

Ingeniería de pavimentos para carreteras

Alfonso Montero Fonseca*

La Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Colombia ha publicado el libro *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Esta segunda edición consta de dieciséis capítulos que contienen la última información técnica, que contribuye a la formación de profesionales y se convierte en un material importante de consulta para Ingenieros y Docentes especializados en el diseño estructural, construcción y mantenimiento de pavimentos.

La publicación presenta temas entre los que se destacan:

- *Últimos métodos de diseño de pavimentos de concreto de la PCA.*
- *Tecnología del hormigón, materiales y métodos constructivos de los pavimentos de concreto armado.*
- *Control estadístico de calidad del concreto*

Resumen

El Instituto Nacional de Vías del Ministerio de Transporte de la República de Colombia, poseía una metodología de diseño de pavimentos que necesitaba ser estandarizada por razones de orden técnico y económico.

En el orden técnico se puede mencionar, como factor más importante, la actualización a rangos contemporáneos de las variables de entrada para el diseño. En el orden económico se observaba la falta de fallas de normas racionales para la selección de alternativas de pavimentos.

Las instrucciones contemplan el tratamiento de todas las variables necesarias para el diseño y selección de la solución más conveniente de pavimento. Los

* Ingeniero de vías y transporte, Oficina de Investigaciones, Especialista en pavimentos, Especialista en Gerencia de Obra, Profesor Universitario, Investigador y consultor

rangos de tránsito han sido estandarizados, así como el procedimiento para su estimación. Se dan los lineamientos generales para la selección de la resistencia de la subrasante, para la que se han establecido cuatro niveles de resistencia, medida en términos de su módulo resiliente; también se han establecido procedimientos para muestreo y estudios geotécnicos de los suelos por donde será construido el pavimento. Se han establecido seis regiones climáticas en función de las precipitaciones medias anuales y de la temperatura del aire media anual ponderada.

Con los datos obtenidos de aplicar las instrucciones se entra a un sistema de cartas de diseño que permite la selección de alternativas de pavimentos de acuerdo a los materiales disponibles en cada caso y que luego serán comparadas económicamente para la selección definitiva de la solución.

1. Introducción

En varios proyectos recientes se ha podido visualizar el uso de métodos de diseño de veinte años de antigüedad (Método M.O.P.T. 1975) cuyos entornos de tránsito en términos de ejes equivalentes a 8,2 tn fueron extrapolados de un método anterior (Método M.O.P.T. 1970) aparentemente sin fundamento técnico adecuado, llevando a diferencias importantes de espesores según sean los criterios adoptados.

En general los estudios de proyecto y rehabilitación de pavimentos son contra-

tados a consultoras las cuales realizan sus diseños sin una familia de normas claras referente a métodos y variables de diseño que deben ser aplicadas. Esta forma de abordar los proyectos de pavimentos enfrentaba a la administración con dos problemas fundamentales: a) Una falta de diseños racionales y consistentes con las condiciones prevalecientes de la zona en que se ejecutan los mismos y b) Posibilidades de modificación de los proyectos de pavimentos durante la construcción de la obra con los perjuicios económicos que este aspecto conlleva.

Aunque la tendencia actual en el dimensionamiento de pavimentos está orientada hacia la aplicación de conceptos racionales de la mecánica y de la dinámica, la variabilidad de las características de los materiales que componen la estructura ha llevado a que todavía prevalezca, en una gran medida, la experiencia del proyectista.

El conocimiento de las características locales es de suma importancia a la hora de decidir sobre el diseño del pavimento, pero también es de suma importancia evaluar su capacidad estructural con los mismos criterios y herramientas. Con ello se podrán extrapolar resultados y formar una base de datos que se utilizará en diseños integrales, en los cuales queden incluidos todos los aspectos que afectan la performance económica del sistema vía -usuario.

Mediante esta normativa de diseño y rehabilitación de pavimentos se trata de minimizar la influencia de la variabilidad

de criterios de diseño con el consiguiente aumento paulatino de la confiabilidad en los proyectos de pavimentos. Evidentemente lo anterior conducirá al uso cada vez más eficiente de los recursos asignados para construcción y mantenimiento de pavimentos.

