

# DISEÑO DE PAVIMENTOS RIGIDOS MEDIANTE UN DIMENSIONADO ESTRUCTURAL APOYADO EN EL METODO DE ELEMENTOS FINITOS

## RIGID PAVEMENT DESIGN THROUGH STRUCTURAL DIMENSIONING BASED IN FINITE ELEMENT METHOD

G. Pannillo\*, A. Barrios \*\*, E. Colina Morles \*\*\*

Recibido 09/03/2016: Aprobado: 21/05/2016

### RESUMEN

Los métodos mecanicistas representan una excelente opción a la hora de realizar diseños de elementos estructurales debido, entre otras cosas, a la precisión con la que se pueden simular las condiciones de carga, las propiedades de los materiales y las condiciones de apoyo. Dependiendo de la naturaleza de la situación que se va a estudiar, la solución de los sistemas de ecuaciones que se generan de los modelos matemáticos del fenómeno suele ser compleja, siendo por ello los métodos numéricos de importancia vital para llegar a dichas soluciones. En esta investigación se propone el uso del método de elementos finitos para auxiliar el dimensionado estructural de los pavimentos rígidos, tomando como muestra un tramo de la red vial que forma parte del Sistema de Transporte Masivo de Barquisimeto, Transbar, C.A (Transbarca). Al obtener el dimensionado de la estructura de pavimento basado en la información de tránsito, condiciones del suelo de fundación y el tipo de concreto empleado para la losa, según el proyecto original, se determinó un espesor de carpeta rígida de magnitud similar al conseguido mediante la aplicación del método AASHTO 86. Esto permite que el método planteado en esta investigación sea validado al cotejarlo con el método más utilizado en Venezuela para diseño de pavimentos.

**Palabras clave:** *Métodos mecanicistas, Elementos Finitos, AASHTO 86, Venezuela*

---

\*Docente Investigador de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Ingeniero Civil. Correo: gino.pannillo@ucla.edu.ve

\*\*Ingeniero Civil. Correo: andresbarrios.ucla@gmail.com

\*\*\* Docente Investigador de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Ingeniero Civil. Correo: ecolina@ucla.edu.ve

## ABSTRACT

Mechanistic Methods are an excellent option when designing Structural Elements, due, among other things, to the precision simulating load conditions, the properties of the materials and support conditions. Depending on the nature of the situation to study, solving systems of equations generated from mathematical models of the phenomenon is often complex, these is why Numerical Methods are vital to get to these solutions. This research proposes the use of Finite Element Method to help in the structural dimensioning of rigid pavements, taking as example a stretch of the road network that is part of the Mass Transit System of Barquisimeto, Transbar, C.A (Transbarca). When getting the dimensioning of the pavement structure based on traffic information , conditions of foundation soil and the type of concrete used for the slab, according to the original project, the thickness of a rigid carpet was obtained similar to the one obtained when applying the AASHTO 86 Method. This Allows that the Method used in this research be validated when placed against the method most used in Venezuela for pavement design.

**Keywords:** *Mechanistic methods, Finite Element, AASHTO 86, Venezuela*

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, en Venezuela, el diseño de los pavimentos se basa en el método AASHTO 86 [1], el cual es un método de naturaleza empírica que se obtuvo a partir de una serie de datos recolectados en un tramo vial de prueba. A pesar de ser una metodología de diseño debidamente difundida y aceptada, y su uso tiene gran tradición en la rama de la ingeniería vial, es necesario plantearse la interrogante de cuanta vigencia posee este método para las exigencias actuales, luego de dos décadas de formulado, pero aún más importante, preguntarse cuan cercano a la realidad puede resultar el modelo que la AASHTO formuló.

