

ANÁLISIS DE LAS VARIABLES Y PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LA
ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO DENTRO DE UN TÚNEL; CASOS DE
ESTUDIO TÚNELES KACHOTIS, PUEBLO NUEVO, TOYO Y SUMAPAZ



ING. JUAN GABRIEL CORREDOR HERRERA

Cód. 6100266

ING. JOSÉ GONZALO RÍOS

Director Especialización en Ingeniería de Pavimentos

ING. CESAR AUGUSTO PALOMINO SAAVEDRA, MSc

Director Investigación

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS

JUNIO 29 DE 2017

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá 29 de junio de 2017

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Militar Nueva Granada, por permitir desarrollar el contenido de la Especialización en Ingeniería de Pavimentos, aportando nuevos conocimientos para la formación personal y profesional.

Al Ingeniero Cesar Augusto Palomino Saavedra, por la dirección del presente proyecto de grado, gracias a su aporte fue posible desarrollar el presente documento.

Al Ingeniero José Gonzalo Ríos, director de la Especialización en Ingeniería de Pavimentos de la Universidad Militar Nueva Granada, por todas las gestiones realizadas para permitir a los estudiantes desarrollar sus conocimientos en las áreas de la infraestructura vial.

Al Ingeniero Jorge Caro Castillo, Gestor de Proyectos del Instituto Nacional de Vías, por su valioso apoyo técnico, para encaminar y orientar la viabilidad del presente documento.

Al Ingeniero Oscar Joya Camargo, Director de Estudios y Diseños de la compañía Pavimentos Colombia, por su valiosa colaboración y tiempo para desarrollar comité técnico, base de la presente investigación.

RESUMEN

El desarrollo de la infraestructura vial en Colombia, ha generado una serie de necesidades técnicas para la optimización de la misma, estos requerimientos pretenden buscar un país mucho más competitivo y desarrollado, que esté altura de los similares de la región; dichas necesidades se han venido satisfaciendo por parte del gobierno nacional, con políticas y planes con los cuales se han priorizado corredores viales de alta importancia, pero para ello se ha requerido la implementación de mega obras de ingeniería vial, tales como carreteras doble calzada con viaductos y túneles. El presente proyecto se centra en los túneles, obras subterráneas que brindan una solución adecuada antes las particularidades geológicas, geotécnicas y topográficas del país; la estructura del pavimento es uno de los elementos más importantes de los túneles, no solo por ser la superficie sobre la cual se moviliza el tráfico, si no porqué además debe interactuar con todos los demás elementos al interior del túnel, es por esta razón que en este documento se analizan de manera particular las variables y parámetros que influyen para el diseño de la estructura de pavimento dentro estos, dejando como objetivo principal, identificar si son los mismos que se tienen en cuenta para diseñar un pavimento a cielo abierto, además que variables y complejidades adicionales se presentan, que recomendaciones de diseño y constructivas se deben realizar por parte de los especialistas. Todo esto a partir de casos de estudio de pavimentos dentro de túneles diseñados y/o en servicio en Colombia, reuniones técnicas con especialistas en la materia y documentación técnica vigente tanto nacional como internacional, de tal manera que se pueda establecer un panorama preliminar claro, frente a los diseños de pavimento dentro de los túneles.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. MARCO REFERENCIAL	4
3.1 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE.....	4
3.1.1 Los Túneles en Colombia.....	9
3.1.1.1 Estructuras de pavimento en los túneles de Colombia	10
3.1.2 Aspectos de pavimentos en túneles relacionados con la seguridad frente a incendios:.....	12
3.2 MARCO DE REFERENCIA TEÓRICO.....	18
3.3 MARCO GEOGRÁFICO	21
3.4 MARCO LEGAL	24
4. DISEÑO METODOLÓGICO.....	25
4.1 Fase 1.....	25
4.2 Fase 2.....	25
5. DESARROLLO Y RESULTADOS	27
5.1 Fase 1.....	27
5.1.1. Análisis particular de los parámetros de diseño de las estructuras del pavimento, con base en la información entregada por el Invias y la ANI.....	29
5.1.1.1. Túnel tramo vial Ancón Sur – Primavera.....	29
5.1.1.1.1. Parámetros de diseño	29
5.1.1.1.2. Transito	30
5.1.1.1.3. Subrasante.....	31
5.1.1.1.4. Efecto berma y transferencia de carga	31
5.1.1.1.5. Determinación de los espesores de la estructura.....	31
5.1.1.1.6. Barras de anclaje y transferencia	32
5.1.1.1.7. Modulación de las losas y espesor.....	32
5.1.1.1.8. Análisis de elementos particulares adicionales	33

5.1.1.2. Túnel tramo Santa fe de Antioquia – Cañas Gordas (Túnel del Toyo).....	38
5.1.1.2.1. Capacidad de soporte de la Subrasante	39
5.1.1.2.2. Resistencia a la flexotracción del concreto.....	39
5.1.1.2.3. Pasadores y efecto berma	39
5.1.1.2.4. Análisis del tránsito.....	39
5.1.1.2.5. Calculo de espesores	40
5.1.1.2.6. Modulación de las losas.....	40
5.1.1.3. Túnel tramo Bogotá - Girardot (Túnel del Sumapaz).....	41
5.1.1.3.1. Caracterización de la geología en la zona del túnel	43
5.1.1.3.2. Periodo de diseño	44
5.1.1.3.3. Metodología de diseño	44
5.1.1.3.4. Tránsito	44
5.1.1.3.5. Subrasante.....	45
5.1.1.3.6. Modulación de las losas.....	47
5.1.1.3.7. Soporte, sostenimiento y revestimiento	47
5.1.2. Revisiones adicionales de documentos técnicos.	48
5.2. Fase 2.....	51
5.2.1. Transcripción del Comité técnico realizado con los especialistas diseñadores de los túneles del tramo Ancón sur – Primavera – Camilo C.....	52
5.2.1.1. Análisis de los elementos más importantes del Comité.....	59
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	63
7. CONCLUSIONES	70
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
9. ANEXOS.....	74

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Colombia a nivel regional en Infraestructura

Tabla 2: Espectro de carga para diseño de pavimento en túneles tramo Ancón sur – Primavera

Tabla 3: Espesores de la estructura del pavimento en túneles tramo Ancón sur – Primavera

Tabla 4: Características geométricas túneles tramo Ancón sur – Primavera

Tabla 5: Espectro de cargas tramo Santa Fe de Antioquia – Cañas Gordas

Tabla 6: Espesores estructura de pavimento Túnel del Toyo Santa Fe de Antioquia – Cañas Gordas

Tabla 7: Resumen general de las perforaciones realizadas para diseño Túnel del Sumapaz

Tabla 8: Características mecánicas de las rocas para diseño Túnel del Sumapaz

Tabla 9: Carga de los vehículos comerciales para diseño del pavimento del Túnel del Sumapaz

Tabla 10: Composición vehicular para diseño del pavimento del Túnel del Sumapaz

Tabla 11: Espesores del pavimento diseñado Túnel del Sumapaz

Tabla 12: Clasificación de los Túneles en Colombia

Tabla 13: Influencia del tipo de revestimiento frente al diseño del pavimento

Tablas 14: Clasificación de los tipos de formación y macizos rocosos para la excavación de túneles y secciones transversales típicas de los túneles dependiendo del tipo de formación rocosa

Tabla 15: Diagrama de flujo para la identificación de las variables y parámetros adicionales que deben ser tenidos en cuenta para el prediseño de la estructura del pavimento dentro de un Túnel.

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1: Principales corredor viales de Colombia

Imagen 2: Localización tramo Bogotá – Girardot

Imagen 3: Localización tramo Primavera – Camilo C

Imagen 4: Localización tramo Santa Fe de Antioquia – Cañas Gordas

Imagen 5: Sección Transversal típica túneles tramo Ancón Sur – Primavera

Imagen 6: Sección transversal revestimiento túneles tramo Ancón sur – Primavera

Imagen 7: Localización general Túnel del Sumapaz

Imagen 8: Modelación de la sección transversal con sostenimiento y revestimiento del túnel del Sumapaz

Imagen 9: Sección Transversal típica de la excavación de un túnel

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1: Curvas de variación de temperatura con la profundidad en una losa de hormigón durante un incendio

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1: SECCIÓN TRANSVERSAL TÍPICA DE LOS TÚNELES DEL TRAMO ANCÓN SUR – PRIMAVERA – CAMILO C.

ANEXO 2: DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCEDIMIENTO PARA IDENTIFICAR LAS VARIABLES Y PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO DENTRO DE UN TÚNEL.

ANEXO 3: COPIA DIGITAL DEL AUDIO DEL COMITÉ TÉCNICO REALIZADO CON LOS ESPECIALISTAS DISEÑADORES DE LOS TÚNELES DEL TRAMO ANCÓN SUR – PRIMAVERA – CAMILO C.

ANEXO 4: CORRESPONDENCIA CRUZADA ENTRE LA UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA CON EL INVIAS, LA ANI Y LA EMPRESAS CONCESIONARIAS.

1. INTRODUCCIÓN

Las carreteras desde tiempo inmemoriales han sido generadoras y sinónimos de desarrollo y competitividad, estudios demuestran que el Producto Interno Bruto de un país es directamente proporcional a la calidad de las obras viales, calidad traduce especificaciones con tecnologías de punta, innovación en la utilización de técnicas constructivas, y como centro de atención se encuentra la operación. Esta última contiene una serie de parámetros, entre los que se encuentra el mantenimiento vial, la seguridad para los usuarios y comunidad y en términos generales la optimización de todos los aspectos para que las fases de pre-construcción y construcción hayan sido eficientes y eficaces.

Las tendencias modernas y las exigencias económicas, sociales, culturales y políticas, han generado a nivel mundial la necesidad de construir infraestructura vial con especificaciones más exigentes, enfocadas precisamente en garantizar un proceso de operación vial más ágil y seguro para los usuarios; este hecho generó por ejemplo en Colombia que se optara por modernizar toda la infraestructura vial, haciendo énfasis en las vías de orden nacional y principales, con actividades como el mejoramiento de las características geométricas, estructurales del pavimento, geotécnicas, ambientales y sociales.

De acuerdo con lo anterior, y debido a las exigencias de esa modernización de la infraestructura, el Gobierno nacional ha dado un vuelco total en los temas de carreteras, implementando vías de alta competitividad, con criterios como mayor velocidad de diseño y operación, estructuras de pavimento mucho más durables y que requieran menores labores de mantenimiento y rehabilitación y menores impactos ambientales y sociales, lo cual generó que se establezcan tratamientos especiales para que las carreteras cumplan esos criterios, tales como la construcción de vías multicarril bidireccional (doble calzada), realizar el menor número de intervenciones en los taludes en cuanto a las carreteras a media ladera, es decir reemplazar los cortes de las laderas por viaductos y túneles.

En presente documento se enfoca en los túneles, los cuales corresponden a una de estas nuevas obras necesarias para garantizar la competitividad requerida en las carreteras, estas estructuras subterráneas permiten conectar dos puntos en el trazado de una vía, sin necesidad de realizar cortes a media ladera o incrementar la longitud del segmento vial, lo cual se traduce en mayor velocidad de operación, disminución de los tiempos de viajes y mejoramiento de los parámetros de seguridad operacional, ya que no se requiere la utilización de mantenimiento permanente sobre los taludes en al caso de carreteras a media ladera y con condiciones geológicas y geotécnicas desfavorables.

Sin embargo, se ha podido observar que dentro de los túneles, las estructuras del pavimento presentan algunas condiciones particulares que no se presentan para el caso de vías a cielo abierto, lo cual generó la necesidad de identificar dichas particularidades y parámetros que deben ser tenidos en cuenta y que no son tocados en profundidad en los manuales y normatividad técnica para el diseño y operación de pavimentos.

El producto del presente documento será precisamente entregar al lector, algunos parámetros mínimos a tener en cuenta, cuando se enfrente al diseño de una estructura de pavimento dentro de un túnel y que muy seguramente no los encontrará explícitos dentro del manual de diseño de pavimentos correspondiente. La metodología de investigación se basa principalmente en estudios de caso, la cual consiste en analizar los criterios y particularidades que fueron tenidos en cuenta tanto para el diseño, como para la construcción y posteriormente para la operación y mantenimiento de la estructura del pavimento de varios de los principales túneles de Colombia.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Analizar y estudiar técnicamente las variables y parámetros que influyen para el diseño, de la estructura del pavimento en túneles.

2.2 Objetivos específicos

- Verificar y estudiar los aspectos técnicos y parámetros de diseño de las estructuras de los pavimentos de los túneles, a partir de casos de estudio en Colombia.
- Establecer preliminarmente los criterios de diseño adicionales que deben ser tenidos en cuenta para las estructuras de pavimento en túneles.
- Determinar mediante un diagrama de flujo, el procedimiento que debe adelantar un especialista para diseñar la estructura de pavimento dentro de un túnel.
- Identificar recomendaciones de diseño y constructivas de las estructuras de pavimento dentro de túneles, que garanticen la seguridad y confort de los usuarios, cumpliendo los índices de serviciabilidad y operación.

3. MARCO REFERENCIAL

3.1 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Colombia presenta un notorio retraso en infraestructura vial, prueba de ellos se encuentra consignado en el estudio que realizó el Banco Mundial denominado “Índice de Desempeño Logístico” (LPI), según este, Colombia se encuentra en el puesto 18 a nivel Latinoamérica y el Caribe y 97 dentro de 160 países evaluados, esto denota las necesidades de inversión en una infraestructura más moderna, que se traduzca en mejoramiento de la productividad y economía. A continuación se presenta el resumen del estudio (LPI), el cual se encuentra plasmado en el “Plan Maestro de Transporte Intermodal”, publicado por la Vicepresidencia de la República:

Pais	Rango LPI	Puntaje LPI	Aduana	Infraestructura	Envfos Internacionales	Competencia Logística	Rastreo	Puntualidad
Alemania	1	4.12	4.10	4.32	3.74	4.12	4.17	4.36
Países Bajos	2	4.05	3.96	4.23	3.64	4.13	4.07	4.34
Estados Unidos	9	3.92	3.73	4.18	3.45	3.97	4.14	4.14
Chile	42	3.26	3.17	3.17	3.12	3.19	3.30	3.59
Panamá	45	3.19	3.15	3.00	3.18	2.87	3.34	3.63
México	50	3.13	2.69	3.04	3.18	3.12	3.14	3.5
Argentina	60	2.99	2.55	2.83	2.96	2.93	3.15	3.49
El Salvador	64	2.96	2.93	2.63	3.20	3.16	3.00	2.75
Brasil	65	2.94	2.48	2.93	2.80	3.05	3.03	3.39
Bahamas	66	2.91	3.00	2.74	2.96	2.92	2.64	3.19
Rep. Dominicana	69	2.86	2.58	2.61	2.93	2.91	2.91	3.18
Jamaica	70	2.84	2.88	2.84	2.79	2.72	2.72	3.14
Perú	71	2.84	2.47	2.72	2.94	2.78	2.81	3.30
Renta media alta		2.82	2.58	2.67	2.87	2.76	2.81	3.22
Venezuela	76	2.81	2.39	2.51	2.94	2.76	2.92	3.18
Guatemala	77	2.80	2.75	2.54	2.87	2.68	2.68	3.24
Paraguay	78	2.78	2.49	2.46	2.83	2.76	2.89	3.22
América Latina y Caribe		2.74	2.57	2.52	2.79	2.70	2.76	3.08
Ecuador	86	2.71	2.49	2.50	2.79	2.61	2.67	3.18
Costa Rica	87	2.70	2.39	2.43	2.63	2.86	2.83	3.04
Uruguay	91	2.68	2.39	2.51	2.64	2.58	2.89	3.06
Nicaragua	95	2.65	2.66	2.20	2.69	2.58	2.58	3.17
Colombia	97	2.64	2.59	2.44	2.72	2.64	2.55	2.87
Honduras	103	2.61	2.70	2.24	2.79	2.47	2.61	2.79
Bolivia	121	2.48	2.40	2.17	2.35	2.68	2.68	2.60
Guyana	124	2.46	2.46	2.40	2.43	2.27	2.47	2.74
Haití	144	2.27	2.25	2.00	2.27	2.14	2.32	2.63
Cuba	152	2.18	2.17	1.84	2.47	2.08	1.99	2.45

Tabla 1 Colombia a nivel regional en Infraestructura. Fuente: Plan Maestro de Transporte Intermodal – Vicepresidencia de la República

Como se puede observar en la tabla anterior, el país mejor calificado en cuanto a infraestructura es Alemania, con una calificación de 4.32, Colombia apenas presenta una calificación de 2.44; necesariamente la calidad y estado de la infraestructura se encuentra ligada a la productividad de un País, de ahí que se observe también el retraso en la calidad de vida de los Colombianos, el comercio en las zonas con menor acceso a vías competitivas se encuentra notoriamente atrasado y en términos generales el PIB es muy bajo comparado con países que han invertido en vías de alta competitividad.

Colombia sin embargo ha venido presentando una notoria mejoría, en la última década realizó un vuelco total en los aspectos de infraestructura vial, invirtiendo en su infraestructura de orden primario, secundario y terciario; la inversión más significativa es sin duda alguna las concesiones, puntualmente las que se han realizado en vías primarias de orden nacional que constituyen corredores estratégicos de conexión intermodal, es decir que conectan los centros de producción agrícola con los puertos y centro de exportación.

En el “Plan Maestro de Transporte Intermodal”, se presentan datos como por ejemplo: *“(...) las Olas 1,2 y 3 de proyectos estructurados en la Cuarta Generación de concesiones (4G) por la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) tienen relación beneficio costo promedio de 1.44, los proyectos incluidos reducen los costos de transporte al aumentar la capacidad vial en segmentos críticos de congestión de la red. En términos puntuales, las 4G significan beneficios que ascienden a \$58 billones, sumados a \$16 billones que dejan los proyectos complementarios a corto plazo (...)”*¹

Se observa entonces que la salida de los problemas económicos del país, se relacionan con la inversión en infraestructura vial, este vuelco de buscar vías competitivas acorde a las necesidades económicas del país, generó la necesidad de aumentar la capacidad vial de los corredores viales estratégicos, esto con la construcción de segundas calzadas a los tramos viales existentes que

¹ Vicepresidencia de la República. (2015). Plan Maestro de Transporte Intermodal. Bogotá: Vicepresidencia de la República.

presentaban la mayor congestión, de igual manera las políticas nacionales para describir una vía competitiva implica que está presente una velocidad de operación óptima, unos índices de funcionalidad y serviciabilidad altos; esto solo puede conseguirse con la construcción dentro de esas segundas calzadas de obras especiales, que permiten mejorar las especificaciones geométricas, geotécnicas y del pavimento y de la seguridad vial.