El presente trabajo tiene por objeto la obtención e implementación de directivas de diseño estandarizadas, basadas en criterios racionales y actuales del dimensionamiento y rehabilitación de pavimentos. Como resultado se ha obtenido una guía o catálogo de diseño, para ser utilizada tanto por los técnicos del Instituto como por los técnicos de las empresas consultoras. Se entiende que estas normas tenderán a que los diseños sean racionales, confiables y controlables.

Contenidos de la normativa de diseño de pavimentos flexibles

Basados en el diagnóstico realizado y luego de concretada la recopilación de los métodos de diseño de pavimentos nacionales y extranjeros se estimó conveniente organizar la metodología de acuerdo a los parámetros fundamentales de diseño. Estos son: el tránsito, el suelo de fundación y subrasante, las condiciones climáticas, los materiales usados, el diseño estructural incluyendo estrategias de diseño y los costos involucrados.

Tránsito

El tránsito es uno de los parámetros de diseño fundamental. Aunque se puede

permitir ciertas imprecisiones en la determinación de esta variable, siempre será necesario conocerla para poder determinar los espesores de las capas que constituyen el pavimento. Dentro del procesamiento de los datos relacionados con el tránsito es necesario distinguir los siguientes aspectos:

- a) Tránsito promedio diario
- b) Clasificación de vehículos
- c) Factores de equivalencia carga por vehículo
- d) Distribución direccional
- e) Distribución por carril
- f) Variaciones estacionales
- g) Proyección de las variables en la vida de diseño.

Estas variables permiten la estimación y proyección del espectro de carga (o su efecto). En caso de estar disponible, debiera usarse el espectro y no su estimación a partir de datos agregados de tránsito.

Tránsito promedio diario

Es una de las variables fundamentales para la determinación del número de ejes equivalentes que solicitarán el pavimento. En general, se cuenta con conteos en secciones de rutas para las cuales existen cambios significativos de los volúmenes. Los conteos son ejecutados con el objeto de verificar fundamentalmente condiciones de operación por lo que se realizan con mucha más frecuencia que los pesajes de vehículos, aspecto relacionado con la capacidad estructural del pavimento. Sin

embargo, el tránsito promedio diario se convierte en un dato muy importante a la hora de calcular las cargas que circularán por la calzada.

Clasificación de vehículos

Otro aspecto de significativa importancia lo constituye el conocimiento de la composición del tránsito, ya que con ella se estima la configuración y el número de vehículos pesados que son los que interesan al problema que se trata.

Factor de equivalencia de carga

Este es el factor que transforma los vehículos pesados en ejes cargados. En el factor se sintetiza la distribución de carga de los camiones, la configuración de los ejes del vehículo pesado y el tipo de carga que se transporta en el corredor. La determinación de este factor necesita de la ejecución conjunta de censos de carga, conteos volumétricos y de clasificación.

Distribución direccional

La distribución direccional es generalmente asumida por mitades (50% en cada dirección). Sin embargo, en algunos casos la distribución de camiones pesados se da en una dirección debido a que los camiones cargados van en esa dirección mientras que regresan descargados.

Distribución por carril

Este aspecto toma importancia en los casos de calzadas de más de dos carriles. Aun-

que la mayoría de las rutas colombianas son carreteras de dos trochas, se deben realizar consideraciones en este aspecto para los casos particulares en donde los niveles de tránsito son de tal magnitud que exigen multicarriles (accesos a ciudades).

Variaciones estacionales

Las variaciones estacionales tienen especial importancia cuando estas ocurren con estados críticos de la capacidad portante de la subrasante.

