

FUNDAMENTOS DE LA PROPUESTA DE NORMA DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN SIMPLE PARA CUBA

Félix Michael Hernández López¹, Eduardo Tejeda Piusseaut²

¹ Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor asistente, Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría", Calle 114, # 11901, e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao. La Habana. Cuba.
E-mail: fmichaelhl@gmail.com

² Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Universidad Tecnológica de la Habana "José Antonio Echeverría", Calle 114, # 11901, e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao. La Habana. Cuba.
E-mail: fmichaelhl@gmail.com

RESUMEN

El trabajo contiene los elementos fundamentales en que se basa el procedimiento de diseño de pavimentos de hormigón simple, siguiendo el criterio de fatiga y considerando las condiciones ambientales, de materiales y solicitaciones de Cuba, que son la base de la propuesta de norma recientemente elaborada. Para su confección se identificaron los factores fundamentales de diseño, haciendo énfasis en los modelos de comportamiento a fatiga, cuya ley empírica determina el número de repeticiones admisibles en la losa como función de la relación entre la tensión en el borde debido a las cargas y el módulo de rotura del hormigón. Se utilizó la simulación numérica combinada con la experimentación como herramienta para evaluar el comportamiento de estas estructuras en las condiciones de Cuba. La norma incluye gráficos y tablas que facilitan el trabajo de los diseñadores, con un modelo probabilístico que permite determinar el número de repeticiones admisibles, donde se introduce la confiabilidad como un factor en el diseño.

Palabras claves: erosión, fatiga, pavimento de hormigón simple, repeticiones admisibles

FUNDAMENTALS FOR THE PROPOSAL OF STANDARD FOR SIMPLE CONCRETE PAVEMENTS IN CUBA

ABSTRACT

The work contains the fundamental elements on that the procedure of design of pavements of simple concrete is based, following the approach of fatigue and considering the environmental conditions, of materials and solicitations of Cuba that are the base of the proposal of recently elaborated norm. For their making the fundamental factors of design were identified, making emphasis in the behavior models to fatigue whose empiric law determines the number of acceptable repetitions in the slab like function of the relationship among the tension in the border due to the loads and the module of break of the concrete. The numeric simulation was used combined with the experimentation like tool to evaluate the behavior of these structures under the conditions of Cuba. The norm includes graphics and charts that facilitate the work of the designers, with a probability model that allows to determine the number of acceptable repetitions, where it is introduced the dependability like a factor in the design.

Keywords: erosion, fatigue, simple concrete pavement, admissible repetitions.

Nota Editorial: Recibido septiembre 2019; Aceptado: diciembre 2019

1. INTRODUCCIÓN

Cuando a principios del siglo XX, el hombre construyó los primeros pavimentos de hormigón hidráulico, en algunas ciudades de Europa y Estados Unidos, comienza ya a preocuparse por el estudio de todos los aspectos influyentes en su diseño, construcción y rehabilitación. A partir de entonces surgen teorías e hipótesis que intentan explicar el comportamiento real de estas estructuras. Estas investigaciones se dividen en dos principales tendencias: la empírica, que parte de estudios experimentales realizados en laboratorios y pistas de ensayos, la empírico-mecanicista, que describe la respuesta de los pavimentos mediante conocimiento teóricos derivados de la mecánica del continuo y ecuaciones diferenciales, estas respuestas son introducida en modelos de comportamiento que evalúan como trabaja la estructura durante su etapa de servicio [1],[2], [3].

En los pavimentos de hormigón o rígidos como también se conocen, el buen desempeño se puede garantizar a partir de mitigar la aparición de dos deterioros fundamentales, fatiga provocada por la acción repetidas de las cargas del tráfico y la erosión del cimientto de la estructura. Para lograrlo es necesario limitar las tensiones y deflexiones que se originan en determinadas zonas de la losa, por tanto, los diferentes métodos proponen procedimientos que permiten el dimensionamiento de la estructura de forma tal que disminuya la probabilidad de fallo dentro del período de diseño [4], [5], [6], [7].

En Cuba las carreteras y calles construidas con pavimentos de hormigón hidráulico constituyen un bajo por ciento del total de las vías pavimentadas, según una actualización en el año 2014 realizada por el Centro Nacional de Vialidad, sin embargo, de esta proporción la mayor parte lo constituyen vías de interés nacional y urbanas.



Figura 1: Estado actual de la red de carreteras del país

Durante la década de los años 50 del pasado siglo esta solución fue ampliamente utilizada, en el período posterior a 1959, la necesidad de otras construcciones motivó que casi no se construyeran vías con pavimentos rígidos, por un período de aproximadamente 20 años. Posteriormente, con el surgimiento de la crisis energética y a su vez el incremento de la producción nacional de cemento, así como situaciones surgidas en la política de conservación de carreteras y calles hicieron que los pavimentos de hormigón hidráulico fuese una variante a analizar. Por eso, a finales de la década de los 80 del pasado siglo, se diseñaron y construyeron varios pavimentos de hormigón hidráulico. Algunas de las principales obras se reseñan a continuación.

- Prolongación de la Avenida Carlos Manuel de Céspedes.
- Ampliación de la Avenida de Rancho Boyeros.
- Ampliación de la Vía Blanca.
- Autopista Este – Oeste (Habana-Pinar del Río).