El vuelco en infraestructura vial que dio el país con las “4G”, implica entre otras alternativas de diseño y construcción, la intervención mínima de los taludes para el caso de las carreteras a meda ladera, es decir lo menos posible realizar grandes cortes, garantizar pendientes longitudinales acordes a la velocidad de operación, mejoras en los trazados geométricos en planta, evitar curvas horizontales de radios bajos y estructuras de pavimento que manejen índices de funcionalidad y serviciabilidad altos, es decir estructuras de pavimento más durables, uniformes, confortables y seguras. Todo lo anterior es posible con la implementación y construcción de obras que en tiempos pasados eran imposibles de concebir, ya fuera por temas presupuestales o simplemente porque la visión a futuro de la red de carreteras era muy limitada y solo se pensaba en vías para “comercios cerrados y orientados a la conectividad entre puntos fijos”².

Las actividades necesarias para garantizar esa red de carreteras moderna y competitiva, corresponde a grandes obras de infraestructura como viaductos, túneles, intersecciones a desnivel, todas estas bajo las normatividades y estándares internacionales; de esta manera es como se observan las mega obras de ingeniería actualmente, las doble calzada presentan viaductos en las zonas donde hay limitaciones geológicas y geométricas, se construyen intercambiadores o intersecciones viales a desnivel para no alterar el flujo vehicular y garantizar parámetros de seguridad vial y en lo que se centra el presente proyecto de grado, se optó por construir túneles de longitudes considerables en zonas donde resultaba como mejor alternativa ante los impedimentos de orden geológico, geométrico, ambiental, presupuestal y económico.

² Vicepresidencia de la República. (2015). Plan Maestro de Transporte Intermodal. Bogotá: Vicepresidencia de la República.

En Colombia existen actualmente 1475 kilómetros de doble calzada, según el “Plan Maestro de Transporte Intermodal”, en éste país se cuenta con una densidad de vías pavimentadas de 1,9 km/100 km², mucho menor al promedio en América Latina que es de 2,5, el reto inicial es construir las doble calzada en los corredores viales estratégicos para el país; a continuación se relacionan las principales corredores viales de Colombia:

- Troncal de occidente: Ipiales – Cali – Medellín – Barranquilla.
- Troncal Central: Mocoa – Neiva – Pto Salgar – San Roque – Santa Marta.
- Troncal Oriental: Bogotá – Tunja – Bucaramanga – Cúcuta.
- Troncal del Piedemonte: San Miguel – Florencia – San José del Guaviare – Yopal – Arauca
- Troncal Quibdó -Buenaventura – Ecuador
- Transversal Buenaventura – Pto Carreño
- Transversal Pto Araujo – Pto Gaitán
- Transversal San Juan del Cesar – Carmen de Bolívar
- Transversal Medellín – Bucaramanga
- Transversal Cúcuta – Montería
- Transversal Maicao – Necocli
- Trasversal Bogotá – Medellín
- Transversal Tumaco – Mocoa
- Transversal Turbo – Pto Berrio
- Conexión al Pacifico
- Conexión Guapi - San Vicente del Caguán
- Conexión Cúcuta – Arauca
- Circunvalar de San Andres y Providencia.

Principales corredores viales de Colombia



Imagen 1: Principales corredor viales de Colombia. Fuente: Grafico 17 Plan Maestro de Transporte Intermodal – Vicepresidencia de la República

En los sectores más saturados de los corredores viales antes descritos, es en donde inicialmente se construyeron o se están construyendo las doble calzada, en la mayoría de estas se presentó la necesidad de construir túneles por los aspectos técnicos antes descritos, además se debe tener como primera problemática que Colombia es un país en donde la mayoría de los centro de producción agrícola e

industrial se encuentran en zonas de montaña, ya que en su mayoría hacen parte de la cordillera de Los Andes, esto implica que la mayor parte de las carreteras se construyan a media ladera y en zonas geológicamente inestables.

3.1.1 Los Túneles en Colombia

Tal como se mencionó, la problemática geográfica, geológica, ambiental y las necesidades de modernización de la infraestructura vial, generó en Colombia que se optara por las soluciones técnicas con obras subterráneas; desde que se innovo en las concesiones viales y se identificaron los sectores saturados de la red de carreteras, se inició la propagación de túneles por todas las carreteras del país.

Colombia en los últimos 20 años se ha convertido en potencia mundial en túneles, los primeros túneles en red vial de carreteras se construyeron en el tramo Bogotá – Villavicencio, uno de los sectores viales más saturados del país y que mueve una gran cantidad de la carga pesada, el pionero de estos túneles es el denominado “Quebrada Blanca”, entregado en servicio en el año de 1976, simultáneamente se construyeron los denominados “Ventarrón” y “Volador” en el tramo Guateque – El Secreto.

Las experiencias han sido positivas con la construcción de túneles en Colombia, han generado un gran impacto positivo para la movilidad como es el caso del túnel “Sumapaz” en el tramo Bogotá – Girardot, que hace parte del gran corredor vial “Transversal Buenaventura – Pto Carreño”, un corredor por el cual se mueve más del 80% de la carga pesada del país y uno de los más importantes en cuanto a su impacto para el comercio interno y externo por su salida al puerto marítimo.

En la actualidad se adelanta la construcción de un sin número de túneles, desde el tan sonado “Túnel de la Línea” de 8.6 Kilómetros de longitud, también localizado en el corredor vial “Transversal Buenaventura – Pto Carreño”, el túnel del “Toyo” que se convertirá en el túnel más largo de Colombia con una longitud de 9.8 kilómetros. Como se puede observar, la tendencia actualmente es la construcción de túneles, los cuales han brindado una solución eficiente para las problemáticas

técnicas de la infraestructura vial; ahora bien, es importante realizar un énfasis especial a la superficie sobre la cual se movilizara el tráfico por este gran número de túneles en servicio y proyectados, es decir la estructura del pavimento dentro de la estructuras subterráneas, tal como se describe a continuación.

3.1.1.1 Estructuras de pavimento en los túneles de Colombia

En vista de la “gran ola” de modernización de la infraestructura vial que se adelanta en Colombia, además de que como se mostró anteriormente, en las doble calzada las alternativas más implementadas recientemente es construir estructuras subterráneas o túneles, se observa que en Colombia no existes ninguna reglamentación o manual para el diseño de las estructuras del pavimento dentro de los túneles, las cuales, como se va a mostrar en el presente documento, presentan algunas variables adicionales a las convencionales empleadas para los diseños actualmente.

Inicialmente hay que tener en cuenta que los parámetros técnicos en los túneles se le da mucha más importancia a los factores estructurales del túnel como tal, es decir al sostenimiento y revestimiento de todo el conjunto del túnel, sin embargo dichos parámetros también tienen una clara incidencia para el diseño de la superficie sobre la cual circularan los vehículos. Como referencia principal se tiene que en el año 2015 el Instituto Nacional de Vías (Invias) publicó el “Manual Para el Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento de Túneles de Carretera”; documento en el cual al realizar una revisión, se verificó que no se profundiza mucho en el tema de la estructura del pavimento dentro del túnel.

En el capítulo 5.11 “Documentos Entregables Y Actividades Para Cada Fase En La Etapa De Estudios Y Diseños”, en uno de sus numerales se hace referencia a lo siguiente: “(...) *Estudio de pavimentos en túneles: El diseño del pavimento de los túneles, se recomienda se diseñe con una vida útil de mínimo 30 años y se deberá indicar junto a la memoria de cálculo del diseño del pavimento, la modulación de las losas a lo largo del túnel, las recomendaciones sobre el drenaje*

superficial y subterráneo y mantenimiento del mismo y el programa indicativo de mantenimiento para el pavimento. El uso de pavimento flexible está restringido en túneles menores a 1000 m. Para túneles de mayor longitud (>1000 m) solo se permite la utilización de pavimento rígido. En ningún caso se acepta la utilización de mezclas abiertas (...)”

Como se puede observar simplemente se realizan algunas recomendaciones de diseño, no se profundiza en las variables y complejidades que se tienen dentro de una estructura subterránea para el diseño del pavimento; de igual forma en la instrucción en lo referente al marco normativo de dicho manual, para el caso de diseño de estructuras de pavimento dentro del túnel, simplemente se recomienda remitirse al “Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías de bajos, medios y altos volúmenes de tránsito”.

Como conclusión inicial de la revisión del estado del arte en lo referente a las estructuras de pavimento dentro de los túneles en Colombia, se observa claramente que simplemente se recomienda realizar los diseños bajo los mismos parámetros de una vía a cielo abierto, claramente esto no ocurre por lo que se va a tratar en el presente documento.

Empíricamente y por las experiencias de los especialistas en diseñar y construir túneles, se han plasmado algunas variables adicionales consignadas en documentos de México para el diseño de pavimentos; en un documento titulado “Innovaciones en el Diseño y Construcción de Túneles” de fecha 5 de diciembre de 2013, se hace referencia a los siguientes aspectos:

- *“(...) Para el diseño de pavimentos en los distintos túneles se aprovechó la capacidad de carga de la roca y su uniformidad desde el punto de vista del valor relativo de soporte, es decir, su capacidad para soportar cargas de tránsito (...)*”
- *“(...) Todo el desarrollo de la vialidad corresponde a los pavimentos desplantados prácticamente en la misma roca. El pavimento en cada uno de los túneles está constituido por una capa de subbase de 22 cm de*

espesor y una de concreto hidráulico de 300 kg/cm² con 28 cm de espesor. La construcción del pavimento de concreto hidráulico permitirá un comportamiento eficiente de acuerdo con las cargas de tránsito de diseño. Su mantenimiento será mínimo y, por lo tanto, la relación costo-beneficio será mejor que para otro tipo de pavimento (...)”

- *(...) Los criterios empleados en el diseño de los pavimentos se basaron en el método AASHTO para pavimentos rígidos. Se determinó el número de repeticiones de carga de un vehículo estándar de un peso nominal de 8.2 t, denominado carga axial equivalente única (...)*”

3.1.2 Aspectos de pavimentos en túneles relacionados con la seguridad frente a incendios:

Luego de consultada gran parte de la información relacionada con el diseño de pavimentos en túneles, se ha observado que no existe mucha directamente relacionada con recomendaciones de diseño o variables adicionales a tener en cuenta; en el medio local, tal como se mencionó anteriormente, en el manual de túneles recientemente publicado por el INVIAS, solo se realizan algunas recomendaciones de diseño del pavimento, el fuerte del texto hace referencia a los aspectos hidrogeológicos, geotécnicos, ambientales, geométricos, etc., del túnel como tal, en ese caso es importante tener en cuenta que a pesar de la gran importancia de que la caverna se sostenga y brinde las condiciones de seguridad establecidos en la normatividad de túneles internacional, pero hay que también hacer un énfasis especial en la superficie sobre la cual va a circular el tráfico, tanto por cuestiones de seguridad, movilidad, durabilidad y también por las condiciones estructurales del túnel, ya que en algunas ocasiones la estructura se convierte en parte de los elementos estructurales del sostenimiento del túnel.

En cuanto a los temas de seguridad dentro del túnel, algunos textos internacionales hacen referencia a la influencia de la superficie de rodadura frente a incendios dentro del túnel, lo cual se convierte en un factor indispensable en el

momento de seleccionar la alternativa de diseño más adecuada dependiendo las complejidades del túnel.

El Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, publicó el documento denominado *“Pavimentos de Hormigón en Túneles, su influencia en la seguridad frente al fuego”*, en el cual se hace referencia en volver política pública para los túneles carreteros establecer parámetros frente a la seguridad en estos, esto en vista de que en Europa han existido bastantes eventos negativos de incendios en los túneles carreteros. En España particularmente ya se tomaron medidas sobre el asunto, mediante Decreto Real No. 635/2006, se establecieron requisitos mínimos de seguridad en túneles, entre estos se incluyen aspectos como los siguientes:

- *“Obligatoriedad de utilizar pavimento de hormigón en los túneles de más de 1.000 metros de longitud”*
- *“Los túneles de carretera son elementos que por sus singulares características dentro de la red viaria merecen una atención especial, no porque en ellos se produzcan más accidentes que en otros puntos del trazado de las carreteras, sino porque cualquier incidencia grave que les afecte puede provocar alarma social, dadas las circunstancias concurrentes y específicas del lugar en que se produce, las dificultades de rescate o evacuación, el dramatismo provocado por el confinamiento o el trastorno que para el sistema de transportes puede suponer el cierre temporal de un tramo viario, en ocasiones con alternativas difíciles o inexistentes”*
- *“Resulta por tanto imprescindible adoptar todas las medidas que puedan contribuir a que no se empeore la situación de los ocupantes de los vehículos ni de los servicios de emergencias. Una de ellas es la elección de un firme que sea incombustible, de forma que al ser sometido a las temperaturas que se desarrollan en un incendio, no incremente la carga de fuego ni produzca humos o vapores tóxicos”³*

³ Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. (2015). Pavimentos de hormigón en túneles Su influencia en la seguridad frente al fuego. España: Vaquero Servicios de Publicaciones, S.L.

De acuerdo con los análisis realizados por el estudio Español en mención, se determinó que el material para superficie de rodadura (firme), que cumple las condiciones de no incrementar la carga de fuego en caso de un incendio ni generar vapores tóxicos, es el concreto, en ese mismo estudio se relacionan una serie de incendios ocurridos en túneles Europeos, en donde se observa que durante un evento de fuego dentro de un túnel, las temperaturas pueden llegar a los 1200 °C, por lo tanto es indispensable construir la capa de rodadura con un material que sea incombustible.

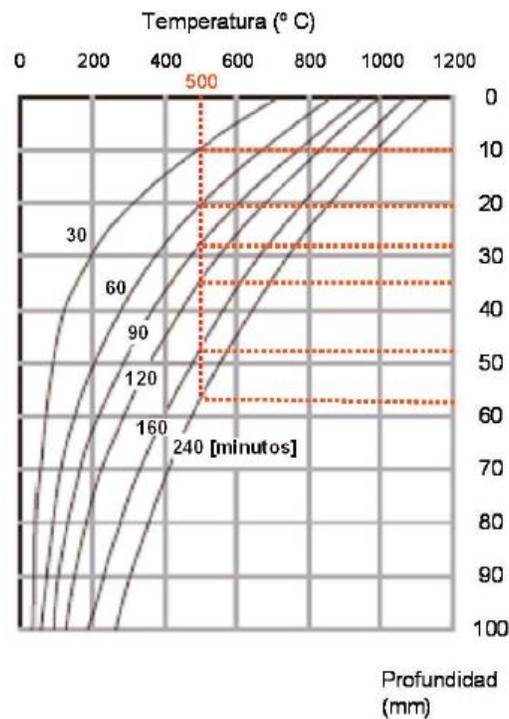
De igual manera en el documento, se hace referencia a los beneficios económicos que genere la construcción de la estructura del pavimento con la capa de rodadura en concreto, ya que por sus características, brinda una mayor vida útil, aproximadamente 30 años, lo cual genera una mejor condición costo/beneficio frente a las mezclas asfáltica al requerir menores actividades de conservación.

El hormigón según el documento, es el material que mejor se comporta frente al fuego, no solo porque evita que se propague el mismo, sino que además que a pesar de sufrir un incendio, conserva sus propiedades estructurales, como resultado de los estudios, se obtienen los siguientes datos de gran importancia frente al comportamiento del material:

“(...) Sin embargo, al verse sometido el hormigón a temperaturas elevadas, sus componentes pueden experimentar modificaciones importantes: a partir de los 100 °C el agua libre o capilar incluida en la masa del mismo empieza a evaporarse, retardando de esta forma su calentamiento; entre 200 y 300 °C la pérdida de agua es completa, sin que se aprecien aún alteraciones en la estructura del cemento hidratado y sin que las resistencias disminuyan de forma apreciable; de 300 a 400 °C se produce una pérdida de agua del gel de cemento, teniendo lugar una disminución más importante de las resistencias y pudiendo aparecer las primeras fisuras en la superficie; a los 400 °C una parte del hidróxido cálcico procedente de la hidratación de los silicatos se transforma en cal viva; hacia los 600 °C los áridos comienzan a expandirse, dando lugar a tensiones internas que comienzan a

disgregar el hormigón. El aumento de volumen es mayor en los áridos de tipo silíceo que en los calizos, cuyo coeficiente de dilatación térmica es como media un 35 % menor. (...)”⁴

De acuerdo con lo que se menciona en el texto, el concreto si presenta problemas estructurales frente a un incendio, son embargo los problemas de gran importancia se presentan a partir de los 500°C, y se relacionan con un fenómeno denominado “desconchado” o “Spalling” en inglés, este corresponde a grandes desprendimientos de trozos de la superficie y se encuentra dado en función de la profundidad de la losa de hormigón, tal como se ilustra en la siguiente gráfica:



Grafica 1: Curvas de variación de temperatura con la profundidad en una losa de hormigón durante un incendio. Fuente: Pavimentos de hormigón en túneles Su influencia en la seguridad frente al fuego - Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones

En una profundidad de 6 centímetros en la losa a una temperatura de 500 °C y en una duración de 240 minutos de incendio, se podría presentar el fenómeno de

⁴ Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. (2015). Pavimentos de hormigón en túneles Su influencia en la seguridad frente al fuego. España: Vaquero Servicios de Publicaciones, S.L.

desconchado, sin embargo los estudios también demuestran que los efectos de ese fenómeno son más visibles en concretos de alta resistencia, generando incluso desprendimientos explosivos, además de esto, también se ha estudiado que los efectos del “Spalling” se pueden mitigar en caso de incendios, empleando fibras de polipropileno que se funden a temperaturas de solo 160°C, proporcionando una vía de escape al vapor de agua, lo cual reduce los efectos de ese fenómeno, otra alternativa para mitigarlo es con la utilización de “aireantes” que generan una red de burbujas entre los capilares del concreto que actúan como cámaras de expansión ante un evento de incendio e incremento de la temperatura.

Otro factor importante a tener en cuenta de las placas de hormigón ante un evento de incendio en un túnel, corresponde a la expansión que se produce por el cambio de volumen, lo cual genera una pérdida de adherencia entre la losa y las armaduras por la dilatación de estas, para el caso de los pavimentos, este efecto se mitiga con la utilización de concretos continuos de hormigón armado.

De acuerdo con estos análisis del fenómeno de “Spalling” que podría llegar a afectar a los pavimentos en concreto en caso de un incendio dentro de un túnel, como conclusión importante en el documento, se aclara que para el caso de las losas de rodadura de los pavimentos rígidos, es improbable de que ocurra dicho fenómeno, por lo expuesto a continuación:

“A los hormigones de firmes se les exigen unas resistencias a flexotracción de 4,0 a 4,5 MPa, que en compresión suponen valores del orden de 25 a 30 MPa. A la vista de lo expuesto anteriormente, no parece que los desconchados como consecuencia de un incendio puedan suponer un problema importante en un pavimento de hormigón de un túnel”.