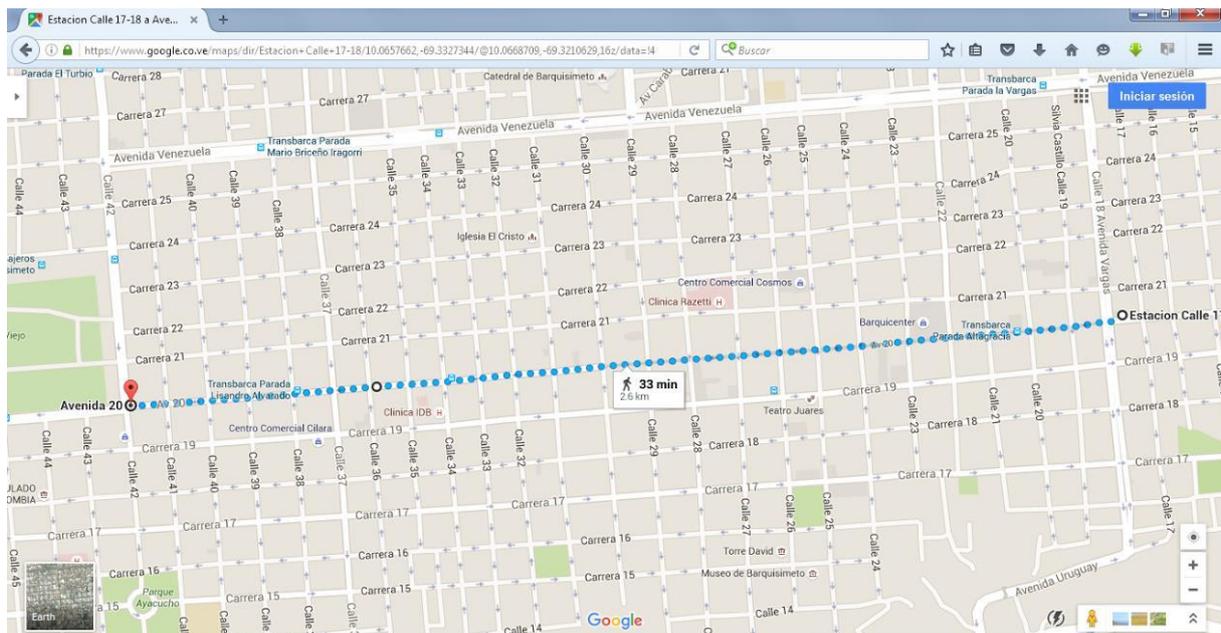
Es notorio que en un pavimento pueden existir otros parámetros de diseño adicionales a los que se planteó la AASHTO [1], parámetros que de ser tomados en cuenta pueden aportar un refinamiento importante del diseño, como por ejemplo, la necesidad de una armadura de acero en un determinado lugar por irregularidad del suelo de fundación. El desafío de todo ingeniero es aportar soluciones eficientes, pero nunca dejando de lado el hecho de que las estructuras deben soportar las condiciones a las que estarán sometidas durante su tiempo de servicio. Es allí donde los métodos de diseño mecanicistas toman relevante importancia, por tener la capacidad de simular de manera precisa las condiciones de operación de cualquier estructura.

En esta investigación se propone el uso del método de elementos finitos para el diseño de pavimentos, mediante un dimensionamiento estructural en el que los parámetros son la carga móvil de servicio, las condiciones del suelo de fundación y las propiedades del concreto a emplear. Los pavimentos serán modelados mediante el uso de un potente programa comercial de Autodesk con aplicaciones de elementos finitos, el *Robot Structural Analysis Professional* 2015 [2] en su versión educacional.

El diseño consiste en la aplicación de un modelo de fatiga en el que el dato de entrada es la relación de resistencias, el cual representa un cociente entre el esfuerzo máximo axial generado por la carga del vehículo de diseño, y el módulo de flexión por rotura del concreto utilizado. El resultado de la aplicación del modelo de fatiga es un número de repeticiones de carga admisible que es directamente proporcional a la relación de resistencias. Este número de repeticiones de carga admisible debe ser comparado con el número real de repeticiones de carga que se estima ocurrirá durante la vida útil del pavimento, siendo el espesor de carpeta rígida satisfactorio el menor espesor donde las repeticiones de carga admisible sean mayores que las repeticiones de carga real.

## 2. DESARROLLO Y METODOLOGÍA

La vialidad estudiada en esta investigación es un tramo de la red vial del Sistema de Transporte Masivo de Barquisimeto, Transbar, C.A (Transbarca), ubicado en la avenida 20 y comprendido desde la Avenida Vargas hasta la avenida Rómulo Gallegos de la ciudad de Barquisimeto, como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1.** Tramo objeto de estudio. Fuente: Google Maps.