En los años 50 hasta los 90 se conoce a través de la experiencia, que la carencia de un documento normativo para el diseño, condujo a la adopción del método de la *Portland Cement Association (PCA)* [5]. Este método tiene una base empírico-mecanicista y consiste en suponer un espesor a partir de condiciones específicas de tráfico y materiales, para luego comprobar si cumple simultáneamente con dos criterios, fatiga y erosión. El primero, se encarga de limitar las tensiones para que la acción repetida de esta no cause el fallo por fatiga antes que concluya el período de diseño, el segundo, controla las deflexiones en la zona de las juntas para que no se acelere el fenómeno de pérdida del material en el cimientto por erosión. Los resultados aplicando esas normas fueron buenos, pues hoy en día aún permanecen en servicio mucha de esas vías superando los 30 años de explotación, sin embargo, se puede cuestionar la racionalidad de los diseños realizados con anterioridad, pues se conoce que no se ajustan a las condiciones de tráfico, materiales y clima de Cuba [8].

Este cuestionamiento, unido a otros problemas originados por el empleo inconsistente de normas para el diseño de pavimentos que no tienen en cuenta la acción repetida de las cargas (Ejemplo: empleo de normas para pisos industriales) demuestran la necesidad de realizar investigaciones con el propósito de adaptar un procedimiento a las condiciones de Cuba.

El objetivo del presente artículo está en proponer un procedimiento para el diseño de pavimentos de hormigón simple modificando el método de la PCA (con antecedentes constructivos en Cuba) de forma tal que factores tales como el tráfico, materiales y calidad del cimienta se ajusten a las condiciones del país. Para ello primero, se explica de forma secuencial como se evaluarán cada uno de los factores de diseño (tráfico, calidad del cimienta y hormigón de la losa, etc.). Posteriormente se proponen expresiones y gráficos que permite evaluar el comportamiento a fatiga de la losa introduciendo la confiabilidad en el diseño como nuevo enfoque. Finalmente se realiza la evaluación del comportamiento ante la erosión del cimienta a partir de tablas y nomogramas.

Para la concepción de este artículo se estudió la influencia de los factores de diseño en la respuesta estructural de las losas de hormigón, mediante el empleo de modelos numéricos previamente calibrados y validados, para simular las condiciones de trabajo de los pavimentos en Cuba. Los resultados obtenidos a través de las complejas técnicas de modelación numéricas fueron transformados en criterios y elementos básicos convencionales compresibles para los ingenieros en la práctica profesional del área de diseño de pavimentos.

2. ANÁLISIS DEL TRÁFICO DE DISEÑO

2.1 Determinación del número de vehículos pesados por el carril de diseño en el período de diseño (NTVP)

Las cargas impuestas por los vehículos ligeros no provocan en el pavimento un estado tensional de magnitud tal que genere el deterioro de la estructura, por tanto, para los propósitos de diseño los vehículos ligeros pueden ser ignorados y solo se consideran los efectos de los vehículos pesados. Para determinar las repeticiones esperadas o tráfico de diseño, se procede como sigue:

a) Determinación del Número de Vehículos Pesados, que circularán durante el período de diseño y por el carril de diseño

$$NTVP = 365 \cdot ICD_0 \cdot K_r \quad (1)$$

Donde:

K_r : Factor que toma en cuenta el crecimiento acumulado del tránsito hasta el año n , y se calcula como:

$$K_r = \frac{(1+r)^n - 1}{\ln(1+r)} \quad (2)$$

r : Razón anual de crecimiento de tránsito, para los vehículos pesados. La obtención de la razón anual de crecimiento de tránsito (r), para los vehículos pesados, exige el estudio de las tendencias de crecimiento en la red. Como aproximación, puede utilizarse el incremento anual del Producto Social Global. Se recomienda, para los casos de que no se disponga de información más precisa, una razón de crecimiento entre 0,03 y 0,04.

a) Cálculo de la intensidad promedio diaria de vehículos pesados, por el carril de diseño, durante el período de servicio de la vía

La Intensidad Diaria de Vehículos pesados en el carril de diseño, durante el primer año de servicio, puede ser obtenida mediante la siguiente expresión:

$$ICD_0 = TPD_0 \cdot \frac{P_{VP}}{100} \cdot \frac{P_{CD}}{100} \cdot k \quad (3)$$

El tránsito inicial (TPD_0) se estima a partir de los estudios para construir la vía o sobre la base del uso potencial de la tierra u otros factores.

La composición y distribución del flujo en la sección transversal está dada por los siguientes parámetros:

- ✓ k : Factor de distribución por sentido de circulación.
- ✓ P_{VP} : Proporción de vehículos pesados respecto al total (%).
- ✓ P_{CD} : Proporción de vehículos pesados en el carril de diseño (%).

El coeficiente k tiene en cuenta la distribución del tráfico total por sentido de circulación, generalmente el valor puede ser asumido como 0,5 (tráfico balanceado). Los parámetros P_{VP} y P_{CD} se obtienen mediante recuentos, en una vía de similares características a las del diseño. En ausencia de datos más precisos, se pueden utilizar los valores de la tabla 1.

Tabla 1: Composición típica del tránsito para diferentes tipos de vías

Tipo de Vía		Porcentaje de vehículos pesados	
		En la corriente vehicular (P_{VP})	En el carril de diseño (P_{CD})
Calles y avenidas colectoras	Con limitación de camiones, sin excluir ómnibus.	30 - 40	55 - 65
	Sin limitación a la circulación de camiones.	15 - 20	
Arterias principales y secundarias.	Dentro del casco urbano.	25 - 35	Principales (80 - 90) Secundarias (70 - 80)
	En accesos a la ciudad.	35 - 45	
Arterias y otras carreteras en áreas suburbanas.		20 - 30	2 carriles 100 4 carriles (70 - 85) 6 o más (50 - 70)
Carreteras rurales de categoría I, II y autopistas.		60 - 70	

2.2 Determinación del espectro de cargas

Para determinar el espectro de carga es necesario conocer la distribución de carga por eje de cada tipo de camión, para ello se puede realizar un conteo con control de peso mediante básculas. En caso de no contar con básculas para el pesado de los vehículos, la norma propone utilizar el "Método indirecto para la determinación del espectro de cargas". En este método es necesario disponer de información sobre el peso máximo de cada vehículo pesado y los porcentajes de distribución de la carga por eje, para ello contiene en anexo los pesos de vehículos pesados y cargas por eje característicos del tráfico; las siluetas de cada vehículo posible, divididos en camiones y ómnibus rígidos, camiones y ómnibus articulados y remolques. Para cada tipo de vehículo pesado aparece la tara, carga máxima, tipos de ejes y porcentajes de distribución por ejes, información necesaria para estimar el peso por eje y el espectro de carga.