“Como conclusión, puede afirmarse que los desconchados en un pavimento de hormigón como consecuencia de un incendio, en caso de producirse, tienen en general una importancia bastante menor que los de otras partes del túnel como puede ser el revestimiento o un falso techo. El hormigón no afectado por

temperaturas elevadas o por el spalling conserva prácticamente toda su resistencia, formando un sustrato sano. Por ello, la reparación de los desperfectos puede llevarse a cabo mediante bacheos a espesor parcial o, en caso necesario, con un refuerzo delgado adherido, previo fresado de algunos centímetros del pavimento”⁵

Ahora bien, al realizar una comparación entre las superficies de rodadura en concreto hidráulico, frente a las de concreto asfáltico, el análisis y estudios permitió demostrar además que después de producido un incendio el aglomerado, en Colombia agregados, se ven afectados en una profundidad de varios centímetros, como resultado se tienen una serie de partículas sueltas que pueden ser fácilmente reiteradas y arrastradas por el tráfico, produciendo así baches, lo cual constituye otra desventaja de las mezclas asfálticas para ser empleadas en superficies de rodadura en túneles.

Entre las conclusiones más importantes del documento publicado por el Instituto Español del Cemento, se encuentran las siguientes que favorecen la utilización de losas de concreto frente a carpetas asfálticas en túneles:

- *“El pavimento de hormigón, debido a su composición, es estable en situación de fuego. No es inflamable, no arde y, por tanto, no contribuye a la carga de fuego que, dentro del túnel (...)”*
- *“Las capas de mezcla bituminosa tienen un fuerte poder calorífico, que incrementa la carga de fuego y las temperaturas durante un incendio. El punto de ignición, que marca el inicio de la combustión, se sitúa entre 428 °C y 530 °C”.*
- *“Las mezclas bituminosas no mantienen, en situación de fuego, sus características mecánicas La combustión disgrega los áridos ya que pone fin, de manera irreversible, a la adherencia árido-ligante bituminoso”*
- *“Un pavimento bituminoso, transcurridos 5 minutos después de iniciado el calentamiento, despiden gases asfixiantes y tóxicos (monóxido y dióxido de*

⁵ Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. (2015). Pavimentos de hormigón en túneles Su influencia en la seguridad frente al fuego. España: Vaquero Servicios de Publicaciones, S.L.

carbono, aldehídos, metanol, propanol-2, acetona, benceno, tolueno, dióxido de azufre y ácidos, entre otros) por lo que agrava la situación de incendio”⁶

Como elemento final del documento se entregan las siguientes conclusiones finales con respecto a la favorabilidad de emplear pavimento rígido en los túneles, lo cual debe ser una política pública:

1. Superficie más clara y luminosa
2. Menor deterioro, tanto superficial como estructural.
3. Mayor vida útil y menor coste total en mantenimiento y operación.
4. Reducción de las distancias de frenado.
5. Disminución en la probabilidad de ocurrencia de accidentes durante labores de conservación y mantenimiento, ya que deben realizarse con menor frecuencia.
6. Reducción de consumo de carburantes.
7. Disminución de los niveles sonoros.
8. Efectos negativos mínimos ante un evento de incendio dentro del túnel.

3.2 MARCO DE REFERENCIA TEÓRICO

El presente proyecto se centra en las estructuras de pavimento dentro de túneles, como se mencionó en el capítulo anterior, los túneles en Colombia se han construido y se están construyendo sobre las vías de orden primario de gran importancia estratégica y en las cuales los niveles de tráfico son muy altos, requiriendo así soluciones técnicas que implican construir segundas calzadas sin realizar grandes cortes en ladera.

Las carreteras primarias según el Instituto Nacional de Vías se definen como: “Aquellas troncales, transversales y accesos a capitales de Departamento que cumplen la función básica de integración de las principales zonas de producción y

⁶ Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. (2015). Pavimentos de hormigón en túneles Su influencia en la seguridad frente al fuego. España: Vaquero Servicios de Publicaciones, S.L.

consumo del país y de éste con los demás países. Este tipo de carreteras pueden ser de calzadas divididas según las exigencias particulares del proyecto. Estas carreteras se encuentran listadas en el Decreto 1735 de 2001 por el cual se fija la Red Nacional de Carreteras a cargo de la Nación Instituto Nacional de Vías y se adopta el Plan de Expansión de la Red Nacional de Carreteras y se adoptan otras disposiciones”⁷

En los segmentos de estas troncales y transversales de alta concentración vehicular, es en donde se están han construido o se están construyendo las segundas calzadas, ejemplo de ello son por ejemplo lo tramos Bogotá – Girardot; Bogotá – Villavicencio; Bogotá – Buenaventura, actualmente dentro del “Plan Maestro de Transporte Intermodal” se encuentran priorizados una serie de corredores viales, en los cuales además se tienen proyectadas estructuras subterráneas; es importante definir lo que es un túnel en la normatividad Colombiana, corresponde a “*Obra Subterránea de carácter lineal que comunica dos puntos, para el transporte de personas o materiales*”⁸, mientras que la construcción de un túnel se define como: “*Se entiende por construcción de túneles la Actividad mediante la cual se excava un macizo geológico o suelo con el fin de generar un paso subterráneo, incluye la excavación y soporte del túnel*”⁹.

De acuerdo con las anteriores definiciones y en vista de que el presente proyecto se centra en túneles destinados para la movilidad de vehículos automotores, haciendo un énfasis en las estructuras de pavimento sobre las cuales circula ese tránsito, es necesario tener muy claro que es un túnel vehicular y que es una estructura de pavimento. Continuando con la consulta a normatividad nacional, túnel vehicular se define como: “*(...) se entiende por túnel vehicular, aquella infraestructura del transporte, cuya finalidad es permitir la continuación de la circulación de automóviles (carros, buses, camiones, motos, bicicletas, autobuses), mediante una obra subterránea, en condiciones de continuidad en el*

⁷ INVIAS. (2016). Pliegos de condiciones No. LP-DO-GTL-048-2016, terminación Túnel de la Línea. Bogotá: Invias.

⁸ Instituto Nacional de Vías. (2015). Definiciones. En Manual de diseño, construcción, operación y mantenimiento de túneles de carretera para Colombia (2-2). Bogotá: Invias.

⁹ INVIAS. (2016). Pliegos de condiciones No. LP-DO-GTL-048-2016, terminación Túnel de la Línea. Bogotá: Invias.

*espacio y el tiempo, con niveles adecuados de seguridad y de comodidad, permitiendo pasar con facilidad grandes obstáculos, como montañas, cañones, etc.*¹⁰. Una estructura de pavimento se define como el conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, un proyecto de construcción de la estructura del pavimento comprende las siguientes actividades: “materialización de la estructura de pavimento constituida por concreto asfáltico y/o hidráulico y una o varias capas granulares. (Sub-bases y/o bases)”¹¹

De otro lado, se ha observado que por lo general las estructuras de pavimento dentro de los túneles en Colombia, se diseñan y construyen en “pavimento rígido”, sin embargo en el presente documento se van a tocar los temas relacionados con los parámetro técnicos que permiten definir y seleccionar el tipo de pavimento dependiendo las particularidades de cada zona de proyecto y las necesidades propias de la estructura subterránea, por esta razón es necesario definir conceptualmente a que corresponde cada tipo de estructura empleada dentro para la construcción de carreteras en Colombia; Un pavimento flexible es aquella estructura conformada por una o más capas de materiales granulares seleccionados (Subbase y base) y una superficie de rodadura en concreto asfáltico, su principio mecánico corresponde a la teoría de deformaciones en el rango elástico, es decir que las cargas que se transmiten a él a través del tránsito, generan deformaciones en el rango elástico, así mismo en los pavimentos flexibles se busca que los esfuerzos se disipen a través de la carpeta de rodadura y las capas granulares y lleguen al suelo de Subrasante de manera mínima. Por su parte los pavimentos rígidos están conformados por una losa de concreto hidráulico soportado sobre una capa granular o directamente sobre la Subrasante, a diferencia de los pavimentos flexibles, la losa de concreto hidráulico soporta casi la totalidad de esfuerzos.

Los parámetros y variables a tener en cuenta para diseñar una estructura de pavimento, sea rígida o sea flexible son prácticamente los mismos, como se sabe

¹⁰ INVIAS. (2016). Pliegos de condiciones No. LP-DO-GTL-048-2016, terminación Túnel de la Línea. Bogotá: Invias.

¹¹ INVIAS. (2016). Pliegos de condiciones No. LP-DO-SRN-038-2016, Perimetral de Mocoa. Bogotá: Invias.

el objetivo de una estructura de pavimento es la de permitir una superficie uniforme, segura y confortable que soporte la acción combinada del tránsito y el clima, en esa pequeña definición se encuentran descritas las variables, es decir, el tránsito, el clima y la Subrasante; de igual forma existen otras variables desde el punto de vista funcional que deben ser tenidas en cuenta, pero las mismas varían dependiendo el tipo de proyecto, tales como particularidades geológicas, geotécnicas, ambientales, sociales, etc., pero para el caso del presente proyecto, solo se estudiarán las antes mencionadas y algunas adicionales de gran importancia que deben ser tenidas en cuenta cuando se trata de un diseño de pavimento dentro de un túnel carretero. A continuación se presentan las definiciones teóricas de las principales variables que influyen para el diseño de una estructura de pavimento:

Subrasante: “Es la capa superior de la explanación sobre la cual se apoya la estructura del pavimento.”¹²

Tránsito y su evaluación: corresponde a los vehículos que circulan y circularán por la vía en estudio; *“La cuantificación del tránsito es de gran importancia y busca la obtención de ejes equivalentes acumulados de 80 KN en el carril de diseño y en un determinado periodo de diseño”*¹³

Clima: Los parámetros del clima que deben ser estudiados para el diseño de una estructura de pavimento son: Las precipitaciones en la zona, ya que de ellas dependen en gran medida la selección del tipo de estructura a construir y el procedimiento constructivo, la temperatura, ya que influye directamente en el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica y para el caso del concreto hidráulico influye para los tiempos de fraguado, tasa de evaporación, gradientes térmicos, cotas de inundaciones, etc.

3.3 MARCO GEOGRÁFICO

El presente estudio se realiza en los túneles de los siguientes tramos viales:

¹² UMNG. (2017). Presentación cátedra Construcción de pavimentos asfálticos. Bogotá: UMNG.

¹³ UMNG. (2016). Presentación cátedra Diseño de pavimentos flexibles. Bogotá: UMNG.

- Bogotá – Villavicencio
- Bogotá – Girardot
- Buga – Buenaventura
- Primavera – Camilo C
- Calarcá – Cajamarca

Dichos tramos viales hacen parte de los corredores de gran importancia para el País, descritos en el Marco Referencial de la presente investigación, a continuación se presenta la localización general de cada uno de dichos tramos viales:

Bogotá – Girardot:



Imagen 2: Localización tramo Bogotá - Girardot Fuente: ANI. (2017). Localización tramo Bogotá - Girardot. 31/05/2017, de ANI Sitio web: <https://www.ani.gov.co/proyecto/carretero/bosa-granada-girardot-21262>. Citado el 31/05/2017

Primavera – Camilo C:

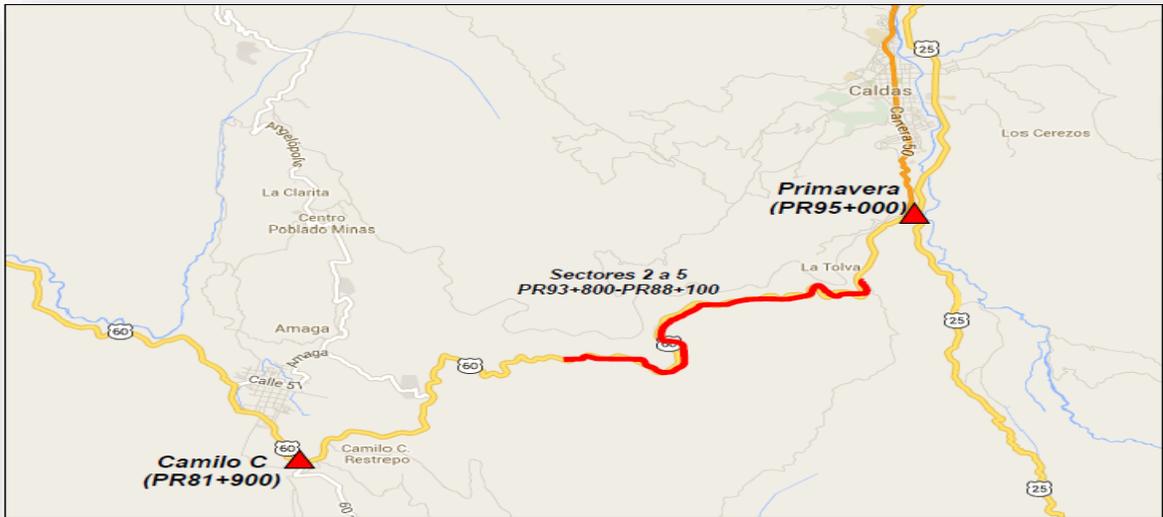


Imagen 3: Localización tramo Primavera – Camilo C Fuente: Instituto Nacional de Vías CAPÍTULO VI ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EL DISEÑO DEL PAVIMENTO –. Marzo de 2014

Santa Fe de Antioquia – Cañas Gordas:



Imagen 4: Localización tramo Santa Fe de Antioquia – Cañas Gordas Fuente: Instituto Nacional de Vías. Informe ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS SANTA FE DE ANTIOQUIA CAÑAS GORDAS (Túnel del Toyo). Mayo de 2013.

3.4 MARCO LEGAL

Aquí se consignan las principales normas legales establecidas por entidades de orden nacional, que intervienen en el presente documento:

De acuerdo con lo establecido en el capitulo 1.4 del Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento de Túneles de Carreteras Para Colombia, “Leyes, Decretos y Normatividad Nacional, se realizó un filtro de normatividad técnica que debe ser tomada en cuenta de manera directa e indirecta para el diseño y construcción de estructuras de pavimento dentro de túneles en Colombia:

- Ley 105 de 1993: Mediante la cual se dictan disposiciones básicas sobre transporte y reglamentan algunos aspectos sobre la planeación del sector transporte.
- Ley 1383 de 2010: Se establecen parámetros para la señalización y demarcación vial.
- Ley 1508 de 2012: Estructuración de proyectos en etapas de pre-factibilidad y factibilidad.
- Ley 1523 de 2012: Estructuración de proyectos en etapas de pre-factibilidad y factibilidad
- Decreto 1735 de 2001: Mediante el cual se reglamenta la red Nacional de Carreteras.
- Resolución 1400 de 2000: Mediante la cual se adopta el Manual de Diseño Geométrico Para Carreteras.
- Manual de Diseño de Pavimentos en Concreto para Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Transito reglamentado por el Instituto Nacional de Vías.
- Manual De Diseño De Pavimentos Asfálticos Para Vías Con Bajos Volúmenes De Tránsito reglamentado por el Instituto Nacional de Vías
- Especificaciones Generales de Construcción reglamentado por el Instituto Nacional de Vías.
- Volúmenes de Transito Publicados por el Instituto Nacional de Vías.

4. DISEÑO METODOLÓGICO

El desarrollo del presente proyecto se define en 2 fases principales, estas se relacionan con el objeto de estudio y el tipo de investigación desarrollada, la cual se define como proceso descriptivo cuantitativo, que busca delimitar a partir de estudios de caso, los parámetros y variables adicionales que deben ser tenidas en cuenta por los especialistas en pavimentos, cuando se diseñe una estructura de pavimento dentro de un Túnel. Tal como se ha mostrado en los capítulos del presente documento, existen algunas variables que deben ser tenidas en cuenta, adicionales a las que técnica y convencionalmente se analizan en los pavimentos a cielo abierto; a continuación se hace la descripción de las fases del presente proyecto:

4.1 Fase 1

La fase 1 del presente proyecto consiste en una investigación bibliográfica y documental, en la cual se busca estudiar, analizar y encontrar las variables y factores adicionales que deben ser tenidos en cuenta para el diseño de la estructura del pavimento dentro de un túnel. Dicha investigación bibliográfica y documental se realiza a través de consultas a entidades oficiales, bibliografía disponible sobre manuales, artículos, legislación etc., documentos con los cuales se puede analizar elementos y encontrar los factores buscados.

4.2 Fase 2

Una vez analizada y estudiada la información disponible, se debe sostener un comité Técnico con uno de los especialistas de las firmas que han diseñado la estructura del pavimento dentro de un túnel en Colombia, este fue seleccionado de acuerdo con la disponibilidad y complejidad del túnel construido; como se trata un análisis de estudios de caso, es ideal encontrar un túnel en condiciones de esfuerzos y necesidades técnicas de alta complejidad, de esta manera el presente

documento servirá de guía para los diseños de la estructura del pavimento dentro de túneles.

Dentro de la fase 2 se realiza el análisis particular de cada túnel seleccionado, estos se encuentran en los tramos descritos dentro del “marco Geográfico” del presente documento, con ello se permitirán encontrar particularidades de cada sección transversal, espesores de pavimento, suelo de fundación, drenaje superficial, subsuperficial y subterráneo, características mecánicas de la estructura del pavimento en conjunto con el túnel, etc.

El resultado final de las 2 fases, es entregar a los lectores del presente documento un algoritmo base de los procedimientos y variables especiales que deben ser estudiadas conjuntamente con las que convencionalmente se analizan para diseñar estructuras de pavimento.

5. DESARROLLO Y RESULTADOS

5.1 Fase 1

El análisis de información y documentación se realizó con 2 fuentes principales, la primera consiste en documentos encontrados en internet, sobre análisis particular de elementos especiales tenidos en cuenta para las estructuras del pavimento dentro de un túnel, el documento principal del cual se analizó información muy valiosa y que ya es tenida en cuenta en Colombia es el siguiente:

“Pavimentos de hormigón en túneles Su influencia en la seguridad frente al fuego”, documento publicado por el IECA “Instituto Español del cemento y Sus Aplicaciones”, los principales aportes para el presente proyecto se encuentran descritos dentro del Marco Referencial del presente documento en el numeral “*Aspectos de pavimentos en túneles relacionados con la seguridad frente a incendios*”

Con respecto a las consultas de información oficial en Colombia, se presentaron las siguientes comunicaciones con el propósito de conseguir documentos técnicos de diseño, construcción y mantenimiento de la estructura del pavimento:

- Comunicación radicado Invias No. 148946 del 04/04/2017:

La comunicación antes descrita fue radicada en el Instituto Nacional de Vías, con el fin de obtener los estudios geológicos, geotécnicos y el diseño de la estructura del pavimento de los túneles de los tramos viales Buga – Buenaventura y Ancón Sur – Primavera. Dicha información fue entregada por esa entidad mediante oficio No. DT-GGP 81053 del 18/04/2017.

La comunicación de requerimiento y el oficio de respuesta, hacen parte del presente documento, con lo cual se demuestra la autorización por parte del INVIAS, para hacer uso de la documentación técnica entregada.