Proyección de las variables del tránsito en la vida de diseño

Finalmente un aspecto de primordial importancia consiste en la estimación de los niveles de tránsito esperado durante la vida de diseño del pavimento. En general se reconocen diferentes niveles de sofisticación en la predicción de las cargas de tránsito:

1. Pronosticar las cargas como simple expansión del número de ejes de referencia.
2. Pronosticar los cambios en tránsito promedio diario, porcentaje de camiones y factores de equivalencia por camión por separado.
3. Pronosticar volúmenes de autos, porcentaje de camiones por tipo de vehículo y factores de equivalencia por camión separadamente.
4. Pronosticar volúmenes de autos, porcentaje de camiones por tipo de vehí-

culo y factores por clase de equivalencia por tipo de camión por separado.

5. Pronosticar volúmenes de autos, volúmenes de camiones por clase de vehículo y factores de equivalencia por clase de vehículo por separado.

A partir de las consideraciones anteriores se propusieron los siguientes objetivos particulares:

- Generar formas de estimar las cargas de tránsito necesarias para el dimensionamiento de pavimentos y refuerzos.
- Proveer la información necesaria que permita la estimación de las cargas en magnitud y frecuencia para una determinada zona o área, cuando no se disponga de datos particulares o éstos sean incompletos.

Aspectos considerados en la normativa

- **Zonas de transporte de cargas de características similares**

A partir del tipo de carga predominante en la región y atendiendo a los orígenes y destino de cada mercadería se procedió a zonificar el país. Se puso particular atención en los productos mineros, forestales, agrícolas y de construcción ya que son aquellos los que producen más deterioro del pavimento. Los estudios se basaron en antecedentes producidos por el Ministerio de Transporte. Entre los antecedentes utilizados se destacan las toneladas anuales receptadas y generadas por departa-

mento en el período 1987 - 1993 y distribución de cargas por tipo de vehículo categorizado según el número de ejes. Esta información se utilizará como elemento de consulta de la normativa sobre diseño de pavimentos y en una primera etapa ayudará a establecer las zonas de tránsito homogéneas de ser factible tal división. Las zonas analizadas son: 1) Costa Atlántica, 2) Eje cafetero, 3) Santanderes 4) Zona Cundiboyacense, 5) Antioquia, 6) Valle, 7) Cauca - Nariño - Putumayo y 8) Huila - Tolima - Caquetá.

- **Información de índole reglamentaria**

Como información adicional se describe el sistema de clasificación de vehículos de carga legales vigentes por tipo de eje, y la carga total máxima en función de la longitud y tipo de tren de cargas.

- **Crecimientos de tránsito de cada zona**

Para cada zona se determinaron típicos de tránsito para seis niveles de tránsito promedio diario a efectos de servir como guía en aquellos casos que no tengan datos para su determinación.

- **Determinación de los factores de equivalencia de carga por categoría de vehículo**

A partir de los censos de carga realizados durante el año de 1996, se determinaron los factores daño para cada configuración de vehículo aplicando las formula dadas en la Tabla 1.

Tipo de Eje	Fórmula
Simple de rueda simple	$\frac{(CARGA)^4}{6.6}$
Simple de rueda doble	$\frac{(CARGA)^4}{8.2}$
Tandem	$\frac{(CARGA)^4}{15}$
Tridem	$\frac{(CARGA)^4}{23}$

Tabla 1. Fórmulas para el cálculo del factor daño

Con las relaciones anteriores y el procesamiento de 150.199 vehículos comerciales pesados se obtuvieron los siguientes valores del factor de daño según su configuración:

Tipo de Vehículo	Factor de Daño
Buses Grandes	1.00
C2P	1.14
C2G	3.44
C3-C4	3.74
C5	4.40
C6	4.72

Tabla 2. Factores daño estimados

- **Rangos de tránsito que considera la normativa**

Con los datos determinados en los pasos anteriores se calculó la cantidad de ejes equivalentes de 8,2 tn por trocha y por día, la cantidad de ejes acumulados por trocha para toda la vida útil con dos horizontes: 10 y 20 años.

Con el conocimiento de la distribución se establecieron los rangos de tránsito que considera la normativa medidos en término de ejes equivalentes a 8,2 tn. Estos rangos se fijaron tratando que la longitud de red involucrada en cada uno sea similar. La tabla 3 muestra los rangos finalmente adoptados.