3. RESISTENCIA DEL CIMIENTO

3.1 Subrasante

A diferencia de otro tipo de pavimentos, la capacidad estructural de los pavimentos de hormigón, se encuentra principalmente proporcionada por la calzada de hormigón, ya que, gracias a su elevada rigidez, la misma se encarga de distribuir los esfuerzos sobre un área más amplia, reduciendo de esta manera las tensiones transmitidas a las capas inferiores.

Esta particularidad hace que no sea necesario que un pavimento de hormigón se encuentre sobre un cimiento de elevada resistencia, sino que resulta suficiente con que el mismo sea homogéneo, estable y permanente. Para que el pavimento de hormigón presente un comportamiento favorable en las condiciones de Cuba, se deberán atender adecuadamente 2 fuentes principales de heterogeneidad en el apoyo: pérdida de soporte por erosión (bombeo) y la presencia de suelos expansivos.

La capacidad soporte de la subrasante se cuantifica a través del módulo resiliente " Mr ", brindando la posibilidad de determinarlo mediante el ensayo triaxial cíclico o estimarlo por correlación con otros ensayos de rutina, como por ejemplo el de Índice Soporte de California (CBR). El módulo resiliente es un estimativo del módulo de elasticidad del suelo, y se basa en las determinaciones de esfuerzos y deformaciones bajo cargas rápidas, como las que reciben los materiales a través de las ruedas de los vehículos. El procedimiento de estimación es válido ya que no se requiere una determinación exacta del " Mr ", ya que pequeñas variaciones no afectan significativamente el espesor del pavimento.

A título informativo la propuesta de norma presenta valores característicos de CBR y módulos resilientes (Mr) de distintos tipos de suelos. La tabla 2 muestra dichos valores.

Tabla 2: Valores de CBR y módulos resilientes para distintos tipos de suelos

Clasificación AASHTO	Descripción	Clasificación unificada de suelos	CBR (%)		Mr (MPa)	
			Mín	Máx	Mín	Máx
Suelos granulares						
A-1-a, bien graduada	Grava	GW, GP	60	80	272	290
A-1-a, mal graduada			35	60	245	276
A-1-b	Arena Gruesa	SW	20	40	165	228
A-3	Arena Fina	SP	15	25	169	241
A-2 Material granular con alto contenido de finos						
A-2-4 gravoso	Grava Limosa	GM	40	80	228	290
A-2-5 gravoso	Grava Arena Limosa					
A-2-4 arenoso	Arena Limosa	SM	20	40	193	259
A-2-5 arenoso	Arena Gravo Limosa					
A-2-6 gravoso	Grava Arcillosa	GC	20	40	165	259
A-2-7 gravoso	Grava Areno Arcillosa					
A-2-6 arenoso	Arcilla Arenosa	SC	10	20	148	193
A-2-7 arenoso	Arcilla Grava Arenosa					
Suelos finos						
A-4	Limo	ML, OL	4	8	148	200
	Mezclas de Limo/Arena/Grava		5	15		
A-5	Limo mal graduado	MH	4	8	117	176
A-6	Arcilla plástica	CL	5	15	93	165
A-7-5	Arcilla Elástica moderadamente plástica	CL, OL	4	15	55	117
A-7-6	Arcilla muy plástica	CH, OH	3	5	34	90

3.2 Subbase granular

En general, si se cuenta con un suelo de subrasante uniforme y estable, solo resultará obligatoria la incorporación de una subbase no erosionable, en el caso que se encuentre prevista la circulación de vehículos pesados y la presencia de suelos con excesivos contenidos de fino. En estas situaciones, la subbase más que una contribución estructural, cumplirá la función de prevenir la erosión por bombeo en la interfase losa-cimiento. Además, cuando se incorpora una capa de subbase al sistema brindará, un beneficio adicional desde el punto de vista constructivo, la conformación de una plataforma de trabajo adecuada, no susceptible a las condiciones climáticas reinantes y apta para la circulación de los vehículos que se mueven en la obra.

El criterio principal para emplear una subbase granular en un pavimento de hormigón es el de limitar el contenido de finos que pasan el Tamiz No.200. Si el material cuenta con excesivos contenidos de finos, la capa puede almacenar agua, encontrándose susceptibles a la erosión por bombeo. A continuación, se brindan algunos requisitos que deben presentar la subbase para su empleo como material de cimiento.

- ✓ El espesor mínimo de subbase a emplear no será menor que 10 cm.
- ✓ El porcentaje de material más fino que el tamiz No. 200 tiene que ser menor que 15%.
- ✓ El resultado de ensayo de desgaste Los Ángeles del árido tiene que ser menor al 50%.
- ✓ El tamaño máximo del árido tiene que ser menor que 1/3 del espesor.
- ✓ El material debe compactarse con una densidad mínima al 98% del Proctor Modificado.
- ✓ Se recomienda no emplear espesores mayores a los 25 cm (criterio económico)

La incorporación de una capa de subbase para la conformación de la estructura de apoyo de la losa, involucrará además un incremento de la capacidad del cimiento, que debe considerarse durante el proceso de diseño. Para tener en cuenta tal contribución se propone un nomograma que permite determinar el Módulo Resiliente combinado [9], dado el espesor de subbase y la calidad de los materiales de subrasante y subbase (Figura 1).

