Rugosidad y desempeño de pavimentos

Índice de rugosidad y condición del pavimento. Revisión de la guía de diseño mecánico-empírico de pavimentos. Diferencia entre el IRI esperado y el real. Efectividad del microtratamiento superficial.

Índice de rugosidad y condición del pavimento

Referencia

Kyungwon Park, Natacha E. Thomas, and K. Wayne Lee (University of Rhode Island, USA). *Applicability of the International Roughness Index as a Predictor of Asphalt Pavement Condition*. Technical note. Journal of Transportation Engineering. Vol 133, N° 12, December 1, 2007. ASCE.

Esta nota técnica busca relacionar los daños en la superficie de pavimento asfáltico, su rugosidad, y el índice de condición de pavimento. Recoge la información de una base de datos sobre diversas secciones de pavimento en la región Atlántico Norte de Estados Unidos (la misma que corresponde a un programa de desempeño de pavimentos de largo plazo). Con el apoyo de un software se calcula la condición de tales secciones. El artículo desarrolla un modelo de regresión lineal entre la condición del pavimento y su rugosidad. Ello les permite a los autores considerar que la rugosidad es un buen predictor de la condición del pavimento.

Introducción

En relación con las fallas funcionales y la capacidad de servicio del pavimento, la rugosidad es por definición un factor importante y de fácil medición a través del Índice Internacional de Rugosidad, IRI. A su vez, la condición del pavimento puede hacerse por métodos visuales (lo cual conduce a estimados subjetivos) o por otros métodos que demandan equipo costoso y personal entrenado, para obtener el Índice de Condición del Pavimento, PCI. Por ello el estudio presta atención a investigar la aplicabilidad del IRI como predictor para la condición del pavimento, PCI.

---

*El PCI toma en cuenta la condición del pavimento considerando la **clase, severidad y cantidad** de cada daño. Se consideran daños como:*

Piel de cocodrilo
Exudación
Agrietamiento en bloque
Abultamientos y hundimientos
Corrugación
Depresión
Grieta de borde
Grieta de reflexión de junta
Desnivel carril/berma
Grietas longitudinales y transversales

Parcheo
Pulimento de agregados
Huecos
Cruce de vía férrea
Ahuellamiento
Desplazamiento
Grieta parabólica
Hinchamiento
Desprendimiento de agregados

***Los rangos para la calificación del PCI son los siguientes**:*

100-85	*Excelente*
85-70	*Muy bueno*
70-55	*Bueno*
55-40	*Regular*
40-25	*Pobre*
25-10	*Muy pobre*
10-0	*Fallado*

En 1982, el IRI fue propuesto por el Banco Mundial como un índice estándar para medir la rugosidad del pavimento. El IRI se expresa en unidades de pendiente, medidas por la acumulación de suspensión en un vehículo en movimiento recorriendo un cierto tramo (en m/km o in/mi, por ejemplo). Así el IRI describe las vibraciones del vehículo causadas por la irregularidad del perfil y es linealmente proporcional a la rugosidad de la vía. El valor más bajo, *IRI=0*, corresponde a un perfil plano. Aunque no existe un límite superior para el IRI, en la práctica los valores por encima de *8 m/km*, indican un pavimento impasable por un vehículo excepto a velocidad reducida.

Metodología

Se formula el modelo de regresión potencial en la forma:

$$PCI = K_1 IRI^{K_2}$$

Una transformación logarítmica conduce a una relación lineal:

$$logPCI = logK_1 + K_2 logIRI$$

Una condición de frontera establece que el máximo valor de *PCI=100* para un valor *IRI=0.727*. Con esta referencia se introduce la transformación *log(IRI/0.727)* para la intercepción en *cero* en 2, así:

$$logPCI = 2 + K_2(log\frac{IRI}{0.727})$$

Un ajuste de mínimos cuadrados es usado para completar los parámetros.