Designación	Rango de Tránsito
T1	$<0.5 \times 10^6$
T2	$0.5-1 \times 10^6$
T3	$1-2 \times 10^6$
T4	$2-4 \times 10^6$
T5	$4-6 \times 10^6$
T6	$6-10 \times 10^6$
T7	$10-15 \times 10^6$
T8	$15-20 \times 10^6$
T9	$20-30 \times 10^6$
T10	$30-40 \times 10^6$

Tabla 3. Rangos de tránsito contemplados en la normativa.

Las categorías t1 corresponden a tránsitos muy bajos con pocos vehículos pesados; la T2 a tránsito bajo, principalmente autos, furgonetas de reparto y vehículos de agricultura, muy pocos vehículos pesados; las categorías T3 y T4 representan volúmenes medios de tránsito con pocos vehículos pesados; las categorías T5, T6 y T7 corresponden a los altos volúmenes de tránsito con numerosos vehículos pesados; y, finalmente, las categorías T8, T9 y T10 representan volúmenes de tránsito muy alto con alta proporción de vehículos pesados cargados.

Metodología para la determinación del número de ejes acumulados de 8,2 tn para el diseño del pavimento

La normativa contempla tres metodologías para el cálculo del número de ejes equivalentes:

- a) Cálculo simplificado a partir de la comparación con rutas existentes, a las que se le conozca el número de ejes equivalentes a 8.2 tn por trocha y por día, con proyecciones con funciones simples. Este procedimiento se deberá utilizar para estudios de prefactibilidad y anteproyectos solamente.
 - b) Cálculo detallado de los ejes equivalentes por trocha y por día a partir de conteos de tránsito y/o pesajes con proyecciones a partir de funciones simples. Este método se debe utilizar únicamente para caminos de la categoría III.
 - c) Cálculo detallado de los ejes equivalentes por trocha y por día a partir de conteos de tránsito y/o pesajes con proyecciones, considerando series históricas. Este método se debe utilizar para caminos de las categorías I y II.
- Consideraciones sobre la confiabilidad en la determinación del número de ejes equivalentes.

La normativa contempla un procedimiento para considerar el nivel de confiabilidad en la estimación del tránsito equivalente a lo largo de la vida de servicio. Para ello es necesario conocer o estimar los Emite de confianza de la regresión de

la serie histórica, si se conociese, o adoptándolos si la serie fuese inexistente.

Suelo de fundación y subrasante

Se entiende por suelo de fundación del pavimento a aquel que sirve de soporte a la capa de subrasante y la capa de subrasante es la que sirve de apoyo a la subbase. Generalmente la diferencia entre suelo de fundación es más aparente que real, debido que en general se utiliza el mismo tipo de suelo con diferencias únicamente en las exigencias de compactación. La subrasante es uno de los principales factores que afectan el desempeño de los pavimentos. Las propiedades deseables en una subrasante son: resistencia durante la vida del pavimento. La subrasante es un material altamente variable en el sitio, por lo que es necesario realizar un detallado estudio de ella para poder diseñar el pavimento. En suelos, las relaciones entre tipo de suelo, densidad, contenido de agua y resistencia son complejas; además, estos comportamientos son aún más difíciles de evaluar cuando se habla de cargas dinámicas. Debido a estas complejidades, es prácticamente imposible establecer reglas únicas para todos los casos que se pueden presentar en realidad. No obstante, en esta normativa, se convierten técnicas y procedimientos para la mejor caracterización de esta propiedad fundamental. Los objetivos perseguidos en esta etapa del estudio son:

Formular un procedimiento que permita establecer la resistencia de diseño, atendiendo especialmente a las características particulares del país, tanto en la diversidad de suelos como en los medios técnicos disponibles.

Recomendar consideraciones prácticas de diseño y tratamiento acerca de subrasantes de suelos problemáticos, condiciones de drenaje y subdrenaje y su relación con el medio ambiente.