- Comunicación radicado ANI No. 2017-409-035338-2 del 04/04/2017.

La comunicación antes descrita fue radicada en la Agencia Nacional de Infraestructura, con el fin de obtener los estudios geológicos, geotécnicos y el diseño de la estructura del pavimento de los túneles de los tramos viales Bogotá – Villavicencio y Bogotá - Girardot. Dicha información fue entregada por esa entidad mediante oficio No. 2017-500-011309-1 del 17/04/2017.

La comunicación de requerimiento y el oficio de respuesta, hacen parte del presente documento, con lo cual se demuestra la autorización por parte de la ANI, para hacer uso de la documentación técnica entregada.

- Comunicación radicado de fecha 03/04/2017, dirigida a CONCRETO S.A.S – INTEGRANTE DE ESTRUCTURA PLURAL VÍAS A GIRARDOT:

La comunicación antes descrita fue radicada ante la sociedad concesionaria del tramo vial Bogotá – Girardot, sin embargo dicha compañía no atendió la solicitud. Se deja constancia de ello y la solicitud hace parte integral del presente documento.

- Comunicación radicado No. 3890 del 04/04/2017, dirigida a la sociedad COVIANDES concesionario del tramo vial Bogotá- Villavicencio:

La comunicación antes descrita fue radicada ante la sociedad concesionaria del tramo vial Bogotá – Villavicencio, sin embargo dicha compañía no atendió la solicitud. Se deja constancia de ello y la solicitud hace parte integral del presente documento.

De igual manera dentro de la fase 1 del presente proyecto se realizó revisión documental de los siguientes documentos técnicos:

- Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento de Túneles de Carreteras Para Colombia.
- Manual de Diseño de Pavimentos en Concreto para Bajos, Medios y Altos Volúmenes de Tránsito reglamentado por el Instituto Nacional de Vías.
- Manual De Diseño De Pavimentos Asfálticos Para Vías Con Bajos Volúmenes De Tránsito reglamentado por el Instituto Nacional de Vías

5.1.1. Análisis particular de los parámetros de diseño de las estructuras del pavimento, con base en la información entregada por el Invias y la ANI

5.1.1.1. Túnel tramo vial Ancón Sur – Primavera

Dentro de los documentos entregados por el Instituto Nacional de Vías, se analizó el volumen VI, denominado “*ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EL DISEÑO DEL PAVIMENTO*”, éste documento técnico contempla el diseño de pavimento de todo el corredor vial Ancón Sur – Primavera – Camilo C; teniendo en cuenta que el presente estudio se centra en la estructura del pavimento dentro del Túnel, se realizó especial análisis del capítulo 7 denominado “*DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO PARA TÚNELES*”.

5.1.1.1.1. Parámetros de diseño

Inicialmente se debe tener clara la localización de los túneles en el tramo, esta corresponde a las siguientes abscisas:

*“Se proyecta la construcción de tres (3) túneles así: dos (2) túneles paralelos en el sitio denominado Kachotis entre el K9+010 al K8+887 aproximadamente y uno (1) en el sitio denominado Pueblo Nuevo entre el K6+514 al K6+181 aproximadamente”*¹⁴

Tal como se titula el capítulo y en concordancia con gran parte de lo estudiado en el presente documento, se adoptó para los túneles diseñados y construidos pavimento rígido, por las siguientes ventajas señaladas en el informe:

“(…) Se propone una estructura en pavimento rígido, teniendo en cuenta las ventajas del concreto frente al asfalto en términos de seguridad en los túneles, debido a su resistencia a los ataques del fuego. Así mismo, presenta otras ventajas asociadas a la seguridad como:

- Superficie más clara y luminosa, lo que permite optimizar el costo de la iluminación.

¹⁴ INVIAS. (2014). Diseño de pavimento rígido para túneles. En VOLUMEN VI ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EL DISEÑO DEL PAVIMENTO (43). Bogotá: Invias.

- Menor deterioro tanto estructural como superficial, teniendo en cuenta que en el interior de los túneles las diferencias de temperatura son menores que en el exterior, lo que se traduce en unas menores tensiones y una mayor durabilidad del pavimento.
- Reducción de la distancia de frenado.
- Disminución de posibles accidentes por actividades de conservación.
- Reducción del consumo de combustible, generando disminución en el volumen de gases emitidos.
- Disminución de los niveles sonoros (...)¹⁵

Periodo de diseño:

Como cualquier pavimento rígido, el periodo de diseño adoptado fue de 20 años.

5.1.1.1.2. Transito

El análisis del tránsito del tramo vial para el diseño de la estructura del pavimento se realizó mediante espectro de cargas, al parecer no se contó con información específica de pesajes de los vehículos comerciales, por lo cual se adoptaron las cargas máximas legales permitidas por el Ministerio de Transporte, a continuación se presenta el resultado del análisis del espectro de carga:

Tabla 28. Repeticiones esperadas

Eje	Sector	Carga Máxima Legal (kN)					
		Simple Rueda Simple		Simple Rueda Doble		Tándem	Tridem
		24.0	58.8	88.3	107.9	215.7	235.4
1 y 2	Sectores 2 a 5 (Túneles Kachotis y Pueblo Nuevo)	31 080 247	29 051 442	31 080 247	18 499 542	11 157 450	2 392 880

Tabla 2: Espectro de carga para diseño de pavimento en túneles tramo Ancón sur – Primavera.

Fuente: Invias. Volumen Vi Estudio Geotécnico Para El Diseño Del Pavimento – Pág. 45

Adicionalmente se adoptó un factor de seguridad de carga de 1.2, es decir que se recomienda mejorar las repeticiones esperadas, en vista de que se trata de un

¹⁵ INVIAS. (2014). Diseño de pavimento rígido para túneles. En VOLUMEN VI ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EL DISEÑO DEL PAVIMENTO (43). Bogotá: Invias.

tramo vial de orden nacional que contempla un volumen de tránsito esperado bastante alto.

5.1.1.1.3. Subrasante

Para el caso de los túneles de este tramo, se recomienda que las losas de concreto hidráulico se apoyen sobre un material tipo subbase granular con un CBR del 40%, para el cual aplicando una correlación se obtiene un módulo de reacción de la Subrasante ($K = 120 \text{ Mpa/m}$).

Por el hecho de que la Subrasante es producto de la excavación de la estructura subterránea, se considera que la misma corresponde a una roca (capa rígida según el informe), se emplea una gráfica de la Guía de diseño AASHTO de 1993, Figura 3.4, página II-30, denominada "*Modificación del módulo de reacción de la Subrasante considerando el efecto de la capa rígida*"

De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta que la Subrasante sobre la cual se apoyará la estructura del pavimento es una roca, es decir un suelo de fundación duro y rígido, se adoptó para el diseño un módulo de reacción $K = 135 \text{ Mpa/m}$.

5.1.1.1.4. Efecto berma y transferencia de carga

Según el informe, el diseño no contempla la sección transversal como un elemento monolítico, por lo cual los bordillos que estarán en los bordes de las losas serán elementos independientes, de esta manera se concluye que no se consideró el efecto berma en la estructura. De otro lado, se considera necesaria la transferencia de carga por medio de dovelas o pasadores, tal y como un estructura de pavimento rígido convencional sometido a niveles de tránsito altos.

5.1.1.1.5. Determinación de los espesores de la estructura

Para determinar los espesores, en el informe se aclara que se empleó la metodología PCA, empleando el Software BS-PCA, a través de ese análisis se determinaron los siguientes espesores de la estructura del pavimento dentro de los túneles:

Tabla 29. Espesores de estructura obtenidos

Sector	k (MPa/m)	Espesores de Estructura (cm)		Consumos (%)	
		Subbase granular (CBR \geq 40%)	Concreto MR45	Fatiga	Erosión
Sectores 2 a 5 (Túneles Kachotis y Pueblo Nuevo)	135	Variable (Véase Nota 1)	29	0	82.37

Tabla 3: Espesores de la estructura del pavimento en túneles tramo Ancón sur – Primavera.

Fuente: Invias. Volumen Vi Estudio Geotécnico Para El Diseño Del Pavimento – Pág. 46

Se verifica un elemento importante en este caso, el espesor de la subbase granular, que será el soporte de las losas, se considera variable y el mismo se encuentra sujeto de acuerdo a la tipología de diseño de cada túnel, se recomienda un valor mínimo de espesor de 15 cm, sin embargo se puede concluir de manera directa que el tipo de suelo de la excavación subterránea definirá dicho espesor, un parámetro adicional para determinar los espesores de la estructura.

5.1.1.1.6. Barras de anclaje y transferencia

En el diseño se contemplan barras de anclaje longitudinal, estas con el objetivo de mitigar la fisuración por el efecto de alabeo, estas dependen si las losas se construyen carril por carril, caso en el cual serán similares a las juntas de construcción, que permitan amarrar las 2 losas entre si y una ranura superficial para colocar un material sellante, para las barras de anclaje se establecen barras corrugadas de 1/2" de diámetro y un $F'c = 4,200 \text{ Kg/cm}^2$ y 85 cm de longitud.

Para el caso de las barras de transferencia de carga, de acuerdo con el espesor de la losas y el cálculo del radio de rigidez del concreto, se determina que las barras de transferencia deben ser barras lisas de diámetro 1 1/2", una longitud de 50 cm, espaciadas entre si cada 30 cm y un $F'c = 4,200 \text{ Kg/cm}^2$.

5.1.1.1.7. Modulación de las losas y espesor

Teniendo en cuenta la sección trasversal del túnel, en donde el ancho de la calzada es de 8 metros y aplicando la relación de esbeltez de 1.25, se calcularon las siguientes dimensiones de losas de concreto hidráulico de $MR=4,5 \text{ Mpa}$:

Espesor losa= 29 cm

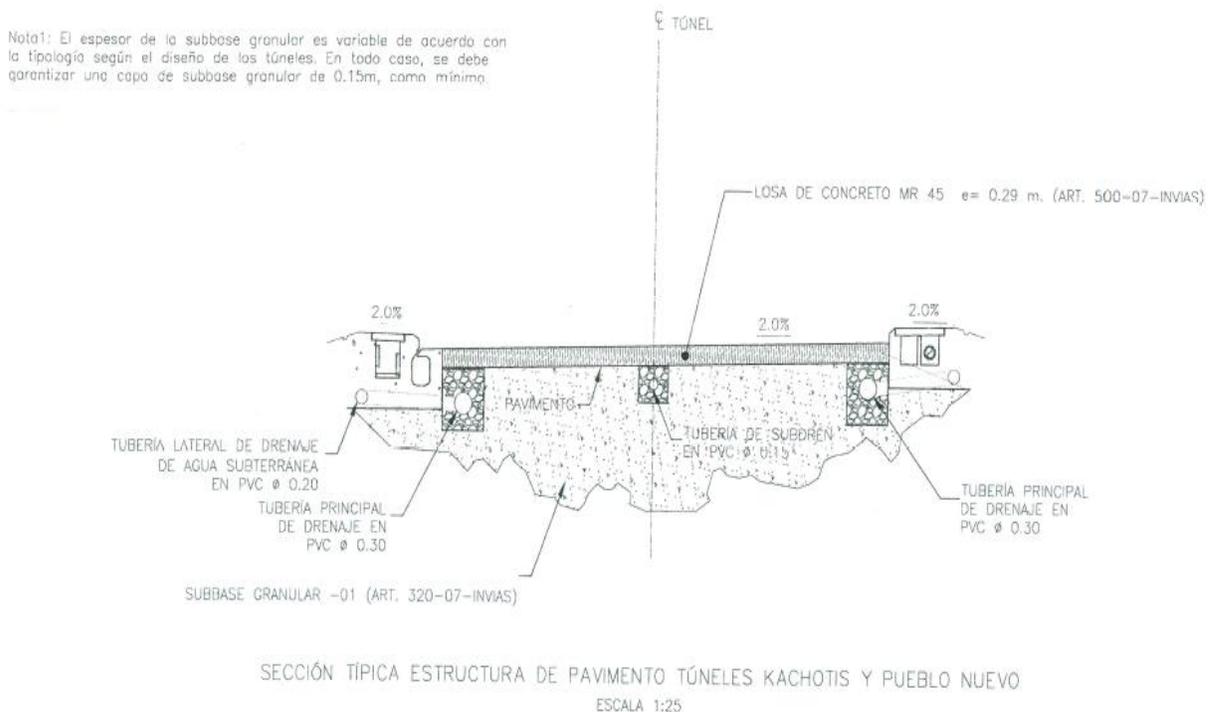
Ancho losa= 4 metros

Longitud losa máxima= 5 metros

Adicionalmente se realizan unas recomendaciones de refuerzo, esto debido a que algunas losas por la geometría del túnel deben ser irregulares, para lo cual cada losa debe ser reforzada con una parrilla compuesta por barras corrugadas de ½” separadas cada 25 cm, instaladas en el tercio medio de cada losa.

5.1.1.1.8. Análisis de elementos particulares adicionales

Como elemento importante se verifica que la geometría del túnel es un parámetro de gran importancia para determinar las características de las losas, en este caso particular se verificó lo siguiente: “(...) Para el caso de los túneles en el sector de Kachotís, teniendo en cuenta la geometría de la vía, las losas serán irregulares por lo que deben ser reforzadas en su totalidad. Mientras que en el túnel de Pueblo Nuevo, solamente algunas losas son irregulares (...)”¹⁶



¹⁶ INVIAS. (2014). Diseño de pavimento rígido para túneles. En VOLUMEN VI ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EL DISEÑO DEL PAVIMENTO (50). Bogotá: Invias.

Imagen 5: Sección Transversal típica túneles tramo Ancón Sur – Primavera – Fuente: Invias
Volumen Vi Estudio Geotécnico Para El Diseño Del Pavimento – Anexo 8 plano CDC-CP-DIS-PAV-
SE-01-V0

Nota: En el anexo 3 del presente documento se puede observar la imagen 5, con mayor tamaño, esto con el propósito de identificar el detalle del sistema de drenaje.

Como elemento importante hay que tener en cuenta que en el eje de la vía, en donde se encuentra la junta constructiva, se localiza un elemento de drenaje “*Tubería de subdren en PVC de diámetro 30 cm*” inmediatamente bajo la losa, este aspecto no es común encontrarlo en estructuras de pavimento convencionales a cielo abierto.

Parámetros geotécnicos y geométricos de los túneles que influyen en el diseño de la estructura del pavimento:

Se verificó la información contemplada en el informe titulado: “*CAPÍTULO IX TOMO IX-3 TÚNELES KACHOTIS Y PUEBLO NUEVO INFORME DE REVESTIMIENTO*”, en el cual se encontraron los siguientes aspectos que influyen directamente sobre el diseño de la estructura del pavimento:

“(...) Se parte del hecho que las convergencias se encuentra en cero (0,0 mm) al momento de la construcción del revestimiento definitivo que conformará la sección de servicio. Se supone que el estado de tensiones y deformaciones se encuentra estable y que el revestimiento aquí diseñado no soportará ninguna carga de empuje de terreno que le corresponda al soporte del túnel en las primeras etapas de estabilización de las excavaciones (...).

(...) Desde el punto de vista de cargas se considera la condición más desfavorable para el diseño del revestimiento y no se establece el trabajo en sección compuesta entre el soporte inicial y el revestimiento definitivo. Se considera que esta interface donde se ubica la impermeabilización definitiva del túnel no une las dos estructuras (Soporte preliminar y Revestimiento Definitivo) y se considera que el trabajo es de forma independiente para todo tipo de cargas (...).

(...)Desde el punto de vista de cargas se considera que el soporte inicial uniformiza las cargas y se las transmite al revestimiento definitivo en el caso de la acción a largo plazo. Estas cargas se consideran uniformemente distribuidas alrededor del revestimiento definitivo. Para el diseño del revestimiento se estudia el caso de una envolvente de cargas irregularmente distribuidas alrededor del revestimiento (...). (...)El soporte inicial es diseñado para soportar las cargas a largo plazo originadas por la relajación de la roca a largo plazo. Como criterio del diseñador el revestimiento se diseña para soportar una carga de diseño 25,0 kN/m² (...)”¹⁷

A continuación se describen las características geométricas de los túneles y los parámetros de diseño:

Tabla 1 Características Geométricas de los túneles

Obra Subterránea	Longitud	Progresiva
Túnel Kachotis (Derecho)	123 m	Km 8 + 887 – Km 9+012
Túnel Kachotis (Izquierdo)	103 m	Km 8 + 903 – Km 9+006
Túnel de Pueblo Nuevo	333 m	Km 6 + 189 – Km 6+522

PARÁMETRO	KACHOTIS – PUEBLO NUEVO
Velocidad de diseño	60 km/h.
Radio mínimo	214 m
Distancia de parada	70 m
Distancia de visibilidad frente al portal	250 m
Pendiente longitudinal	4.01, 4.41 % Y 7.15%
Peralte máximo	2.0 %

Tabla 4: Características geométricas túneles tramo Ancón sur – Primavera. Fuente: Invias. Capítulo IX Tomo Ix-3 Túneles Kachotis Y Pueblo Nuevo Informe De Revestimiento – Pág. 6 y 8

Para el caso de la sección transversal se identificaron los siguientes aspectos técnicos:

“(...) Para el tipo de terreno anticipado se adoptó una sección transversal de excavación con sección circular parcial de aproximadamente 220°. Por su carácter

¹⁷INVIAS. (2013). INFORME DE REVESTIMIENTO. En CAPÍTULO IX TOMO IX-3 TÚNELES KACHOTIS Y PUEBLO NUEVO (3). Bogotá: Invias.

circular, la geometría seleccionada permite la adecuada redistribución de esfuerzos alrededor de la cavidad, minimizando la concentración de esfuerzos de compresión y la generación de esfuerzos de tensión (...)"¹⁸

Todas las anteriores características y análisis técnicos, permiten determinar el diseño estructural del revestimiento en concreto reforzado de los túneles de la siguiente manera: *“La estructura corresponde al revestimiento definitivo en concreto reforzado para el túnel vial en su interior. Espesor teórico de revestimiento $t = 0,30$ m. Vigas base de 1,10 m de ancho en la cara inferior en contacto con el suelo y 0,40 m de espesor que se encarga de transmitir todas las cargas a la cimentación”*.¹⁹.

A continuación se describen todos los parámetros del revestimiento diseñado:

“(...) Estructura al interior conformada por un (1) arco con radio interior (Medidas al interior de la sección de servicio) de: $R = 5,25$ m.

- Viga Base de 1,10 m de ancho por 0,40 m de espesor.*
- Espesor teórico del revestimiento de 0,30 m. Constante en hastiales y bóveda.*
- Altura total del revestimiento 8,50 m.*
- Módulos típicos para vaciado de la estructura $L = 6,0$ m, se recomienda la utilización de cinta de PVC de 0,22 entre módulos para evitar el paso de agua en el caso de falla de la impermeabilización primaria (...)*

¹⁸ INVIAS. (2013). INFORME DE REVESTIMIENTO. En CAPÍTULO IX TOMO IX-3 TÚNELES KACHOTIS Y PUEBLO NUEVO (7). Bogotá: Invias.

