

EVALUACIÓN DE FACTORES DAÑO EN VÍAS NACIONALES APLICANDO EL MÉTODO SIMPLIFICADO DE LA AASHTO

José David Muñoz Gutiérrez*

Resumen: con el fin de atender las nuevas demandas de carga que se han generado, el sector transportador ha propiciado sobrepesos en los vehículos de carga. Esto ha traído consecuencias negativas para las principales vías terrestres del país. Este artículo presenta los resultados de un trabajo encaminado a evaluar el espectro de carga de las carreteras nacionales. Se presentan los resultados del análisis de diferentes vías concesionadas del país. Con el objeto de estimar los factores daño según el tipo de vehículo, para cada una de las vías analizadas en el periodo 1998-2000 se ha utilizado la metodología de la ASSHTO - método simplificado. Dentro del análisis del espectro de carga en cada una de las vías estudiadas, se han realizado operativos para medir las presiones de inflado de los vehículos comerciales pesados; también se ha evaluado el estado tensional de tres estructuras típicas para cada vía, a fin de aplicar la metodología propuesta por Inserrato, Faraggi y Gaete [1987] en el cálculo de los Factores de Equivalencia de Carga por Eje (FECE). Los resultados obtenidos se comparan con los valores que actualmente se aplican en el país y se plantean algunas recomendaciones producto de esta comparación.

Abstract: in order to meet the new demand of cargo generated, the carrier sector has propitiated overweight in the cargo vehicles. It has had negative consequences for the main land roads of the country. This article presents the outcomes of a research designed to evaluate a range of cargo in the national roads. In order to estimate the damage factors according to the type of vehicle for each one of the analyzed roads in the period 1998-2000 the methodology of the ASSHTO - simplified method was used. In the analysis of the range of cargo in each one of the roads studied operations to measure the inflation pressure of the heavy commercial vehicles as well as to evaluate the stress state of three typical structures for each road, in order to apply the proposed methodology by Inserrato, Faraggi and Gaete [1987] in the calculation of Equivalence

* Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Especialista en Geotécnia con énfasis en vías de la Universidad Nacional de Colombia. Profesor Asistente y Jefe de Sección de Geotecnia y Vías, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana.

Factors of Cargo by Axle (FECE Spanish Acronym for Factores de Equivalencia de Carga por Eje) were implemented. The outcomes are compared with the values which are now applied in the country and some recommendations are proposed as a consequence of this comparison.

1. INTRODUCCIÓN

Los valores utilizados en el cálculo del número de ejes equivalentes para el diseño de un pavimento en las vías nacionales y departamentales en Colombia (ley 105 de 1993), se determinan, teniendo en cuenta factores daño propuestos por la Universidad del Cauca (1997); estos son el resultado de un análisis generalizado de las vías colombianas. Para muchas vías, estos valores no son representativos: en la malla vial nacional se presentan diferentes espectros de carga que, sin lugar a dudas, modifican el número de ejes equivalentes (N) en el diseño del pavimento. Lo anterior implica cambios, en muchos casos radicales, en el diseño.

El poco conocimiento sobre tecnología vial por parte de las regiones colombianas y el cambio sustancial de las condiciones de carga en los últimos años, generó la inquietud, en el Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana, de investigar acerca de un método de cálculo del espectro de carga, para propósitos de diseño de pavimentos.

Este artículo tiene como finalidad dar algunas pautas para la estimación de los factores daño (FD) que representen el espectro de carga real de diferentes vías nacionales y departamentales, con el objeto de proporcionar lineamientos generales para estimar el cálculo de ejes equivalentes para el diseño del pavimento.

Uno de los métodos más utilizados para determinar el factor daño, a partir del cálculo de los factores de equivalencia de carga por eje, es el método simplificado de la Asociación Americana de Transporte y Carreteras Estatales de los Estados Unidos (AASHTO), en donde, sin ningún tipo de análisis, se utiliza un valor de $n=4$ en la expresión:

$$FECE = (P1/P0)^n \quad (1)$$

Donde:

P1: Carga aplicada.

P0: Carga de referencia.

n: Exponente que depende de las características de carga de los vehículos.

Un exponente n de 4, es poco conservativo del estado de las vías y no representa realmente el espectro de carga real en la mayoría de las vías colombianas. Así lo corroboran estudios adelantados hasta ahora, que sugieren cierta variabilidad en el valor del exponente [González y Hernández, 2000].

