



Laboratorio Nacional de  
Materiales y Modelos Estructurales



PROGRAMA DE  
INFRAESTRUCTURA DEL  
TRANSPORTE

## Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA)

# **PRESIÓN DE INFLADO DE LOS NEUMÁTICOS Y LA FORMA EN QUE AFECTA LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO**

Preparado por:

**Unidad de Gestión Municipal  
PITRA-LanammeUCR**

San José, Costa Rica  
Febrero, 2013

<b>1. Informe</b> LM-PI-GM-08-2014		<b>2. Copia No.</b> 1	
<b>3. Título y subtítulo:</b> PRESIÓN DE INFLADO DE LOS NEUMÁTICOS Y LA FORMA EN QUE AFECTAN LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO.		<b>4. Fecha del Informe</b> Febrero, 2014	
<b>5. Organización y dirección</b> Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440			
<b>6. Notas complementarias</b>			
<b>7. Resumen</b> <p><i>En el presente documento se analiza el parámetro: presión de inflado de los neumáticos de los vehículos de carga y la forma en que este afecta la estructura del pavimento. Se presenta una explicación de la evolución del neumático y sus tipos según el avance tecnológico y el aumento en la demanda de carga de los vehículos pesados.</i></p> <p><i>Finalmente, se evalúa el efecto sobre los principales deterioros de la estructura del pavimento: el agrietamiento por fatiga y el ahuellamiento. Se analiza y compara un caso específico de dos estudios realizados: uno en el estado de Texas de Estados Unidos de América en el cual se presentan las combinaciones de parámetros que coadyuvan con el detrimento de la estructura del pavimento; y otro en Egipto en el cual se estudia en campo, las presiones y las variaciones de las mismas.</i></p> <p><i>En general, la presión de inflado de los neumáticos de los vehículos de carga tienen un efecto nocivo sobre la estructura del pavimento y es importante tomarlo en cuenta a la hora de realizar cualquier diseño de pavimentos para así evitar deterioros a temprana edad.</i></p> <p><i>La presente investigación analiza los parámetros principales que aunado a las presiones de inflado afectan el desempeño de los pavimentos de mezcla asfáltica. Esto brinda los insumos necesarios para realizar la investigación de campo, sobre las mediciones de presión de inflado y los demás parámetros como temperatura y tipo de llanta, para Costa Rica.</i></p>			
<b>8. Palabras clave</b> Pavimento, Presión de Inflado, Neumático, Temperatura, Ahuellamiento, Fatiga		<b>9. Nivel de seguridad:</b> Ninguno	<b>10. Núm. de páginas</b> 40
<b>11. Preparado por:</b>			
Ing. Jaime Allen Monge, MSc Investigador UGM-PITRA		Luis Mariano Sibaja Vargas Estudiante Escuela Ingeniería Civil	
Fecha: 20 / 02 / 14			
<b>12. Revisado por:</b> Ing. José Pablo Aguiar Moya, PhD Coordinador Unidad de Materiales y Pavimentos		<b>13. Aprobado por:</b> Ing. Guillermo Loría Salazar, PhD Coordinador General PITRA	
Fecha: 20 / 02 / 14		Fecha: 20 / 02 / 14	



## Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN .....	6
2. OBJETIVO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN .....	7
3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	7
4. ESQUEMA CONCEPTUAL .....	8
5. EVOLUCIÓN Y ESTADO DEL ARTE DE LA PRESIÓN DE INFLADO DE LOS NEUMÁTICOS DEBIDO AL AUGE TECNOLÓGICO .....	9
5.1. Funciones del neumático .....	10
5.2. Materiales utilizados en la elaboración de los neumáticos .....	11
5.3. Estructura y Tipos de Neumáticos .....	11
5.3.1. Estructura .....	12
5.3.2. Tipos de Neumáticos .....	12
5.3.2.1. Neumáticos Diagonales (Bias-ply) .....	13
5.3.2.2. Neumáticos Radiales .....	13
5.3.3. Nomenclatura de los Neumáticos .....	14
5.3.3.1. Índice de Carga .....	16
5.3.3.2. Índice de velocidad .....	15
5.4. Relación entre presión y neumático .....	16
5.5. Evolución de la presión de inflado de los neumáticos .....	17
5.6. Efecto de la presión del neumático sobre su estructura y las condiciones de manejo .....	17
6. ANÁLISIS DE ESTUDIOS INTERNACIONALES ACERCA DEL DAÑO PRODUCIDO A LAS ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO DEBIDO A LA PRESIÓN DE INFLADO DE LOS NEUMÁTICOS .....	19
6.1. Área de Contacto .....	20
6.2. Presión de Contacto .....	21
6.3. Relación entre Presión de Inflado y Pavimento .....	23
6.4. Sistema de presión de inflado central .....	24
6.5. Utilización de Neumáticos “Supersingle” .....	26



