

DISEÑO DE PAVIMENTOS REFORZADOS: EVALUACIÓN DE FACTORES DE CARGA Y SUBRESISTENCIA POR EL MÉTODO LRFD

JUAN FERNANDO ARANGO LONDOÑO¹

Resumen

La introducción de los pavimentos de concreto reforzado como alternativa de pavimentación, hace necesario desarrollar una metodología de análisis por medio de factores de carga y factores de subresistencia (LRFD por sus siglas en inglés), basada en el concepto de confiabilidad.

Este documento presenta las bases para la elección de los factores de subresistencia y de los factores de carga, con sus respectivas combinaciones de carga, para diferentes niveles de confiabilidad por el método de Montecarlo para los casos de fuerza axial y cortante (punzonamiento).

Este artículo es parte de los resultados del proyecto de investigación “Desarrollo, implementación y seguimiento del Pavimento Larga Vida”, desarrollado en el Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín – ITM.

1 Ingeniero Civil y Especialista en Estructuras de la Universidad Nacional de Colombia. Estudiante de Doctorado en Estudios de Ciencia y Tecnología y Gestión de la Innovación Tecnológica en la Universidad del País Vasco (UPV-España). Líder del grupo de investigación en Materiales y Tecnologías de Construcción MYTEC del ITM. Investigador principal del proyecto “Desarrollo, implementación y seguimiento del Pavimento de Larga Vida PLV”. Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín, ITM. Abril de 2005.
E-mail: juanarango@itm.edu.co - juarangol@mixmail.com

Palabras clave

Pavimento, Concreto, Diseño, Confiabilidad, LRFD, Método.

Abstract

The introduction of reinforced pavements as an alternative for paving, make necessary to develop a design method by Load and Resistance Factor Design (LRFD) based on reliability analysis.

This paper proposes a basis to choose load and resistance factors and its load combinations, to achieve target reliability levels using Montecarlo technique for flexure and shear (pouch).

This work is a research result of the proyect “Development, implementation and behavior of the Pavimento de Larga Vida-PLV- (Long Lasting Pavement), at the Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín, Colombia – ITM.

Key words

Pavement, Concrete, Design, Reliability, LRFD, Reinforcement.

1. INTRODUCCIÓN

La introducción de pavimentos reforzados exige el desarrollo de una metodología de análisis y diseño diferente a la propuesta para los pavimentos rígidos tradicionales no reforzados, los cuales se analizan con base en la metodología de diseño por esfuerzos de trabajo y fatiga. El diseño de secciones de pavimento reforzado, por medio de la metodología de esfuerzos de trabajo, acarrea las mismas dificultades que el uso de ese método representaba para las edificaciones: un juego determinado de esfuerzos admisibles no garantizaban un nivel constante de seguridad para todas las estructuras, y no es seguro su uso cuando se tienen fuerzas que contrarrestan a otras en la estructura. La única ventaja relativa del método de esfuerzos admisibles es su simplicidad.

La base del método LRFD es establecer requisitos de diseño basados en los esfuerzos últimos de las secciones críticas de un elemento. El método asigna factores de seguridad parciales para aquellas variables de las ecuaciones de diseño que son impredecibles, como son la pérdida de resistencia o sobrecarga de los elementos.

El formato de las ecuaciones de diseño para el método LRFD es del tipo:

Resistencia factorada \geq efecto de las cargas factoradas

$$\phi M_n \geq M_u \quad (\text{Ecuación 1})$$

No se ha reportado literatura que permita establecer los parámetros de diseño por la metodología LRFD de pavimentos reforzados, como son los factores de subresistencia (ϕ) y los factores de mayoración de carga, en especial, para el diseño de pavimentos con base en las condiciones particulares de tránsito del territorio colombiano.