Aspectos considerados en la normativa

- Macro - zonas de tipologías de suelos similares

Se establecieron macro zonas geotécnicas, a efectos de ubicar al proyectista dentro de un marco de referencia para la planificación de los estudios geotécnicos necesarios para la caracterización de la subrasante, desde el punto de vista del diseño del pavimento. Para ello se trabajó con información disponible, por ejemplo los estudios realizados por el Instituto Agustín Codazzi. El resultado es un plano con una breve referencia cualitativa de los suelos principales. Se presenta también una descripción geomorfología para completar la información de suelos.

- Entornos de resistencia de subrasante para diseño

Basándose en los resultados de la recopilación de datos de pavimentos existentes, complementando con los estudios anteriores (edafología y geomorfología), se establecieron los entornos de resistencia de subrasante que contempla la normativa. Ellos son:

Designación	Rango de módulo resiliente (Kg 1CM2)
S1	300 - 500
S2	500 - 700
S3	700 - 1500
S4	1500 - 2000

Tabla 4. Entornos de resistencia de subrasante.

- Procedimiento para determinar la resistencia del terreno

En la normativa se consideran criterios para establecer secciones homogéneas del tramo a pavimentar, requerimientos de muestreo, selección del valor de resistencia del terreno considerando costos de mantenimiento y construcción, procedimiento para estimar la humedad de servicio, condiciones de compactación y tipos de ensayo a realizar.

- Tipos de suelos problemáticos y recomendación de soluciones para su utilización.

Con el conocimiento de técnicos y expertos se identificaron los principales problemas respecto a los suelos, encontrados en el medio; juntamente con la identificación se establecieron soluciones, en caso de existir, y una delineación de los aspectos a considerar para diseñarlas y construir las.

Condiciones Climáticas

Cuando se habla de la incidencia de las condiciones climáticas sobre los pavimentos, dos aspectos cobran significativa importancia: el régimen de lluvias y su influencia sobre el comportamiento de la subrasante y las capas no tratadas del pavimento, y el régimen de temperatura y su influencia sobre las capas de rodamiento y base.

El clima es el responsable de la degradación de las rocas naturales, la durabi-

lidad de los materiales con los que se ha construido el pavimento y, dependiendo del subdrenaje, la estabilidad de los materiales no tratados del pavimento. Las condiciones climáticas influenciarán también el contenido de humedad de equilibrio de los suelos. El ingeniero deberá considerar las condiciones climáticas y evitar el uso de materiales muy susceptibles a la temperatura y/o humedad de equilibrio de los suelos. El ingeniero deberá considerar las condiciones climáticas y evitar el uso de materiales muy susceptibles a la temperatura y/o humedad en condiciones adversas. Los objetivos perseguidos en esta parte de la normativa son:

- Formular un procedimiento que permita relacionar la resistencia del suelo y la calidad de los materiales de las unidades de obra con las condiciones climáticas imperantes en cada caso.
- Relevar y presentar la información necesaria para considerar las condiciones climáticas en el diseño.

Aspectos considerados en la normativa

- **Regiones de climatología similar**

Dada la gran extensión del país, fue imperativo diferenciar regionalmente la climatología con el objeto de que sirva de guía al ingeniero de pavimentos y, en caso

de ser primordial, se realizan los estudios necesarios para completar esta información. Un aspecto que se estimó de mucha utilidad es el de tratar de relacionar los suelos típicos con esta clasificación climática regional dado que el comportamiento de ellos es altamente sensitivo a variaciones en el clima, sobre todo a la cantidad de lluvia. La normativa da recomendaciones para tratar este aspecto. A efectos de definir la tipología de clima la normativa adjunta planos de pluviometría y de temperaturas del aire medias anuales ponderadas en puntos representativos del país.

La normativa define seis tipologías de clima en función de la precipitación media anual y la temperatura del aire media anual ponderada (WXMT) como se observa en la Tabla 5.

El manual de diseño contempla en sus cartas de diseño los seis tipos de regiones climáticas.