¹⁹ INVIAS. (2013). INFORME DE REVESTIMIENTO. En CAPÍTULO IX TOMO IX-3 TÚNELES KACHOTIS Y PUEBLO NUEVO (12). Bogotá: Invias.

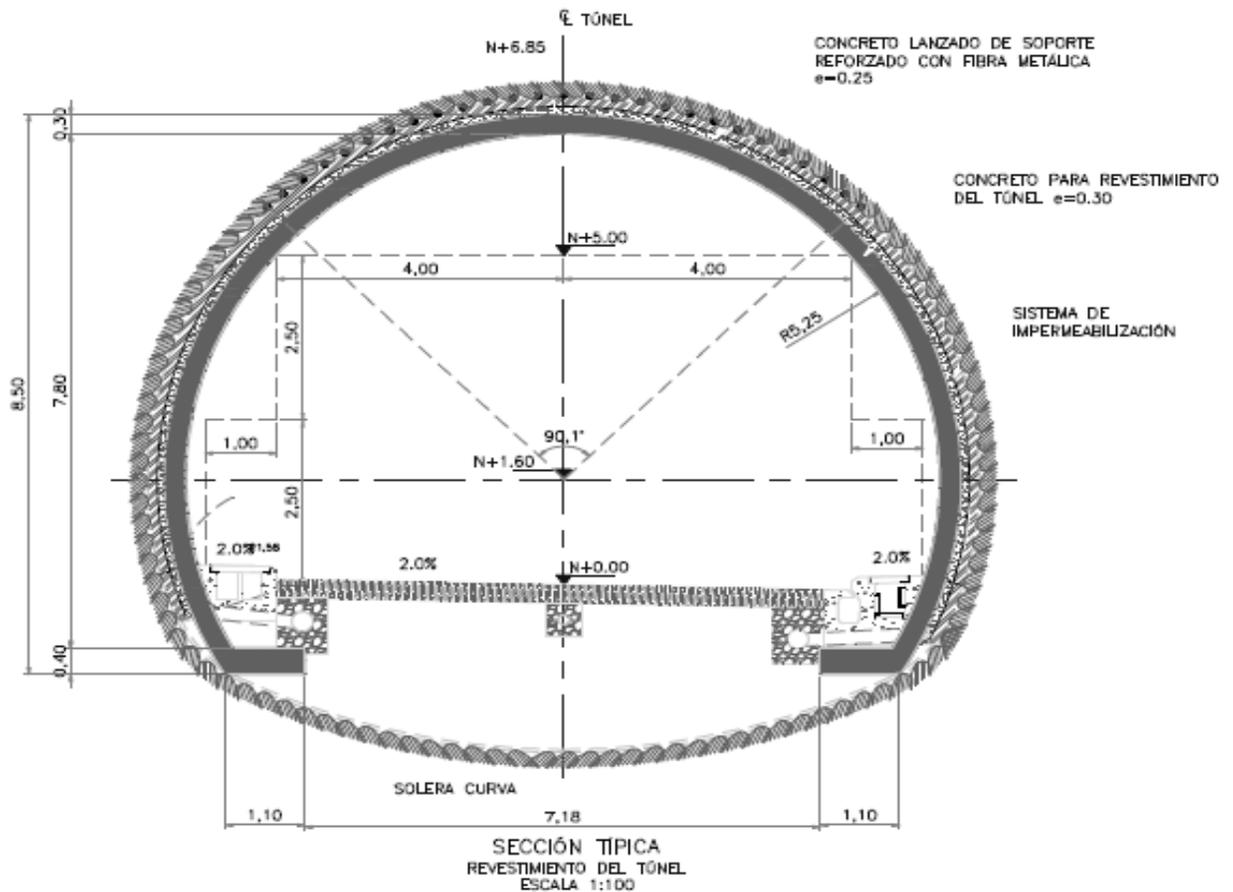


Imagen 6: Sección transversal revestimiento túneles tramo Ancón sur – Primavera- Fuente: Invias
Capítulo IX Tomo Ix-3 Túneles Kachotis Y Pueblo Nuevo Informe De Revestimiento – Pág. 13

Se identifica que a partir de los parámetros geotécnicos y geométricos para diseñar el revestimiento, se propone la construcción de una solera curva en la parte inferior, esta se considera alternativa de acuerdo con los siguientes apartes de los estudios:

“(…)Como se establece más adelante, la construcción del túnel, si el Contratista lo determina con la debida aprobación del INVIAS, podrá ser llevada a cabo desarrollando las actividades de excavación y soporte de toda la sección superior, independiente del tipo de terreno en el que se avance y posteriormente se efectuará la excavación y soporte de la sección inferior, la cual podrá ser

excavada en etapas, y en los terrenos que se requiera, se podrán construir tramos de solera curva, de acuerdo con el comportamiento que allí se registre (...).

(...)En este tipo de terreno el túnel podrá excavarse en tres etapas: primero la sección superior del túnel, con una altura mínima hasta la banca de 5,5 m, posteriormente la sección inferior y finalmente la sección de la solera, en función de la naturaleza del terreno esta última podrá ejecutarse al final o seguida a la sección inferior. El avance por ciclo en la sección superior podrá efectuarse entre 0.5 m y 1.0 m. La excavación de la sección inferior deberá hacerse con avances de máximo 2.0 – 4.0 m. La excavación de la sección de solera deberá efectuarse en avances no mayores a 6.0 m, o según las instrucciones del INVIAS (...).

(...)En caso de que puedan ocurrir levantamientos severos de la solera, deberán instalarse micropilotes de 6.0 m a 8.0 m de longitud en el piso espaciados a 10.0 m en ambas direcciones y se deberán cubrir con un espesor de 0.10 a 0.15 m de concreto lanzado (...)²⁰

De lo anterior se puede concluir que el elemento denominado solera curva, el cual depende del tipo de terreno en la medida que avance la excavación subterránea, se convierte en un elemento importante tanto de toda la sección del túnel, como del soporte de la estructura del pavimento, otro elemento clave y adicional que debe ser tenido en cuenta para el diseño de la estructura del pavimento.

5.1.1.2. Túnel tramo Santa fe de Antioquia – Cañas Gordas (Túnel del Toyo)

Luego de sostener reunión técnica con el Ingeniero Carlos Felipe Sabogal, gestor del proyecto del Túnel del Toyo por parte del Instituto Nacional de Vías, se logró conseguir el informe técnico denominado “ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS SANTA FE DE ANTIOQUIA CAÑAS GORDAS”, el cual cuenta con el capítulo 8.3 “Diseño de pavimentos Rígidos (Túneles)”, del cual se analizó la siguiente información:

²⁰ INVIAS. (2014). TOMO IX-1 INFORME FINAL DISEÑO TÚNEL DE KACHOTIS. Bogotá: Invias.

Inicialmente hay que tener en cuenta que también se adopta como alternativa, estructura de pavimento rígido, no se realizan aclaraciones del motivo por el cual se recomienda dicha alternativa, se aclara que el diseño de espesores se realiza mediante la metodología PCA de acuerdo con los parámetros de diseño a continuación relacionados:

5.1.1.2.1. Capacidad de soporte de la Subrasante

Se estima que las losas serán soportadas sobre una Subrasante con un CBR del 20% y un material tipo base granular, con lo cual se determina un valor de K combinado = 104 Kg/cm³.

No se especifican los ensayos de los cuales se tomó el valor del CBR de la Subrasante, pero de acuerdo con el valor adoptado, se puede concluir que se asume que el suelo de fundación después de la excavación es un suelo medianamente fuerte.

5.1.1.2.2. Resistencia a la flexotracción del concreto

Se estima que para el tránsito que circulara por el túnel, se debe emplear un concreto hidráulico con resistencia a la flexotracción a los 28 días de 4.5 Mpa.

5.1.1.2.3. Pasadores y efecto berma

Al igual que en los diseños del tramo Ancón sur – Primavera, no se contempla el efecto berma y se recomienda transferencia de carga por medio de pasadores.

El periodo de diseño adoptado es de 20 años, correspondiente al convencional adoptado para cualquier pavimento rígido y se estima un factor de seguridad de carga (FSC)= 1.2, similar al empleado en los diseños anteriormente analizados.

5.1.1.2.4. Análisis del tránsito

El análisis del tránsito del tramo vial para el diseño de la estructura del pavimento se realizó mediante espectro de cargas, al parecer no se contó con información específica de pesajes de los vehículos comerciales, por lo cual se adoptaron las cargas máximas legales permitidas por el Ministerio de Transporte, a continuación se presenta el resultado del análisis del espectro de carga:

Tramo	Localización	EJE				
		SIMPLE			TANDEM	TRIDEM
		6	8	11	22	24
1	Túnel Occidente-Santafe	6651876	2373623	3414675	1036294	77722
	Cañas Gordas-Uramita	3176399	1371192	1068941	1023412	125165
	Dabeiba-Mutatá	2555441	949301	928728	846765	237094
	Cañas Gordas-Santafé	3176399	1371192	1068941	1023412	125165
3	San José de Nus-Puerto Berrío	8135337	2083773	2415338	4799817	1309041

Tabla 5: Espectro de cargas tramo Santa Fe de Antioquia – Cañas Gordas. Fuente: Invias. Estudio Geotécnico Para El Diseño De Pavimentos Santa Fe De Antioquia Cañas Gordas. Pág. 42.

5.1.1.2.5. Calculo de espesores

Para esta caso particular, el diseño recomienda emplear una estructura conformada por un material tipo subbase granular, una base en concreto pobre MR= 1.5 Mpa, y sobre esta un losa de MR= 4.5 Mpa, con los siguientes espesores.

Localización	Espesor (cm)		
	Concreto MR 4.5 Mpa	Concreto MR 1.5 Mpa	Sub base granular
Sante Fé de Antioquia-Cañas Gordas	19	10	30

Tabla 6: Espesores estructura de pavimento Túnel del Toyo Santa Fe de Antioquia – Cañas Gordas. Fuente: Invias. Estudio Geotécnico Para El Diseño De Pavimentos Santa Fe De Antioquia Cañas Gordas. Pág. 42.

De igual manera se aclara que la recomendación de diseño y los espesores recomendados se manejan de la manera antes descrita, debido a que toda la estructura estará soportada sobre una roca alterada y el túnel manejará un alto nivel de tránsito.

5.1.1.2.6. Modulaci3n de las losas

Para esta caso particular se adopt3 una relaci3n de esbeltez de 1 a 1.4, las barras de transferencia tendr3n una longitud de 35 cm y un di3metro de 1"separadas cada 30 am y la barra de amarre longitudinal, ser3 una barra corrugada de 90 cm de longitud, 1/2" de di3metro en acero de 420 Mpa y se colocaran 3 por losas.

Finalmente se recomienda refuerzo para las losas que su longitud sea superior a 24 veces el espesor, las que la relación de esbeltez supere 1.4, losas irregulares y losas en las cuales se encuentren elementos como pozos de alcantarillado y sumideros.

En términos generales, se puede observar que el presente diseño no contempla elementos o parámetros adicionales a los que convencionalmente se tienen en cuenta para el diseño de estructuras de pavimento a cielo abierto.

5.1.1.3. Túnel tramo Bogotá - Girardot (Túnel del Sumapaz)

De acuerdo con la información entregada por la Agencia Nacional de Infraestructura, se realizó revisión de los siguientes informes técnicos del denominado túnel del Sumapaz: "*Capítulo IX. 16, Pavimentos, Base Granular y Subbase Granular*", este documento corresponde a las especificaciones generales y mínimas que estableció el INCO (hoy ANI), para el diseño y construcción de la estructura del pavimento dentro de del túnel, dentro de los parámetros más importantes se encuentran los que a continuación se relacionan:

Dentro del alcance se limita a que la estructura del pavimento debe ser en concreto hidráulico, las losas deben ir soportadas sobre un material tipo base granular, se hace aclaración que en los casos en que el túnel sea en terreno tipo IV y V, se requiere de un relleno con material tipo subbase granular, según lo estudiado en los túneles anteriores, por las condiciones del material en donde se está excavando el túnel, es necesario completar el círculo de la misma con la solera circular inferior, que permite la disipación de esfuerzos sobre los borde del túnel.

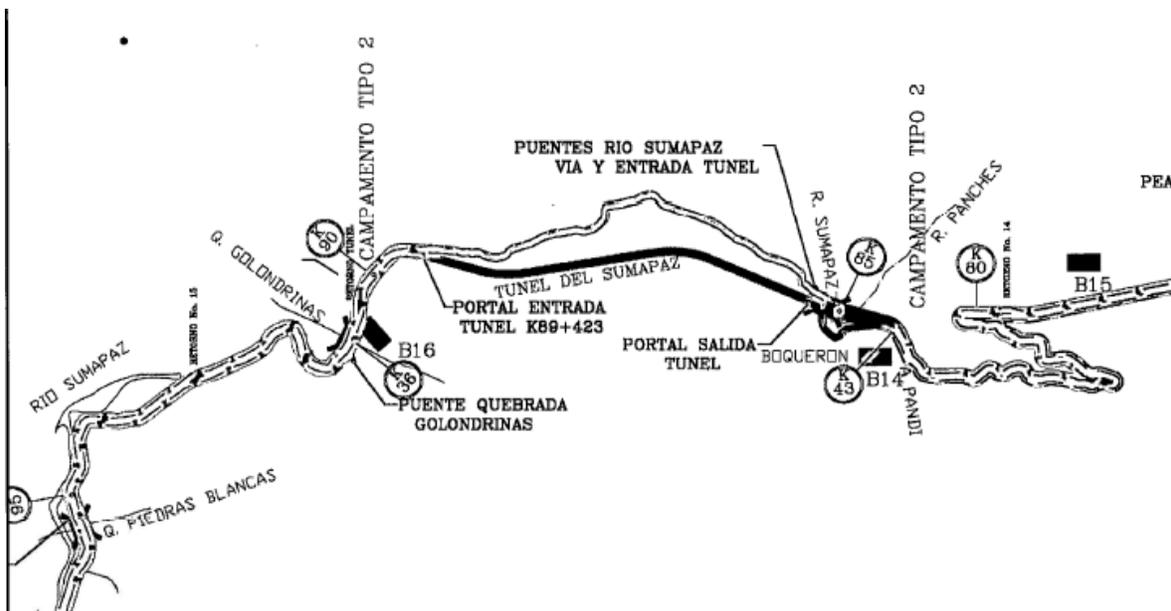


Imagen 7: Localización general Túnel del Sumapaz. Fuente: INCO (ANI). Volumen V Informe del Plan Exploratorio del Subsuelo y Estudio Petrográfico y Ensayo de Mecánica de Rocas enero de 2005

Realizando una revisión detallada de los estudios entregados, se observan las siguientes características generales del túnel:

Se encuentra localizado en el tramo No. 9 del tramo Bogotá – Girardot, en el sector denominado trayecto No. 9 – Boquerón – Melgar, en el departamento del Tolima, el proyecto de la obra subterránea se desarrolla sobre el talud derecho del río Sumapaz, entre las abscisas K89+700 al K85+630, a su vez el túnel internamente se divide en 5 sectores de la siguiente manera:

- Tramo 1: K89+730 – K88+950
- Tramo 2: K88+975 – K87+300
- Tramo 3: K88+830 – K87+100
- Tramo 4: K87+100 – K86+500
- Tramo 5: K86+500 – K85+640

Estas subdivisiones internas del túnel, obedecen a que los tramos 1, 3 y 5 corresponden a excavaciones en roca, mientras que los tramos 2 y 4, son las

excavaciones en los portales, que se consideran a cielo abierto, la longitud total del túnel es de 4,1 kilómetros.

5.1.1.3.1. Caracterización de la geología en la zona del túnel

Con las perforaciones y estudio de suelos realizados, se identificó que en el portal Boquerón se encuentran coluviones, atravesando estos se encuentra el macizo rocoso de la formación guaduas, por su parte en el portal Melgar se identifica un característica similar, pero el macizo rocoso corresponde a la formación de terrazas de Melgar; dichas formaciones corresponden al Cretáceo y la Terciario.

TRAMO TÚNEL	PERFORACIÓN	PROFUNDIDAD PROGRAMADA (m)	ABSCISA TÚNEL	OBSERVACIONES
I	PT - 1	70	K86+440	Túnel en rocas de F. Villeta cerca al portal.
II	PT - 2	50	K86+650	Tramo atravesando coluvión
III	PT - 4	100	K89+600	Túnel en rocas Terciarias
V	PT - 3	100	K88+540	Túnel en rocas del Terciario

Tabla 7: Resumen general de las perforaciones realizadas para diseño Túnel del Sumapaz.

Fuente: INCO (ANI) Volumen V Informe del Plan Exploratorio del Subsuelo y Estudio Petrográfico y Ensayo de Mecánica de Rocas - enero de 2005.

Los resultados de los ensayos y perforaciones, permitieron concluir que en su mayoría, las rocas presenten para la excavación del túnel, corresponden a areniscas cuarzosas del grupo de la formación del grupo Guadalupe, en cuanto a las formaciones del terciario se encuentran conglomerados, areniscas conglomeráticas y arcillolitas. Estas rocas presentan las siguientes características mecánicas a lo largo del túnel del Sumapaz:

FORMACIÓN GEOLÓGICA	TIPO DE ROCA	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	PESO UNITARIO T/m ³	ÁNGULO DE FRICCIÓN	MODULO DE YOUNG (Gpa)
GUADUAS (TKg)	Arcillolita	2.46	2.20	27°	0.50
ARENISCA TIERNA Y LABOR (Kgt y Kgl)	Arenisca	55.0	2.30	41°	7.6
PLAENERS (Kgp)	Limolita y lutita	30.0	2.25	37°	0.9
ARENISCA DURA (Kgd)	Arenisca	60.0	2.30	52°	10.0
VILLETA (Kv)	Lutita	7.0	2.25	35°	0.9
GUALANDAY (Tg)	Conglomerado	15.0	2.20	40°	4.9

Tabla 8: Características mecánicas de las rocas para diseño Túnel del Sumapaz. Fuente: INCO (ANI) Volumen V Informe del Plan Exploratorio del Subsuelo y Estudio Petrográfico y Ensayo de Mecánica de Rocas – enero de 2005.

A partir de la caracterización geológica, condiciones del tránsito y según las especificaciones establecidas por la entidad contratante, se establecen los siguientes parámetros de diseño en cuanto a la estructura del pavimento:

5.1.1.3.2. Periodo de diseño

Como cualquier pavimento rígido, el periodo de diseño adoptado fue de 20 años

5.1.1.3.3. Metodología de diseño

En el volumen IV de los estudios del tramo Bosa – Granada – Girardot, denominado “Informe de Pavimentos”, se identifica que la metodología de diseño adoptada para la estructura del pavimento rígido dentro del túnel es la PCA.