(<https://www.google.co.ve/maps/dir/10.0668197,-69.3091754/10.0657529,-69.332834/@10.0655107,-69.3314753,17.46z?hl=es-419>)

Del proyecto original se extrajo un resumen de la unidad de diseño seleccionada, mostrado a continuación [3]:

- Repeticiones de ejes equivalente para un período de diseño de 20 años, considerando los primeros 10 años con un trolebús simplemente articulado y los 10 años restantes con un trolebús doblemente articulado: REE06-25= 48.314.232 EE.

- Confiabilidad estadística  $R= 95\%$ . Desviación estándar  $S_0= 0,35$ .
- Serviciabilidad final  $P_t= 2,5$ . Índice de falla  $\Delta PSI= 2,0$ .
- Capacidad de soporte del suelo de fundación (CBR): 7,34%
- Módulo de reacción de la subrasante  $K= 0,048 \text{ N/mm}^3$ .
- Pavimento rígido sin reforzamiento de acero.
- Módulo de flexión a la rotura del concreto:  $40 \text{ kgf/cm}^2$ .
- Pasa juntas transversales de acero.
- Barras de acero para amarres longitudinales
- Ancho del canal: 3,70 m
- Separación de paños: 4,50 m

El primer paso para la estimación de espesores de las capas de pavimento es el modelado de esta estructura en el programa para análisis estructural *Robot Structural Analysis Professional 2015* de Autodesk [2]. La elección de esta herramienta se basó en las características avanzadas que presenta este producto, en comparación con algún otro programa existente. Para realizar el modelo de la estructura de pavimento se siguió con la secuencia analítica que se presenta a continuación:

Paso 1: Elección del tipo de estructura a estudiar, que para el caso particular de esta investigación será una estructura tipo lámina (Shell).

Paso 2: Creación de nodos en los vértices del segmento de pavimento objeto a estudios, según la geometría de planta del tramo seleccionado.

Paso 3: Generación de contorno del segmento de pavimento.

Paso 4: Generación del panel de concreto que conformará el segmento de pavimento, con características de los materiales y espesores definidos.

Paso 5: Definición de las condiciones de apoyo, según las características del suelo de fundación.

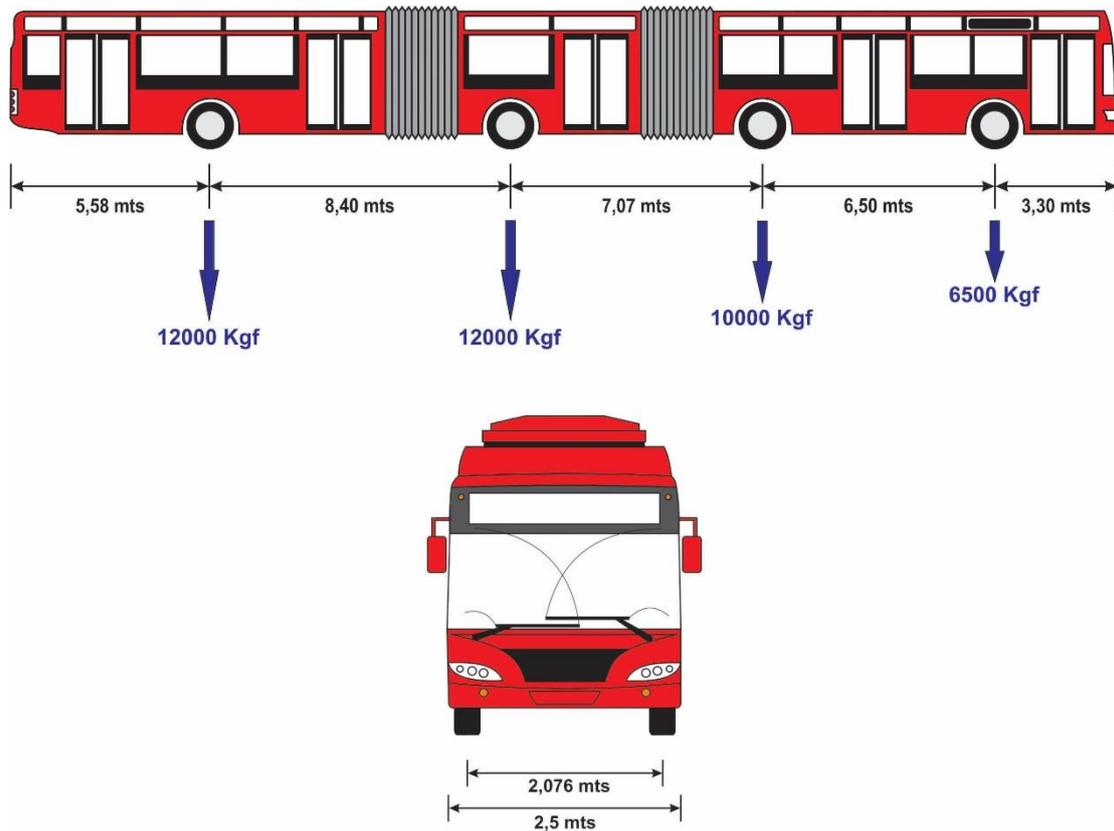
Paso 6: Definición de la carga móvil del trolebús, según las características geométricas y de carga del vehículo de diseño seleccionado, como se muestra en la Figura 2.