Para el caso del Pavimento de Larga Vida (PLV)², un tipo de pavimento reforzado diseñado por metodología LRFD, se propuso

2 El Pavimento Larga Vida (PLV) es un desarrollo propuesto por el ingeniero Andrés Uriel Gallego Henao en 2001 como una alternativa durable de pavimentación con base en elementos de concreto reforzado.

de forma provisional (Arango, 2004) la adopción de factores subresistencia idénticos a los especificados por la Norma Sismo Resistente Colombiana (NSR98) para los diferentes tipos de sollicitaciones. Para la determinación de los factores de mayoración, se realizó un ejercicio simple consistente en determinar la carga para el 98% de confiabilidad de no excedencia, a la cual se aplicó un factor de mayoración de 1,4, el cual a su vez se combinaba con un factor de impacto de 1,3 equivalente al máximo que se utiliza en diseño de puentes. Si bien, estas consideraciones iniciales adoptadas para el caso del PLV son razonables, no permiten establecer el grado de confiabilidad del diseño obtenido en el sentido estricto que define el método LRFD.

El objetivo del artículo es presentar los valores de confiabilidad que se obtienen para diferentes factores de mayoración y combinaciones de carga, que permitan la selección objetiva de los parámetros de diseño por la metodología LRFD para pavimentos reforzados basado en la estadística de cargas vehiculares en Colombia.

2. DISEÑO POR EL MÉTODO LRFD

Para aplicar el método LRFD se requiere determinar los diferentes factores de carga y subresistencia por medio de un análisis probabilístico que tenga en cuenta la variabilidad de los parámetros de diseño en los estados límites de resistencia (Ellingwood, 1980). Los diferentes factores se asocian a niveles dados de seguridad que se quieren brindar al sistema.

En el método LRFD, la seguridad se asocia al concepto de confiabilidad. Debido a que las decisiones de la ingeniería de diseño se deben realizar en la presencia de incertidumbres, la cual proviene de la naturaleza aleatoria de muchos parámetros del diseño, se requiere una forma de cuantificar esas incertidumbres y el riesgo potencial asociado, de tal forma que se provea un margen de seguridad a las estructuras. Toda vez que la certeza en el diseño es imposible de lograr, la teoría de la probabilidad y el diseño basado en la confiabilidad permiten establecer una metodología para asegurar una baja probabilidad de desempeño no favorable.

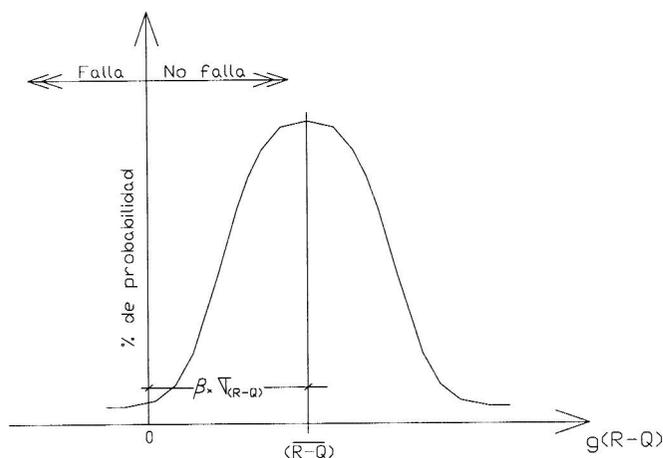
La confiabilidad se determina a partir de una función que relaciona la resistencia de la sección y el efecto de las cargas. Tomando la inequación fundamental de diseño (Ecuación 1) como igualdad, si el resultado de la resistencia factorada menos el efecto de las cargas factoradas da un valor negativo, esto indica una condición de falla. Los casos en que da un resultado positivo, supone una condición de desempeño satisfactorio.

Mediante la técnica de Montecarlo se pueden generar de forma aleatoria, con base en las estadísticas de las variables, combinaciones de efectos de cargas y resistencias. El análisis estadístico de los resultados permite establecer el índice de confiabilidad para una combinación de factores de subresistencia y factores de mayoración. Esta metodología se conoce en la literatura como análisis de confiabilidad de nivel I.