Materiales usados

Las selección de materiales en el diseño de pavimentos se basa en una combinación de disponibilidad, factores económicos y experiencia previa. Todos estos factores deben ser evaluados durante el diseño, a efectos de seleccionar aquellos que mejor se adapten a las condiciones de servicio.

No.	REGIÓN	TEMPERATURA WMAAT (°c)	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (mm)
R1	Fría seca y fría húmeda	<13	<2000
R2	Templado seco y templado semi húmedo	13 - 20	<2000
R3	Templado húmedo	20 - 30	<2000
R4 2000 - 4000	Cálido húmedo	13 - 20	
R5 2000 - 4000	Calido húmedo	20 - 30	
R6	Cálido muy húmedo	20 - 30	<4000

Tabla 5. Tipos de regiones climáticas.

Es de esperar que el proyecto se refiera a las especificaciones vigentes sobre calidad de materiales. Sin embargo, puede darse el caso que algunas especificaciones estén desactualizadas o bien se generen nuevas especificaciones de materiales; para solucionar este tipo de inconvenientes el método más directo consiste en la actualización periódica y sistemática de los parámetros de calidad estandarizados y su relación con el diseño.

Los materiales deben ser clasificados, de acuerdo a su comportamiento fundamental, en varias categorías con diferentes clases, de acuerdo a sus características de resistencia. Los objetivos perseguidos en esta parte del estudio fueron:

- Identificar todos los materiales que pueden ser usados en la construcción de pavimentos que posean probado comportamiento en servicio, permitiendo incorporar aquellos que por sus relaciones costo - efectividad sea conveniente observar su desempeño.

- Establecer un sistema fácil y efectivo de identificación de los distintos materiales que pueden ser utilizados.

Aspectos considerados en la normativa

- **Relevamiento, enumeración y descripción de los diferentes materiales posibles de ser usados.**

Una de las primeras tareas a realizar en un estudio de materiales consiste en el relevamiento y enumeración de los diferentes materiales a utilizar en la construcción de pavimentos. En la presente normativa se incluyeron los materiales utilizados en las unidades de obra, tales como, concretos asfálticos, bases de materiales granulares sin trata, bases de grava - cemento. Etc.

Con el objeto de concentrar la normativa se incorporaron los materiales con probado comportamiento en servicio en particular la capa de base ya que en muchos caos es la que soporta la mayor parte de

la carga. Sin embargo, también se han incluido diseños contemplando el uso de materiales clásicos pero con poco uso en el medio.

Al igual que en el punto anterior se presentan los distintos tipos de superficie de rodamiento de los pavimentos flexibles en el país; concreto asfáltico en caliente, concreto asfáltico en frío y tratamiento bituminoso superficial.

- **Redacción de una síntesis de las especificaciones técnicas más importantes**

Con el fin de que la guía de diseño sea consistente con las especificaciones vigentes, y que al ingeniero de pavimentos le resulte relativamente simple y fácil identificar el tipo de material que se utilizará, se consideró imprescindible contar con una síntesis de las especificaciones técnicas más importantes de cada unidad de obra. La normativa contempla 40 materiales diferentes, abarcando desde los materiales usados en subrasantes hasta los materiales usados en capa de rodamiento. Con el objeto de lograr una identificación rápida y precisa se generó un sistema de identificación que permite diferenciar cada material y/o unidad de obra en forma rápida y precisa.

- **Guía de disponibilidad y costos**

Este capítulo de la normativa finaliza suministrando una tabla guía para la evaluación de la disponibilidad de materiales y la determinación de sus costos.

Cartas de diseño

El procedimiento de diseño desarrollado es aplicable a pavimentos de carreteras interurbanas de dos o más carriles, abarcando todas las gamas posibles de tránsito. La normativa se fundó en una combinación de métodos existentes, experiencia, la teoría de comportamiento estructural y los materiales existentes. Sin embargo, la normativa propuesta no excluye otros métodos de diseño que por la particularidad propia del caso deban ser utilizados.