Paso 7: Aplicación de la carga móvil del trolebús.

Paso 8: Generación del mallado de elementos finitos.

Paso 9: Análisis estructural del modelo.

Paso 10: Dimensionamiento teórico del modelo.



**Figura 2.** Vehículo de diseño seleccionado. Fuente: los autores.  
Adaptado del proyecto de especificaciones técnicas de trolebuses articulados de la empresa pública metropolitana de transporte de pasajeros de Quito [4]

Una vez constituido el modelo, analizado y dimensionado, el programa está en la capacidad de generar los datos esfuerzo-deformación que la carga móvil provoca a la estructura de pavimento estudiada, lo que trae como consecuencia la obtención de los parámetros básicos para realizar el diseño de los espesores de capa del tramo vial.

En el anexo F de la Norma Covenin 1753-2006 [5] se presenta una guía para el diseño de pavimentos de concreto de vías de tránsito convencional, el cual está apoyado en los lineamientos establecidos por la *Portland Cement Association* (PCA) [6]. Para el diseño basado en cargas actuantes de tránsito o periódicas, se presenta un procedimiento de diseño de modo que el pavimento soporte la fatiga, la erosión y bombeo que pueden ser ocasionados por dichas cargas. Siendo el satisfactorio aquel pavimento que soporte fatiga y erosión con el menor espesor de carpeta rígida.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Diseño por fatiga

El procedimiento de diseño por fatiga se basa en determinar la relación de resistencias (SR) [5], cuya expresión matemática es:

$$S_r = \frac{Mr \text{ actuante}}{Mr \text{ resistente}} \quad (1)$$

Donde,

*Mr actuante* = Esfuerzo máximo axial por carga actuante en el centro de la losa.

*Mr resistente* = Resistencia de Diseño a la Tracción por Flexión.

$$Mr \text{ resistente} = \frac{\text{Resistencia a la Tracción por Flexión}}{\text{Factor de Seguridad}} \quad (2)$$

La Tabla F-8.2 de la norma COVENIN [5], presenta los factores de seguridad a utilizar dependiendo del tipo de carga. Por lo cual, para el caso en estudio dicho factor es de 1,3. En referencia a la información de la unidad de diseño seleccionada [3], el valor del *Módulo de Resistencia a Tracción por Flexión* del concreto es de 40 kgf/cm<sup>2</sup>. Por lo que el *Mr resistente* es:

$$Mr \text{ resistente} = \frac{40 \text{ kgf/cm}^2}{1,3} = 30,77 \text{ kgf/cm}^2 \quad (3)$$

Del análisis estructural de un modelo con espesor de losa de 33,00 cm, se obtienen los esfuerzos por flexión máximas que pueden ocurrir en el pavimento, tal como se muestra en la Figura 3.