5.1.1.3.4. Tránsito

Para el análisis del tránsito, se tomaron datos de un estudio realizado por la firma IGETEC en el año de 1998, los datos empleados corresponden al sector Chinauta – Esmeralda, el cual presenta un TPD de 5445 vehículos día llevados al año 2005, a continuación se presenta el resumen de los datos generales del tránsito:

TIPO DE VEHÍCULO COMERCIAL	EJE 1 (Ton)	EJE 2 (Ton)	EJE 3 (Ton)
Buses	No se considera el eje direccional para la evaluación.	9.0 (88.2 KN)	-
Camión C2-p		8.0 (78.4 KN)	-
Camión C2-G		9.0 (88.2 KN)	-
Camión C3-C4		23.0 (225.4 KN)	-
Articulados C-5		20.0 (196 KN)	20.0 (196 KN)
Articulados C-6		20.0 (196KN)	24.0 (235.2 KN)

Tabla 9: Carga de los vehículos comerciales para diseño del pavimento del Túnel del Sumapaz.

Fuente: INCO (ANI) Volumen IV Informe de Pavimentos – enero de 2005.

A diferencia de los dos diseños de pavimento antes estudiados en el presente informe, se observa que para el caso del túnel del Sumapaz, si se contó con datos de pesajes por ejes de los vehículos comerciales, en los otros casos simplemente se adoptaron los valores de cargas máximas del Ministerio de Transporte; este aspecto es de gran importancia para el diseño de la estructura del pavimento, ya que se cuenta con los datos reales de la composición de las cargas que serán aplicadas.

TIPO DE VEHÍCULO COMERCIAL	% de Vehículos
Autos	44
Buses	12
Camión C2-p	25
Camión C2-G	4.3
Camión C3-C4	1.6
Articulados C-5	5.0
Articulados C-6	8.1

Tabla 10: Composición vehicular para diseño del pavimento del Túnel del Sumapaz. Fuente: INCO (ANI) Volumen IV Informe de Pavimentos –enero de 2005.

5.1.1.3.5. Subrasante

La caracterización geomecánica del suelo y las formaciones rocosas presentes en el túnel del Sumapaz, permitió a los diseñadores de la estructura del pavimento, establecer los siguientes parámetros de la Subrasante:

“(...) En el análisis se aprovechó que la Subrasante en la cual se apoyará el pavimento corresponde a materiales granulares de tipo coluvión, roca fracturada de tipo lutita y roca arenisca (...)”²¹

Según lo establecido anteriormente, se observa que asumen que es una Subrasante de pobre a regular características, con un CBR= 5,8%, razón por la cual para esta caso se propone la colocación de una capa en material tipo subbase granular de 20 centímetros de espesor y sobre esta un capa asfáltica MDC-1 (MCD-25) de 8 centímetros, con asfalto homogeneizado, para mitigar los efectos de la erosión y el bombeo, además se establece que dicha mezcla asfáltica propuesta debe tener un contenido de asfalto de entre 6 a 6.5 % de contenido de asfalto.

Con el CBR de 5,8% asumido, la capa de material tipo subbase granular de 20 cm y la capa de mezcla tipo MDC-1, con ayuda de las gráficas de la PCA, se obtiene un “K” combinado de 98 Mpa/m, valor con el cual se determinaran los espesores de losa. Los demás parámetros de diseño de la estructura del pavimento, se describen a continuación:

Módulo de rotura del concreto= MR= 4,5 Mpa

Factor distribución por carril= 0,50

Velocidad de diseño= 60 Km/h

Factor de seguridad de carga= 1,1

Transferencia de carga: Con pasadores (dovelas)

Con los anteriores parámetros de diseño, se calcularon los siguientes espesores:

²¹ INCO. (2005). Informe de pavimentos. En Volumen IV Estudios y Diseños Túnel Sumapaz (9). Bogotá: ANI.

Sector	Espesor Subbase granular (cm)	Espesor Base Asfáltica (cm)	Espesor concreto Rígido (cm)	
			Con Berma	Sin Berma
Túnel del SUMAPAZ	20	8.0	20cm	25cm

Tabla 11: Espesores del pavimento diseñado Túnel del Sumapaz. Fuente: INCO (ANI) Volumen IV Informe de Pavimentos - enero de 2005.

Se observa que el análisis con efecto berma y sin él, se realizó con el fin de identificar cuanto disminuyen los espesores, la aplicación de esta alternativa se dejó a consideración de la entidad contratante.

5.1.1.3.6. Modulación de las losas

Para la realizar la modulación de las losas, se adoptó una relación de esbeltez de 1,0, con la cual se calcularon losas de 3,9 x 3,9 metros, sin embargo se aclara que pueden ser empleadas losas de longitud hasta 5 metros, el ancho de carril recomendado es de 3,65 metros con un sobre ancho de 0,25 metros, la igual que en todos los diseños aquí estudiados, se recomienda que todas las losas irregulares deben ser reforzadas.

5.1.1.3.7. Soporte, sostenimiento y revestimiento

De acuerdo con los estudios geotécnicos, de suelos, las especificaciones y recomendaciones de la entidad contratante, el diseñador realizó modelaciones del soporte de la excavación, recordando que se convierte en un factor que influye para el diseño del pavimento, teniendo en cuenta que dependiendo el tipo de suelo de la excavación va a requerirse la solera curva en la parte inferior del túnel y que debe ser rellena con material que se convertirá en elemento de la Subrasante para el diseño de la estructura del pavimento, a continuación se presenta la sección transversal modelada con factores de seguridad y solera circular:

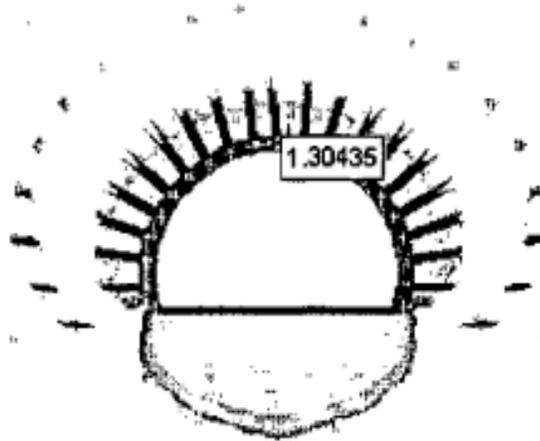


Imagen 8: Modelación de la sección transversal con sostenimiento y revestimiento del túnel del Sumapaz. Fuente: INCO (ANI) Volumen II Informe Geotécnico Obras Subterráneas – enero de 2005.

En los documentos entregados, no se observaron recomendaciones sobre el drenaje vial dentro del túnel, únicamente las relacionadas con el sistema de drenaje del revestimiento por las infiltraciones esperadas.

5.1.2. Revisiones adicionales de documentos técnicos.

Con los túneles estudiados de los tres tramos, se ha logrado establecer que el tipo de formación sobre la cual se realiza la excavación del túnel, influye de cierta manera para el diseño de la estructura del pavimento, esto debido a que se hace necesaria la colocación de un material adicional cuando la disipación de esfuerzos hace necesaria la solera curva inferior.

De otro lado, también existen proyectos de túneles, en los cuales la excavación se realiza en rocas tan sanas y duras, que hacen pensar que no se requiere revestimiento, esto sería otro factor que influye dentro del diseño del pavimento, ya que la superficie de rodadura se encontraría expuesta a la erosión producto de los flujos internos, recordando que estos siempre van a existir por la dinámica

hidrogeológica de las formaciones, en este caso se necesita un cuidado especial sobre los materiales y productos que se necesitan sobre la superficie de rodadura.

De otro lado, según el Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento de Túneles de Carretera Para Colombia, los túneles tienen una clasificación, que depende de su longitud y tráfico, otros de los factores más importantes para definir inicialmente la alternativa de diseño del pavimento requerida; a continuación se presenta el resumen de dicha clasificación:

CLASE	ALTERNATIVA 1		ALTERNATIVA 2	
	LONGITUD (m)	TPDA - CARRIL	LONGITUD (m)	TPDA - CARRIL
A	> 3000	>100	>500	>10000
B	>1000 y < 3000	>100 y <10000	>500 y <3000	>4500 y <10000
C	>500 Y < 1000	>100 y < 4500	>250 y < 500	>4500
D	>250 y < 500	>100 y < 4500	>100 y < 250	>4500
E	>100 y < 250	>100 y < 4500	N/A	

Tabla 12: Clasificación de los Túneles en Colombia. Fuente: Elaboración propia a partir de INVIAS. Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento de Túneles de Carretera Para Colombia

Nuevamente retomando el tema de la solera circular, es claro que en su mayoría los túneles en Colombia la llevan, no solo como elemento estructural del túnel, si no como una pieza clave de la fase de excavación de la estructura subterránea, a continuación se presenta la sección transversal típicas de la excavación de túneles:

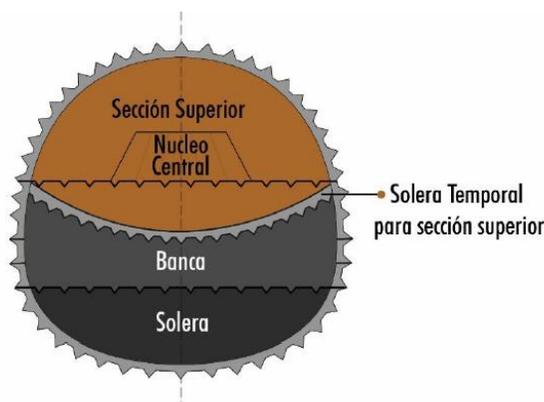


Imagen 9: Sección Transversal típica de la excavación de un túnel. Fuente: INVIAS. Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento de Túneles de Carretera Para Colombia.

Según el manual del Invias, para el revestimiento de túneles existen un clasificación, la cual depende principalmente de la calidad de la roca, la longitud del túnel y la cantidad de caudal de infiltración, como se ha logrado establecer, éstos son parámetros que deben ser tenidos en cuenta para el diseño de la estructura y más aun de los materiales que conformaran la superficie de rodadura, de acuerdo con el siguiente análisis:

TIPO DE REVESTIMIENTO	LONGITUD (m) Túnel	Observación frente al diseño del Pavimento
RCS revestimiento capa sencilla	<700	No presenta sistema de impermeabilización, el agua subterránea ingresa directamente la túnel, limitado a caudales menores a 0,5 L/S
RCC revestimiento capa compuesta	Sin importar	Requiere obligatoriamente sistema de impermeabilización sobre la capa de concreto neumático, no influye sobre el pavimento.
RCD revestimiento capa doble	Sin importar	Es el revestimiento más usado, mínimo debe tener 30 cm y tiene sistema de impermeabilización, no influye sobre el pavimento

Tabla 13: Influencia del tipo de revestimiento frente al diseño del pavimento. Fuente: Elaboración propia a partir de: INVIAS. Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento de Túneles de Carretera Para Colombia

Finalmente en cuanto a las revisiones adicionales a documentos técnicos, es importante resaltar que uno de los aspectos que limita la utilización de mezclas asfálticas dentro de los túneles, es el componente de luminosidad y reflectividad, es claro que las mezclas bituminosas por contener un producto derivado del

petróleo, es de color negro y en condiciones de túneles sería desfavorable la absorber la poca luz disponible, generando una condición crítica frente a la seguridad vial.

Frente a estas condiciones, en el evento de requerirse un túnel carretero de menos de 1 kilómetros, en donde se observara que la alternativa económicamente más eficiente, fuera el pavimento flexible en mezcla bituminosa, a nivel mundial se han empleado alternativas con mezclas asfálticas pigmentadas, de acuerdo con lo siguiente:

“(…) Mezcla en caliente fabricada con betún sintético que permite una pigmentación en masa de la misma en cualquier color incluido el color natural. EL asfalto coloreado es una alternativa de pavimentación para calles, aceras, plazas, aparcamientos o cualquier espacio público o privado que quiera diferenciarse del entorno gris habitual por razones estéticas o para mejorar la seguridad vial manteniendo las propiedades mecánicas del betún convencional.

La utilización de estas mezclas puede ser debida por consideraciones estéticas, ambientales, por seguridad o ahorro energético en iluminación.

Tienen un amplio campo de aplicación como en urbanizaciones, aceras, zonas peatonales, carril bici, pavimentos deportivos, parque naturales, túneles, etc. (…)”²²

5.2. Fase 2

De acuerdo con los estudios y diseños consultados, la información técnica recopilada y analizada, se determinó que para desarrollar la fase 2 del presente proyecto, los túneles del tamo vial la cual se debía solicitar una reunión técnica con el especialista diseñador, son los túneles del tramo vial Ancón Sur – Primavera – Camilo C.

²² TRABIT. (2017). Mezclas asfálticas pigmentadas. 11/06/2017, de TRABIT Sitio web: <https://www.trabit.com/mbc-color/>

Por intermedio del gestor del proyecto por parte del Instituto Nacional de Vías, Ingeniero Jorge Caro Castillo, se logró programar un comité técnico con los Ingenieros Oscar Joya Camargo – Director de Estudios y Diseños y Karina Ramos Zuluaga – Especialista en Pavimentos del Consorcio Desarrollo Vial Camilo C. a continuación se presenta la transcripción de dicho comité técnico:

5.2.1. Transcripción del Comité técnico realizado con los especialistas diseñadores de los túneles del tramo Ancón sur – Primavera – Camilo C

Yo estoy haciendo mi tesis de grado en la especialización en ingeniería de pavimentos en la Universidad Militar, y me quise meter con el tema de la estructuras del pavimento dentro de los túneles, porque quizá encontré que no está como muy explícito ese tema en los manuales de diseño de pavimentos y demás. Entonces yo quiero darle un enfoque a la siguiente pregunta: ¿se le da algún tratamiento especial a las estructuras de pavimento dentro de túneles?

Pues en realidad no, en realidad un pavimento dentro de un túnel se diseña igual que un pavimento en cualquier otra situación, los parámetros son los mismos en cuanto a Subrasante, tráfico, todas las demás variables inmersas en el diseño; lo que pasa es que hay que tener en cuenta tres variables, pensaría yo que son las tres variables más importantes para tener en cuenta: la primera es la Subrasante, cuando usted trabaja en un túnel, las Subrasantes que usted encuentra son más competentes, digamos usted tiene 2 situaciones, si el suelo es duro, usualmente, supongamos usted tiene su montaña, aquí está el túnel, donde se tienen los recubrimientos grandes pues va a tener suelos duros usualmente roca, entonces va a tener Subrasantes duras, de pronto en los portales, porqué el suelo se meteoriza en la superficie, en los portales va a tener unas subrasantes muy blandas, pero que tampoco son tan blandas porque son suelos muy consolidados.

Usted tiene su diseño del túnel aquí, esta sería la sección típica para estos sectores, donde usted tiene roca, si el suelo es muy blando, esta sección ya no le aplica, para suelos tipo 5 o algo así, entonces ya le toca hacer una solera curva abajo, al hacer la solera curva en la parte inferior usted va a tener que rellenar

esto con material seguramente subbase o algo de ese estilo, esa es la denominada solera curva que llaman, lo que usted hace es darle mayor resistencia al túnel, entonces aquí va a tener unos llenos con materiales competentes, subbase, además usted va a tener esos materiales apoyados sobre unos materiales que digamos sean arcillas o algo así, pero van a estar consolidados porque van a estar 10 a 12 metros aproximadamente bajo tierra, entonces van a estar en mejores condiciones. Entonces ese es el primer parámetro, es la Subrasantes, que en general son Subrasantes competentes, obviamente hay que hacer el estudio y el análisis particular.

El segundo parámetro que usted tiene que tener en cuenta es la visibilidad dentro del túnel, entonces esa es una de las razones por las que se trabaja, digamos que los materiales, más que la visibilidad, hay que analizar los materiales de la superficie, y que particularidad debe tener en cuenta usted en los materiales, la primera es la visibilidad y otra es el mantenimiento; en cuanto a la visibilidad lo ideal es no tener una rodadura oscura porque entonces le oscurece más el túnel. - ¿ósea que la capa rodadura no se oscurece? – pues es lo ideal, pues digamos en túneles cortos se podría manejar, en el nuevo manual del INVIAS – Ese manual recomienda que en túneles de menos de 1000 metros se puede con mezclas asfálticas – pero seguramente ese va enfocado a la iluminación, que no oscurezca mucho el túnel, en túneles cortos se podría trabajar con mezcla asfáltica sin problemas. Hay mezclas asfálticas, que incluso hay túneles en Suiza y demás, eso está en la literatura, que los han trabajado con pigmentos, pigmentación, asfaltos de colores y pues eso al final las mezclas quedan de un color crema.

¿Pero digamos en general en Colombia las estructuras en túneles son en pavimento rígido, ósea en concreto, al concreto se le da algún tipo de tratamiento para darle algún tipo de coloración a la superficie?

No, el concreto como es blanco, es claro, no hay problema, la mezcla asfáltica por ser oscura puede atrapar el color y la iluminación.

¿En el evento que se llegara a diseñar con asfalto, que fuera un túnel corto que fuera con mezcla asfáltica, hay que buscar la forma de darle algún tipo de pigmentación para el tema de seguridad vial?

Sobre todo para túneles largos, lo ideal es tratarlo de no oscurecerlo; cuando usted diseña un túnel, debe realizarse un estudio fotométrico de la luz interna, es cuando se diseña la distancia entre luces y también se tiene en cuenta el tipo de superficie de rodadura; en ese estudio se define la iluminación y la distancia.

En el estudio fotométrico, se determina el tipo de iluminación y la distancia entre estas, en túneles largos lo ideal es que los conductores no vean la luz al final del túnel, porque generalmente estos tienden a acelerar a salir rápido, en túneles cortos no hay problema porque da la sensación de pasar bajo un puente, pero en túneles largos es ideal es siempre que el usuario no vea el portal de salida porque el efecto es que se puede generar un efecto de encandilamiento el punto blanco al final y lo segundo es que la gente quiere salir rápido y acelera, entonces es importante que los usuarios no puedan ver esa luz y generalmente se hace una curva, como usted tiene una luz día, en estos puntos usted une más las luminarias o las separa más, ese es el estudio fotométrico y esa distancia está de acuerdo a la intensidad de las luminarias, esa es otra historia, pero digamos cuando se hace ese estudio, los especialistas le preguntan a uno que tipo de superficie de rodadura se tiene contemplada en el diseño, en conclusión lo ideal son las superficies claras.

Lo otro que hay que tener en cuenta es el mantenimiento, por eso también se enfoca el tema del pavimento rígido, porque en teoría usted lo diseña a 20 o 30 años y si tiene un mantenimiento adecuado debería durar, en cambio el flexible a los 10 años ya puede empezar a presentar problemas y si usted lo trabaja además pigmentado, le toca hacerle el sello de la fisura con un material negro y estéticamente queda mal.