El diseño estructural de pavimentos tiene como fin el de poder proveer protección a la subrasante mediante la interposición de capas, incluidas las rehabilitaciones, y de esta forma obtener un nivel de serviciabilidad fijado minimizando los costos totales. El diseño estructural contempla factores de tiempo, tránsito, materiales de pavimentos, suelos de subrasante. La presente normativa trata de cubrir un rango de tipos de pavimentos y materiales corrientemente usados en la práctica local.

Cuando un pavimento de carretera alcanza el final de su vida de servicio será rehabilitado de alguna forma, y de esta manera se extiende su vida de servicio. Para que el ingeniero de pavimentos pueda realizar una comparación insesgada entre alternativas propuestas, necesita definir una base común de comparación, generalmente los costos. Los objetivos de la normativa respecto al diseño fueron:

- Encontrar un método de diseño calibrado a las condiciones del país, para verificar estructuras en diferentes condiciones a las de calibración y/o validación.
- Generar un procedimiento para considerar las estrategias de mantenimiento dentro de la selección de alternativas de diseño.
- Redactar la normativa que se obtendrá como resultado del estudio que se realiza, incluyendo un método de evaluación económica para comparar alternativas de diseño.

Calibración y ejecución de las cartas de diseño

El Instituto de Vías de la Universidad Nacional del Cauca posee datos sobre pavimentos existentes que fueron la base para calibrar y validar la normativa que se propone.

En la primera etapa de la Investigación Nacional de Pavimentos se relevaron datos de 17 tramos de la red nacional mientras que en la segunda y tercera etapa se relevaron 43 ramos con el objeto de calibrar los modelos de deterioro del HDM-III; esto dio un muy buen inicio para establecer las secciones de las estructuras más usadas y su comportamiento en servicio.

A partir de esa base de datos se asignaron campos de interés de diseño estructural, incluyendo número de ejes equivalentes

soportados por la estructura, valor soporte de la subrasante, espesores y tipo de materiales utilizados, edad del pavimento. Los otros datos complementarios fueron estimados a partir de los anteriores, por ejemplo, el número estructural.

Teniendo en cuenta la historia del pavimento, las condiciones ambientales y los relevamientos deflectométricos, se estimó la resistencia de la subrasante en su estado de equilibrio.

Se estableció el grado de deterioro teniendo presente que:

- Si hubiese habido intervenciones se asumió que la misma fue realizada cuando se alcanzó un índice de serviciabilidad de 2.
- Si hubiese habido construcciones se asumió que la misma fue realizada cuando se alcanzó un índice de serviciabilidad de 1.

Cuando el pavimento no alcanzó ninguno de los umbrales anteriores se procedió a estimar el índice de serviciabilidad aplicando el criterio del método AASHTO; con ello se estableció la caída del índice, y consecuentemente se estimó el número de repeticiones según ese método de diseño. Para estos casos la aplicación de los métodos de diseño basados en la serviciabilidad terminal no se utilizaron, por lo que se recurrió a métodos empírico - mecánicos. Al menos dos estimaciones del número de ejes equivalentes se calcularon por cada sección de calibración. En la

confección de la presente normativa se utilizaron los métodos AASHTO versión 193 y racional (mecánico - empírico) basado en las curvas de fatiga desarrolladas que involucran el nivel de fisuramiento en servicio.

La evaluación se realizó estadísticamente asumiendo a las variables de entrada de diseño como variables aleatorias independientes y a la diferencia entre el número de ejes equivalentes soportados por la estructura y a los calculados por los métodos de diseño usado como variables aleatorias dependientes. El establecimiento del o los métodos que más se ajustan a las condiciones particulares del país, se realizó en base a minimizar el error en el número de ejes equivalentes, es decir buscando que el mismo tienda a cero y con varianza mínima. La comparación entre varianzas de errores calculadas al partir de la aplicación de diferentes métodos de diseño, dio la bondad de los datos estimados para verificar los diseños. Si bien la calibración mostró una gran dispersión, permitió la selección del método de diseño usado en la verificación de las alternativas propuestas en las cartas. El método de diseño más confiable se procedió a verificar las secciones estructurales seleccionadas para validación. Posteriormente se propusieron estructuras para aquellas combinaciones de resistencia de subrasante y tránsito que no contaban con diseños aprobados.