La confiabilidad se expresa a través del índice de confiabilidad (β), el cual indica la distancia que hay desde la media hasta el punto de origen de la gráfica de la función de probabilidades, expresada en unidades de desviación estándar.

$$\beta = \bar{Z} / \sigma_z \quad (\text{Ecuación 2})$$

FIGURA 1. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA CONFIABILIDAD



Los factores obtenidos se asocian así a las estadísticas determinadas para las cargas y las resistencias de las secciones. En Colombia se han determinado las distribuciones de cargas para los diferentes tipos de ejes vehiculares a partir de trabajos como el del Instituto Nacional de Vías –INVÍAS (Sánchez, 1999). Las estadísticas incluyen la media y varianza de las cargas en las carreteras colombianas para los diferentes vehículos (ver tabla 1). Por otra parte, no se conocen las estadísticas asociadas a la resistencia de secciones reforzadas, utilizándose en Colombia directamente aquellos determinados por estudios como el SP577 de la *National Bureau of Standards* de Estados Unidos, los cuales son similares a los adoptados por la NSR-98.

TABLA 1. ESTADÍSTICA DE EJES COLOMBIANOS

Camión	Eje	u (kN)	V (%)	Carta legal máxima en Colombia (CLM)
C2	1	34.3	0.25	6
	2	9.49	0.25	11
C3	1	52.9	0.20	6
	2	182.3	0.25	22
C4	1	105.6	0.25	14
	2	183	0.25	22
C2-S1	1	40.8	0.15	6
	2	71.8	0.25	11
	3	67.2	0.25	11
C3-S1	1	40	0.15	7
	2	78.9	0.20	22
	3	101.8	0.25	11
C2-S2	1	36.7	0.15	6
	2	87.5	0.25	11
	3	108.7	0.20	22
C3-S2	1	48	0.15	7
	2	167.7	0.20	22
	3	165.5	0.20	22
C3-S3	1	48.9	0.15	7
	2	190	0.20	22
	3	222.9	0.20	24

La técnica de Montecarlo permite incluir el efecto de la variabilidad de las dimensiones de las secciones. Debido a que no se encuentran reportes estadísticos de la variación de esta propiedad geométrica en Colombia, ese tipo de análisis no se presenta en el artículo.

3. DEFINICIÓN DE VARIABLES DEL MÉTODO

Las variables que intervienen en el desempeño de los pavimentos reforzados son la resistencia de los materiales, expresadas a través de la resistencia a la compresión del concreto y las cargas del tránsito³. Para las cargas vehiculares se introducirá el análisis de esfuerzos en el pavimento asociado a las cargas estáticas y a las cargas dinámicas.

Como cargas de diseño se adoptarán las cargas legales máximas (CLM) vigentes en Colombia, relacionadas en la última columna de la tabla 1 para cada tipo de vehículo.

La confiabilidad para flexión se determinará asumiendo un $\phi = 0,9$. Para el esfuerzo de punzonamiento (cortante), se utilizará un factor $\phi = 0,85$.

En función de los efectos que se pueden presentar en una estructura de pavimento, se analizarán dos casos de carga fundamentales: carga estática y carga dinámica.

La carga estática está asociada al efecto directo de la masa en el eje y sus efectos en la estructura de pavimento.

Las cargas dinámicas son aquellas resultantes del desplazamiento de los vehículos y por ello varían de forma constante en un pavimento. Las cargas dinámicas se manifiestan como un incremento local en la carga total sobre el pavimento por efecto de la

3 En el diseño de pavimentos rígidos se consideran como factores de diseño la resistencia del concreto a través del Módulo de Rotura (MR), la resistencia de la subrasante (k), el tráfico vehicular con su frecuencia, y el período de diseño. En este análisis no se considera de forma preliminar el período de diseño, pues está asociado a condiciones de fatiga que se deben analizar por otras metodologías diferentes al método LRFD.

respuesta de la suspensión del vehículo a las ondulaciones de la vía y la rugosidad de la superficie. Los factores principales que afectan la porción dinámica de la carga total son la masa del vehículo, su velocidad, el perfil de la vía y el tipo de suspensión.