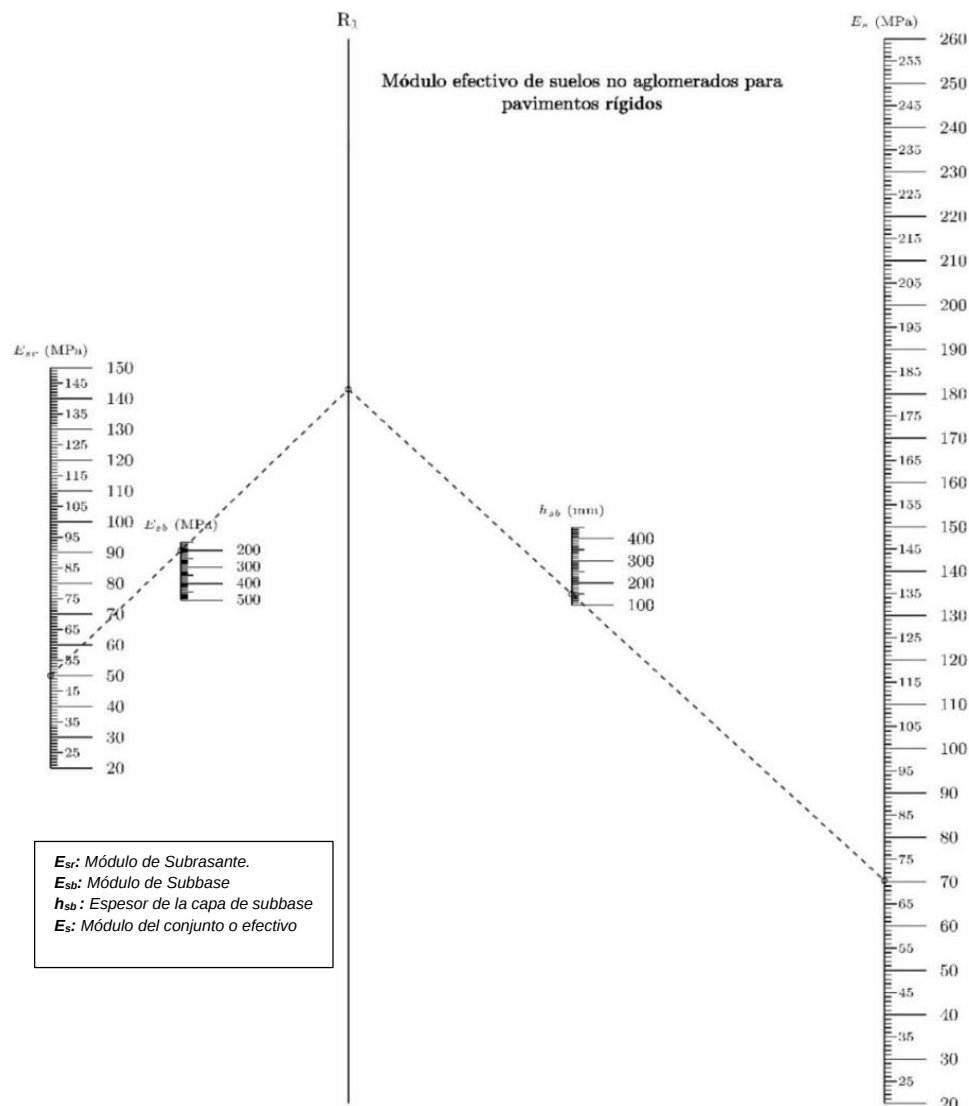


Figura 2: Nomograma para estimar el módulo resiliente en la superficie

4. CALIDAD DEL HORMIGÓN HIDRÁULICO

La resistencia del hormigón a la flexión o módulo de rotura es considerada en procedimientos de diseño, como la característica que controla el agrietamiento del pavimento bajo las cargas repetitivas de vehículos pesados, se obtiene a partir de un ensayo a flexión realizado en una viga prismática cargada a un tercio de la luz después de 28 días de curado.[10],[11].

Además del desempeño estructural del pavimento frente a cargas, otro aspecto que debe tener en consideración el proyectista al momento de seleccionar la calidad del hormigón de la losa, es que se aseguren las condiciones de durabilidad durante la vida útil. Las condiciones de durabilidad son las que definirán los parámetros mínimos de resistencia a compresión del hormigón, a emplear en la fase de diseño de la estructura ya que, a partir de la condición de exposición, se encontrará definida la relación agua/cemento. En la tabla 3 se resumen distintas condiciones de exposición y los requisitos de resistencia mínima.

Se observa en la tabla que, para la primera condición de exposición, en la que no se encuentra previsto un ambiente agresivo, no se establece ningún valor de resistencia mínima o relación agua/cemento máximo, para las estructuras de hormigón en general. Sin embargo, considerando que los pavimentos son estructuras que, además de la agresividad del medio, deben resistir la abrasión generada por el tránsito, manteniendo durante su vida útil sus características de fricción obtenidas desde su construcción, se sugiere para pavimentos de carreteras y calles, el empleo de hormigones de 30 MPa o superiores.

Tabla 3: Requisitos de durabilidad para distintas condiciones de exposición

Tipo de exposición	Máxima relación a/c	Resistencia característica mínima (MPa)
Ambiente no agresivo / normal / cálido y húmedo	0,50 *	30 *
Exposición moderada a sulfatos solubles (0,10 a 0,20 % en masa)	0,50 (**)	30
Exposición severa a sulfatos solubles (0,20 a 2,0 % en masa)	0,40 (**)	35

(*) Sin requisitos, valor sugerido.