Lo otro es el ruido, si usted mira la norma INVIAS, se recomienda que no se trabaje con mezclas abiertas, porque producen más ruido, lo idea también es trabajar mezclas anti-ruido.

Puntualmente el túnel de Ancón sur es en pavimento rígido, el tema de pavimento rígido cómo se maneja en esa complejidad, como se ha manejado el tema del ruido?, porque en teoría genera más ruido.

Por mantenimiento, igual son túneles de 120 metros, son realmente cortos, allá el rígido también está enfocado al mantenimiento, no es fácil cerrar un túnel para reparar un parche, en teoría la idea es que tenga una larga durabilidad, que no haya necesidad de estar cerrándolo para hacerle mantenimiento y lo otro fue la iluminación también, para que no se oscurezca, de todas formas a esos túneles se les puso bastante luz.

Otra pregunta con respecto a la solera, ¿generalmente esta solera va siempre en los portales del túnel?

Si el suelo es blando si, por ejemplo los túneles de Ancón sur, todos tienen solera curva, porque el suelo era blando, usted cuando diseña túneles, se define una sección típica, hay varios parámetros, pero enfocándonos en el tipo de la formación o suelo donde se construye el túnel, estos se clasifican de 1 a 5, donde 1 es roca y 5 es prácticamente suelo, entonces si usted tiene roca, prácticamente se puede dejar la caverna y se puede manejar una sección solo con la roca, si se tiene un suelo tipo 2 se tiene un suelo competente, una roca, pero ya va a tener que meterle algunos pernos porque puede estar algo fracturada, una roca tipo 3 puede tener el mismo caso del tipo 2, pero algo más fracturada y va a tener que meterle pernos y puede que un arco para el sostenimiento del túnel, el tipo 4 puede tener la misma sección, va a requerir pernos para cocer los materiales, va a necesitar arcos más grandes y robustos y los debe poner más juntos, en el tipo 3 puede poner los arcos cada 2 metros pero en tipo 4 los debe poner cada 1 metro o cada 75 centímetros, pero cuando ya cuando llega a tipo 5, es decir prácticamente tipo suelo, ya ni el arco es suficiente para soportar el túnel, porque ya se tienen

unos esfuerzos altos en la parte inferior, además de los arcos, va a requerir pernos, es necesario cerrar el círculo para que se distribuyan los esfuerzos hasta abajo y se completa incluso el arco en la parte inferior, ahí se conforma la denominada solera, esta es una explicación general, no es una regla que se cumpla en todos los casos.

En los túneles de Ancón sur, como es material tipo suelo, se tiene esa condición, se tienen arcos incluso separados entre 50 y 75 centímetros y tienen solera curva, esto porque son en suelo y tienen esa condición.

Esos son las particularidades que se deben tener en cuenta en cuanto a los materiales de superficie, visibilidad, mantenimiento o durabilidad, por eso es que es rígido y lo otro es el ruido.

Hay un tercer tema, que son los drenajes, que eso también está asociado al estudio hidrogeológico que usted haga al túnel, en general que hay que tener en cuenta de los drenajes, si usted mira el túnel que nosotros hicimos, la superficie, aquí tenemos las losas de concreto, aquí tenemos los andenes, entonces se identifican unos puntos vulnerables, en esos puntos se proyectaron unos drenes para que capten el agua y la conduzcan y no se vaya a quedar el agua empozada, y también se tienen aguas que entran por debajo, entonces para que no se vaya a quedar el agua ahí, se tienen una serie de filtros para que saquen el agua permanentemente.

¿Por qué esos puntos son vulnerables?

Porque aquí es donde está la junta con el andén, aquí está la junta central y la otra junta con el andén, se colocan esos drenajes para evitar bombeo, lo ideal es que no se le vaya a acumular agua bajo las losas.

¿Realmente todos estos parámetros no se encuentran explícitos en ningún manual? Eso ya va dado por la experiencia y los estudios que ustedes han adelantado en diferentes túneles.

Sí, es verdad, pues de hecho ya que usted está estudiando el tema, si encuentra algo además de información le recomiendo comunicarme y compartirme.

Volviendo al tema de la Subrasante, cuando usted de pronto tiene roca, se hace voladura, la superficie queda muy irregular, esa superficie se debe uniformizar, se debe colocar un material granular y sobre esta colocar la estructura del pavimento, no se puede colocar la estructura directamente sobre la Subrasante, por eso volvemos al tema de que son Subrasantes muy competentes, siempre se va a tener un material de muy buenas condiciones.

¿En el caso de pavimentos rígidos en túneles el “K” de reacción de la Subrasante lo aporta directamente el macizo rocoso?

Si, lo aporta directamente el macizo o tipo de formación sobre la cual se encuentra el túnel.

¿Qué documentos se deben entregar dentro del diseño de pavimentos en túneles?

Se deben entregar: La modulación de las losas con un plano en planta, unas recomendaciones constructivas y unos planos de detalles

ASISTE AL COMITÉ LA INGENIERA KARINA, DISEÑADORA DE PAVIMENTOS DE LOS TÚNELES DE ANCÓN SUR – PRIMAVERA – CAMILO C

Se realiza presentación y se informa sobre el alcance e intensidad del proyecto de grado.

Nosotros entregamos diseños sectorizados de la siguiente manera, sector 1 que no tiene túneles y sectores 2 al 5 que son en los cuales se encuentra todo el tema de diseño de pavimento rígido dentro de los túneles.

Nosotros no tenemos operación del túnel, nuestro contratos solo contemplo diseño y construcción, una vez terminadas las obras INVIAS debía entregar todo el tramo construido a la ANI y esta a su vez a la concesión que va hasta Bolombolo.

En este caso es un diseño de pavimento rígido, con una capa rígido abajo, porque es una roca, esa es la particularidad de ese diseño.

¿Dentro de los manuales y normas técnicas para diseño de pavimentos, existe algún tratamiento especial para el diseño de pavimentos en túneles?

No existe, la verdad es que es un pavimento común y corriente,

¿Cuál es la diferencia entre sostenimiento y revestimiento del túnel?

El sostenimiento es el que brinda el aporte estructural del túnel o macizo rocoso, el revestimiento es lo que se coloca al final para darle estética y acabado, segundo para mejorar las condiciones de luminosidad y tercero para mejorar las condiciones de ventilación. Por ejemplo, para que el túnel se sostenga y no se vaya a cerrar, puede ser suficiente simplemente con los arcos, los pernos, la solera curva y además se coloque concreto lanzado en 110 centímetros dependiendo del empuje que esté dando el túnel para cerrarse, pero supongamos que hacemos un corte transversal del túnel, esta es la roca, aquí se colocaron los arcos y después se colocó concreto lanzado, ese es el sostenimiento del túnel y ese le sostiene ya el túnel, pero por condiciones de aire, ventilación, eso va a tener una rugosidad alta, va a tener choques, estéticamente no es el mejor, la luz se va a perder entre los arcos, entonces es necesario colocar el recubrimiento, que es un concreto encima, que le da el acabado estético, ahí ya se tienen paredes lisas para el tema de ventilación no va a existir fricción lateral, la luz ya se tiene controlada, se manejan espesores de 15 a 20 cm y generalmente se complementa con factores de seguridad y con el espesor del sostenimiento para terminar de completar los elementos estructurales del túnel.

En los túneles de Ancón sur, todas las losas quedaron reforzadas, porque todas son irregulares, ya que los túneles quedaron en curva, debido a que la relación de esbeltez no daba, lo que indicaba que las losas eran irregulares y debían ir reforzadas, si el túnel fuera recto se podrían manejar losas sin refuerzo, solo con las barras de transferencia de carga.

- *El investigador realiza la siguiente intervención:*

Con la información reunida y analizada, uno de los objetivos es verificar si existe la necesidad de sugerirle al INVIAS que incluya dentro del próximo manual de diseño de pavimentos, un capítulo para casos especiales, que correspondería a estructuras de pavimento dentro de túneles.

- *Los entrevistador entregan información final:*

Se entregan los informes donde se pueden observar los detalles, los tres drenajes en las juntas y se observa un relleno, ya que el corte en la superficie es irregular debido a que la excavación en la roca no se realiza con motoniveladora, entonces se consideró como estructura una placa y un relleno variable, con material de subbase entre la excavación de la roca y la placa.

Inicialmente no se consideró la solera curva, pero finalmente se observó la necesidad de utilizarla, en las notas se consignó que debe garantizarse mínimo 15 centímetros de subbase bajo la losa, cuando se hace solera quedan casi 50 centímetros con la subbase, se rellena todo porque debe emparejar la superficie con la solera curva.

Termina el Comité técnico.

5.2.1.1. Análisis de los elementos más importantes del Comité

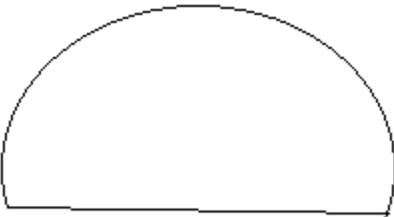
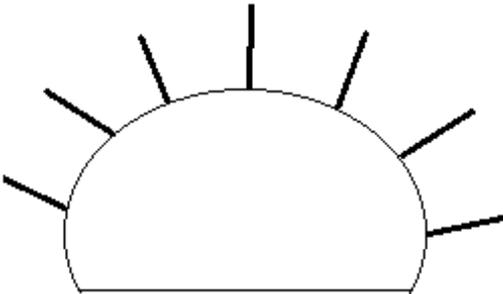
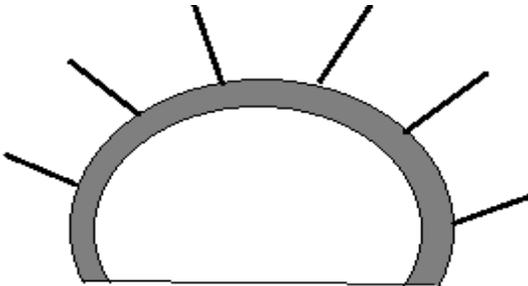
Una vez analizada la información entregada por los especialistas en el comité técnico se resaltan los siguientes aspectos, que aportan para el presente proyecto:

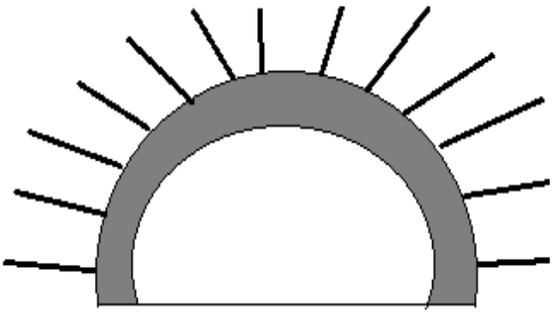
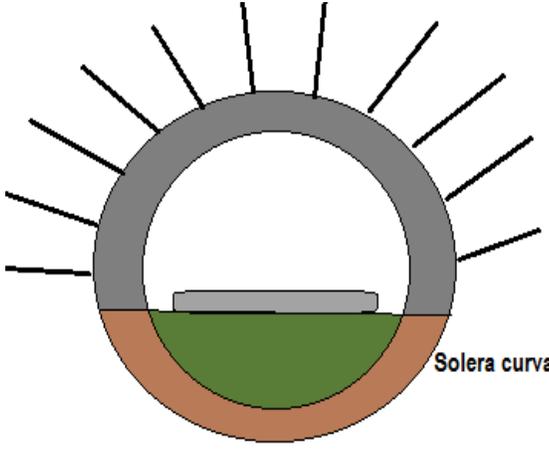
Los tres parámetros adicionales a los que convencionalmente se tienen en cuenta para el diseño de pavimentos son:

- Los suelos de Subrasante, por lo general son duros, así la excavación sea en suelo, es decir un túnel en tierra, el suelo de Subrasante sobre el cual se apoyará la estructura estarán muy consolidados porque tienen mucha

cobertura encima, solo en los portales se puede encontrar una condición desfavorable, ya que el suelo puede que se haya meteorizado.

- El tipo de formación en el cual se adelanta la excavación y construcción del túnel, influye sobre la necesidad de construir la solera curva, la cual como se ha podido observar en el presente documento, debe ser analizada como parte de la estructura del pavimento, ya que la misma conforma el componente para el módulo de reacción K de la Subrasante compuesto; a continuación se presenta un esquema de lo explicado por el Ingeniero Joya:

TIPO DE FORMACIÓN EN LA EXCAVACIÓN	SECCIÓN TRANSVERSAL TÚNEL	CARACTERÍSTICA
TIPO I		<p>Roca muy sana, no requiere sostenimiento, el revestimiento se emplea por temas de reflectividad, ventilación e impermeabilización, que además sirve para proteger la superficie de rodadura del pavimento.</p>
TIPO II		<p>Roca sana, con algunas fracturas y discontinuidades, requiere un mínimo de sostenimiento con anclajes y revestimiento</p>
TIPO III		<p>Roca sana con un mayor porcentaje de fracturas, discontinuidades y erosión, presenta una menor resistencia por lo cual requiere un sistema de revestimiento más robusto con concreto neumático y anclajes</p>

<p>TIPO IV</p>		<p>Roca bastante fracturada y degradada, con gran número de discontinuidades y baja resistencia, requiere un sistema de sostenimiento bastante robusto, con concreto neumático de gran espesor, anclajes, pernos y arcos medianamente espaciados.</p>
<p>TIPO V</p>		<p>Suelo, muy baja resistencia, requiere un sistema de revestimiento muy robusto, concreto neumático, anclajes, pernos, arcos con poco espaciamiento y solera curva, es decir completar el círculo de la excavación para disipar los esfuerzos y material de relleno en esa solera</p>

Tablas 14: Clasificación de los tipos de formación y macizos rocosos para la excavación de túneles y secciones transversales típicas de los túneles dependiendo del tipo de formación rocosa. Fuente:

Elaboración propia.

- El Ingeniero Joya, realizó un énfasis especial en el tema de la visibilidad, los pavimentos tienen gran influencia en éste aspecto, ya que la superficie de la estructura garantiza la seguridad de los usuarios en cuanto a reflectividad dentro del túnel.
- Drenajes: Es un factor que se debe tener en cuenta para cualquier diseño de pavimentos, sin embargo, según lo analizado en el comité técnico, en el caso de los túneles del tramo Ancón sur – Primavera, se observa que bajo la junta de construcción de las losas, se coloca un dren, con el propósito de mitigar la acción del agua que asciende por capilaridad hacia la superficie y puede generar fenómeno de bombeo.

- Ruido: Se hizo especial énfasis en que el ruido es un factor a tener muy en cuenta dentro de un túnel, y la acción de los neumáticos de los vehículos sobre el pavimento es quizá lo que más genera ruido, por esta razón no se recomiendan las mezclas asfálticas abiertas, además las losas de concreto hidráulico debe realizarse un procedimiento especial sobre la macrotextura, para que disminuir el ruido sin afectar los aspectos de la fricción.
- En términos generales y en concordancia con lo aquí estudiado, los especialistas asistentes la comité técnico, recomiendan las estructuras de pavimento rígido, ya que su desempeño es mejor en cuanto a los parámetros de visibilidad, seguridad frente a incendios, ruido, durabilidad y mantenimiento.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez desarrolladas las 2 fases del presente proyecto, procesada la información técnica entregada por le entidades oficiales y después de sostener el comité técnico con especialistas en el diseño de estructuras de pavimento dentro de túneles se realizan los siguientes análisis de resultados:

- El diseño de pavimento dentro de túneles, se realiza de la misma manera de un pavimento convencional a cielo abierto, sin embargo si existen algunos parámetros adicionales que afectan de manera directa los requerimientos de diseño, tales como:
 - ✓ La seguridad frente a incendios: Es el parámetro inicial para determinar el tipo de pavimento a diseñar, la longitud del túnel inmediatamente limita la selección entre pavimento flexible y rígido, como se estudió anteriormente las mezclas asfálticas son severamente susceptibles a las altas temperaturas, durante un incendio en un túnel, el pavimento flexible tienen a aumentar la carga de calor, según lo observado se llegan a alcanzar temperaturas de 1200 °C, lo cual genera una notoria desventaja frente a los pavimentos en concreto hidráulico, además después de ocurrida la emergencia, la mezcla asfáltica habrá perdido todas sus propiedades mecánicas y de resistencia, mientras que el concreto empleado en pavimentos las seguirá conservando.
 - ✓ La Luminosidad: Luego de analizar que el limitante para seleccionar pavimento rígido frente flexible en el diseño dentro de un túnel, también se debe analizar que si el túnel es de menos de 1000 metros, pero si llegará a ser de una longitud considerable, por ejemplo 800 metros lineales, el diseñador estaría en condición de proponer una estructura de pavimento flexible, sin embargo también debe analizar que las mezclas bituminosas por su color oscuro, presentan una alta tendencia a absorber la luz y se presentaría una condición insegura para los usuarios; si se tratara de un

túnel tipo E, es decir de menos de 250 metros, se podría llegar a considerar el pavimento flexible como alternativa, de acuerdo con lo estudiado aquí, debería proponerse una solución con mezclas asfálticas pigmentadas.