Calibración

Se utilizan estas expresiones para relacionar la condición del pavimento con la rugosidad empleando los datos de la región Atlántico Norte de Estados Unidos. Esta información corresponde a una base de datos organizada desde 1983 y que se registra para Estados Unidos y parte de Canadá. Es parte de un programa de largo plazo.

En la Tabla 1 se presentan los datos manejados para esta calibración. La base de datos proporciona valores del IRI, daños en el pavimento (algunos con bastante detalle), geometría, y fecha de construcción, en secciones de 500 pies de

longitud por 12 pies de ancho. La selección condujo a 20 secciones de pavimento provenientes de 11 estados y provincias. En total, 62 observaciones. El IRI ha sido medido directamente vía rayos laser o sensores ópticos. Gracias a un software adicional se calculó el PCI, entendido como una forma indirecta de procesar los daños visibles por tipo, severidad, y densidad.

Tabla 1. Valores de IRI y PCI por Estado y secciones de pavimento

Estado	Sección	Fecha (a)	IRI	PCI	Estado	Sección	Fecha (a)	IRI	PCI
Delaware	1450	7/2/1997	1.300	69	New York	1643	10/24/1996	0.831	100
		10/21/1998	1.413	76			7/29/1999	1.06	93
		4/29/1999	0.926	100		1644	5/4/1992	0.985	86
Maryland	1632	5/27/1997	1.010	88			11/18/1993	1.065	85
		10/21/1997	0.98	100			9/6/1995	1.069	85
		11/2/2000	1.01	88			5/15/1996	1.194	78
	1634	5/13/1992	1.000	87			10/29/1996	0.774	100
		12/2/1993	1.000	85			7/28/1999	0.802	97
		9/20/1995	0.919	83	Vermont	1681	5/1/1991	1.080	91
		4/17/1996	0.895	78			6/2/1998	1.090	89
		8/14/1996	0.895	77		1683	4/30/1991	1.067	85
		10/1/1997	0.939	80			6/3/1998	0.957	89
		4/8/1998	0.930	76	Virginia	1417	3/13/1997	1.668	53
		9/30/1998	0.727	100			10/28/1997	1.900	50
		2/22/2001	0.727	100			4/21/1998[b]	2.772	77
	2401	7/29/1997	0.890	93			8/12/1998	1.000	100
		10/31/2000	1.450	69		1419	8/23/1989	1.200	89
	2805	5/6/1997	0.976	100			3/12/1997	1.425	61
New Jersey	1033	7/23/1997	1.000	85			10/7/1997	1.000	100
		10/22/1997	0.797	100		1423	8/23/1989	1.700	67
		10/24/2000	1.000	85			8/13/1998	2.168	61
	1034	7/30/1997	1.480	68			6/24/1999	2.168	61
		10/25/2000	1.481	67			11/23/1999	1.100	100
	1638	7/31/1997	0.971	93		2021	5/21/1996	1.400	85
		10/26/2000	1.228	67	Ontario	1680	9/5/1996	1.276	83
New York	1008	8/7/1996	1.017	82			5/21/1997	1.200	94
		7/27/1999	1.230	75			10/17/2000	1.400	68
		4/17/2000	1.350	74	Prince Edward Island	1646	6/10/1997	1.700	75
	1643	4/28/1992	1.780	74			8/4/1999	1.780	76
		10/4/1993	2.120	65	Quebec	2011	9/12/1996	1.200	73
		9/8/1995	2.120	70			8/24/1999	1.580	65
		5/29/1996	2.029	62					

(a) Fechas en mes/día/año
(b) Considerada fuera de grupo

El modelo de regresión

El ajuste a las expresiones ya presentadas que relacionan PCI con IRI para los datos mostrados, con el análisis de variancia respectivo, condujo a un alta significancia del 99%. Los valores del IRI están entre 0.7 a 3.3 m/km con un valor medio de 1.233 y una desviación estándar de 0.385. El rango del PCI es de 100 a 50 con un valor medio de 81.532 y una desviación estándar de 13.355.