(**) Si se emplea cemento resistente a los sulfatos (Tipos II o IV) se puede incrementar la relación agua/cemento en 0,05.

Una vez especificada la clase de hormigón a utilizar deberá determinarse la resistencia a compresión media correspondiente, mediante la siguiente fórmula:

$$f'_{cm} = f'_{ck} + s \cdot Z \quad (4)$$

f'_{cm} : Resistencia media a compresión, MPa

f'_{ck} : Resistencia característica a compresión

s: Desviación estándar

Z: Valor estándar según distribución normal, para la confiabilidad adoptada (Ejemplo: Para R=90%, Z=1.282)

En caso de no contar con la posibilidad de realizar el ensayo de flexión [10] es posible estimar M_R a partir de correlacionar este con la resistencia media a compresión a los 28 días. En el siguiente gráfico se muestra la relación que existe entre la resistencia a flexión y compresión según la [11].

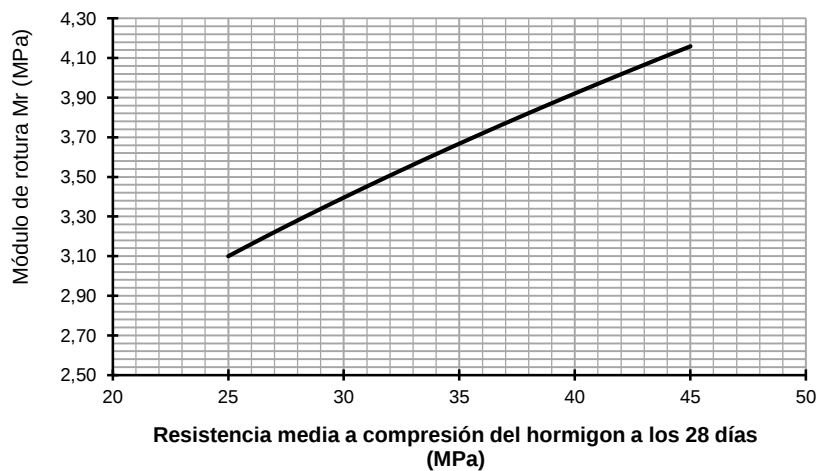


Figura 2: Relación que existe entre la resistencia a compresión y el módulo de rotura para hormigones en Cuba según [11]

5. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE LA LOSA

El comportamiento a fatiga del pavimento de hormigón se determina a partir del daño por fatiga consumida por cada una de las cargas del espectro, empleando la ecuación de Miner, que relaciona el número de ejes esperados en el período de diseño con el número de ejes admisibles antes del fallo por fatiga, bajo determinadas condiciones en el mismo período de tiempo. El valor de fatiga consumida debe encontrarse en el intervalo de 90 y 110 % (criterio de diseño). Por debajo del 90% se considera que hay exceso de espesor, por lo cual se puede mejorar reduciendo espesor; de lo contrario, por encima de 110%, el diseño refleja insuficiencia en el espesor.

$$DF_{Total} = DF_{Simples} + DF_{Tándem} + DF_{Trídem} \quad (5)$$

Donde:

- ✓ DF_{Total} : % de daño total de fatiga consumida
- ✓ DF_{Simple} : % de daño por fatiga consumida, provocado por los ejes simples
- ✓ $DF_{Tándem}$: % de daño por fatiga consumida, provocado por los ejes tándem
- ✓ $DF_{Trídem}$: % de daño por fatiga consumida, provocado por los ejes trídem

El daño por fatiga consumida se determina a partir de la ecuación de Miner:

$$DF = \sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

Donde:

- ✓ n_i : Número de ejes esperados en el período de diseño.
- ✓ N_i : Número de ejes permisibles antes del fallo por fatiga.

a) Determinación del número de ejes esperados (n_i)

El Número de ejes esperados en cada escalón de carga de la muestra, se determina como un porcentaje del número total de camiones durante el período de diseño, para ello se multiplica ese número total de camiones por la frecuencia de ese peso, del total de camiones contados en la muestra:

$$n_i = \frac{NTVP \cdot f_i}{\sum f_i} \quad (7)$$

Donde f_i es la frecuencia de i-énimo eje en el escalón.

b) Determinación del número de ejes admisibles (N_i)

En cada escalón determinado, se determina el número de ejes admisibles a partir de un modelo dependiente de la relación entre la tensión de trabajo (σ_i) y el módulo de rotura (M_R) para distintos niveles de confiabilidad (S), como:

$$\log N_i = \left[\frac{-RT^{-10.08} \cdot \log(S)}{0.0108} \right]^{0.205} \quad (8)$$

Donde

- ✓ RT : Relación de tensiones.
- ✓ S : Probabilidad de fallo de las losas al final del período de diseño.

La relación de tensiones se determina con la siguiente expresión:

$$RT = \frac{\sigma_i}{M_R} \quad (9)$$

Donde:

- ✓ σ_i : Tensión de trabajo
- ✓ M_R : Módulo de rotura del hormigón.