Las suspensiones que mayor carga dinámica generan son las “*walking beam*” y “*single point*”, las de resortes de hojas se encuentran en un punto medio de incremento de carga, mientras las de sistemas de aire generan la menor carga dinámica. A pesar de los múltiples estudios sobre el tema (Sweatman, Gillespie, Karamihas, Pidwesbesky y otros) es difícil establecer una generalización sobre los efectos de las cargas dinámicas en los pavimentos debido a las múltiples características de los ejes y de la rigidez de las llantas de los vehículos en circulación.

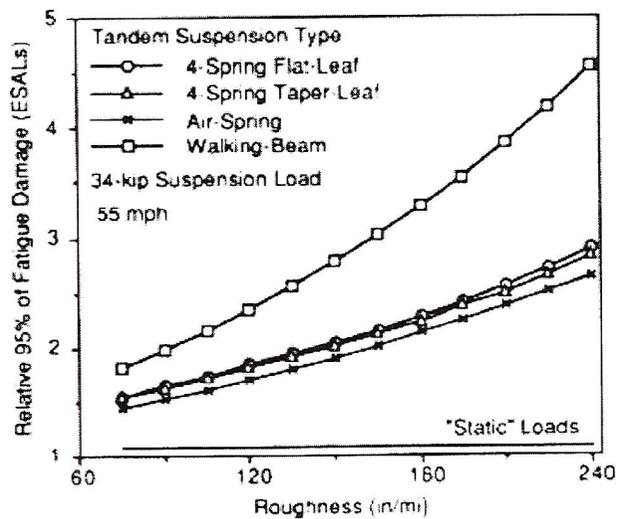
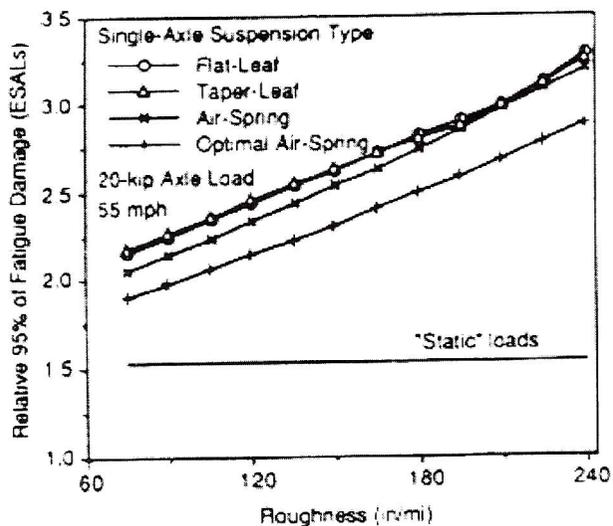
Con el fin de determinar las combinaciones de carga, se estimaron a partir de los trabajos de Gillespie (1983, 1994) y con base en la ley de la cuarta potencia para fatiga, los factores equivalentes de amplificación de la carga estática en los pavimentos rígidos (tabla 2). Los gráficos representan el 95% de confiabilidad para el valor de amplificación dinámica de los ejes simples y tándem, los cuales se reportan como los únicos de interés para efectos dinámicos.

La evaluación de confiabilidad se realizará tomando los valores máximos por efectos dinámicos, en adición a los estáticos productos de la carga de tránsito.