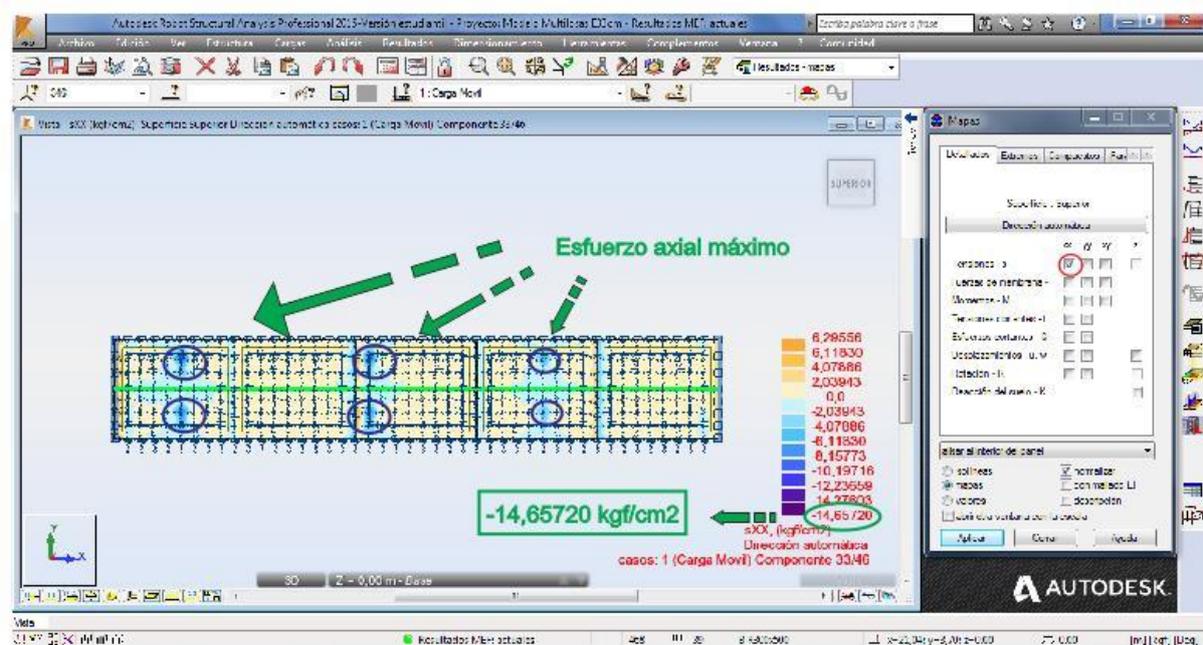


Figura 3. Mapa de esfuerzos del pavimento de espesor  $E=33,00$  cm Fuente: los autores.

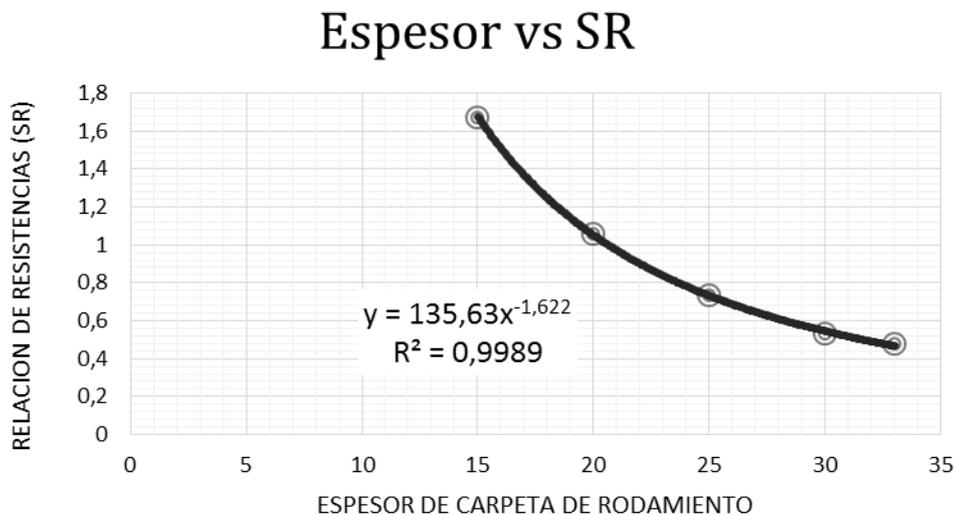
De lo cual se selecciona que la magnitud del esfuerzo máximo por carga actuante en el centro de la losa es 14,66 kgf/cm<sup>2</sup>.

$$S_r = \frac{M_r \text{ actuante}}{M_r \text{ resistente}} = \frac{14,66 \text{ kgf/cm}^2}{30,77 \text{ kgf/cm}^2} = 0,48 \quad (4)$$

En la Tabla 1 se muestra un resumen de *Esfuerzos Máximos por Flexión*, y la respectiva relación de resistencias (SR) para varios modelos de pavimento en función del espesor de la carpeta de rodamiento del mismo. Posteriormente en la Figura 4, se presenta un gráfico que ilustra la variación de la relación de resistencias en función del espesor de la capa de rodamiento.