A partir de la información disponible se elaboraron las cartas de diseño para cada condición climatológica y diferentes tipos

de bases y carpetas de rodamiento. Las cartas se han desarrollado bajo la hipótesis de que no serán necesarias intervenciones estructurales importantes durante la vida del pavimento, mientras se mantengan las condiciones de resistencia de subrasante y nivel de tránsito

Una vez seleccionados los valores de módulo resiliente de la subrasante y estimado el número de ejes equivalentes, se seleccionan los diseños factibles de ser construidos considerando la disponibilidad de materiales.

Evaluación y selección de alternativas de pavimentos

La normativa establece la forma de evaluar distintas alternativas de pavimentos considerando costo inicial, costo de mantenimiento, valor residual y costo de los usuarios, si se dispone de éste.

El método consiste en seleccionar la alternativa que presente el menor valor presente en los costos; para ello es necesario establecer políticas de mantenimiento según la alternativa de pavimento y estimar la vida residual del pavimento.

Rehabilitación de pavimentos existentes

Finalmente, la guía posee un capítulo dedicado a la rehabilitación de pavimentos existentes. Primeramente, diferencia la rehabilitación estructural de la rehabilitación superficial y para cada una de ellas se dan recomendaciones de estudios de

campana y posibles trabajos previos a realizar.

Conclusiones

Este trabajo tiene por objeto la presentación formal de la guía de diseño de pavimentos flexibles para la República de Colombia. La guía que se presenta incluye únicamente aquellos pavimentos de carácter interurbano, caminos de la red primaria y secundaria, accesos a instalaciones industriales, etc. ya sean públicos o privados.

El principal objetivo de esta guía fue el de establecer recomendaciones que permitan normalizar el diseño de pavimentos flexibles en Colombia. Cabe destacar que este es el primer intento de normalización del proceso de dimensionamiento de pavimentos en el ámbito del país. En las presentes instrucciones no se incluyen pavimentos de hormigón, todas las soluciones presentadas son de tipo asfálticas; aquellos casos en que por conveniencia técnica, económica o ambas, deban ser diseñados, ejecutados y conservados.

Las instrucciones contemplan el tratamiento de todas las variables necesarias para el diseño y selección de la solución más conveniente de pavimento. Los rangos de tránsito han sido estandarizados, así como el procedimiento para su estimación. Se dan los lineamientos generales para la selección de la resistencia de la subrasante, para la que se han establecido cuatro niveles de resistencia, medida en términos de su módulo resiliente; también

se han establecido procedimientos para muestreo y estudios geotécnicos de los suelos por donde será construido el pavimento. Se han establecido seis regiones climáticas en función de las precipitaciones medias anuales, y de la temperatura del aire media anual ponderada.

Con los datos obtenidos de aplicar las instrucciones se entra a un sistema de caras de diseño, que permite la selección de alternativas de pavimentos de acuerdo a los materiales disponibles en cada caso, y que luego serán comparadas económicamente para la selección definitiva de la solución.

Bibliografía

SHELL PAVEMENT DESIGN MANUAL. SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM COMPANY LIMITED, LONDON, 1978.

ADDENDUM TO THE PAVEMENT DESIGN MANUAL. SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM COMPANY LIMITED, LONDON, 1985.

THICKNESS DESIGN. ASPHALT PAVEMENTS FOR HIGHWAYS AND STREETS. THE ASPHALT INSTITUTE, MANUAL SERIES No. 1 (MS-1) 1984.

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF THE ASPHALT INSTITUTE'S THICKNESS DESIGN MANUAL (MS-1) NINTH EDITION. THE ASPHALT INSTITUTE, RESEARCH REPORT No. 82-2 (RR - 82-2) 1982.