Los resultados del modelo para la relación exponencial conducen a los valores:

$$K_1 = 100 \qquad K_2 = -0.436$$

Aunque los valores de la muestra corresponden a magnitudes bajas del IRI (y deben tomarse con cautela las extrapolaciones), la Figura 1 resume los resultados en forma ordenada para el rango total.

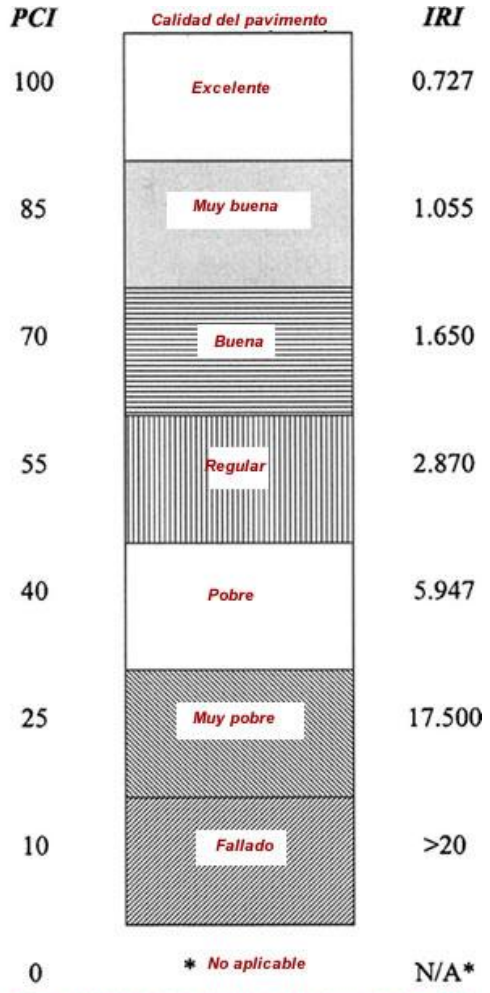

Figura 1. Calidad de pavimento para valores de IRI y PCI

Revisión de la guía de diseño mecánico-empírico de pavimentos

Referencia

Brian Coree, Halil Ceylan, and Dale Harrington (Iowa State University, USA). *Implementing the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: Implementation Plan*. Center for Transportation Research and Education. Iowa State University. May 2005.

El trabajo se refiere a la Guía de Diseño Mecánico-Empírico de Pavimentos (M-E Pavement Design Guide) y su software asociado, lanzada por la AASHTO (American Association of State Highway Transportation Organizations) en varias versiones, destinada a reemplazar la guía de 1993.

La guía proporciona significativos beneficios potenciales respecto a la de 1993. El más importante corresponde al software que facilita el análisis integrado que toma en cuenta el tráfico, el clima, y la estructura del pavimento, además de consideraciones de la carga espacial con múltiples ejes, y provee un medio para

evaluar el diseño y su confiabilidad. También sirve como herramienta forense para analizar la condición de pavimentos existentes y puntualizar deficiencias de diseños pasados.

Descripción del proceso de la guía

La siguiente descripción está referida al caso de pavimentos flexibles, aunque se aclara que la guía y el software permite recurrir a módulos para características variadas. Sus principales componentes se presentan resumidos en la Figura 2.