- ✓ El tipo de formación del túnel: De manera reiterada se observó que en los diseños del pavimento dentro de los túneles se propone siempre la solera curva en la parte inferior, esto también tiene que ver que en Colombia las características geológicas muy seguramente no han permitido que los túneles se construyan en formaciones con roca sana tipo I, pero es de gran importancia que los diseñadores en pavimentos analicen previamente dichos aspectos con el fin de definir un diseño de espesores contemplando la solera curva inferior, en 2 de los tres diseños aquí analizados, se verificó que se propone este elemento sobre la subrasante, en material tipo subbase granular, claramente será determinante para el cálculo del módulo de reacción de la subrasante K compuesto.
- ✓ Dentro de los túneles, la caracterización de la subrasante se homogeniza y generaliza, muy seguramente porque se parte del supuesto de que el suelo o roca van a estar en condiciones casi que inalteradas, por eso no se realiza análisis de zonas homogéneas por características particulares de la Subrasante, muy curiosamente se observa dicha particularidad en el diseño del túnel del Toyo, de una longitud bastante considerable (más de 9 Km). En la realidad de la ingeniería de pavimentos se sabe que en una longitud tan extensa es improbable que sea una sola zona homogénea. De esta manera se puede concluir que para el diseño de pavimentos dentro de túneles, el análisis de la Subrasante difiere bastante del que se realiza para un pavimento a cielo abierto, en donde se proponen diferentes alternativas sujetas a los cambios de las condiciones del suelo.
- ✓ Se resalta como en el diseño del drenaje para la estructura del pavimento de los túneles del tramo Ancón sur – Primavera – Camilo C, presenta la alternativa del dren bajo la junta constructiva, un elemento que no se observó en los otros 2 diseños analizados, la parecer en ese caso influye el hecho de que no se trata de un túnel en suelo, que muy seguramente

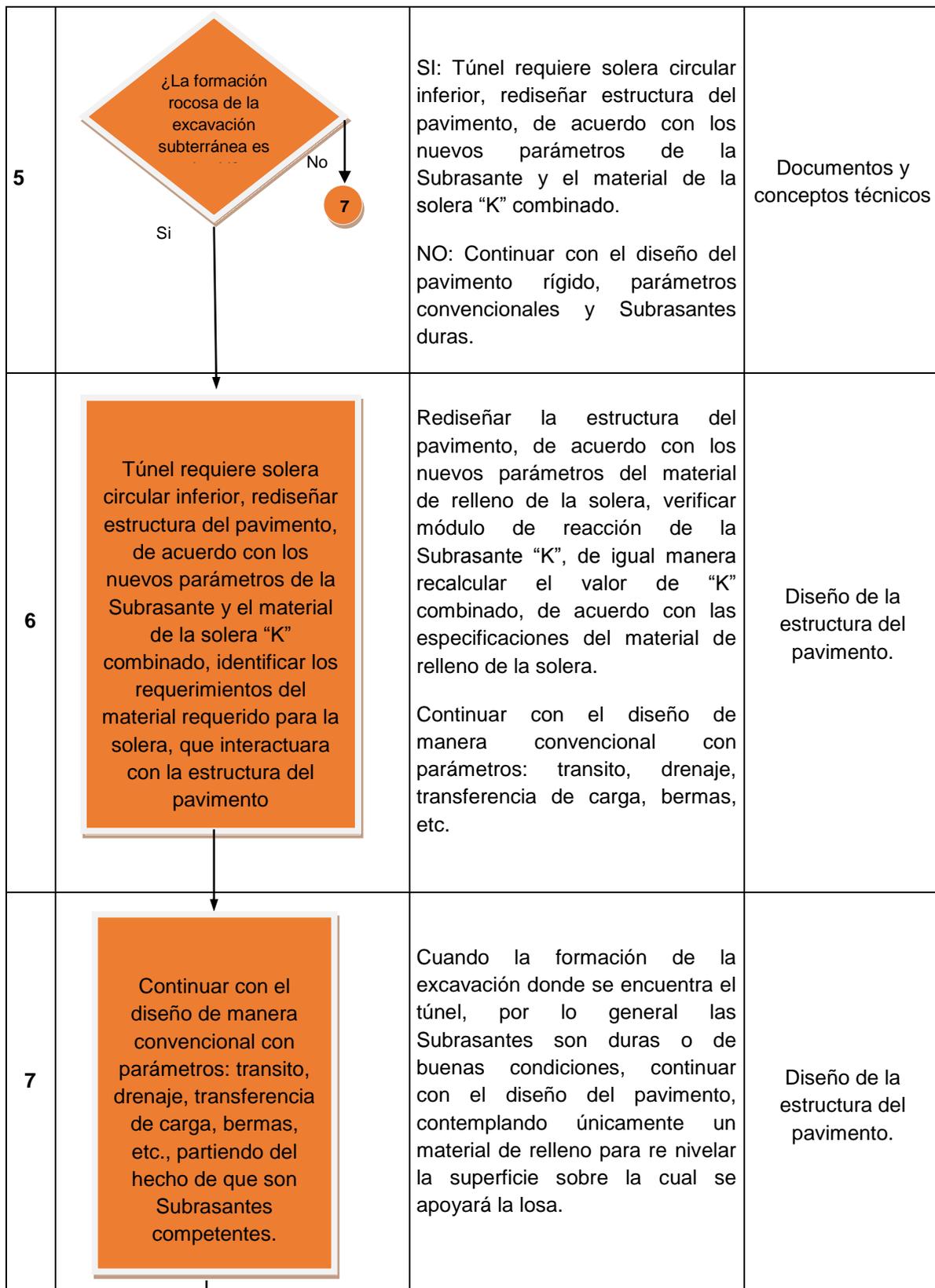
tendrá otras características en cuanto al ascenso de aguas subterráneas hacia los materiales que conforman la estructura. Esto indica que el drenaje se convierte en otro parámetro que debe ser analizado de manera diferente frente a los diseños de pavimentos convencionales.

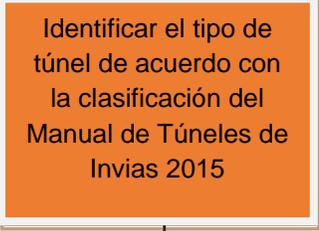
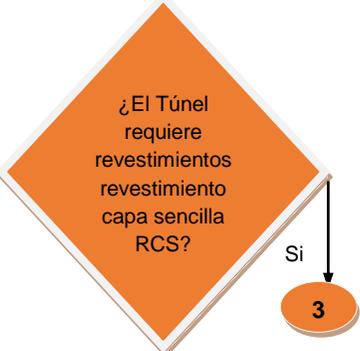
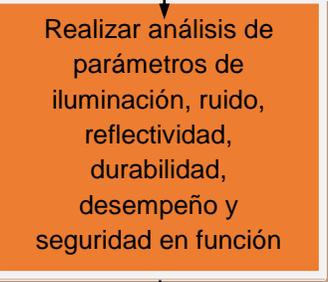
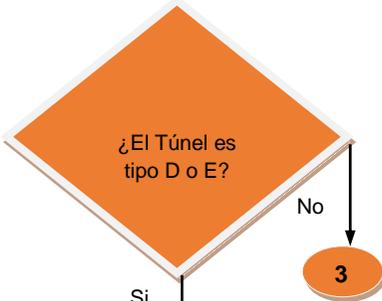
- ✓ Por su parte los análisis frente la tránsito si se manejan exactamente igual que en un pavimento a cielo abierto.
- ✓ Sería de bastante utilidad que se realicen investigaciones frente a la utilización de pavimentos flexibles en túneles cortos, ya que sería una alternativa más económica en términos de construcción, dentro de los aspectos a investigar se encuentran alternativas para mitigar la vulnerabilidad de los asfaltos la fuego, las mezclas pigmentadas aquí estudiadas pueden ser desarrolladas para ser empeladas en túneles de menos de 1000 metros y sistemas de drenaje como el propuesto en los túneles de Ancón sur – Primavera – Camilo C, que después de un monitoreo del comportamiento de la estructura de pavimento frente a otras en túneles sin ese sistema, se puede concluir un beneficio especial frente a la operación y mantenimiento.
- ✓ En términos generales, el pavimento rígido es el más recomendado para túneles, los aspectos de seguridad, visibilidad, durabilidad, mantenimiento, hacen notar sus grandes ventajas, sin embargo también es claro que el mismo presenta unos costos mucho más elevados para su construcción, y en Colombia se han construido túneles relativamente cortos con dicha ésta alternativa, puede ser un análisis apresurado, pero hasta qué punto es recomendable y en cuales es mejor alternativa el flexible por costos.

El presente análisis se complementa con el siguiente diagrama de flujo, obtenido a partir de las investigaciones aquí realizadas, que sirven de manera preliminar para identificar las variables y parámetros adicionales que deben ser tenidos en cuenta para el diseño de la estructura del pavimento dentro de un Túnel.

No.	FLUJO	ACTIVIDAD	REGISTRO
1.		Analizar y estudiar de manera técnica las particularidades geométricas, geológicas, geotécnicas, hidrogeológicas y particularidades de la excavación del túnel.	Estudios técnicos disponibles, requerimientos y especificaciones oficiales
2		<p>SI: Continuar con diseño preliminar de la estructura del pavimento rígido.</p> <p>NO: Verificar alternativas de diseño de acuerdo con el tipo de túnel, revestimiento y requerimientos técnicos particulares.</p>	Documentos y conceptos técnicos
3		Diseñar la estructura del pavimento con superficie de rodadura en concreto hidráulico, de acuerdo con los manuales y normatividad vigente.	Memorias de cálculo, estudios y diseños preliminares.
4		A partir de los estudios geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos, identificar el tipo de formación rocosa presente en la excavación del túnel, de acuerdo con lo establecido en la Fase 2 del presente documento.	Estudio técnico de geología, geotecnia e hidrogeología





8		De acuerdo con el Manual de túneles de Invias 2015, se debe identificar si el túnel es tipo C, D, E, la cual se encuentra en función de la longitud del túnel y el tránsito.	Documentos y conceptos técnicos
9		<p>SI: Continuar diseño de la estructura del pavimento rígido, con materiales especiales para proteger de erosión en caso de infiltraciones muy altas.</p> <p>NO: Verificar alternativas de diseño de la estructura del pavimento rígido o flexible.</p>	Documentos y conceptos técnicos
10		De acuerdo con el Manual de Túneles de Invias, revisar el tipo de túnel, en función del tráfico y su longitud.	Documentos y conceptos técnicos
11		<p>SI: Identificar y estudiar la posibilidad de emplear pavimento flexible pigmentado.</p> <p>NO: Continuar con diseño de pavimento rígido.</p>	Documentos y conceptos técnicos

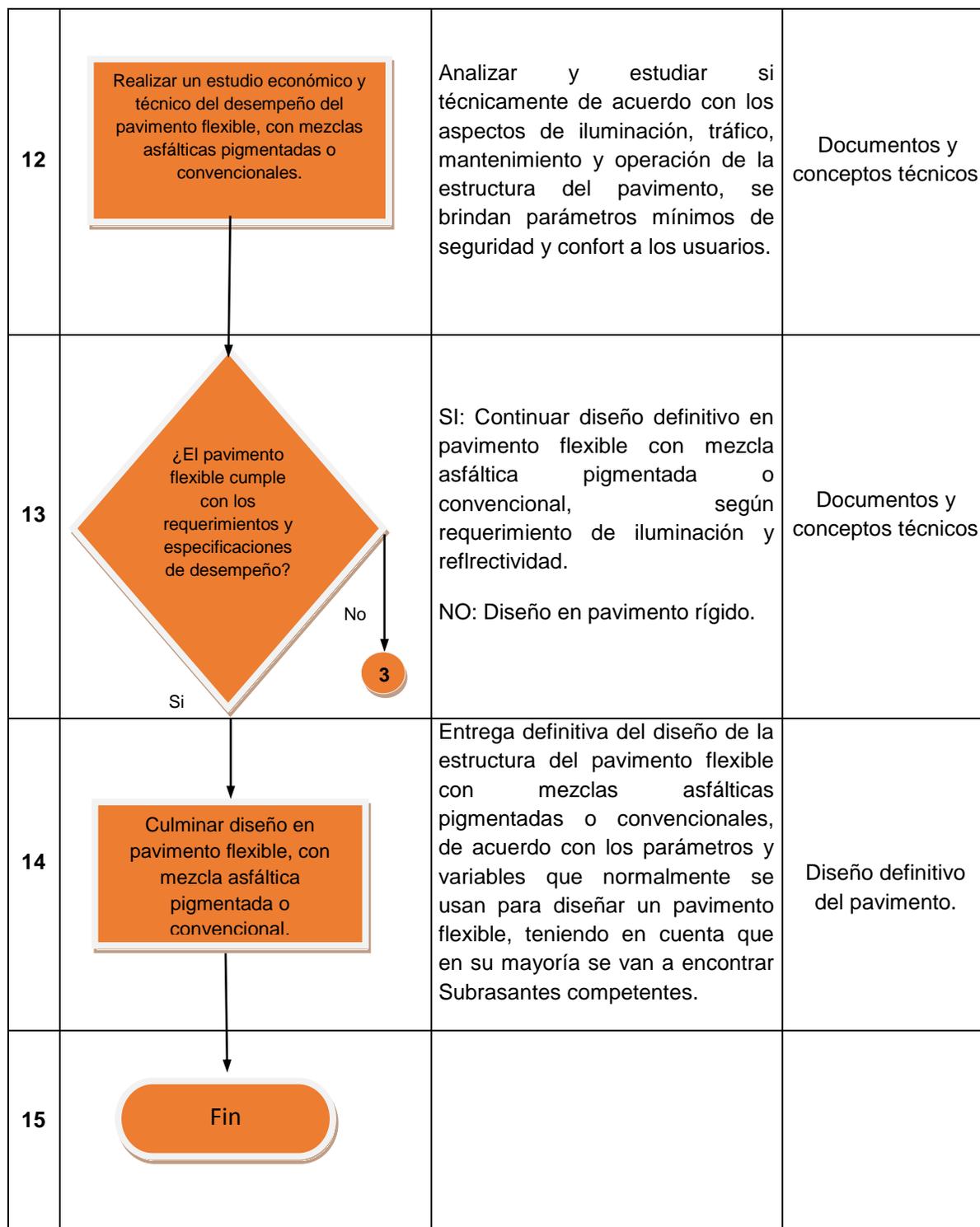


Tabla 15: Diagrama de flujo para la identificación de las variables y parámetros adicionales que deben ser tenidos en cuenta para el prediseño de la estructura del pavimento dentro de un Túnel.
Fuente: Elaboración propia – Juan Gabriel Corredor Universidad Militar Nueva Granada.

7. CONCLUSIONES

- El diseño de la estructura del pavimento dentro de un túnel, maneja los mismos parámetros del diseño de un pavimento convencional a cielo abierto, sin embargo existen algunas variables adicionales de dichos parámetros, que influyen directamente, tales como la visibilidad, ruido, tipo de formación rocosa en donde se construye el túnel, infiltraciones internas, mantenimiento y operación, subrasante, que de no ser analizadas de manera particular y especializada, pueden llegar a generar problemas de sobre estimación o subestimación del diseño, así como afectar el desempeño del pavimento en servicio.
- En Colombia se ha limitado la utilización de pavimentos flexibles a túneles de más de 1 kilómetro, sin embargo ésta longitud parece corta si solo se analiza desde el punto de vista de incendios, otra variable se convierte en la visibilidad, reflectividad y luminosidad, lo cual puede ser mitigado con el uso de mezclas pigmentadas, que pueden ser una buena alternativa para túneles cortos y brindarían un beneficio económico; para ello se requiere que se adelanten investigaciones al respecto.
- Las Subrasantes en túneles por lo general son de muy buenas condiciones, es indispensable que el diseñador de la estructura del pavimento cuente con información de la hidrogeología, geología y geotecnia de la excavación, estos aspectos técnicos pueden influir significativamente para seleccionar la alternativa de diseño más adecuada, entre estos aspectos también se encuentran los materiales requeridos para conformar tanto las capas estructurales, el tipo de concreto para las losas y el sistema de drenaje, elementos que a pesar de ser tenidos en cuenta en todos los diseños de pavimento, en el caso de túneles presenta unos componentes especiales y adicionales.
- Para el diseño de pavimentos en túneles, el estudio y análisis del tránsito presenta exactamente las mismas características que el diseño de un

pavimento convencional, es quizá unas de las variables a las cuales no se les debe realizar tratamiento especial.

- En el diseño de la estructura del pavimento dentro de un túnel, por lo general las características de la subrasante, se maneja como una sola zona homogénea, es decir que éstas se van a comportar de igual forma a lo largo de toda la longitud del túnel; sin embargo por lo estudiado en el presente documento se observó que difícilmente la geología Colombiana va a brindar las condiciones de un macizo rocoso tipo I, lo cual genera que el diseño del pavimento se convierta en un ejercicio dinámico, que se debe reajustar de manera permanente a medida que avanzan las excavaciones del túnel.
- En muchas ocasiones se sobre estima la capacidad de la roca con los primeros ensayos y se propone la solera circular solo en los portales, esperando que a lo largo de toda la longitud se va a encontrar roca sana, pero la incertidumbre y el riesgo geológico es tan grande que a medida avanzada la excavación, se identifican sectores con rocas bastante fracturadas y de baja resistencia, que debe incluirse la solera curva, lo cual debe ser tenido en cuenta nuevamente para el diseño de la estructura del pavimento. Por esta razón es que en algunos túneles largos hay heterogeneidad en tanto en la excavación como en la estructura del pavimento-
- Se recomienda continuar con las investigaciones frente a las variables a las cuales se les debe realizar un análisis especial, esto de acuerdo con lo establecido en el presente documento, dichas investigaciones deben ir acompañadas con el monitoreo de los pavimentos dentro de túneles en servicio, revisando su grado de desempeño, índices de serviciabilidad, confort y seguridad de los usuarios. De igual manera se recomienda que el sistema de drenaje de los túneles de Ancón Sur – Primavera – Camilo C, así como el tema de las mezclas asfálticas pigmentadas, debe ser investigado y analizado en detalle, ya que las mismas constituyen alternativas innovadoras que pueden ser implementadas como soluciones en pavimentos en diferentes túneles.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Vicepresidencia de la República. (2015). Plan Maestro de Transporte Intermodal. Bogotá: Vicepresidencia de la República.
- Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. (2015). Pavimentos de hormigón en túneles Su influencia en la seguridad frente al fuego. España: Vaquero Servicios de Publicaciones, S.L.
- INVIAS. (2016). Pliegos de condiciones No. LP-DO-GTL-048-2016, terminación Túnel de la Línea. Bogotá: Invias.
- Instituto Nacional de Vías. (2015). Definiciones. En Manual de diseño, construcción, operación y mantenimiento de túneles de carretera para Colombia. Bogotá: Invias.
- INVIAS. (2016). Pliegos de condiciones No. LP-DO-GTL-048-2016, terminación Túnel de la Línea. Bogotá: Invias.
- UMNG. (2017). Presentación cátedra Construcción de pavimentos asfálticos. Bogotá: UMNG.
- UMNG. (2016). Presentación cátedra Diseño de pavimentos flexibles. Bogotá: UMNG.
- INVIAS. (2014). Diseño de pavimento rígido para túneles. En VOLUMEN VI ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EL DISEÑO DEL PAVIMENTO. Bogotá: Invias.
- INVIAS. (2013). INFORME DE REVESTIMIENTO. En CAPÍTULO IX TOMO IX-3 TÚNELES KACHOTIS Y PUEBLO NUEVO. Bogotá: Invias.

- INVIAS. (2014). TOMO IX-1 INFORME FINAL DISEÑO TÚNEL DE KACHOTIS. Bogotá: Invias.
- INCO. (2005). Informe de pavimentos. En Volumen IV Estudios y Diseños Túnel Sumapaz. Bogotá: ANI.
- TRABIT. (2017). Mezclas asfálticas pigmentadas. 11/06/2017, de TRABIT Sitio web: <https://www.trabit.com/mbc-color/>
- Invias (2015). Estudio Geotécnico Para El Diseño De Pavimentos Santa Fe De Antioquia Cañas Gordas. Bogotá: Invias.
- Instituto Nacional de Vías. (2008). Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías de bajos, medios y altos volúmenes de transito. Bogotá: Invias.
- Instituto Nacional de Vías. (2006). Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías de bajos y medios volúmenes de transito. Bogotá: Invias

9. ANEXOS