La tensión de trabajo es el esfuerzo que origina el eje que se analiza a determinada distancia del borde. Se determina a partir de una tensión equivalente multiplicada por un factor de corrección por carga. La tensión equivalente es la tensión que origina el eje de referencia (10 ton para eje simple y 18 ton para el tándem). Dicha tensión es determinada a partir de conocer la resistencia del cemento, el espesor de losa asumido y si se tiene o no paseo de hormigón [8],

$$\sigma_i = \sigma_{eq} \cdot f_p \quad (10)$$

Donde:

- ✓ σ_{eq} : Tensión equivalente (se muestra en un anexo de la norma)
- ✓ fp : Factor de corrección por carga (**Figura 3**)

Tabla 4: Fragmento del anexo correspondiente a la tabla de tensión equivalente (caso de losa sin paseo de hormigón)

Espesor de losa (mm)	TENSIÓN EQUIVALENTE PARA PAVIMENTOS SIN PASEO DE HORMIGÓN (MPa)															
	MÓDULO RESILIENTE DEL CIMENTO (MPa)															
	40		60		80		100		150		200		250		300	
	ES	ET	ES	ET	ES	ET	ES	ET	ES	ET	ES	ET	ES	ET	ES	ET
130	4,04	3,44	3,68	3,08	3,41	2,85	3,21	2,71	2,83	2,32	2,56	2,11	2,36	1,94	2,2	1,8
140	3,74	3,15	3,41	2,83	3,16	2,62	2,99	2,5	2,64	2,16	2,39	1,96	2,21	1,82	2,06	1,68
150	3,47	2,9	3,17	2,62	2,95	2,43	2,79	2,31	2,47	2,02	2,25	1,83	2,08	1,7	1,95	1,58
160	3,24	2,69	2,97	2,44	2,76	2,26	2,61	2,15	2,32	1,89	2,12	1,72	1,96	1,61	1,84	1,5
170	3,04	2,5	2,79	2,28	2,6	2,11	2,46	2	2,19	1,78	2	1,62	1,86	1,52	1,75	1,42
180	2,86	2,34	2,63	2,14	2,45	1,98	2,33	1,88	2,08	1,69	1,9	1,53	1,77	1,44	1,66	1,35
190	2,7	2,2	2,48	2,01	2,32	1,86	2,2	1,77	1,97	1,6	1,81	1,45	1,69	1,37	1,59	1,29
200	2,56	2,07	2,36	1,9	2,2	1,75	2,09	1,67	1,88	1,52	1,72	1,37	1,61	1,31	1,52	1,23

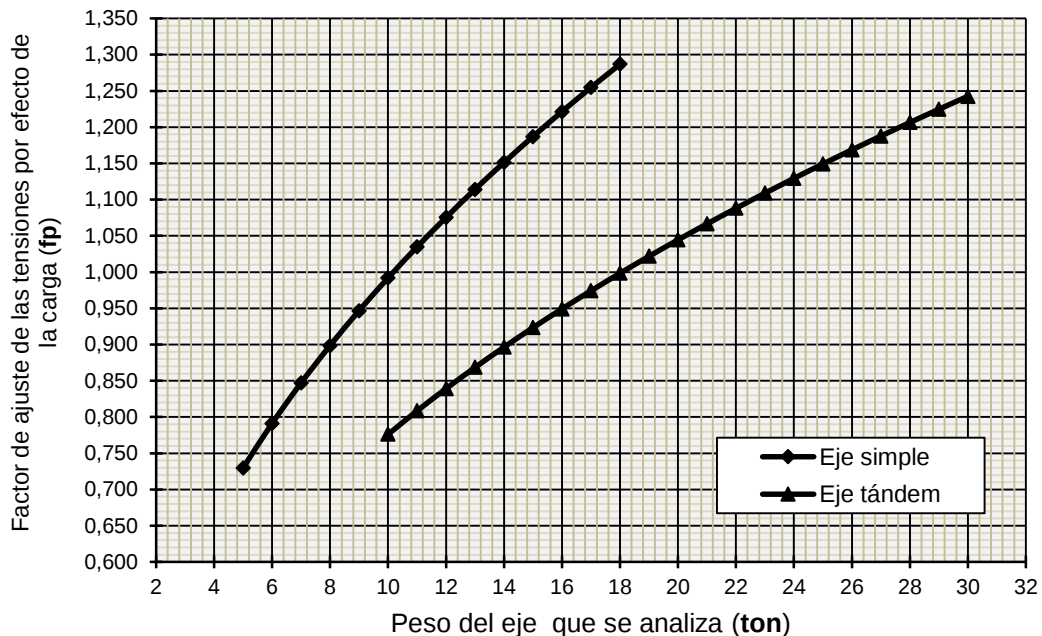


Figura 3: Factor de corrección por efecto del peso del eje

c) Estimar la probabilidad de fallo de las losas al final del período de diseño

Este valor es un factor de seguridad, y representa la probabilidad estadística que un pavimento alcance las condiciones previstas en el diseño al final de su vida útil.

$$S = 1 - \left[\frac{(1 - R) \cdot LF}{0.5} \right] \quad (11)$$

Donde:

- ✓ R : Confiabilidad en el diseño, en tanto por uno.
- ✓ LF : Porcentaje aceptable de losas fisuradas al final del período de diseño.

La confiabilidad es una variable asociada a los costos e importancia de la vía. El porcentaje aceptable de losas fisuradas, representa cuál será su estado al final de su vida útil y es función de la importancia y características de la vía. Se proponen a partir de la clasificación de las vías una tabla que contiene los intervalos de confiabilidad (R) y el porcentaje aceptable de losas fisuradas al final del período de diseño (LF).