El objetivo, al estudiar el espectro de carga, es reevaluar el valor que debe tomar dicho exponente y sugerir de una forma práctica su estimación, con

fundamento en la metodología que plantean Inserrato, Faraggi y Gaete [1991]. Dicha metodología considera, como factores en el análisis, variables como la carga por eje, la presión de inflado y tipo de estructura del pavimento existente. Esta metodología está basada en modelos analíticos definidos por un sistema multicapa, cuyos supuestos se fundamentan en que las deformaciones, ante una carga dinámica producida por el tráfico, se consideran elásticas. De acuerdo con la metodología, los efectos de la presión de inflado aumentan considerablemente el daño a la rodadura.

2. ANTECEDENTES DE LA DETERMINACIÓN DEL FACTOR DAÑO

A partir de pesajes, realizados por el Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT) en 1984, se determinaron, en la primera fase de la Investigación Nacional de Pavimentos, los factores daño de las vías nacionales [MOPT, 1984]. Posteriormente, en 1997, la Universidad del Cauca realizó un estudio en el cual se determinaron los factores daño de los vehículos comerciales, a partir de los pesajes realizados en 1996 por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) [Murgueitio, et al., 1997]. En estas dos ocasiones, para diferentes puntos de la red vial nacional, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 1.

TABLA 1. Factores Daño para las vías nacionales. Resultados comparativos de estudios del Ministerio de Obras Públicas y Transporte (1984) y la Universidad del Cauca (1997).

Tipo de vehículo	Estudio MOPT (1984)	Estudio de la Universidad del Cauca (1997)
C2P	0.1	1.14
C2G	2.8	2.44
C3	4.6	3.76
C2-S1	1.4	3.37
C4	4	6.73
C3-S1	-	2.22
C2-S2	6.7	3.42
C3-S2	5.3	4.40
C3-S3	5.9	4.72

Fuente: [Murgueitio, et al., 1997].

En el estudio realizado por la Universidad del Cauca, se utilizaron diferentes métodos (ASSHTO (general y simplificado), SHELL y del Instituto Norteamericano del Asfalto). En dicho estudio, se observa cómo se presentan variaciones significativas en los vehículos analizados.

Los dos estudios también tienen en común que no consideran variables, tales como presiones de inflado de las llantas de los vehículos. Las metodologías aplicadas no se adaptaron a las condiciones regionales a partir de la modelación del espectro de carga para cada una de las vías donde se estimaron los factores daño para de esta manera adaptar las fórmulas empleadas de acuerdo con los métodos usados para cada vía.

3. METODOLOGÍA EMPLEADA

Para el presente trabajo, se sectorizaron las vías de acuerdo con las condiciones superficiales y estructurales (análisis deflectométrico) del pavimento. Esta sectorización permitiría aplicar la metodología del PCI y definir diferentes tipologías representativas de las vías en estudio.

La evaluación visual de la calzada se llevó a cabo de acuerdo con la metodología del Cuerpo de Ingenieros del ejército norteamericano [Shahin y Walther, 1994], registrando la severidad, tipo y magnitud de las fallas presentes, para calcular posteriormente con ayuda del programa MECAPAV v1.0¹, el Índice de Condición de Pavimento (PCI).

Para el análisis estructural del pavimento, se desarrolló una modelación de las diferentes estructuras a partir del módulo DEFLEX del programa INPACO², mediante el cual se tomaron datos de deflexiones medidas en campo, con el fin de estimar indirectamente los módulos en cada una de las capas del pavimento. Estas mediciones se realizaron en las vías por concesión de Los Patios – La Calera – Guasca (sector Los Patios), El Cortijo – Siberia – La Punta – El Vino (sector Siberia – La Punta) y Bogotá – Honda (sector Guaduas – Honda).³

Luego de integrar la inspección superficial de la calzada (inventario de daños) y los resultados deflectométricos, se realizó una sectorización de las vías en análisis, para definir las diferentes estructuras típicas por sectores.

De acuerdo con la información de los pesajes de los vehículos comerciales por tipo de eje, se estimaron unos rangos de carga, estableciendo valores máximos, mínimos, promedios y modales en cada una de las vías estudiadas. El resultado se muestra en la Tabla 2.

TABLA 2. Rangos de carga máximos y mínimos por tipo de eje. (Toneladas)

Sector	Eje Simple Direccional	Eje Simple Llanta Doble.	Eje Tandem	Eje Tridem
Los Patios – La Calera	1.6 – 4.8	10.7 – 21.3	16.3 – 28.7	40.5 – 55.6
Guaduas – Honda	1.2 – 12.90	1.5 – 21	2.4 – 29.40	4.7 – 31.30
Siberia – La Punta	2.3 – 10.3	5.2 – 9.1	2.3 – 20	5.7 – 29.7

¹ Programa desarrollado por el autor para el estudio de la patología de pavimentos flexibles aplicando el método del ejército americano asistido por computador.

