

Pavimentos - T 017

CALIBRACIÓN A CONDICIONES LOCALES EN ARGENTINA DE LA GUÍA EMPÍRICO-MECANICISTA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

**MSc. Ing. Oscar Víctor CORDO
Dr. Ing. Marcelo Gastón BUSTOS
MSc. Ing. Pablo GIRARDI MANCINI
Ing. Miguel Oscar PEREYRA**

Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña. Facultad de Ingeniería,
Universidad Nacional de San Juan.

ARGENTINA

RESUMEN

La Guía Empírico-Mecanicista de Diseño de Pavimentos (MEPDG en inglés) es uno de los más recientes desarrollos en diseño de pavimentos, basado en resultados del proyecto de investigación norteamericano NCHRP 1-37A. En este artículo se describe una metodología elaborada para ajustar y calibrar los modelos de deterioro del MEPDG para condiciones locales en Argentina, para ser usadas posteriormente en el diseño de pavimentos rígidos.

Dentro del estudio llevado a cabo por investigadores de la Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña de la Universidad Nacional de San Juan, se seleccionaron tramos específicos con pavimento de hormigón, ubicados en diferentes sitios dentro de la zona centro - norte del país. Con la información climática provista por el Servicio Meteorológico Nacional se desarrollaron archivos climáticos compatibles con el programa computacional. Los datos sobre estructura del pavimento, tránsito, y rugosidad IRI fueron suministrados por la Dirección Nacional de Vialidad, vialidades provinciales u otros organismos.

Se realizaron asimismo campañas para inspeccionar los tramos y se recopilaron datos de deterioro, con todo lo cual se confeccionó una base de datos para todos los pavimentos estudiados. Se procesó toda la información utilizando el software MEPDG y se determinaron los coeficientes de calibración para los distintos modelos incorporados para la predicción de indicadores de comportamiento de pavimentos rígidos.

Se presentan finalmente las principales conclusiones emanadas del estudio, y se sugieren recomendaciones para un uso más confiable del MEPDG para diseño estructural de pavimentos rígidos bajo diferentes condiciones en Argentina, con la correspondiente evaluación de las ventajas y limitaciones del procedimiento aplicado.

Palabras Clave: DISEÑO PAVIMENTOS – PAVIMENTOS RÍGIDOS - MODELOS DE DETERIORO – CONDICIONES CLIMÁTICAS – CALIBRACIÓN.

1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, la metodología de diseño para pavimentos rígidos se ha basado ya sea en criterios netamente empíricos, cuyo ejemplo más conocido es la Guía AASHTO '93, o bien en conceptos mecanicistas como los métodos desarrollados por la Portland Cement Association (Packard, 1984). A mediados de la década del '90 se introducen conceptos mecanicistas en la Guía de Diseño AASHTO y así surge en 1998 una adenda a la Guía de 1993 titulada "1998 Supplement for Rigid Pavement Design".

La Guía de Diseño Empírico-Mecanicista de Pavimentos (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, MEPDG) (NCHRP, 2004), que combina el análisis mecanicista de los pavimentos con verificación empírica del comportamiento a través de la predicción de determinados tipos de deterioro, fue desarrollada en base a la gran cantidad de datos colectados en EEUU durante el desarrollo del programa denominado "Long-Term Pavement Performance", más conocido por su sigla LTPP (SHRP, 1993). Estos datos permitieron ajustar los modelos empíricos de deterioro de pavimentos y conocer más profundamente el comportamiento estructural y funcional de estos últimos.

El procedimiento de diseño MEPDG, en términos generales, consiste en adoptar inicialmente una serie de parámetros estructurales para el pavimento (número y tipo de capas, indicadores de resistencia de las mismas, características de la subrasante, etc.), y establecer las condiciones de tránsito y clima a las que estima que se verá sometido a lo largo del período de diseño.

En base a esta información, el programa elabora la predicción de la evolución de determinados indicadores de deterioro a lo largo del período de diseño, los cuales no deberían superar valores umbrales de deterioro previamente establecidos por el diseñador, bajo una cierta confiabilidad también predefinida por dicho usuario. Si no se cumplen estas premisas, o también si se cumplen muy holgadamente, el diseñador puede ir modificando en forma iterativa los parámetros estructurales adoptados para el diseño, hasta arribar a una solución satisfactoria. En la Fig. 1 se muestra una gráfica conceptual del procedimiento global adoptado por la Guía MEPDG para el diseño de pavimentos, aplicado en este caso al diseño estructural de pavimentos de hormigón, y en la Fig. 2 se muestra la pantalla principal del software MEPDG a través del cual se aplica el procedimiento de diseño.

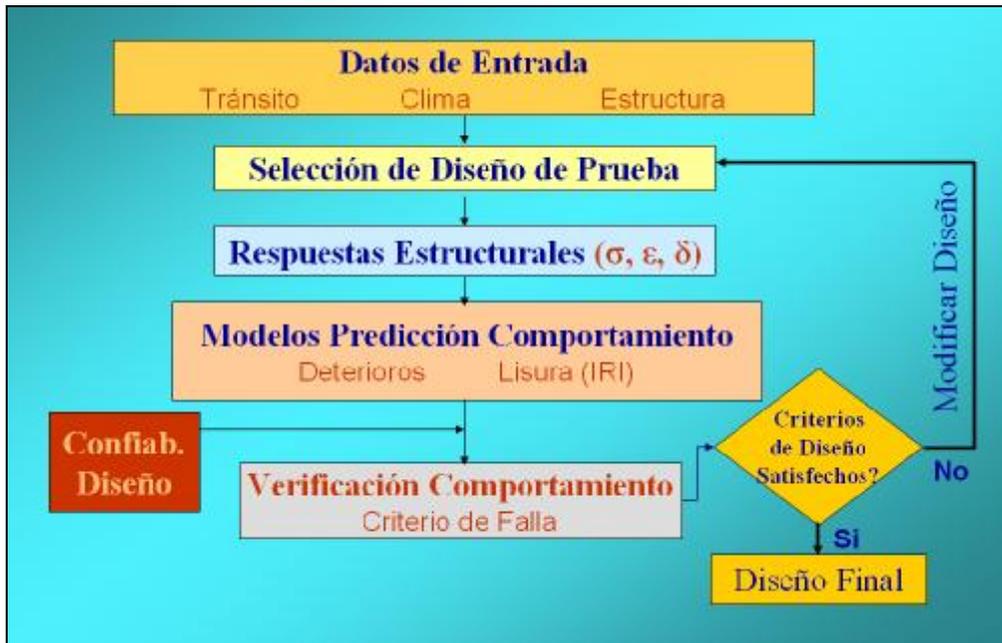


Figura 1. Procedimiento de diseño propuesta por la Guía MEPDG

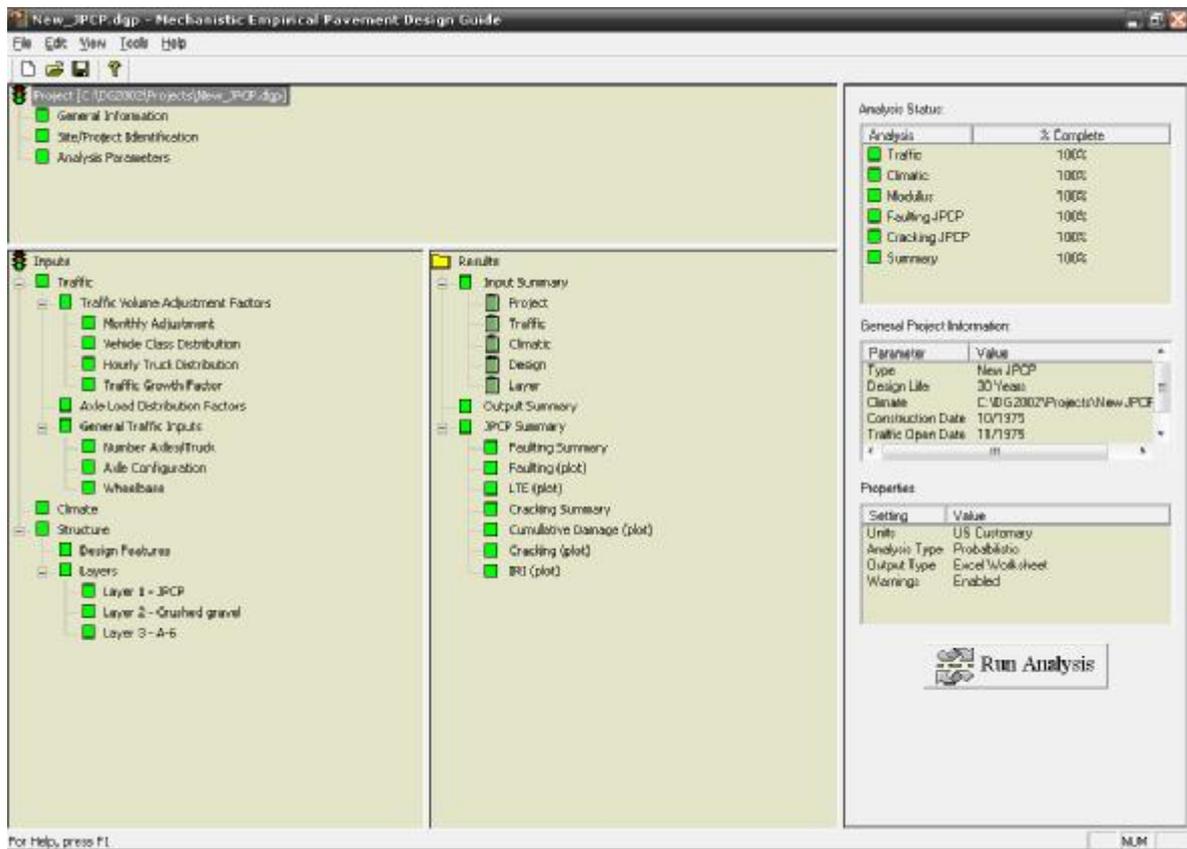


Figura 2. Pantalla principal del software MEPDG para el diseño de pavimentos

2. OBJETIVOS DEL ARTÍCULO

El procedimiento de diseño establecido por la Guía MEPDG puede usarse bajo condiciones muy diversas, pero para utilizarla en otro país diferente a EEUU o Canadá, deben hacerse ajustes previos para reflejar las condiciones locales. Este artículo trata sobre el ajuste y calibración de los modelos de deterioro MEPDG para diseño de pavimentos rígidos a las características propias de las rutas argentinas. Para ello se deben comparar los valores de deterioro predichos por el software MEPDG con los datos relevados en los pavimentos.