Tabla 5: Niveles de confiabilidad y porcentaje aceptable de losas fisuradas

TIPO DE VÍA		R (%)	LF (%)
Calles y avenidas colectoras	Con limitación de camiones, sin excluir ómnibus.	50-80	20
	Sin limitación a la circulación de camiones.	70-90	15
Arterias principales y secundarias.	Dentro del casco urbano.	70-90	15
	En accesos a la ciudad.	75-90	15
Arterias y otras carreteras en áreas suburbanas.		50-80	25
Carreteras rurales de categoría I, II y autopistas.		80-95	20

6. EVALUACION DEL COMPORTAMIENTO A LA EROSIÓN DEL CIMIENTO

El comportamiento a erosión del cimiento se determina a partir de determinar el daño por erosión que puede causar cada una de las cargas del espectro, empleando la ecuación de daño acumulado de Miner, que relaciona el número de ejes esperados en el período de diseño con el número de ejes que puede admitir el pavimento antes de que aparezcan fallos por erosión del cimiento. El daño por erosión debe encontrarse en el intervalo de 90 y 110 % (criterio de diseño). Por debajo del 90% se considera que hay exceso de espesor, por lo cual el diseño se puede mejorar reduciéndolo; de lo contrario, por encima de 110% el diseño refleja insuficiencia en el espesor.

$$DE_{Total} = DE_{Simple} + DE_{Tándem} + DE_{Trídem} \quad (12)$$

Donde:

- ✓ DE_{Total} : % de daño total de fatiga consumida
- ✓ DE_{Simple} : % de daño por fatiga consumida, provocado por los ejes simples
- ✓ $DE_{Tándem}$: % de daño por fatiga consumida, provocado por los ejes tándem
- ✓ $DE_{Trídem}$: % de daño por fatiga consumida, provocado por los ejes trídem

El daño por erosión se determina a partir de la ecuación de Miner

$$DE = \sum \left(\frac{n_i}{N_i} \right) \cdot 100 \quad (13)$$

Donde:

- ✓ n_i : Número de ejes esperados en el período de diseño.
- ✓ N_i : Número de ejes permisibles antes del fallo por erosión.

Número de ejes esperados en el período de diseño

El número de ejes esperado se calculan de igual forma que en el apartado referido al comportamiento a fatiga.

d) Determinación del número de ejes admisibles

Luego de definido los escalones de carga se deben tener bien claro dos aspectos fundamentales en la losa.

1. La presencia o no de paseo de hormigón.
2. El tipo de mecanismo de transferencia de carga que se dispondrá en las juntas transversales (pasadores o trabazón de agregados).

A partir de un espesor seleccionado, conociendo la configuración de ejes y la resistencia efectiva del cimiento, se determina el factor de erosión. Para ello se pueden utilizar un conjunto de tablas recogidas en los anexos de la norma. La selección de la tabla correcta está en función de los dos aspectos antes mencionados.

Para la determinación de los ejes admisibles se emplea la ecuación de comportamiento que describe cuanto es el número de repeticiones de determinado peso que puede resistir el pavimento antes de que se origine el bombeo de fino y por consiguiente la erosión del cimiento [12]. Esta ecuación está implementada en dos nomogramas de diseño. El nomograma a usar depende de la presencia o no de paseo de hormigón [5]. Ver Figura 4 para el caso de pavimento sin paseo de hormigón.