² Programa desarrollado por la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca para el Ministerio de Obras Públicas y Transporte, 1993.

³ Las siguientes entidades colaboraron para la realización de los estudios en las vías mencionadas: Concesión Sabana de Occidente, Consultoría Colombiana S.A. y Concesión del Magdalena Medio.

Con esta información de carga, completada con las modelaciones de las estructuras evaluadas, se procedió a estimar las tensiones en la fibra inferior del concreto asfáltico existente con el programa computacional ELSYM 5, desarrollado por Ahlborn Gale del Instituto de Ingeniería de Tráfico y Transporte de la Universidad de Berkeley en California [Iserrato, Faraggi, y Gaete, 1991]. El programa entrega las deformaciones generadas en distintos puntos de la estructura, modificando parámetros de entrada, tales como la carga y la presión de inflado, de acuerdo con las mediciones que se realizaron en campo.

Posteriormente, y con base en los criterios de falla y leyes de fatiga (Nottingham (1987), Belgian Road Research Centre (1982), Shell (1994), Instituto del Asfalto (1991), TRRL (1984), entre otros), se calculó el número de repeticiones permisibles en cada estructura, según la carga de referencia para cada tipo de eje. De las diferentes leyes de fatiga empleadas en los estudios realizados, se pudo determinar que la más representativa dentro del comportamiento normal del exponente es la ley de fatiga Shell, basada en la ecuación (2):

$$e = 2.15 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0.1626} \quad \text{Shell (1994) para una mezcla S1-F1-50} \quad (2)$$

Donde:

e : Deformación unitaria de la fibra inferior de las capas asfálticas obtenida por el ELSYM 5, en función de la presión de inflado, tipo de estructura y carga.

N : Número de repeticiones admisibles.

De esto se obtiene:

$$N = (e \cdot 2.15 \cdot 10^3)^{6.1538} \quad (3)$$

De lo cual se puede determinar FECE como:

$$FECE = N_0 / N_1 = (P_1 / P_0)^n \quad (4)$$

Donde:

N₀ : Repeticiones admisibles para la carga patrón (P₀).

N₁ : Repeticiones admisibles para una carga específica (P₁).

Luego n se obtiene como:

$$n = \text{Log}(N_0 / N_1) / \text{Log}(P_1 / P_0) \quad (5)$$

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

De acuerdo con la metodología descrita, en la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos del coeficiente n para las vías en estudio.

TABLA 3. Comparación del exponente n para las diferentes vías estudiadas con base en la ley de fatiga SHELL.

Tramo	Presión de inflado recomendado (Kpa)	N
La Calera - Guasca	632	4.5
Siberia - La Punta	758	5.5
Guaduas - Honda	667	4.3

Nota: [Poveda y Rodríguez, 1998], [González y Hernández, 2000] y [Díaz y Medina, 1999].

Ahora bien, es posible calcular el número de ejes equivalentes para los diferentes valores del exponente n en una vía en particular. La Tabla 4 presenta el número de ejes equivalentes para los diferentes valores de exponente n para el sector Guaduas - Honda.

TABLA 4. Número de ejes equivalentes en función del exponente n en el tramo Guaduas - Honda.

n	C2-G FD	C3- FD	C3-S2 FD	C3-S3 FD	F.C	N
4.5	6.38	5.68	2.70	6.10	5.34	2.75
5.5	8.59	7.74	2.66	7.96	6.92	3.56
4.3	6.02	5.36	2.70	5.8	5.08	2.62
4.0	5.38	4.77	2.70	5.27	5.18	2.38

Nota: C# - FD: Tipo de vehículo comercial para un factor daño variable.

N: Número de ejes equivalentes de 8.2×10^7 Toneladas.

F.C. : Factor camión.

Al comparar los valores de n , se aprecia la diferencia sustancial que existe si se toma un valor de exponente 4 (típico en un diseño) o uno de 4.3, resultante del espectro de carga real de la vía; este arroja un número de ejes cercano a los 3 millones. Las repercusiones de estas variaciones se hacen evidentes, si se tiene en cuenta que la diferencia en el número de ejes equivalentes puede conducir a diferencias significativas en los espesores de la estructura del pavimento de un 7% a un 10%. Así, por ejemplo, si se aplican directamente los factores daño obtenidos por la Universidad del Cauca (Tabla 1), resulta un número de ejes equivalentes igual a 1.66×10^7 . Esto quiere decir que, la diferencia de los espesores esperados, aplicando un valor de n de 4.3 (9.6 millones de ejes), es de aproximadamente un 10% a un 15%.