3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

La metodología de investigación utilizada para ejecutar este trabajo, aplicada dentro del proyecto de investigación “Estudio y Adaptación a Condiciones Locales del Método NCHRP 1-37A para Diseño de Pavimentos Rígidos”, desarrollado por la Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña de la Universidad Nacional de San Juan, posee los siguientes pasos:

- En la parte inicial del proyecto se realizó un estudio exhaustivo de los modelos de deterioro de pavimentos incorporados dentro de la Guía MEPDG.
- Se seleccionaron secciones de pavimentos rígidos ubicadas en diferentes regiones del país, para tener en cuenta distintos rangos de cargas, edad del pavimento y condiciones climáticas dentro del análisis. Los pavimentos construidos luego de 1997 reflejan las nuevas metodologías de construcción (mediante encofrados deslizantes) que se están aplicando en Argentina desde la última década.
- Se actualizó y mejoró un procedimiento específico de recolección de información sobre deterioro de pavimentos, basado en conceptos de muestreo estadístico, que ya había sido utilizado en la calibración de los modelos HDM-4 a condiciones locales (Bustos *et al.*, 2006). Los datos de deterioro representativos de cada sección estudiada fueron recopilados muestreando aproximadamente un 15% de losas por km. También se usó dentro de este trabajo buena parte de la información de deterioro recolectada durante la calibración de los modelos del HDM-4.
- Diversos organismos viales (Vialidad Nacional y vialidades provinciales) y el Instituto del Cemento Portland Argentino (ICPA) suministraron información referente a la estructura del pavimento, volumen de tránsito y rugosidad medida mediante el parámetro IRI (Índice de Rugosidad Internacional). La información climática fue suministrada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Se procesó toda esta información, la cual se usó como datos de entrada para el software MEPDG.

- Usando dicho software con los factores de calibración por defecto, se calcularon los valores predichos de escalonamiento en juntas transversales, agrietamiento transversal de losas por fatiga, e IRI. Estos valores se compararon con los datos relevados en campaña, modificando los coeficientes de calibración hasta lograr la equivalencia entre deterioros predichos y observados, para cada pavimento.
- Se analizaron los resultados obtenidos, evaluando posibles tendencias de correlación entre los factores de calibración y algunas variables independientes.

4. DATOS USADOS PARA CALIBRACIÓN

Para desarrollar esta metodología fue necesario disponer de una gran cantidad de información. La selección de tramos de pavimentos rígidos se realizó con el propósito de abarcar un amplio rango de condiciones climáticas, desde el frío seco de los Andes hasta el clima templado húmedo de llanura. Las secciones analizadas se ubican en la parte central de la República Argentina. Solamente se analizaron pavimentos de hormigón simple con juntas. La Figura 3 muestra la ubicación aproximada de cada sección en un mapa.



Figura 3. Ubicación geográfica de las secciones de pavimentos rígidos analizadas

Los datos referentes a escalonamiento de juntas transversales, deterioro en juntas y fisuración de losas, se obtuvieron mediante inspección visual en campaña. La DNV y el ICPA suministraron datos de IRI. Se recopiló también información referente a cargas de tránsito, condiciones climáticas, propiedades de subrasante y materiales estructurales.

4.1 Datos de Tránsito

Los datos sobre volumen de tránsito, tales como tránsito medio diario anual (TMDA), composición y configuración de vehículos, fueron obtenidos de los censos de tránsito elaborados por la DNV. Las tasas de crecimiento de tránsito se obtuvieron a partir de datos de TMDA disponibles desde 1991, por regresión exponencial. Se adoptó un espectro de cargas para vehículos pesados en base a información obtenida durante la ejecución de un proyecto de investigación llevado a cabo en Mendoza (De la Torre y González, 1994).

No fue factible conseguir información más reciente sobre espectros de carga reales, ya que si bien se disponía de datos sobre pesajes realizados en autopistas en Córdoba, dicha información sólo considera camiones con evidente exceso de carga. Por lo tanto, el uso de esta información sobredimensionaría los valores medios esperables de las cargas de los vehículos pesados, introduciendo sesgo en el espectro real de cargas que circulan por las rutas argentinas, y en consecuencia dichos datos fueron descartados para el análisis.

La clasificación de los vehículos pesados argentinos fue revisada y adaptada para encuadrarla dentro de la configuración propuesta por la Federal Highway Administration (FHWA), que es la que se usa en el software MEPDG. Como resultado, se obtuvo una distribución de ejes por camión adaptada a condiciones argentinas, ligeramente diferente a la propuesta por defecto en el software MEPDG. Los ejes cuádruples y los vehículos clase 13 (camión semirremolque con acoplado de 7 o más ejes) son muy raros en nuestras rutas, y en consecuencia no fueron tenidos en cuenta en este estudio. (Ver Tabla 1 y Figura 4).

La DNV proveyó datos sobre distribución horaria y mensual de tránsito en diversas estaciones ubicadas sobre las rutas analizadas o en proximidades de las mismas. El factor de distribución por trocha fue adoptado en base al número de trochas por dirección. Se consideró un 50% por trocha para casi todas las rutas, excepto para la A019, en Córdoba, y para la RN7, en San Luis, donde se tomó un factor del 45% para la trocha externa, al tratarse de autopistas.

Tabla 1. Equivalencia asumida entre categorías FHWA de vehículos y clasificación de DNV

Vehíc.	FHWA	D.N.V. Argentina
1	Motocicletas	Motocicletas
2	Automóviles	Automóviles
3	Dos ejes, cuatro ruedas	Camionetas
4	Omnibus	Omnibus
5	Camión simple, dos ejes, seis ruedas	Camión 1-1
6	Camión simple, tres ejes	Camión 1-2
7	Camión simple, cuatro o más ejes	1-3
8	Semirremolque, cuatro o menos ejes	1-1-1, 1-1-2, 1-2-1
9	Semirremolque, cinco ejes	1-2-2, 1-1-3
10	Semirremolque, seis o más ejes	1-2-3, 1-3-3
11	Camión o semi c/acoplado, 5 o menos ejes	1-1-1-1-1, 1-1-1-2, 1-2-1-1, 1-1-1-1
12	Camión o semi con acoplado, seis ejes	1-1-2-1-1, 1-2-1-2, 1-1-1-3
13	Camión o semi con acoplado, 7 o más ejes	1-2-2-1-1, 1-1-2-1-2, 1-2-2-1-2

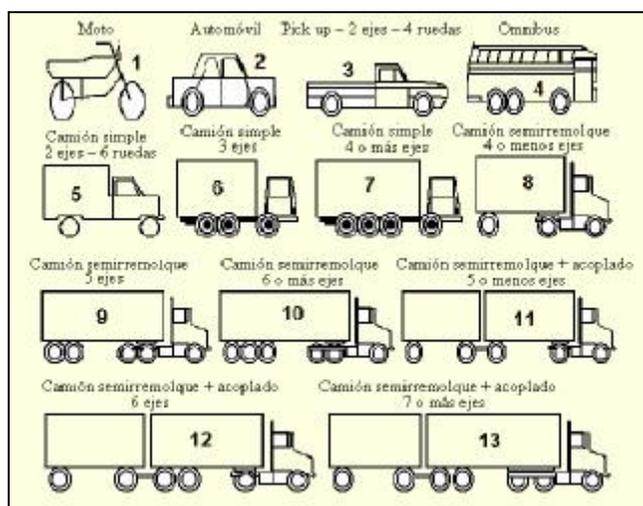


Figura 4. Clasificación de vehículos según la FHWA

4.2 Condiciones Climáticas

La Guía MEPDG necesita una gran cantidad de datos en base horaria, tales como temperatura, lluvia, velocidad del viento, porcentaje de cielo despejado, etc. Buena parte de esta información fue suministrada por el Servicio Meteorológico Nacional. Los datos fueron organizados en archivos con extensión *.icm, en una forma tal que pudieran ser leídos por el software MEPDG. La Figura 5 presenta el tipo de formato que poseen estos archivos, y la clase de información que contienen.