**Tabla 1.** Resumen de relaciones de resistencia del pavimento variando el espesor de la carpeta de rodamiento

Espesor (cm)	Esfuerzo Max (kgf/cm <sup>2</sup> )	SR
40,00	10,60	0,34
33,00	14,66	0,48
30,00	16,31	0,53
25,00	22,60	0,73
20,00	32,53	1,06
15,00	51,55	1,68



**Figura 4.** Variación de la relación de resistencias en función del espesor de la carpeta de rodamiento

En la Tabla 2 se presenta un cuadro resumen de la aplicación del *Modelo de Fatiga de Vesic* [7] para diversos espesores de pavimento, donde se puede apreciar, para cada espesor de losa el número de repeticiones de carga admisible, y al compararlos contra el número de repeticiones de carga real que representa el número de veces que el Trolebús pasa por un tramo dado de pavimento durante su vida útil, indica un total de 4.423.800 repeticiones, de acuerdo a la información de tránsito suministrada por el proyecto original de Transbarca [3]. De esta manera se obtiene el dimensionado del espesor de losa satisfactorio, que en este caso

es 32,25 cm, con un concreto de *Módulo de Rotura* igual a 40 kgf/cm<sup>2</sup>. Por razones constructivas, se seleccionó como espesor definitivo el valor entero inmediato, equivalente a una losa de 33,00 cm.

**Tabla 2.** Cuadro resumen de los resultados de la aplicación del Modelo de Fatiga de Vesic a varios espesores de pavimento.

Espesor(cm)	Relación de Resistencias (SR)	Nº Repeticiones Admisibles	Verificación
40,00	0,34	16145685,88	cumple
39,00	0,36	13708260,06	cumple
38,00	0,37	11589424,84	cumple
37,00	0,39	9754312,37	cumple
36,00	0,41	8171091,62	cumple
35,00	0,43	6810775,32	cumple
34,00	0,45	5647034,42	cumple
33,00	0,47	4656019,84	cumple
32,25	0,49	4015082,09	cumple
32,00	0,49	3816191,63	falla
31,00	0,52	3108155,25	falla
30,00	0,55	2514505,01	falla
29,00	0,59	2019674,46	falla
28,00	0,61	1609793,72	Falla
27,00	0,65	1272553,61	falla
26,00	0,69	997076,40	falla
25,00	0,73	773793,24	falla
24,00	0,78	594327,99	falla
23,00	0,84	451387,42	falla
22,00	0,91	338657,68	falla
21,00	0,97	250706,87	falla
20,00	1,05	182893,64	falla

Por lo que el diseño definitivo del pavimento para el tramo de vía seleccionado en la Avenida 20 y comprendido desde la Avenida Vargas hasta la avenida Rómulo Gallegos, consiste en una losa de espesor 33,00 cm, como se muestra en la Figura 5.



**Figura 5.** Diseño definitivo del pavimento en la unidad de diseño 2

### 3.2. Diseño por erosión

El procedimiento de diseño por erosión consiste en determinar el *Factor de Ajuste por Erosionabilidad* y el *Factor de Potencia del Suelo*, especificados en la sección F.5.5.2 de la Norma Covenin 1753-2006 [5]. Una vez determinados ambos factores, se obtuvo el producto de ambos, el cual debe ser un valor menor o igual que nueve (9) para considerarse que el pavimento pueda soportar infinitas repeticiones del grupo de cargas de diseño sin fallar por erosión. Al ser satisfactorios el diseño por erosión y por fatiga de forma simultánea para un mismo espesor de pavimento, y mismas condiciones de carga, se puede concluir que sólo al final de su vida útil el pavimento llegará a la falla.