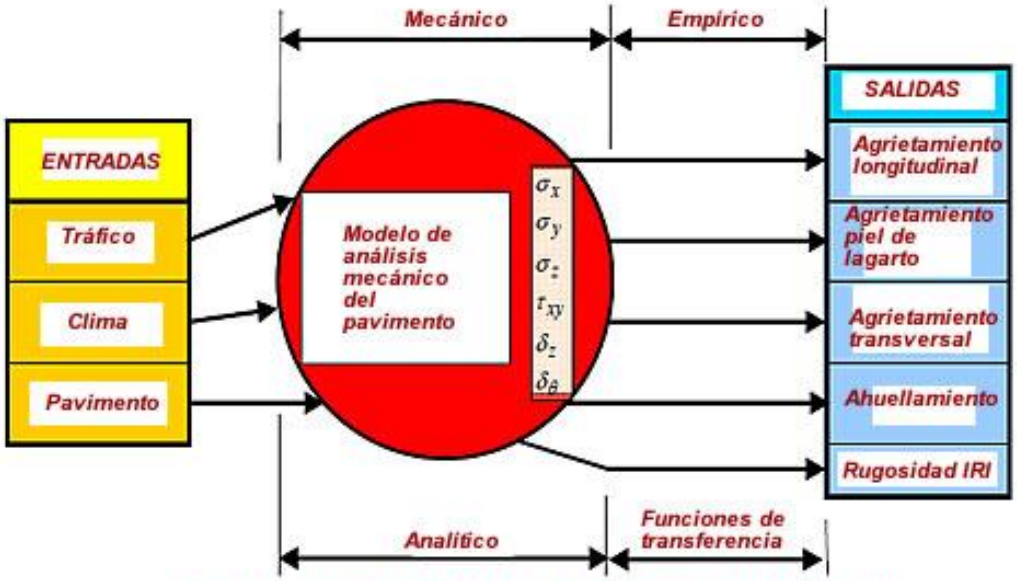

Figura 2. Esquema del proceso de diseño según la guía de diseño

El pavimento se comporta según sus tres influencias primarias:

- Tráfico
- Ambiente
- Pavimento (materiales y espesor)

En un cierto tiempo *t*, la secuencia de operaciones es entendida de la siguiente manera:

- La temperatura y humedad del pavimento son generadas por las condiciones *ambientales* en el tiempo.
- El espectro de cargas de *tráfico* se define en el siguiente incremento de tiempo, Δt.
- Respecto a los materiales, las propiedades elásticas y espesor de cada capa (E, μ, h) están definidas desde las condiciones iniciales, la edad desde la construcción, la temperatura y humedad en el tiempo, y la velocidad (duración o frecuencia) de cada carga.
- El análisis estructural (*mecánico*) es efectuado para estimar los esfuerzos y deformaciones críticas dentro de la estructura.
- Es efectuado un análisis *mecánico* adicional para determinar los esfuerzos y deformaciones ajenas como las cargas (como los gradientes térmicos y de humedad).

- Se combinan los esfuerzos y deformaciones debidos a la carga y aquellos ajenos a ésta, para el incremento de tiempo.
- Los daños incrementales son calculados a partir de los esfuerzos y deformaciones críticos (y sus incrementos). Estos incluyen un conjunto de daños o condiciones como Ahuellamiento, fallas, agrietamientos, rugosidad y otros, los mismos que son calculados en base a modelos determinísticos o *empíricos*.
- Se estiman los cambios en los parámetros iniciales (E, μ) resultantes de los daños incrementales.
- A partir de una escala de tiempo $t+\Delta t$, el ciclo se repite.