Al comparar los diferentes factores daño que han sido calculados en los estudios ya mencionados, se aprecia que estos se encuentran estrechamente relacionados con las condiciones particulares de cada una de las vías, por tanto, se debe emplear factores daño específicos, en términos del espectro de carga, y no se recomienda aplicar factores generalizados (Tabla 5).

TABLA 5. Comparación de los factores daño en las diferentes vías en Colombia.

Tipo de Vehículo	U. del Cauca	Los Patios – La Calera	Siberia – La Punta	Guaduas – Honda
C2P	1.14	-	-	-
C2G	2.44	5.96	3.63	5.84
C3	3.76	6.76	8.96	5.19
C2-S1	3.37	-	1.37	1.87
C4	6.73	-	7.41	-
C3-S1	2.22	-	4.33	0.53
C3-S2	3.42	13.55	4.14	2.68
C3-S3	4.40	6.78	9.46	5.65
C3-R2	4.72	-	6.26	-

5. CONCLUSIONES

- De acuerdo con los estudios realizados, el exponente n en el cálculo del factor daño, influye notablemente en el cálculo de ejes equivalentes y su valor debe obtenerse del espectro de carga de la vía en estudio; estos factores no se deben generalizar.
- La variación de los resultados obtenidos de las leyes de fatiga utilizadas muestra claramente que son valores bastante dispersos; por tal motivo es necesario que, para la obtención de los valores de n , se tomen las leyes de fatiga (CRR-Bélgica, Shell o Nott); las otras leyes tuvieron una gran dispersión en los estudios que se realizaron.
- De acuerdo con los resultados obtenidos en los diferentes estudios realizados en el cálculo del exponente n , es necesario continuar estos estudios, tanto a nivel de la red nacional como a nivel de la red departamental, siguiendo con el procedimiento descrito en el presente artículo.
- Con base en la metodología utilizada, se propone trabajar en los próximos estudios con las presiones de inflado como parámetro primordial para la estimación del valor de n , transformando la ecuación (5) de la siguiente manera:

$$n = \text{Log} (N_0/N_1) / \text{Log} (p_1/p_0). \tag{6}$$

Donde:

p_1 : Presión de inflado de un vehículo en particular.

p_0 : Presión de inflado de referencia para un eje simple llanta doble.

De esta forma, no será necesario realizar pesajes por tipo de eje; solo un operativo de toma de presiones de inflado para cada vehículo comercial.

REFERENCIAS

- Díaz R., Medina Z. "Evaluación del factor equivalencia carga por eje para la vía El Cortijo – Siberia – La Punta – El Vin"o, trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Santa Fe de Bogotá, 1999, p. 227.
- Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) / Subdirección de Conservación de la Dirección de Carreteras de Dinamarca, *Manual de austerización red vial nacional*, Santa Fe de Bogotá, 1996.
- Colombia. Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), *Cartilla de pesajes*, Santa Fe de Bogotá, 1984.
- González M., Hernández G., "Determinación del factor daño para la vía Bogotá -Honda; tramo Guaduas – Honda", trabajo de Grado, Pontificia Universidad Javeriana, Santa Fe de Bogotá, 2000.
- Iserrato, M., Faraggi, V. y Gaete, R., *El efecto de la presión de inflado y otros parámetros en los factores de equivalencia de los firmes flexibles*, Sexto Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, 1991.
- Muñoz, J.D., "Metodología en la caracterización de pavimentos flexibles", trabajo de Especialización, Universidad Nacional de Colombia, Santa Fe de Bogotá, 1998.
- Murgueitio V., Benavides C.A. y Solano E. "Estudio de los factores daño de los vehículos que circulan por las carreteras colombianas". *Simposio de pavimentos*, Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería, Cartagena, 1997, pp. 332-342.
- Poveda A., Rodríguez L., "Verificación del factor de equivalencia de carga por eje de la vía Los Patios – La Calera – Guasca", trabajo de Grado, Pontificia Universidad Javeriana, Santa Fe de Bogotá, 1998.
- Shahin, M.Y., y Walther, J.A., *Refinements of the PCI Calculation Procedure*, U.S. Army Construction Engineering, Laboratory, champagne, 1994.