TABLA 2. EQUIVALENTES DE AMPLIFICACIÓN ESTÁTICA ASOCIADOS A IMPACTO

Eje	Rugosidad (in/mi)	Amplificación dinámica (adim)	Valor medio de diseño
Simple	75	1.12	1.2
	240	1.24	
Tándem	75	1.02	1.15
	240	1.28	

FIGURA 2. INFLUENCIA DE LAS SUSPENSIONES DE LOS EJES EN LA FATIGA DE UN PAVIMENTO RÍGIDO (TOMADO DE UNIVERSIDAD DE MINNESOTA)



4. RESULTADOS OBTENIDOS

Caso de carga estática de los ejes

El efecto de las cargas estáticas sobre un pavimento se analizó a través de la combinación de carga expresada en la ecuación 3:

$$\text{Cargas factoradas} = \gamma_p * P_n \quad (\text{Ecuación 3})$$

Con base en las estadísticas para los ejes colombianos, se realizaron pruebas de Montecarlo, aplicando 10,000 rondas en la evaluación de cada factor de mayoración de prueba. Los esfuerzos para cada ronda se calcularon con base en las mayores solicitaciones de un pavimento reforzado.

FIGURA 3. PRUEBA DE MONTECARLO PARA EFECTOS DE UN EJE SIMPLE
CON BASE EN UNA CARGA DE 110 kN

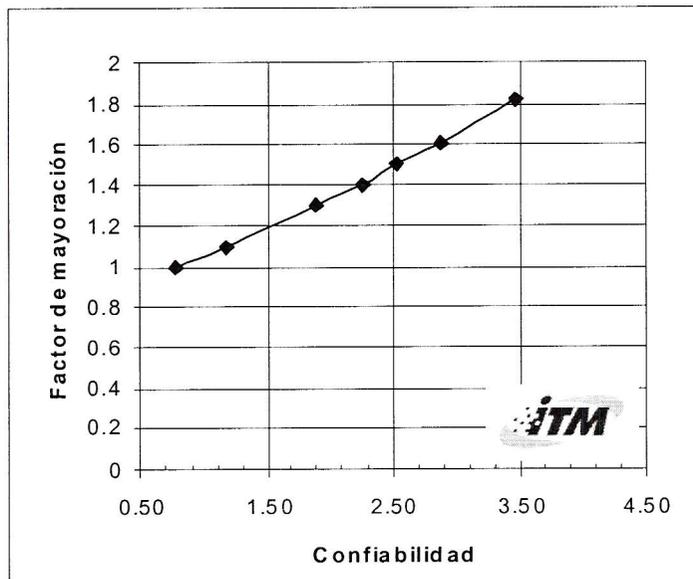
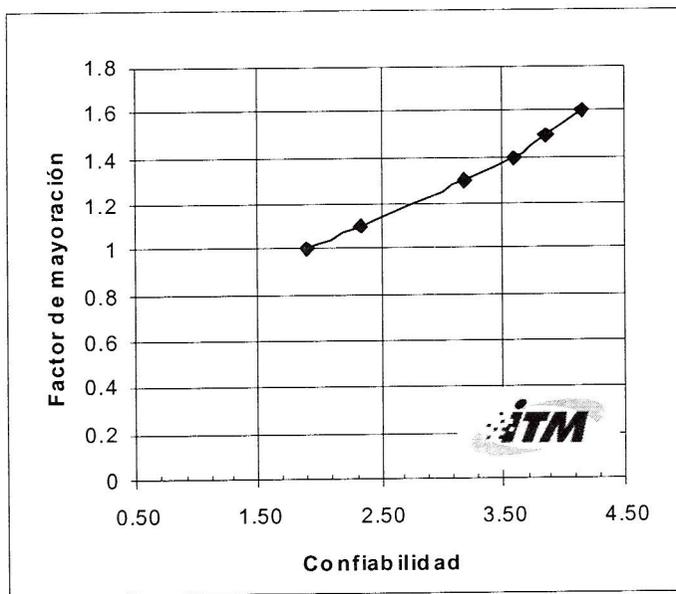


FIGURA 4. PRUEBA DE MONTECARLO PARA EFECTOS DE UN EJE TÁNDEM,
CON BASE EN UNA CARGA DE 220 kN



Para el caso de cortante (punzonamiento), se evaluó la confiabilidad con base en las estadísticas de variación de resistencia a la compresión reportadas por Ellingwood (1980), a partir de una especificación para el concreto de 28 MPa (4.000 psi).