*Factor de Ajuste por Erosionabilidad* de la base de apoyo: este factor es suministrado por la Norma Covenin 1753-2006 [5], a través de la ecuación F-40

$$C1 = 1 - \left[ \left( \frac{K}{55,41} \right) * \left( \frac{10,16}{H} \right) \right]^2 \quad (5)$$

$K$  = Modulo de Reacción del Suelo de fundación

$H$  = Espesor del Pavimento

*Factor de Potencia del Suelo*, este factor es suministrado en la misma norma [5], mediante la ecuación F-43

$$P = 809,5 * \left[ \frac{(K)^{1,27} * (\delta)^2}{H} \right] \quad (6)$$

$K$  = Modulo de Reacción del Suelo de fundación

$H$  = Espesor del Pavimento

$\delta$  = Deflexión

La Norma Covenin 1753-2006 [5] contempla que para que el diseño por erosión sea satisfactorio el producto  $C1 * P$  debe ser menor o igual a 9 (nueve). Por lo que para las cargas actuantes, en el periodo de diseño propuesto de 20 años, desde el espesor de 40,00 cm hasta el espesor de 15,00 cm de la losa de pavimento son satisfactorios, es decir, al cumplirse la vida útil estos llegaran a la falla habiendo soportado infinitas repeticiones de carga. Ratificándose que el diseño definitivo fue el que se obtuvo bajo criterios de fatiga. En la Tabla 3 se muestra

un cuadro resumen del diseño por erosión para diferentes espesores de pavimento.

Espesor (cm)	C1	$\delta$ (cm)	P	C1*P
40,00	0,99949691	0,00857	0,0111577	0,0111521
33,00	0,99926085	0,04380	0,3535181	0,3532568
30,00	0,99910563	0,04759	0,45907911	0,45866852
25,00	0,9987121	0,05530	0,74385388	0,74289587
20,00	0,99798766	0,06768	1,39273369	1,38993104
15,00	0,99642251	0,09031	3,30641835	3,29458966

#### 4. CONCLUSIONES

La aplicación de métodos racionales presenta numerosas ventajas respecto a los métodos tradicionales. Cabe destacar que la simulación de las cargas vehiculares se hace de manera precisa haciendo uso de datos geométricos, y cargas probables del vehículo de diseño. Asimismo, las propiedades elásticas del suelo se pueden simular fielmente a través de los programas con aplicaciones de MEF, según lo establecido en la teoría de mecánica de suelos.

Es recomendable el uso de criterios acertados para la interpretación de los resultados aportados por los modelos de elementos finitos, basados en información científica, al recordar que por ser un método numérico no es más que una aproximación a una situación real sustentado en algunas teorías físico-matemáticas, que como cualquier teoría tiene sus alcances y limitaciones.

En los modelos racionales de pavimentos utilizados en esta investigación, la condición del suelo se supone totalmente homogénea y sin factores externos como cambios de humedad en el mismo. Esto conduce a aseverar, que debe existir un mayor y mejor control de calidad durante la construcción de los pavimentos. Otra opción, es que se debe tomar en consideración las variaciones en las condiciones del suelo para incorporarlas al modelo de elementos finitos.

A pesar de la similitud encontrada en el diseño de espesores entre el método propuesto en esta investigación y el método AASHTO 86, es importante rescatar que al modelo de elementos finitos es posible incorporarle otras variables de diseño, de las que se puede nombrar: a) el efecto del gradiente térmico, b) esfuerzos de frenado del vehículo de diseño, c) cambios en las condiciones del suelo de fundación, y d) efectos sísmicos. Variables que para el método AASHTO no es posible incorporar.

## 5. REFERENCIAS

- [1] AASHTO, Manual de Diseño de Estructuras de Pavimento AASHTO 86, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 1986.
- [2] Autodesk, Guía de Usuario Robot Structural Analysis Professional. Autodesk, 2015.
- [3] E. Colina Morles, Informe de Fase correspondiente al Estudio, Rehabilitación y Diseño de Pavimentos en la Avenida 20 de Barquisimeto, Barquisimeto. Venezuela. 2005
- [4] Empresa Pública Metropolitana de Transporte de Pasajeros de Quito, Proyecto de especificaciones técnicas de Trolebuses Biarticulados, Quito, Ecuador. 2014
- [5] Norma Venezolana, Proyecto y Construcción de obras en Concreto Estructural COVENIN 1753-2006, Caracas: Fondonorma, Venezuela, 2006.
- [6] R. G. Packard, Thickness design for Concrete Highways and street Pavements, Portland Cement Association, Illinois, EUA.1984.
- [7] P. Garnica, J. A. Gómez y J. A. Sesma, Mecánica de Materiales para Pavimentos, Sanfandila, Qro.: Instituto Mexicano de Transporte, México, México, 2002.