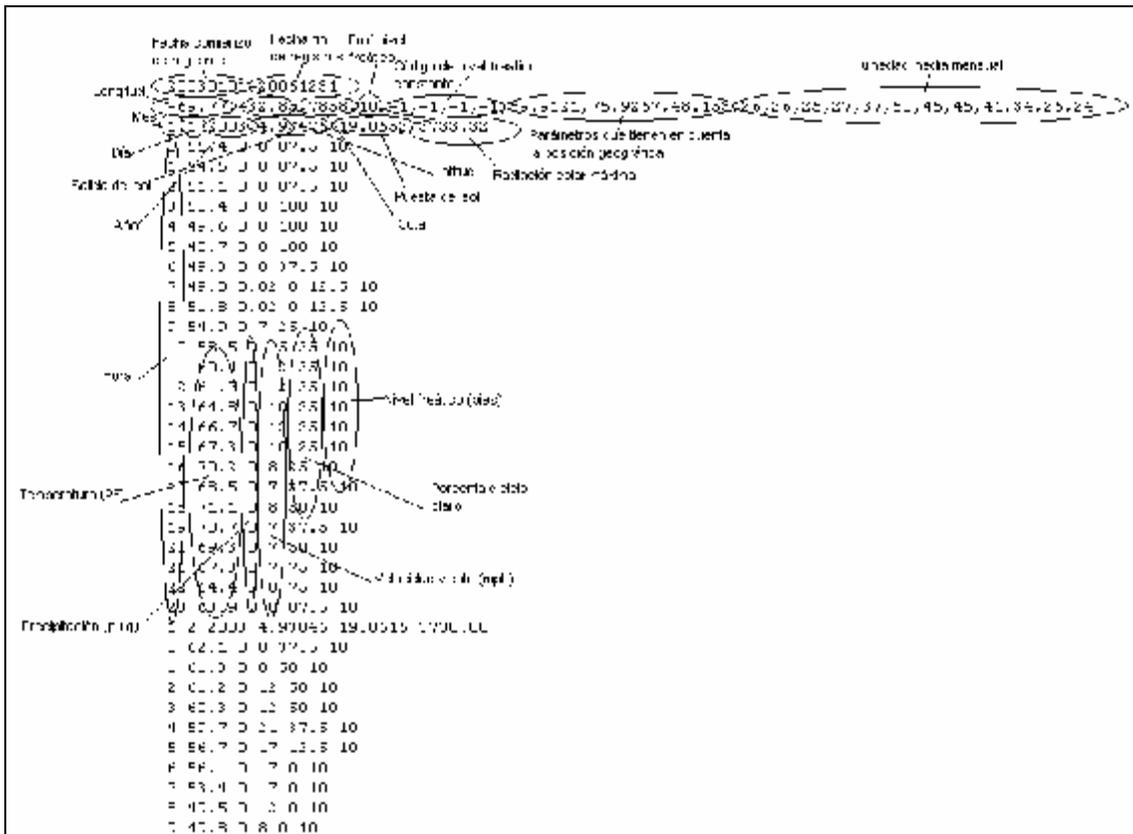


Figura 5. Formato general de los archivos climáticos de la Guía MEPDG

Otros datos, como hora de salida y puesta del sol y radiación solar neta, fueron estimados a partir de archivos climáticos originales del software, eligiendo un punto ubicado en el Hemisferio Norte, pero a la misma latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar que el sitio a analizar en Argentina. Los resultados debieron ser desfasados 6 meses para hacerlos compatibles con el Hemisferio Sur. Se estimó asimismo que la profundidad media del nivel freático era de aproximadamente 3 m para casi todos los casos, excepto para la RN 127 en Entre Ríos y Corrientes, y para la RP 39 en Santa Fe, donde se adoptó un nivel freático a 1 m de profundidad. Se tomó esta decisión ya que buena parte de estas rutas están ubicadas en lugares muy húmedos e incluso pantanosos en determinados sectores puntuales.

La diferencia de temperatura efectiva por alabeo permanente es un valor que tiene en cuenta las condiciones climáticas y de curado del hormigón durante la construcción del pavimento. Es función de las variaciones de temperatura y de humedad a través de la losa de hormigón y reviste suma importancia para modelar la fisuración por fatiga de las losas. El valor por defecto en el software MEPDG es de -10 °F (-5,5 °C). En otros lugares debe ser estimado mediante calibración local. En este estudio, el valor por defecto sólo fue usado

para regiones húmedas (Índice de Humedad de Thornthwaite IHT > 30). Para regiones secas (IHT < 0), el valor adoptado de diferencia de temperatura efectiva por alabeo permanente fue de -20 °F (-11,1 °C) y para regiones sub-húmedas (0 < IHT < 30), se adoptó un valor de -15 °F (-8,3 °C). En la Tabla 2 se detalla, para cada sección estudiada, información sobre ubicación, datos de tránsito y datos climáticos.

Tabla 2. Información sobre ubicación, tránsito y clima para cada sección estudiada

Ruta	Provincia	Sección	Progresiva inicial	Progresiva final	Características de tránsito					Información climática					
					Año base	Año n	TMDA (Año base)	TMDA (pesados) (Año base)	Tasa crecimiento tránsito	Sitio para datos climáticos	Altura media (m)	Temperatura media anual	Precipitación media anual (mm)	Nivel freático (m)	Índice de Thornthwaite
RNA019	Córdoba	Fábrica Fiat-Km 20	15,00	20,00	1975	2001	1581	358	10	Córdoba	387	17,3	869,9	3,00	13,3
RN 158	Córdoba	Quebracho Herrado-Colonia Prosperidad	22,21	33,90	1975	2001	634	280	4,3	San Francisco	119	17,7	997,8	3,00	23,5
RN7	Mendoza	Punta de Vacas-Co. Ardito+1 Km	1205,07	1210,00	1980	2001	322	248	8	Punta de Vacas	2395	8,0	280,0	3,00	-11,0
		Co. Ardito+1 Km-Penitentes+1 Km	1210,00	1216,00						Puente del Inca	2720	6,9	320,0	3	-1,5
		Penitentes+1 Km-A° La Salada	1216,00	1226,00						Las Cuevas	3151	3,9	365,7	3,00	27,4
		A° La Salada-Frontera	1226,00	1237,00											
RN127	Entre Ríos	Federal-Miñones (Sección I)	201,00	237,00	1997	2007	200	114	27	Concordia	34	18,9	1308,0	1	54,6
		Miñones-La Hiera (Sección II)	237,00	266,00											
		La Hiera-San Jaime (Sección III)	266,00	282,00											
	Comentes	San Jaime-Cuatro Bocas (Sección	282,00	332,00	1997	2007	200	132	24	Monte Caseros	51	19,6	1495,9	1,00	71,4
RN177	Santa Fe	RP21-RN9	0,00	7,82	1965	2007	180	30	8,5	Rosario	25	17,3	933,2	3,00	17,9
RP39	Santa Fe	San Javier-A° Saladillo Amargo	0,00	37,00	1999	2007	277	61	8,8	San Javier	25	19,1	1252,9	1,00	46
RN7	San Luis	Lte Córdoba/San Luis-RN8	653,94	692,71	2003	2007	2450	1472	5,2	Villa Reynolds	483	15,6	697,0	3,00	-2,5
		RN8-RN148(Derecha)	692,71	694,68	2003	2007	2600	1495	6,5						
		RN148 (Derecha)-RN148 (Izquierda)	694,68	695,69	2003	2007	4650	2846	9,3						
		RN148 (Izquierda)-Fraga	695,69	730,82	2003	2007	4300	2423	9,6						
		Fraga-RN147	730,82	783,72	2003	2007	4950	2962	6,3	San Luis	728	17,2	627,8	3,00	-12,7
		RN146-Balde	788,79	815,74	2003	2007	2950	2171	3,6						
Balde-Lte. San Luis/Mendoza	815,74	865,52	2003	2007	2400	1609	16								
RN157	Santiago del Estero	Frías-Lavalle	1046,12	1095,14	1980	2007	163	78	11	Frías	333	20,5	525,7	3,00	-25,6
RN157	Tucumán	Circunvalación SM de Tucumán-Bella Vista	1234,97	1250,25	1951	2007	1705	201	0,4	SM de Tucumán	447	19,3	966,3	3,00	20,1

4.3 Propiedades Estructurales de Subrasante y Capas de Pavimentos

En este trabajo se usaron dos fuentes de información referentes a propiedades de subrasantes y capas de pavimento. Para algunas rutas (A019 y RN 158 en Córdoba, y RN 7 en Mendoza), se usaron los datos obtenidos mediante ensayos no destructivos con FWD, ejecutados durante 2001 en el marco de otro trabajo de investigación (EICAM, 2003). Los

parámetros calculados por retroanálisis haciendo uso de la metodología AASHTO '93 fueron: módulo elástico del hormigón E_c , módulo de rotura del hormigón MR y módulo de reacción de subrasante k.

Para las otras rutas, los parámetros estructurales de la subrasante y capas de pavimento fueron obtenidos a partir de información brindada por la DNV, vialidades provinciales, o desde referencias bibliográficas. Se usaron ecuaciones de correlación para estimar los parámetros estructurales requeridos por el software. En algunos casos específicos, cuando no habían datos disponibles, se usaron valores por defecto sugeridos por la Guía MEPDG. Las propiedades de la base y subbase fueron obtenidas a partir de información dada por la DNV o vialidades provinciales. En las tablas 3 y 4 se muestran los datos adoptados sobre propiedades de las losas de hormigón y de las capas de base y subbase, respectivamente.

Tabla 3. Propiedades estructurales para losas de hormigón en las secciones estudiadas.

Ruta	Provincia	Sección	Año construcción	f'c (kPa)	Ec (kPa)	MR (kPa)	Fuente
				(A 28 días)	(A 28 días)	(A 28 días)	
RNA019	Córdoba	Fábrica Fiat-Km 20	1975	N/A	27862393	4366	Ensayos FWD
RN 158	Córdoba	Quebracho Herrado-Colonia Prosperidad	1975	N/A	32316982	5064	Ensayos FWD
RN7	Mendoza	Punta de Vacas-Co. Ardito+1 Km	1980	N/A	25192050	3948	Ensayos FWD
		Co. Ardito+1 Km-Penitentes+1 Km	1980	N/A	28804596	4374	Ensayos FWD
		Penitentes+1 Km-A° La Salada	1980	N/A	28804596	4514	Ensayos FWD
		A° La Salada-Frontera Argentina/Chile	1980	N/A	29506887	4624	Ensayos FWD
RN127	Entre Ríos	Federal-Miñones (Sección I)	1997	36650	33636000	4780	ICPA
		Miñones-La Hiera (Sección II)	1997	40670	35431400	5040	ICPA
		La Hiera-San Jaime (Sección III)	1997	39300	34828600	4950	ICPA
	Corrientes	San Jaime-Cuatro Bocas (Sección IV)	1997	46250	33545600	4775	ICPA
RN177	Santa Fe	RP21-RN9	1965	N/A	29898910	4685	Valor por defecto
RP39	Santa Fe	San Javier-A° Saladillo Amargo	1999	31670	28360000	4440	ICPA
RN7	San Luis	Lím. con Córdoba / Lím. con Mendoza	2003	N/A	29898910	4685	Valor por defecto
RN157	Santiago del Estero	Frías-Lavalle	1980	N/A	29898910	4685	Valor por defecto
RN157	Tucumán	Circ SM de Tucumán-Bella Vista	1951	N/A	29898910	4685	Valor por defecto