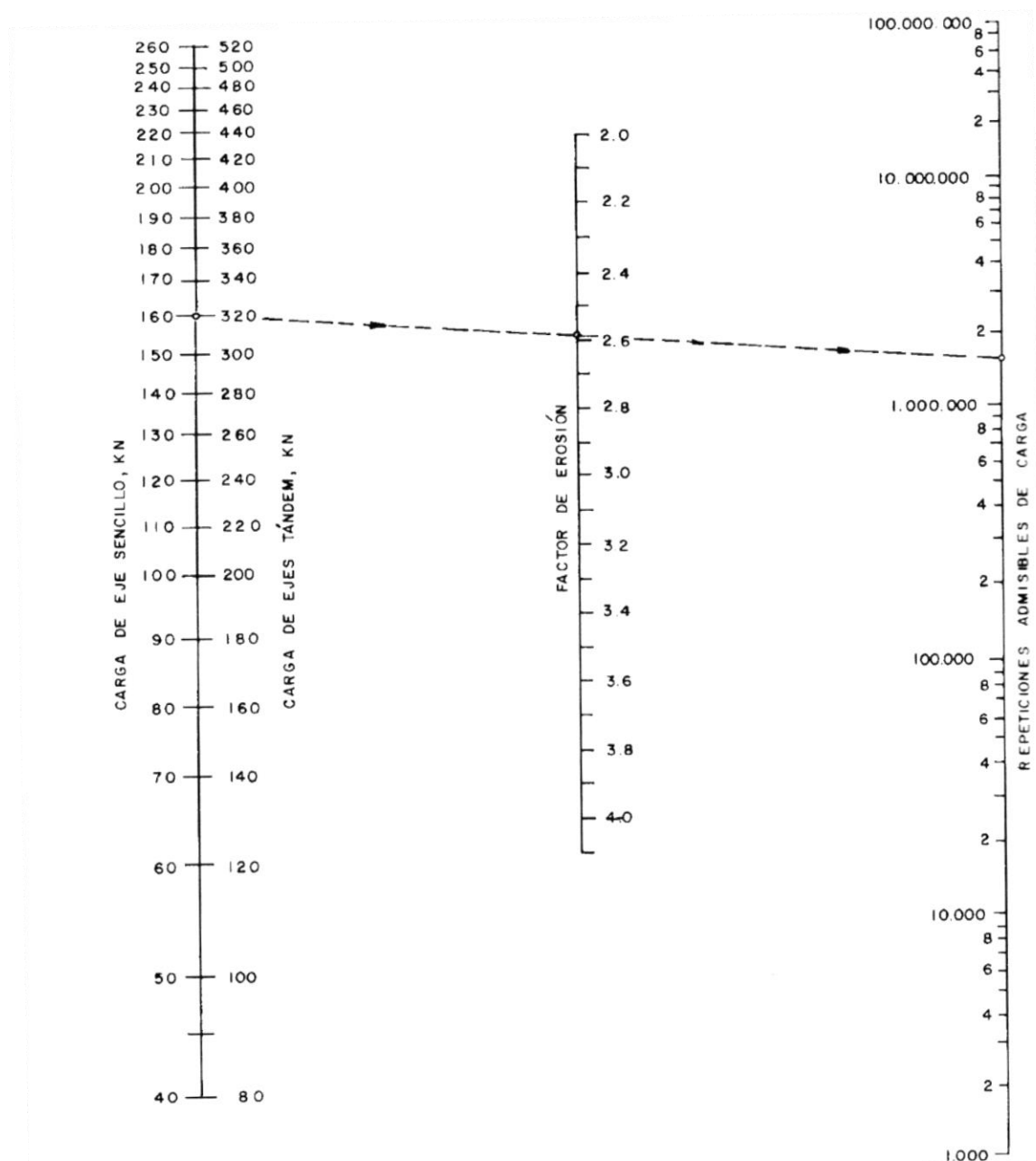


Figura 4: Número de ejes admisibles antes del fallo por erosión (Pavimento sin paseo de hormigón) según [5]

7. CONCLUSIONES

Se propone un procedimiento para el diseño de pavimentos de hormigón simple modificando el método de la PCA de forma tal que factores tales como el tráfico, materiales y calidad del cemento se ajusten a las condiciones de Cuba. Para ello el procedimiento centró sus bases sobre los estudios de tráfico y materiales ya realizados durante la confección de la norma de diseño de Pavimentos Flexibles **NC334-2004**, por lo que mucho de los coeficientes y calidades de materiales fueron revisados y llevados a la propuesta.

Se agregaron elementos que complementan las falencias que tiene el método de la PCA, entre las más importantes se encuentran:

- Se caracteriza el cemento del sistema empleado el módulo resiliente (M_r), este parámetro no se emplea comúnmente en los métodos de diseño de pavimentos rígidos tradicionales (módulo de reacción de la subrasante " k "). Este módulo describe mejor el comportamiento de la estructura ya que su evaluación se realiza teniendo en cuenta la respuesta cíclica y resiliente de sus materiales.

- Se propone un nomograma que permite determinar el módulo resiliente del conjunto o efectivo para cualquier combinación de espesor y material de subbase a emplear.
- Se establece la evaluación del comportamiento a fatiga empleando un modelo que incluye el criterio de confiabilidad en el diseño, este elemento ofrece grandes ventajas económicas pues permite realizar un diseño acorde con la categoría de la vía, permitiendo la reducción considerable de espesores de losa, cosa que no ocurría si se emplea el método de la PCA que solo tienen en cuenta uno de los casos.
- Cuando se emplea el método de la PCA el criterio establece que los consumos de daño en fatiga y erosión no deben sobrepasar el 100%. En el caso de la propuesta se sugiere un rango entre 80 y 110%, lo que se ajusta a la realidad de los diseños, ya que durante las iteraciones teniendo en cuenta de que se avanza de cm en cm, rara vez es posible obtener números próximos 100%, en la mayoría de los casos o se queda muy por debajo o por encima, lo cual es incantable para la PCA. Tomar un rango permite flexibilizar el diseño y establecer un límite inferior como criterio económico.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. J. Dallette, T. a. F. Group, Ed. *Concrete Pavement Design, Construction and Performance*, Second Edition ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2015.
- [2] C. Xu and D. Cebon, "Analysis of Cracking in Jointed Plain Concrete Pavement," Federal Highway Administration. Office of Research, Development and Technology United States, 2017.
- [3] Y. Jia, Y. Yang, G. Liu, Y. Gao, T. Yang, and F. Ding, "analysis of Flexural fatigue Failure and Degradation Reliability of Cement Concrete for Highway Pavement. ," *CICTP*, pp. pp. 951-963, 2019.
- [4] AASHTO, "Guide for Mechanistic-Empirical Design in Rigid Pavement Structures 2008," National Cooperative Highway Research Program (NCHRP) & Transportation Research Board (TRB). Illinois, USA, 2008.
- [5] PCA, "Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements," in "Thickness Concrete Pavement Design," Portland Cement Association, 1984, vol. ISO10P.
- [6] StreetPave12, "Structural Design Software for Street and Road Concrete Pavement," ed. Rosemont, IL 60018, USA: American Concrete Pavement Association (ACPA), 2015
- [7] Y. Wei, S. Liang, X. Gao, and J. Feng, "Design and construction of low-volume concrete road: Experiences from China. ," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 21, no. 2, pp. pp. 393-410, 2020.
- [8] F. M. H. López, "Procedimiento para el diseño por fatiga de pavimentos de hormigón simple para carreteras en Cuba," Phd. Thesis, Departamento de Viales, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de La Habana, Cuba, 2016.
- [9] F. M. H. López, E. T. Piusseaut, C. A. R. Morfa, and J. C. de Carvalho, "Modelo numérico para estimar módulo efectivo del soporte de un pavimento rígido," *Revista Cubana de Ingeniería*, vol. Vol No.8 no. 2, pp. pp. 11-17, 2017.
- [10] NC-245, "Hormigón. Ensayo a flexión Viga simple carga al tercio medio de la luz libre," ININ/ Oficina Nacional de Normalización., La Habana. Cuba 2003.
- [11] NC-207, "Requisitos generales para el diseño y construcción de estructuras de hormigón Módulo de deformación longitudinal del hormigón," ININ/ Oficina Nacional de Normalización., La Habana. Cuba, 2003.
- [12] J. T. McCall, "Probability of fatigue failure of plain concrete," in *Journal Proceedings*, 1958, vol. 55, no. 8, pp. 233-244.