Toda vez que el diseño por punzonamiento parte de la selección de un espesor de sección que garantice que se cumpla la ecuación 4, el análisis de confiabilidad se efectuó con base en la variación de la resistencia a la compresión especificada del hormigón ($f'c$). El espesor de análisis seleccionado es de 125 mm, el cual cumple la condición de no punzonamiento de la sección para las CLM adoptadas. Así, la confiabilidad obtenida no depende de los factores de mayoración introducidos, excepto para valores mayores de 1,8.

$$Pu < \phi V_{pc} \quad (\text{ecuación 4})$$

Donde:

Pu: carga mayorada

V_{pc}: resistencia al punzonamiento de la sección

$$V_{pc} = \phi * A_p * 1,1 * (f'c)^{0,5}$$

La confiabilidad obtenida con base en estas consideraciones fue de 3,1.

Caso de combinación de cargas estáticas y cargas dinámicas

Toda vez que el efecto de las cargas dinámicas se presenta de forma simultánea con las cargas estáticas, las combinaciones de carga en el método LRFD para impacto se pueden expresar de la forma:

$$\text{Cargas factoradas} = \gamma_p * P_n + \gamma_i * I \quad (\text{Ecuación 5})$$

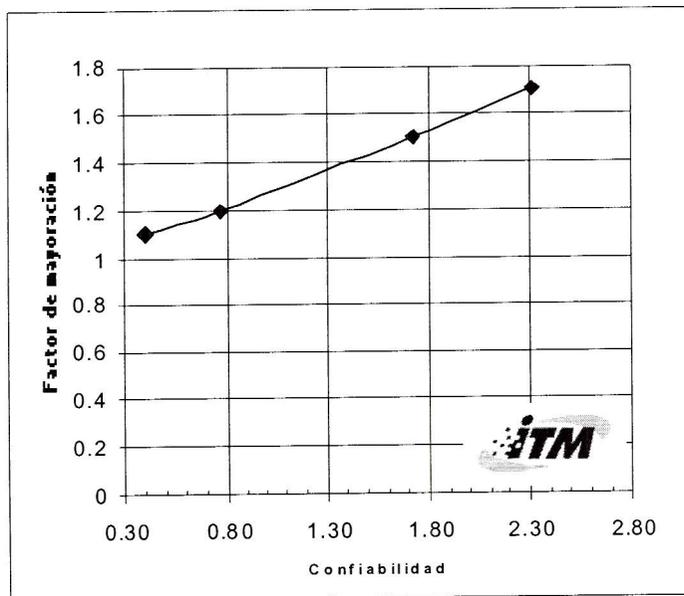
Con base en las estadísticas para los ejes colombianos, se realizaron pruebas de montecarlo, aplicando 10,000 rondas en la evaluación de cada juego de factores de mayoración de prueba. Metodológicamente se consideró un factor de mayoración para impacto de 1, y una variación para el factor de mayoración de carga estática entre 1,82 y 0,75. Los esfuerzos para cada ronda se calcularon con base en las mayores solicitaciones de una sección de pavimento reforzado.

Toda vez que el efecto del impacto se presenta como un porcentaje de la carga estática, la ecuación 5 se puede presentar convenientemente de la forma:

$$\text{Cargas factoradas} = \gamma_{e+d} * P_n \quad (\text{Ecuación 6})$$

La figura 5 presenta los valores de confiabilidad obtenidos para un γ_{e+d} que incluye los efectos dinámicos y estáticos.

FIGURA 5. PRUEBA DE MONTECARLO UN EJE SIMPLE,
CON BASE EN UNA CARGA DE 110 kN MÁS IMPACTO



5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los valores de confiabilidad recomendados para elementos de concreto reforzado a flexión en la práctica varían entre 2,5 y 3,0 para las combinaciones con cargas vivas. La confiabilidad recomendada para las combinaciones que incluyen efectos súbitos y cargas vivas se ubica en 1,75 (Ellingwood, 1980).