Tabla 4. Características de materiales para capas de base y subbase

Ruta	Sección	Propiedades de base o subbase															
		Base o subbase	Espesor (cm)	CBR (%)	MR (kPa)	f'c (kPa)	qu (kPa)	HRB	CBR (%)	#200	#40	#10	#4	#3/4	LL	IP	MR (kPa)
RNA019	Fábrica Fiat-Km 20	Granular tratada	12,5	---	6201000	1723	---	A-4(8)	8	98	100	100	100	100	25	3	66900
RN 158	Quebracho Herrado-Colonia Prosperidad	Granular	20,0	40	186610	---	---	A-6(11)	4	90	100	100	100	100	35	17	41300
RN7	Punta de Vacas-Co. Ardito+1 Km	Base anticongelante	20,0	80	290790	---	---	A-1-b(0)	20	20	35	50	70	100	---	---	119750
	Co. Ardito+1 Km-Penitentes+1 Km																
	Penitentes+1 Km-A° La Salada	Base drenante	20,0	40	186610	---	---										
	A° La Salada-Frontera Argentina/Chile	Base drenante	25,0	80	290790	---	---										
		Subbase adicional	20,0	40	186610	---	---										
		Subbase anticongelante	50,0	40	186610	---	---										
Subbase de agregado grueso		40,0	40	186610	---	---											
RN127	Federal-Miñones (Sección I)	Suelo cemento	12,5	---	548205	---	3920	A-7-6(20)	2	90	100	100	100	100	80	55	35560
	Miñones-La Hiera (Sección II)																
	La Hiera-San Jaime (Sección III)	Suelo cal	30,0	---	308500	---	1960										
	San Jaime-Cuatro Bocas (Sección IV)																
RN177	RP21-RN9	Suelo cemento	10,0	---	548205	---	3920	A-7-6(10)	4	90	100	100	100	100	44	14	41300
		Subbase de arena	20,0	30	155225	---	---										
RP39	San Javier- A° Saladillo	Suelo cemento	12,0	---	548205	---	3920	A-7-6(16)	2	90	100	100	100	100	50	25	27435
RN7	Lte Cba/SL-RN8	Suelo cemento	12,5	---	548205	---	3920	A-4(7)	8	70	90	100	100	100	25	3	66600
	RN8-RN148(Der)																
	RN148 (Der)-RN148 (Izq)																
	RN148 (Izq)-Fraga																
	Fraga-RN147																
	RN146-Balde																
Balde-Lte.SL/Mza																	
RN157	Frías-Lavalle	Granular tratada	12,0	---	10472800	4900	---	A-4(8)	4	70	90	100	100	100	19	0,7	41300
RN157	Circ. SM de Tucumán-Bella Vista	Ninguna	---	---	---	---	---	A-6(10)	40	80	90	100	100	100	30	15	41300

4.4 Recolección de Datos de Deterioros

A través de sucesivas campañas, se relevaron deterioros tales como escalonamiento y deterioro en juntas y fisuración de losas. El escalonamiento se registró mediante un escalonímetro, en tanto que los otros tipos de deterioro fueron relevados en planillas mediante inspección visual (Fig. 6), siguiendo las directivas indicadas en el Manual de Identificación Deterioros del LTPP (SHRP, 1993). En cada sección analizada se registró la temperatura ambiente. Los datos de IRI fueron suministrados por la DNV e ICPA. Luego se procesó y revisó toda la información para ser introducida en el software MEPDG.



Figura 6. Escalonímetro utilizado y relevamiento de deterioros en campaña

5. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN PARA CADA MODELO DE DETERIORO

Contando con la información requerida, se procedió posteriormente a calibrar los modelos de deterioro MEPDG, tal como se describe en las siguientes secciones.

5.1 Modelo de Escalonamiento de Juntas Transversales

El escalonamiento de juntas transversales se determina mediante una aproximación incremental. Este deterioro comienza cuando el pavimento se habilita al tránsito y su evolución a lo largo del tiempo se determina mes a mes. A tal efecto, se usan estas ecuaciones (NCHRP, 2004):

$$Fault_m = \sum_{i=1}^m DFault_i \quad (1)$$

$$DFault_i = C_{34} (FAULTMAX_{i-1} - Fault_{i-1})^2 DE_i \quad (2)$$

$$FAULTMAX_i = FAULTMAX_0 + C_7 \sum_{j=1}^m DE_j \log \left(1 + C_5 5.0^{EROD} \right)^{C_6} \quad (3)$$

$$FAULTMAX_0 = C_{12} d_{curling} \left[\log(1 + C_5 5.0^{EROD}) \log\left(\frac{P_{200} WetDays}{P_s}\right) \right]^{C_6} \quad (4)$$

$$C_{12} = C_1 + (C_2 FR^{0.25}) \quad (5)$$

$$C_{34} = C_3 + (C_4 FR^{0.25}) \quad (6)$$

Donde:

Fault_m = escalonamiento medio al final del mes “m” (pulg)

ΔFault_i = incremento de escalonamiento en juntas durante el mes “i” (pulg)

FAULTMAX_i = escalonamiento máximo medio para el mes “i” (pulg)

FAULTMAX₀ = escalonamiento inicial máximo medio (pulg)

DE_i = energía de deformación en esquina de losa acumulada en el mes “i”

EROD = factor que representa la erosionabilidad de la subbase, adopta valores entre 1 (extremadamente resistente) y 5 (muy erosionable)

δ_{curling} = deformación media mensual máxima en esquina (hacia arriba) debida a alabeo térmico y secado (pulg)

P₂₀₀ = % que pasa el tamiz N°200 del material de subrasante

WetDays = días en el año en que la subbase se encuentra saturada

P_s = tapada sobre subrasante (lbs)

Los valores por defecto de los coeficientes de calibración son:

C₁ = 1,0184; C₂ = 0,9166; C₃ = 0,002185; C₄ = 0,000884; C₅ = 250; C₆ = 0,40; C₇ = 1,83312.

En las ecuaciones 1 a 6, el usuario puede modificar los coeficientes C₁ a C₇. Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad mediante el cual se determinó que el coeficiente de calibración que tiene más incidencia sobre el resultado final es C₆. Este coeficiente gobierna la erosionabilidad y la energía de deformación en la esquina de losa. La Fig. 7 muestra una gráfica ejemplificando la sensibilidad de la predicción del escalonamiento al variar el valor adoptado para C₆, en un pavimento de hormigón con pasadores en juntas transversales, situado en una zona húmeda con congelamiento y suelo predominantemente fino. Puede verse que por encima del valor C₆ = 0.4, el escalonamiento predicho comienza a crecer notablemente.

Para cada sección de estudio se calibraron los valores del coeficiente C₆ utilizando el software MEPDG, variando dicho coeficiente hasta lograr la coincidencia entre los valores de escalonamiento predicho y observado. El factor EROD se seleccionó para cada sección de acuerdo al tipo de base, según se indica en el procedimiento establecido en la Guía MEPDG, ajustando el valor de acuerdo al comportamiento observado en el pavimento. Por

ejemplo para la RN A019 en Córdoba, con una base granular tratada y un bajo nivel observado de deterioros, se adoptó un valor EROD = 1. Para la sección II de la RN 127, donde se observó bombeo de agua con material fino en suspensión, y altos niveles de escalonamiento, tal como ilustra la Figura 8, se adoptó un valor EROD = 5.

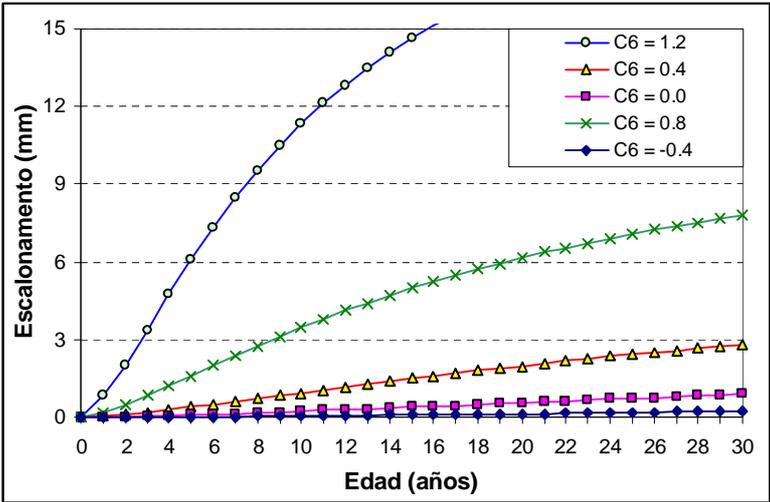


Figura 7. Análisis de sensibilidad del escalonamiento predicho (confiabilidad 50%), respecto a variaciones en el valor del coeficiente de calibración C_6



a)



b)

Figura 8. a) Bombeo en una fisura transversal de alta severidad, con eyección de material líquido. b) Sello deteriorado y elevado escalonamiento en una junta transversal

La Tabla 5 muestra, para cada sección, información general y los valores de los coeficientes C_6 ya calibrados. El valor por defecto para C_6 es 0,40, pero para la mayoría de las secciones se obtuvieron valores superiores (Tabla 5). Los valores ajustados por tramo para C_6 se graficaron en función de diversas variables independientes.

Tabla 5. Datos principales y resultados de calibración de los modelos de deterioro MEPDG para cada sección estudiada

Ruta	Sección	Espesor losa (cm)	Long. de losa (m)	Subrasante	Precipitación anual (mm)	Índice de Thornthwaite	Calibración del modelo de escalonamiento			Calibración del modelo de fisuración			Descascaramiento observado en juntas (%)	Factor de Lugar SF	IRI observado (m/km)
							EROD	Escalonamiento observado (mm)	Coefficiente C ₆	ΔT° efectivo remanente	% observado de losas fisuradas	Coefficiente C ₁			
A019	Fábrica Fiat-Km 20	21	4.5	A-4	870	13.3	1	1.95	0.27	-15	5.0	2.28	35.0	0.00	4.25
RN158	Q. Herrado –C. Prosperidad	20	5	A-6	998	23.5	4	1.87	0.33	-15	11.2	2.08	28.0	0.00	4.63
RN7	Punta de Vacas - Cerro Ardito+1 Km	20	4	A-1-b	280	-11.0	4	1.79	0.11	-20	13.2	2.22	23.6	0.06	4.25
	Co. Ardito+1 Km -Penitentes+1 Km	20	4	A-1-b	320	-1.5	4	1.51	0.03	-20	15.0	2.04	40.0	0.08	4.14
	Penitentes+1 Km - Arroyo La Salada	20	4	A-1-b	320	-1.5	4	1.89	0.02	-20	32.0	1.92	45.0	0.08	4.20
	A° La Salada – Frontera Argentina/Chile	20	4	A-1-b	366	27.4	4	2.26	0.63	-15	12.5	1.73	93.3	0.21	5.05
RN127	Sección I	23	4.5	A-7-6	1308	54.6	3	1.53	1.41	-10	6.7	1.57	9.0	0.00	3.29
	Sección II	22	4.5	A-7-6	1308	54.6	5	4.02	1.46	-10	8.6	1.57	15.2	0.00	3.33
	Sección III	22	4.5	A-7-6	1308	54.6	3	1.6	1.41	-10	5.0	1.63	11.4	0.00	2.73
	Sección IV	22	4.5	A-7-5	1496	71.4	3	3.05	1.60	-10	11.4	1.65	22.9	0.00	2.56
RN177	RP21-RN9	18	3.5	A-7-6	933	17.9	3	4.27	1.00	-15	11.4	1.85	65.7	0.00	4.79
RP39	San Javier– A° S. Amargo	18	4.5	A-7-6	1253	46.0	3	1.16	1.51	-10	6.1	2.16	15.4	0.00	2.51
RN7	Lte. Cba. -RN8	21	4.5	A-4	697	-2.5	3	0.79	0.37	-20	0.7	2.58	1.4	0.00	2.00
	RN8 – Villa Mercedes	21	4.5	A-4	697	-2.5	3	1.23	0.49	-20	0.0	---	0.0	0.00	3.05
	V. Mercedes –RP55	21	4.5	A-4	697	-2.5	3	1.23	0.16	-20	0.0	---	0.0	0.00	2.90
	RP55 - Fraga	21	4.5	A-4	697	-2.5	3	1.02	0.17	-20	0.0	---	3.8	0.00	2.19
	Fraga-RN147	21	4.5	A-4	628	-12.7	3	1.32	0.22	-20	6.9	2.45	2.3	0.00	2.33
	RN147-Balde	21	4.5	A-2-4	628	-12.7	3	1.62	0.51	-20	1.4	2.55	4.3	0.00	2.12
	Balde - Lte. Mza	21	4.5	A-2-4	628	-12.7	3	1.53	0.57	-20	1.1	2.54	0.6	0.00	2.16
RN157	Sgo. Estero	22	6	A-4	526	-25.6	3	1.92	0.82	-20	10.0	2.27	0.0	0.00	4.54
	Tucumán	19	6	A-6	966	20.1	5	4.76	0.58	-15	66.2	1.98	41.4	0.00	6.89