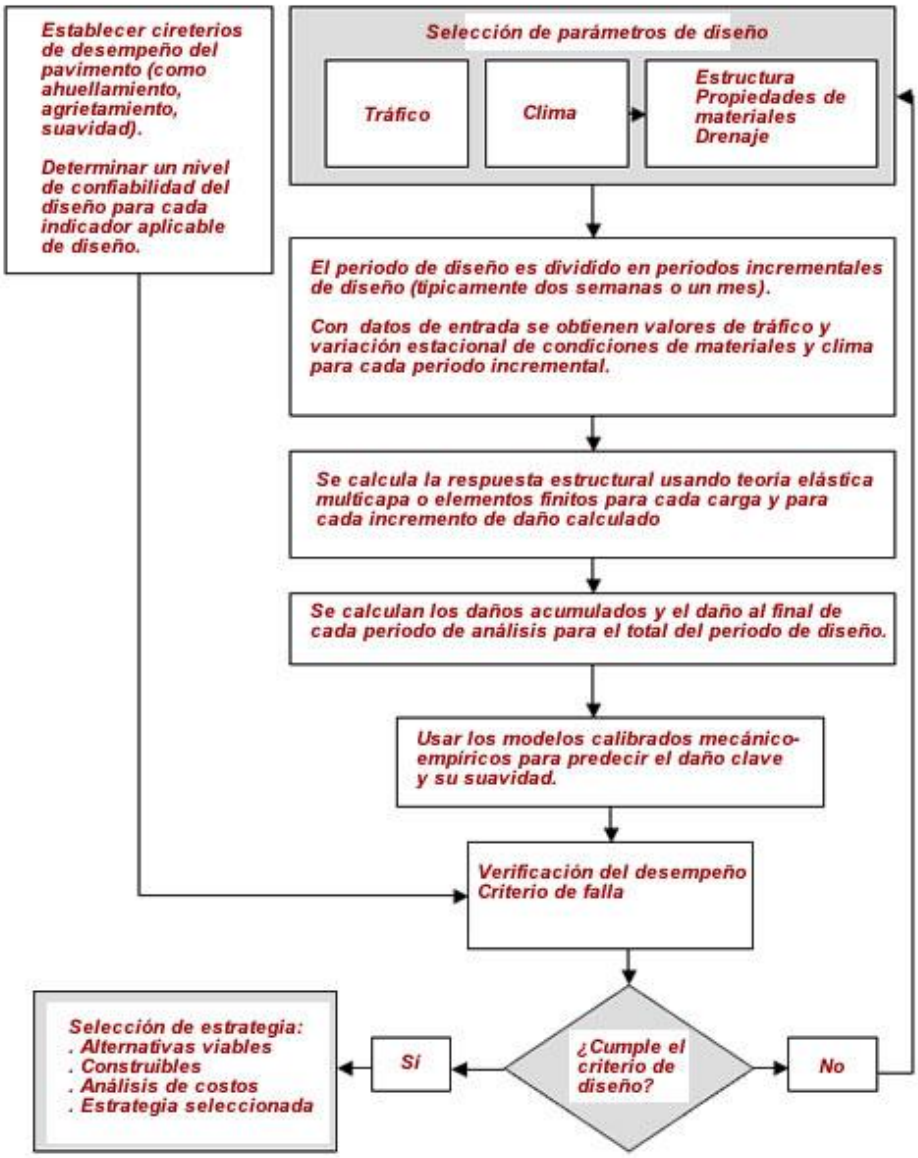

Figura 3. Proceso de diseño según la guía para pavimentos flexibles
Fuente: a partir de Osman Ali. Evaluation of the Mechanistic Empirical Pavement Design Guide 2002. September 2005. National Research Council Canada.

La Figura 3 ilustra este proceso.

Diferencia entre el IRI esperado y el real

Referencia

José P. Aguiar-Moya and Jorge A. Prozzi (The University of Texas at Austin, Texas). *A Mechanistic-Empirical IRI Model Accounting for Potential Bias*. Journal of Transportation Engineering. Posted ahead of print July 19, 2010. ASCE.

Los modelos de predicción de la rugosidad, en IRI, incorporados en la Guía de Diseño Mecánico-Empírico de Pavimentos, han sido desarrollados usando un ajuste de mínimos cuadrados. Sin embargo, algunas de las variables usadas en la predicción del futuro IRI fueron previamente estimadas por medio de modelos separados de desempeño. Ello puede ocasionar diferencias entre las estimaciones de daño y los componentes no observados en el modelo del IRI. Las diferencias pueden ser corregidas considerando variables adicionales que están correlacionadas con los tipos de daños y que no han sido tomadas en cuenta. También las diferencias en el IRI pueden ser generados por factores no observados y no incluidos en el modelo.

El modelo IRI mecánico-empírico

Inicialmente (2001), el modelo IRI fue definido como una función lineal de diferentes tipos de daños y propiedades de la subrasante.

$$IRI = IR_o + \Delta D + \Delta F + \Delta S$$

Esto es, como una función del IRI inicial (IR_o), la variación del daño ΔD, el potencial de helada ΔF, y el potencial de hinchamiento de la subrasante ΔS.