El análisis presentado permite elegir factores de amplificación para cada caso de combinación de carga, para una confiabilidad determinada. Si se adoptan los valores de confiabilidad usuales en la práctica del método, de los análisis presentados en las figuras 3, 4 y 5, es claro que predominan como críticas las confiabilidades asociadas a los efectos de los ejes simples.

De la figura 1, el factor de mayoración para una confiabilidad de 2,5 es de 1,5 para carga estática. Por otra parte, la combinación de factores de mayoración (ecuación 4) en el caso de efectos dinámicos y de carga estática que arrojan una confiabilidad de 1,75 es $(1,3*P+1,0*I)$, que es equivalente a un factor de mayoración de 1,5 para la carga estática. Lo anterior permite la simplificación adicional de los dos casos de combinación de carga a un solo caso equivalente de 1,5 veces la carga estática del vehículo, lo cual cubriría los efectos de cargas estáticas y dinámicas.

6. CONCLUSIONES

Se han determinado con base en el método de Montecarlo, los factores de amplificación, que permiten el diseño por el método LRFD de pavimentos de concreto reforzado, bajo combinaciones de carga estática y carga estática más efectos dinámicos, haciendo uso de las estadísticas vehiculares colombianas.

Se ha recomendado la adopción de una única combinación de carga de 1,5 veces la carga legal máxima vigente para Colombia, lo cual permite alcanzar un diseño con una confiabilidad de 2,5 para carga estática y 1,75 para carga estática más efectos dinámicos, y para el caso de cortante una confiabilidad de 3,1. Para otras confiabilidades, se pueden determinar de las gráficas 3, 4 y 5 los factores de mayoración para cada combinación de carga.

La combinación de carga de $1,4*1,3*CV$ asumida inicialmente por Arango (2003), para cargas estáticas y dinámicas, equivalente a un factor combinado de mayoración de 1,82, se asoció a una confiabilidad de 2,5.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos al Instituto Tecnológico Metropolitano y al Instituto Colombiano de Productores de Cemento –ICPC– por el apoyo para este trabajo investigativo. Agradece también de forma especial al ingeniero Andrés Uriel Gallego Henao, desarrollador del sistema PLV y al ingeniero César Augusto Sierra Álvarez, quien colaboró activamente con los modelos de análisis estructural de los pavimentos.

BIBLIOGRAFÍA

- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente: Decreto 33 de 1998. Bogotá : AIS, 1998.
- ARANGO, JUAN FERNANDO. Modelo de vida útil del Pavimento de Larga Vida (PLV). En: revista *Tecno Lógicas*, Instituto Tecnológico Metropolitano ITM, número 12, julio de 2004.
- ELLINGWOOD, BRUCE, *ET AL.* Development of a probability based load criterion for American National Standard A58. National Bureau of Standards SP 577, Washington, 1980.
- GILLESPIE, THOMAS D., KARAMIHAS, S.D. Heavy truck properties significant to pavement damage. En: ASTM Special Technical Publication 1225. Philadelphia, Pennsylvania. 1994 pp 52-63.
- GILLESPIE, THOMAS D., KARANUHAS, S. M. Effects of heavy-vehicles characteristics on pavement response and performance. En: NCHRP Report 353. National Cooperative Highway Research Program. Washington D.C., 1993. pp 132.
- GILLESPIE, THOMAS *ET AL.* Influence of the size and weight variables on the stability and control properties of heavy trucks. Transport and Road Research Laboratory. Gran Bretaña. 1983.
- SÁNCHEZ SABOGAL, FERNANDO. Las cargas del tránsito automotor y su efecto sobre el comportamiento de los pavimentos flexibles: Análisis de la situación existente en las carreteras colombianas a fines del siglo XX. s.l.: s.n., 1999.
- SWEATMAN, P. F. A study of dynamic wheel forces in axle group suspensions of heavy vehicles. Australian Research Board Special Report SR27. 1983, p. 56.
- UNIVERSIDAD DE MINESOTA. Load testing of instrumented pavements sections, literature review. Minneapolis, febrero de 1999.