Se pudo observar una clara tendencia al graficar C₆ en función del tipo de subrasante (granular o fina) y de la precipitación anual. Los valores más altos de C₆ se obtienen para rutas ubicadas en los lugares más húmedos y con subrasante fina. Esto es razonable, puesto que en esta situación el riesgo de bombeo en juntas es mayor, con el consecuente incremento en el escalonamiento de las juntas. También hay otras variables que muestran una cierta correlación con C₆, tales como la edad del pavimento y la longitud de las losas.

Con el propósito de verificar si era factible elaborar un modelo simplificado que permitiera reflejar dichas tendencias, y estimar de manera aproximada el valor a adoptar para el coeficiente C₆ para diferentes condiciones, se realizó una serie de análisis de regresión lineal múltiple entre el coeficiente C₆ y diversas variables. Se obtuvo finalmente la expresión

que se muestra en la Ec. 7, que permite estimar C_6 a partir de un conjunto de variables. Se indican entre paréntesis los valores estadísticos “t” obtenidos para cada parámetro de la regresión, mostrando que todos los parámetros estimados resultaron suficientemente significativos al 95% de confianza.

$$C_6 = -1,11326 + 0,00154 \ln(\text{PREC}) - 1,086 \text{ SUBR} + 0,8315 \text{ BASE SUBR} + 0,0189 \text{ LLOSA}^2 + 0,1775 \ln(\text{EDAD})$$

$$\begin{matrix} (-5,46) & (11,23) & & (-6,52) & & (6,22) & & (2,45) & & (3,58) \end{matrix}$$

(7)

Donde:

PREC = precipitación media anual, mm

SUBR = 1 para suelos finos (AASHTO A-4 en adelante); 0 en caso contrario

BASE = 0 para bases granulares; 1 para bases estabilizadas

LLOSA = longitud de losa (separación entre juntas transversales), en metros

EDAD = Edad del pavimento a la fecha de medición del deterioro, años

$R^2 = 0,91$; Error standard SEE = 0,16 ; n = 21

De acuerdo a los valores obtenidos para los coeficientes que indican la bondad de ajuste de la regresión, el modelo de la Ec. 7 presenta un muy buen ajuste ($R^2 = 0,91$ y SEE = 0,16), tal como puede apreciarse visualmente en la Fig. 9, donde se muestra la gráfica de valores de C_6 estimados con Ec. 7 versus valores de C_6 ajustados individualmente para cada tramo (es decir, los que aparecen en la Tabla 5).

La Ec. 7 muestra por un lado la clara correlación que existe entre el coeficiente C_6 y dos parámetros como la lluvia y tipo de suelo, que son ampliamente reconocidos como factores que afectan el escalonamiento. Pero también indica que la edad del pavimento y un incremento en la separación entre juntas transversales tienden a generar un incremento en la aparición de escalonamiento (expresado como un incremento en el valor de C_6), lo cual está asimismo de acuerdo con las principales referencias de estudios internacionales sobre este tema. Esto estaría indicando claramente que el modelo de escalonamiento, una vez ajustado para las condiciones argentinas, le asigna al tipo de subrasante, al nivel de precipitaciones, a la longitud de la losa y a la edad del pavimento una incidencia mayor a la que indica el modelo original sin ajustar (es decir, manteniendo constante el valor de $C_6 = 0,4$ tal como se presenta por defecto).

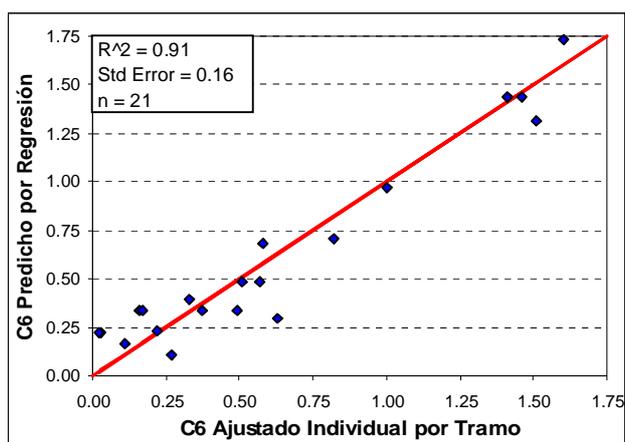


Figura 9. Valores Predichos con Ecuación 7 vs. Ajustados por Tramo para el Coeficiente C_6

Por consiguiente, la calibración efectuada permitiría mejorar sensiblemente el ajuste a las condiciones locales del modelo de escalonamiento, respecto a usar el modelo de escalonamiento original sin ajustar. Eso queda demostrado en las gráficas de la Figura 10, donde se muestra en primer lugar la dispersión que existe entre los valores de escalonamiento predichos por el modelo sin calibrar (Fig. 10-a), y luego cómo se reduce dicha dispersión a menos de la mitad, al utilizar los valores de C_6 predichos utilizando la Ecuación 7 (Fig. 10-b).

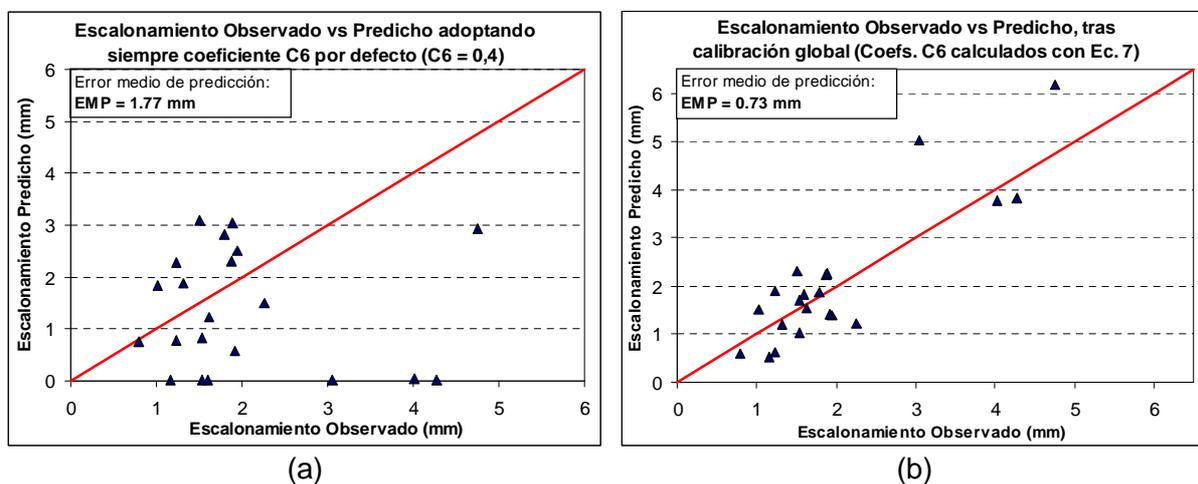


Figura 10. Dispersión del escalonamiento observado vs predicciones realizadas usando coeficiente C_6 por defecto (10-a) y usando valores de C_6 calculados con Ec. 7 (10-b)

Un aspecto adicional de la Ec. 7 es que la combinación de base estabilizada con subrasantes finas estaría contribuyendo a incrementar el valor de C_6 . No obstante, esto no debe interpretarse como una desventaja en el uso de bases estabilizadas respecto a las bases granulares, sino que en Argentina el uso de bases estabilizadas sobre suelos finos

contribuyó a reducir el escalonamiento en proporción menor a lo que hubiera indicado el modelo de escalonamiento sin calibrar (con coeficiente $C_6 = 0,4$ por defecto), siempre en base a los datos observados. En la práctica, esta situación refleja más bien la existencia de problemas constructivos en algunas secciones específicas, y en la medida que en futuros pavimentos este tipo de problemas se vaya corrigiendo, dicha tendencia un tanto anómala debería ir desapareciendo.

La Ec. 7 podría utilizarse como una aproximación preliminar para estimar el valor del coeficiente C_6 a utilizar en el diseño de un pavimento nuevo o rehabilitado, con una confiabilidad bastante aceptable en lo referente a la predicción del escalonamiento, según puede apreciarse en la Fig. 10. Al usar la Ec. 7 para estimar C_6 en un pavimento nuevo, la variable "Edad" debería adoptarse como la extensión del período de diseño (20 años o más). Sin embargo, es necesario aclarar que dicha expresión no debiera usarse fuera del rango de lluvias presentado en Tabla 5 (280 a 1500 mm/año), puesto que no fue determinado para secciones de pavimentos ubicadas en regiones más secas o más húmedas que aquellas incluidas en el estudio.