Estudios siguientes (2003) incorporaron otros factores, resultando la expresión modificada como sigue.

$$\begin{aligned} IRI &= IRI_o + 0.0463\left\{SF\left[\exp\left(\frac{edad}{20}\right) - 1\right]\right\} + 0.00119(TC_L)_T \\ &+ 0.1834(COV_{RD}) + 0.00384(FC)_T + 0.00736(BC)_T \\ &+ 0.00155(LC_{SNWP})_{MH} \end{aligned}$$

Así, el IRI resulta función del valor inicial (el cual es considerado el factor más importante), un factor del lugar, *SF*, que incluye las propiedades de la subrasante y las ambientales, la edad de la estructura del pavimento, y diferentes tipos de daños (y su correspondiente severidad).

El cambio en el 2008 aparece como sigue.

$$IRI = IR_O + 0.0150(SF) + 0.400(FC_{Total}) + 0.0080(TC) + 40.0(RD)$$

En donde:

FC_{Total}: área de agrietamiento combinando piel de cocodrilo, las grietas longitudinales, y las grietas de reflexión, como porcentaje en el área total.

TC: longitud del agrietamiento transversal en pies/milla.

RD: promedio de profundidad de Ahuellamiento en pulgadas.

Además:

$$SF = Edad[0.02003(PI + 1) + 0.007947(Precip + 1) + 0.000636(FI + 1)]$$

PI es el índice de plasticidad del suelo de la subrasante, *Precip* es el promedio anual de lluvia (mm), *FI* es el índice promedio anual de helada.

Diferencias

Los autores consideran que los valores iniciales no observados habrían sido capturados a través de los modelos con las diferencias implícitas en las extrapolaciones e incertidumbres. Además, se habrían estimado otros parámetros. Es posible tomar ventaja del tipo de datos usados para corregir el modelo, así como la correlación entre diferentes tipos de daño y los factores no observados. Adicionalmente, hay variables omitidas que tienen valores constantes en diferentes secciones y que pueden ser usados para las estimaciones del IRI.

Efectividad del microtratamiento superficial

Referencia

Samuel Labi (Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts), Geoffrey Lamptey (Coral Gables, Florida), and Siew-HweeKong (Purdue University, Indiana). *Effectiveness of Microsurfacing Treatments*. Journal of Transportation Engineering. Vol 133, N° 5, May 1, 2007. ASCE.

El artículo determina que el microtratamiento superficial puede ofrecer una reducción promedio de 0.442 en el IRI (en m/km), de 4 mm en la profundidad de ahuellamiento, y un incremento de 6.2 de la tasa de condición del pavimento (PCR) en unidades. La condición pretratamiento del pavimento fue determinada como un factor influyente en la efectividad del tratamiento en el corto plazo. El análisis a largo plazo muestra que cada medida de efectividad e indicador de desempeño, la efectividad está influenciada por el índice de helada, tráfico, y clase de pavimento. La efectividad, en términos de la vida útil varió de 2 a 10 años para el IRI, de 10 años para el ahuellamiento, y de 4 a 15 años para el PCR. Fue encontrada una mayor efectividad en el largo plazo asociada a bajas heladas y condiciones de tráfico. El estudio afirma que el microtratamiento superficial puede mejorar efectivamente las condiciones de ahuellamiento, de la calidad de tránsito, y de la vida útil.

Introducción

El microtratamiento superficial corresponde a una mezcla de emulsión asfáltica modificada con polímeros, agregado chancado, mineral de relleno, agua, y un aditivo para control del endurecimiento. Es típicamente aplicado a mantenimiento preventivo dirigido a fijar daños menores, corregir ahuellamiento, mejorar la textura superficial, así como la calidad de rodadura, y finalmente extender la vida del pavimento.