5.2 Modelo de Fisuración Transversal de Losas

En el software MEPDG, la fisuración de losas se modela como porcentaje de losas agrietadas (NCHRP2, 2004):

$$CRK = \frac{C_3}{1 + C_4 \text{Damage}^{C_5}} \quad (8)$$

Donde:

CRK = porcentaje de losas fisuradas

Daño = n/N

n = número de repeticiones de cargas previstas

N = número admisible de cargas de igual magnitud y configuración para provocar la fisuración por fatiga de la losa de hormigón

C_3, C_4, C_5 = factores de calibración (Valores por defecto: $C_3 = 100$; $C_4 = 1,0$; $C_5 = -2,0$)

El valor de N se calcula con el modelo de fatiga indicado en ecuación 9:

$$\log N_{ijklmn} = C_1 \left(\frac{MR_i}{S_{ijklmn}} \right)^{C_2} \quad (9)$$

Donde:

N_{ijklmn} = número admisible de pasadas de carga a la edad “i” (teniendo en cuenta cambios en MR, adherencia entre losa y base y deterioro de banquina), mes “j” (considerando cambios en el valor de k), tipo de eje “k”, intervalo de cargas “l”, diferencia de temperatura “m” y zona transitada por la rueda “n”.

MR_i = módulo de rotura del hormigón a la edad i (en psi).

σ_{ijklmn} = tensión de trabajo del hormigón en condiciones i, j, k, l, m, n.

C_1, C_2 = factores de calibración (Valores por defecto: $C_1 = 2,0$; $C_2 = 1,22$).

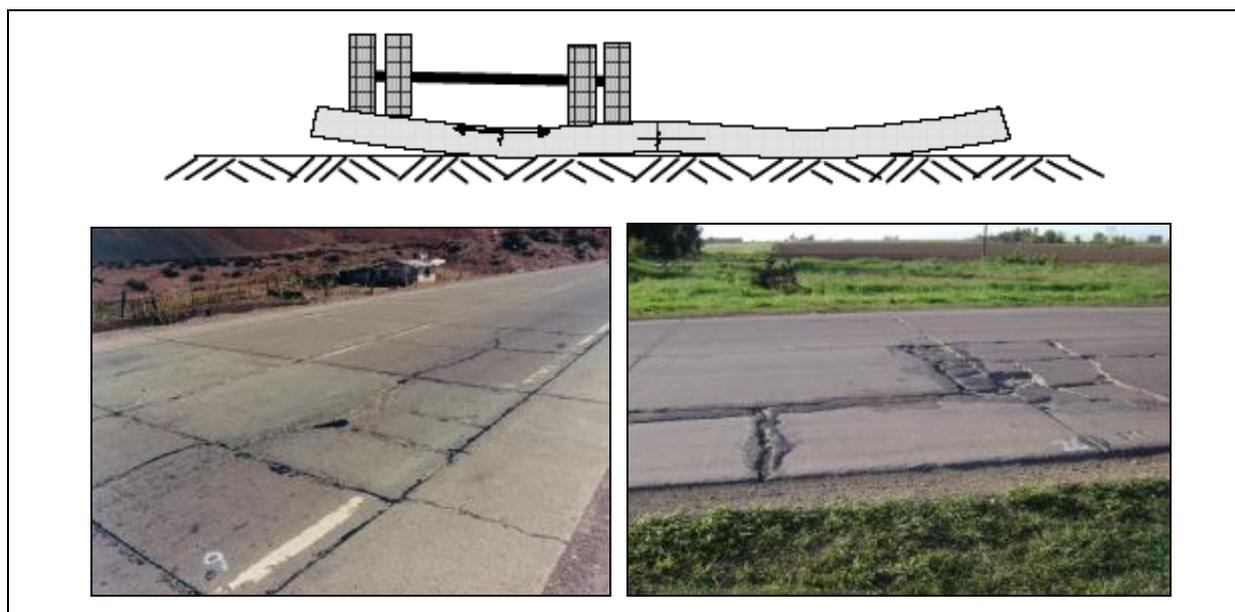
El modelo es muy complejo, y no puede ser fácilmente reproducido en planilla electrónica de cálculo, por lo tanto debe usarse el software MEPDG para comparar los datos de deterioro observados y los predichos. Efectuando un análisis de sensibilidad de los factores de calibración, se encontró que los factores a modificar para fines de calibración eran C_1 o C_2 , los restantes eran muy poco sensibles. Se encontró que el uso de C_1 como factor de ajuste resulta más conveniente dado que aparece como un multiplicador directo en Ec. 9, en lugar de usar C_2 que aparece como un exponente en dicha expresión.

La Tabla 5 contiene datos de fisuración para las secciones analizadas. La calibración consistió en encontrar el valor de C_1 que hiciera coincidir los valores observados y predichos de porcentaje de losas fisuradas. En dicha Tabla también se muestran los valores de C_1 ya calibrados. Debe aclararse que en aquellos pavimentos donde no se había observado ningún signo de fisuración, fue imposible obtener el valor de C_1 haciendo uso de las ecuaciones 8 y 9. Es necesario registrar valores positivos de fisuración para poder ajustar este coeficiente, por lo que en las secciones donde no se observó agrietamiento no fue factible calibrar dicho modelo.

En los casos donde pudo calibrarse C_1 , se encontró que este factor variaba entre 1,57 y 2,58 (Ver Tabla 5). Parecen ser valores razonables dado que el valor por defecto es 2,00. Las secciones con fisuración menor que la esperada con el modelo sin calibrar, tenían valores de C_1 mayores que el valor por defecto, y por el contrario, si la fisuración era mayor a la esperada, $C_1 < 2$. En la Tabla 5, para condiciones argentinas, los valores bajos de C_1 (alta fisuración) corresponden a lugares con clima húmedo (RN 127, RP 39 y RN 177). También se tiene esta situación para RN 7 (Mendoza), especialmente en secciones situadas a mayor altitud, cerca de la frontera entre Argentina y Chile. Estas secciones están sometidas a nevadas severas durante el invierno con el posterior deshielo en primavera.

Hay dos problemas principales que parecen ser la causa del alto grado de fisuración observado en esas secciones. En primer lugar, en lugares húmedos o de alta montaña, las condiciones de soporte parecen ser más pobres de lo que sería esperable según la información ingresada, por lo tanto las losas se vuelven relativamente inestables bajo cargas pesadas de tránsito, incrementándose la fisuración.

Pero además de este fenómeno, en la RN 7 en Mendoza y la RN 177 en Santa Fe, el espaciamiento entre juntas transversales es menor de 4 m. Al ser losas más bien “cortas”, la posición crítica de cargas puede modificarse respecto a las hipótesis de carga crítica adoptadas por los modelos convencionales, generando una posible fisuración longitudinal anterior a las grietas transversales. Una vez que la losa se ha dividido por estas fisuras, aparecen rápidamente las fisuras transversales. La Figura 11.a muestra este problema en secciones de la RN 7 y la Figura 11.b ilustra la misma situación en la RN 177. En ambos casos, la trocha con mayor agrietamiento es la que soporta cargas más elevadas.



a. Fisuras en RN7, Mendoza

b. Fisuras en RN177, Santa Fe

Figura 11. Fisuras longitudinales y transversales severas observadas en pavimentos viejos.

Si este fuese el patrón que ha seguido la evolución real de las fisuras, la guía MEPDG en su actual versión no lo contempla, ya que no efectúa predicción de grietas longitudinales, debiendo por lo tanto realizar una hipótesis simplificativa para poder ajustar este modelo en su estado actual, e indicándolo como una posible limitación de la aplicabilidad de este modelo, la cual debe ser verificada con estudios más detallados del fenómeno estudiado.

Considerando sólo las grietas transversales, los valores ajustados del coeficiente C_1 muestran una clara correlación con el Índice de Thornthwaite, tal como se grafica en Fig. 12. Sin embargo, no resulta convincente expresar a C_1 en función exclusivamente del Índice de Thornthwaite, porque hay muchos factores que tienen también influencia en la evolución de la fisuración, tales como tipo de base, espesor de losa, espaciamiento entre juntas transversales, etc.

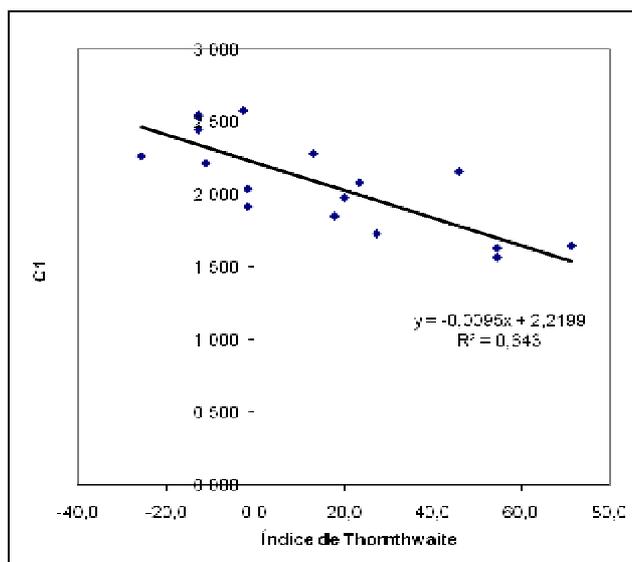


Figura 12. Correlación entre el coeficiente C_1 e Índice de Thornthwaite, modelo de grietas

En realidad, la Fig. 12 sólo refleja el hecho que en los pavimentos analizados, la aparición de grietas ha resultado un poco más notoria para condiciones climáticas más húmedas y donde las condiciones de agua libre son más evidentes, lo cual es fielmente reflejado por valores altos del Índice de Thornthwaite. Pero esta situación, más que deberse a una insuficiente resistencia a la fatiga por parte del hormigón, o a la adopción de espesores de losa inadecuados, estaría más bien asociada a problemas en las condiciones de apoyo bajo la losa, las cuales asociadas a la acumulación de agua libre bajo la losa, terminan por generar pérdida de material fino por bombeo.

Bajo esas condiciones, las cargas de tránsito muy elevadas provocan deflexión excesiva en zona de juntas, acelerando la aparición de grietas en las losas; además, en estas condiciones habitualmente aparece también un escalonamiento importante, lo cual refrenda la hipótesis de que el problema es de falta de soporte, más que de diseño inadecuado de losas o mala calidad del hormigón. La experiencia que se va generando al respecto en nuestro país hace prever que en la medida que se tomen precauciones para asegurar las

condiciones de soporte y minimizar la presencia de agua libre bajo la losa en los nuevos pavimentos, la tendencia mostrada en la Fig. 12 debería ir desapareciendo.

No obstante, a efectos de reflejar el comportamiento de los pavimentos evaluados, que es el principal propósito de la calibración realizada en este estudio, se desarrolló también en este caso un análisis de regresión lineal múltiple considerando los valores de coeficientes C_1 ajustados para cada sección (Tabla 5) como variable dependiente, y otros parámetros, además del Índice de Thornthwaite, como potenciales variables explicativas.

Se llegó de esta manera a la expresión indicada a continuación en la Ecuación 10, donde se aprecia que todos los estimadores resultan estadísticamente significativos al 90% de confianza, con sus correspondientes estadísticos t entre paréntesis.

$$C_1 = 2,5338 - 0,0105 \text{ TMI} - 0,1558 \ln(\text{EDAD}) + 0,159 \text{ SUBR} \quad (10)$$

$(18,6) \quad (-6,84) \quad (-3,28) \quad (1,75)$

Donde:

C_1 : Coeficiente de calibración del modelo de agrietamiento transversal

TMI : Índice de Humedad de Thornthwaite

EDAD: Edad del pavimento desde la construcción, años

SUBR = 1 para suelos finos (AASHTO A-4 en adelante); 0 en caso contrario

$R^2 = 0,78$; $N = 18$; $SEE = 0,16$

El modelo estimado en la Ec. 10, además de incorporar la incidencia del Índice de Thornthwaite, tal como se ha discutido previamente, refleja la influencia de la edad del pavimento como factor tendiente a incrementar el agrietamiento, e indica asimismo que la incidencia de un suelo fino resultaría menos perjudicial que lo esperado, en ambos casos respecto a lo estimado por el modelo sin calibrar (con $C_1 = 2,0$ para todas las secciones).

La Fig. 13 presenta la gráfica de valores C_1 ajustados para cada sección individualmente, versus los valores de C_1 estimados usando la Ec. 10, mostrando un ajuste bastante aceptable.

que se cuente con información más confiable sobre el mismo. En consecuencia, si bien se puede utilizar la Ec. 10 como una forma aproximada de estimar los factores C_1 que convendría aplicar para el diseño de pavimentos nuevos, debe hacerse teniendo en cuenta que el ajuste realizado es de tipo preliminar, y que debe seguirse investigando el funcionamiento del modelo de grietas en pavimentos rígidos para profundizar su calibración a través de futuros estudios.

5.3 Calibración del Modelo de IRI

De acuerdo con el modelo de rugosidad IRI incorporado en la Guía MEPDG y presentado en la Ec. 11 (NCHRP, 2004), el IRI es función de distintos tipos de deterioro, previamente predichos por el modelo. Por lo tanto, la calibración de este modelo debe efectuarse luego de calibrar los modelos de escalonamiento y fisuración.

$$IRI = IRI_0 + C1 CRK + C2 SPALL + C3 TFAULT + C4 SF \quad (11)$$

Donde:

IRI = IRI predicho (en pulg/milla)

IRI_0 = IRI inicial luego de construcción (en pulg/milla)

CRK = porcentaje de losas con fisuras transversales (todos los grados de severidad)

SPALL = porcentaje de juntas deterioradas con severidad media y alta

TFAULT = escalonamiento en juntas transv., suma total acumulada por milla, en pulgadas

SF= Factor de Lugar;

$$SF = AGE (1 + 0,5556 FI) (1 + P_{200}) 10^{-6} \quad (12)$$

AGE = edad del pavimento (años)

FI = índice de congelamiento (°F-día)

P_{200} = porcentaje de pasa tamiz N°200 de la subrasante

Factores de calibración por defecto:

$C1 = 0,8203$; $C2 = 0,4417$; $C3 = 1,4929$; $C4 = 25,24$

El deterioro de juntas (SPALL) es predicho por modelos incluidos dentro del software MEPDG pero que no pueden ser calibrados por el usuario, lo cual representa una limitación del estado actual del software. En consecuencia, la calibración del IRI para cada sección no puede hacerse de la misma manera que se procedió para escalonamiento y fisuración, ya que no se pueden ajustar individualmente los datos de deterioro de juntas respecto a su correspondiente modelo.

En lugar de ello, en este trabajo se efectuó una aproximación global haciendo uso de los datos observados para escalonamiento, fisuración y deterioro de juntas, y por medio de un análisis por regresión lineal múltiple, se estimaron los factores de calibración para el modelo de IRI, que reflejaran la situación de los pavimentos rígidos en Argentina.

Para desarrollar la calibración, es necesario en primer lugar adoptar valores de IRI inicial luego de construido el pavimento (IRI_0 en la Ec. 11). Este dato no estaba disponible en ningún caso, pero para considerar valores razonables, se llevó a cabo un análisis de la correlación entre la edad de los pavimentos y el IRI medido en cada caso, utilizando los valores de IRI que se presentan en la Tabla 5. Adoptando una relación lineal entre ambas variables, y extrapolando hasta obtener el valor de IRI que corresponde a Edad = 0, puede realizarse una estimación suficientemente aceptable de IRI_0 para su posterior uso en el proceso de calibración del modelo de IRI.

La Fig. 15 muestra el análisis efectuado analizando por separado pavimentos “nuevos” de aquellos más “antiguos”. Los más “nuevos” son aquellos que han sido construidos desde mediados de la década de los ´90, cuando comienzan a utilizarse en forma generalizada las tecnologías de alto rendimiento para la construcción de pavimentos de hormigón, con el uso de pavimentadoras de encofrado deslizante. Puede verse que para los pavimentos más recientes, el valor de IRI_0 extrapolado está en el orden de los 2 m/km, en tanto que para los pavimentos más antiguos, el IRI_0 extrapolado es de aproximadamente 3 m/km.

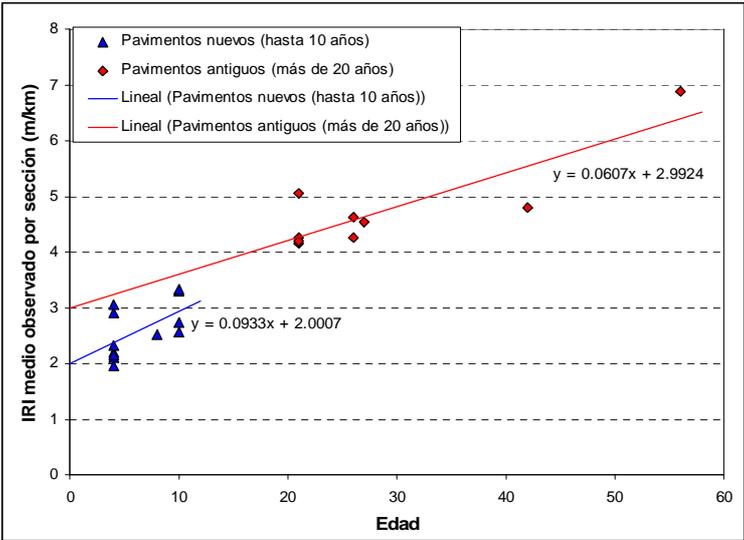


Figura 15. Estimaciones de IRI_0 mediante aproximación lineal en las secciones evaluadas

Esto muestra claramente, por un lado, la diferencia en calidad de rodadura que se puede alcanzar con las tecnologías de alto rendimiento para la pavimentación con hormigón, respecto a la construcción tradicional usada hasta hace un par de décadas, logrando reducir al menos en un tercio el valor de IRI_0 , según puede apreciarse en la Fig. 15.

En base a los resultados obtenidos, se decidió utilizar un valor de IRI_0 diferenciado por edad del pavimento, de 2 m/km para los pavimentos más recientes y de 3 m/km para los más antiguos. Para el análisis por regresión lineal respecto a los datos observados de deterioro (escalonamiento, agrietamiento transversal y juntas deterioradas), se utilizó como variable dependiente la diferencia entre IRI medido e IRI_0 ($\Delta IRI = IRI - IRI_0$), siempre en base a la información presentada en la Tabla 5. Todas las variables dentro del análisis se expresaron en unidades inglesas.

En relación al Factor de Lugar SF indicado en la Ec. 12, que es función del Índice de Congelamiento y del porcentaje de finos de la subrasante, en Tabla 5 puede verse que dicho parámetro presenta valores nulos para la mayoría de los casos analizados, donde no hay problemas de congelamiento, y un valor no nulo para el tramo analizado en la RN 7 en Mendoza que sí presenta condiciones de congelamiento en invierno, aunque finalmente SF resulta muy bajo en ese caso, debido a que tiene buenos suelos de subrasante con un porcentaje muy bajo de finos (P_{200}).

Al realizar una primera regresión lineal múltiple con ΔIRI como variable dependiente, los estimadores estadísticos de los factores C2 y C4, asociados respectivamente a la incidencia del deterioro en juntas transversales y del Factor de Lugar SF, pierden significatividad estadística, por lo cual quedan descartados del análisis.

Efectuando finalmente la regresión lineal múltiple sólo en función del escalonamiento acumulado y del agrietamiento transversal, se obtiene el modelo que se presenta en la Ec. 13, donde los estimadores de C1 y C3 sí resultan estadísticamente significativos al 95% de confianza, según muestran los estadísticos t que se indican entre paréntesis. La Figura 16 muestra el ajuste logrado en la predicción del ΔIRI a través de la Ec. 13, y la Tabla 6 presenta los valores de los coeficientes C1 a C4 por defecto y los coeficientes calibrados.

$$\Delta IRI = IRI - IRI_0 = 2,1425 \text{ CRK} + 1,9522 \text{ TFAULT} \quad (13)$$

(3,67) (4,68)

$R^2 = 0,80$; $N = 21$

SEE = 34,8 pulg/milla (0,55 m/km)

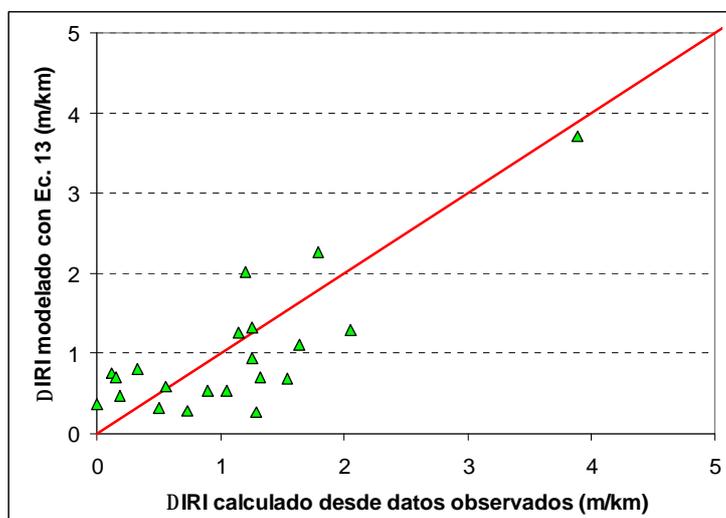


Figura 16. Δ IRI modelado con Ec. 13 vs. Δ IRI calculado desde valores observados de IRI

Tabla 6. Valores propuestos vs valores por defecto para los coeficientes de calibración del modelo de IRI.

Coeficientes obtenidos	Coeficientes originales por defecto
C1 = 2,1425	C1 = 0,8203
C2 = 0	C2 = 0,4417
C3 = 1,9522	C3 = 1,4929
C4 = 0	C4 = 25,24

Los coeficientes calibrados correspondientes a agrietamiento y escalonamiento (C1 y C3 respectivamente) resultan más altos que los valores originales por defecto, lo cual indica que estos tipos de deterioro parecen tener mayor influencia en la evolución del IRI para las condiciones argentinas, si se los compara con las condiciones norteamericanas. Por otro lado, tanto el deterioro de juntas transversales como las condiciones del sitio pierden toda su incidencia sobre el IRI hasta anularla, en comparación con las condiciones de los EE.UU.

La conveniencia de efectuar la calibración se presenta claramente en la Figura 17, donde se muestran los valores observados de IRI versus los valores predichos con coeficientes por defecto (Fig. 17-a), y versus los valores predichos luego de la calibración (Fig. 17-b), demostrando que al utilizar los coeficientes indicados en la Tabla 6, la dispersión entre datos predichos y observados se reduce prácticamente a la mitad.

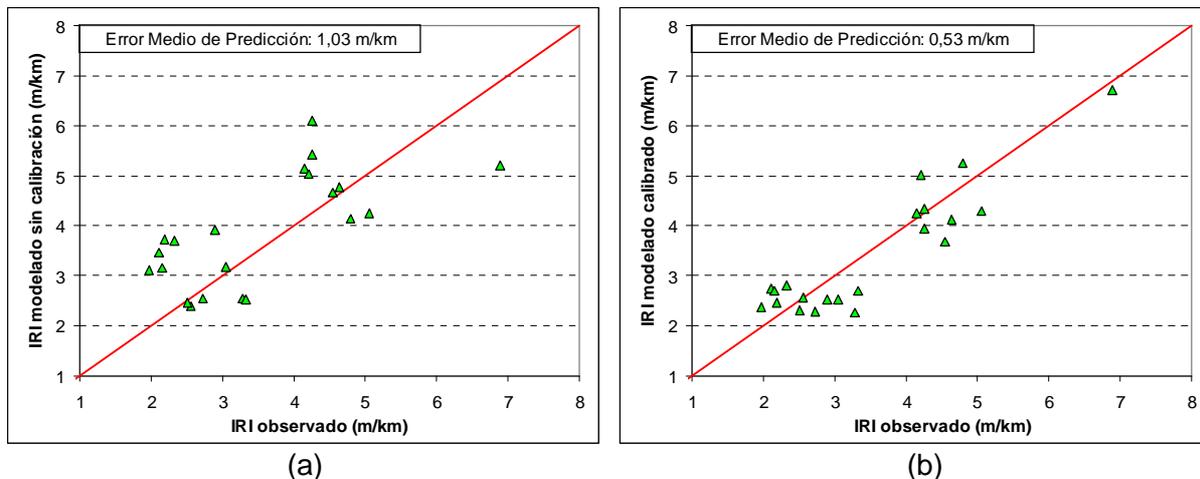


Figura 17. Dispersión del IRI observado vs. predicciones de IRI realizadas usando coeficientes por defecto (17-a), y usando coeficientes calibrados (17-b), según Tabla 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se desarrolló una metodología de calibración para ajustar los modelos de deterioro, incluidos en la Guía Mecánico-Empírica de Diseño de Pavimentos (MEPDG), para pavimentos rígidos en Argentina, en base a información recopilada en rutas situadas dentro de una amplia región correspondiente a la zona centro – norte del país. Los resultados obtenidos en esta instancia son alentadores, dado que se demuestra que la calibración realizada permite mejorar sustancialmente la confiabilidad en las predicciones de los diferentes indicadores de deterioro modelados por la Guía MEPDG.

En relación al modelo de escalonamiento de juntas, se seleccionó al parámetro que gobierna la erosionabilidad y la energía de deformación en la esquina de losa (coeficiente C_6) como el factor de ajuste a ser calibrado dentro del estudio. Los valores ajustados para dicho coeficiente en cada sección mostraron una clara correlación con la lluvia anual y el tipo de subrasante y otras variables tales como edad y longitud de losa. Por tal razón, se desarrolló una ecuación lineal simplificada para estimar el valor de C_6 en función de dichas variables, comprobándose que el uso de los correspondientes valores estimados de C_6 permite reducir hasta en un 60% el error de predicción respecto al modelo sin ajustar.

En el caso del modelo de agrietamiento, el factor de calibración seleccionado para su ajuste fue C_1 , el cual se relaciona directamente con el cociente entre las cargas aplicadas de tránsito y las cargas que provocan la fisuración por fatiga (n/N). Los valores de C_1 ajustados

individualmente por sección estuvieron relativamente cerca del valor por defecto ($C_1 = 2.0$). Se observó que para climas húmedos o fríos había más fisuras, tanto transversales como longitudinales. La explicación puede estar centrada principalmente en la pérdida de soporte bajo las losas, causada por el bombeo de finos y presencia de agua libre bajo losa, en condiciones de apoyo insuficiente de subbase y/o subrasante y altas deflexiones por cargas de tránsito elevadas. También se desarrolló una ecuación simplificada para estimar C_1 en función de las condiciones de humedad, la edad del pavimento y el tipo de subrasante, y el uso de los coeficientes C_1 estimados a través de dicha ecuación permiten reducir el error de predicción del agrietamiento prácticamente en la misma proporción alcanzada para el modelo de escalonamiento.

Respecto al modelo de IRI se pudo determinar por aproximación, a partir del análisis de la información disponible, que hay una significativa diferencia en el valor de IRI inicial (IRI_0) entre los pavimentos construidos a partir de la década de los '90, cuando se introdujeron en el país las tecnologías de alto rendimiento para la construcción de pavimentos rígidos, respecto a los pavimentos construidos con anterioridad, empleando metodologías tradicionales. Según las estimaciones realizadas, el uso de las tecnologías actualizadas ha permitido mejorar la calidad de rodadura en alrededor de un 30%, en términos de IRI, respecto a los procedimientos antiguamente utilizados.

Se determinaron también coeficientes de calibración para el modelo de IRI siguiendo una aproximación global por regresión lineal. Se pudo observar que la fisuración de losas y el escalonamiento y deterioro de juntas tienen mayor influencia en el IRI que los coeficientes indicados por defecto del modelo de la Guía MEPDG, y que el uso de los coeficientes calibrados permite disminuir el error de predicción del IRI a casi la mitad, respecto al modelo original sin calibrar.

Como recomendaciones, cabe indicar que resulta necesario profundizar la investigación, para verificar los resultados obtenidos cuando se presenten condiciones diferentes a las analizadas. Los pavimentos analizados están ubicados principalmente en zonas llanas, con clima de húmedo a sub-húmedo. Solamente se tuvo en cuenta una ruta en clima frío de montaña. Asimismo, futuros estudios basados en información de campo más detallada y precisa, sobre todo de las variables que representan las características y la resistencia de las capas del paquete estructural, podrán indudablemente mejorar la comprensión del comportamiento del pavimento.

En tal sentido, es recomendable seguir realizando la verificación con nuevos datos de campo, que incluyan asimismo mediciones reales del valor de IRI_0 en pavimentos nuevos, al momento de su habilitación al tránsito.

No obstante, se considera que la muestra de pavimentos analizada es suficientemente representativa de la situación actual de los pavimentos rígidos en Argentina, por lo cual los resultados derivados de la calibración efectuada pueden ser considerados también bastante representativos del comportamiento esperable para nuevos pavimentos rígidos que se construyan en futuras ocasiones.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto del Cemento Portland Argentino (ICPA) por el apoyo continuo y por la información aportada sobre medición de IRI en rutas nuevas, datos muy útiles para este trabajo. También se desea agradecer la información provista por la DNV y el Servicio Meteorológico Nacional, y el apoyo dado por la Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña (EICAM) y por la Universidad Nacional de San Juan y el CICITCA, quienes financiaron buena parte del proyecto de investigación.

8. BIBLIOGRAFÍA

AASHTO (1993) *“Guide for Design of Pavement Structures”*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 1993.

AASHTO (1998) *“1998 Supplement to the AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, Part II — Rigid Pavement Design & Rigid Pavement Joint Design”*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1998.

Bustos, M.; Marcet, J.; Cordo, O.; Girardi, P.; Pereyra, M.; Altamira, A. (2006) “Evaluation of Performance of PCC Pavements in Mid-Western Argentina, and Comparison with LTPP Data Using HDM-4 Distress Models”. *Transportation Research Record N° 1947*, pp. 110 - 120. Journal of the Transportation Research Board. National Academies, Washington D.C., U.S.A., August 2006.

De La Torre, A.; González, C (1994). "*Determinación del Factor Equivalente de Carga de los Vehículos del Parque Automotor Argentino en la Región Cuyo*". Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña, San Juan, Argentina, 1994.

EICAM (2003) "*Evaluación y Ajuste de los Modelos HDM4 de Predicción del Deterioro en Pavimentos de Hormigón para Argentina*". Final Report, Research Project N° 21/1198. Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña, Facultad Ingeniería U.N.S.J. April 2003.

NCHRP (2004) "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Final Report". *NCHRP Project 1-37A*. National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board, National Research Council, March 2004.

Packard, Robert G. (1984) "*Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements*". Portland Cement Association PCA, Skokie, Illinois, 1984.

SHRP (1993) "Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Project". *Report SHRP-P-338*, Strategic Highway Research Program, National Research Council. May 1993.