6.6.	Efecto de la presión de inflado de los neumáticos de los vehículos pesados sobre la respuesta y el desempeño del pavimento.....	28
6.6.1.	Fatiga del Pavimento Flexible.....	29
6.6.2.	Ahuellamiento del Pavimento Flexible.....	30
6.7.	Análisis del Caso Específico de los Vehículos de Carga en el Estado de Texas y Comparación con Respecto a Encuesta de Presión realizada en Egipto.....	32
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	36
8.	REFERENCIAS.....	38



## Índice de Cuadros

<b>Cuadro 1.</b> Equivalencia de índices de carga .....	16
<b>Cuadro 2.</b> Equivalencia de índices de velocidad .....	16

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Esquema de una Rueda Metálica.....	10
<b>Figura 2.</b> Neumático diagonal (izquierda) y Radial (derecha).....	13
<b>Figura 3.</b> Ejemplo de Nomenclatura .....	15
<b>Figura 4.</b> Zona de Contacto del Neumático Dependiendo de su Presión.....	18
<b>Figura 5.</b> Tipos de Pavimento.....	19
<b>Figura 6.</b> Carga del eje ( $W$ ), presión de contacto ( $p$ ), área de contacto ( $S$ ), presión de inflado del neumático ( $q$ ) .....	19
<b>Figura 7.</b> Dimensión del Área de Contacto.....	20
<b>Figura 8.</b> Comportamiento Bajo Carga de Neumáticos Diagonales (izquierda) y Radiales (derecha).....	24
<b>Figura 9.</b> Ejemplo de Sistema de Presión de Inflado Central .....	26
<b>Figura 10.</b> Respuesta del pavimento flexible ante el movimiento vehicular.....	29
<b>Figura 11.</b> Mecanismo de Ahuellamiento Bajo el Neumático.....	31



## 1. INTRODUCCIÓN

El comportamiento del vehículo terrestre es el resultado de la interacción entre el conductor, el vehículo y el medio. Los momentos y fuerzas que aplica el vehículo para poder efectuar su movimiento son transmitidos a través del contacto entre el neumático y el camino y debido a esto, es que los neumáticos y su presión interna constituyen un elemento de suma importancia en el diseño de pavimentos.

Las carreteras representan el activo de mayor valor en la infraestructura del transporte de una nación. Evitar que este activo se deteriore antes de tiempo y mantener el nivel de servicio deseado representa un gran reto que sólo puede ser alcanzado mediante una adecuada planificación del manejo de los activos del transporte.

El deterioro del pavimento es considerado como el resultado de una compleja interacción entre las cargas de tránsito, las condiciones del entorno, el tipo de suelo de la subrasante, los materiales utilizados en la estructura del pavimento, los métodos constructivos y el mantenimiento. Se conoce que el peso por eje y los esfuerzos producidos debido a cambios volumétricos en la estructura son los principales contribuyentes del daño al pavimento. Este complejo sistema engloba la presión de inflado de los neumáticos ya que tiene una relación directa con los esfuerzos experimentados por la superficie del pavimento sometido a la carga.

El presente artículo coadyuva para lograr el objetivo primordial de la Propuesta de Línea de Investigación: Determinación de Parámetros de Carga para Diseño Estructural de Pavimentos en Costa Rica del Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA) del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR), para la futura creación de una Guía de Diseño Estructural de Pavimentos para Costa Rica (Allen LM-PI-UMP-001-13, 2013).



## 2. OBJETIVO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

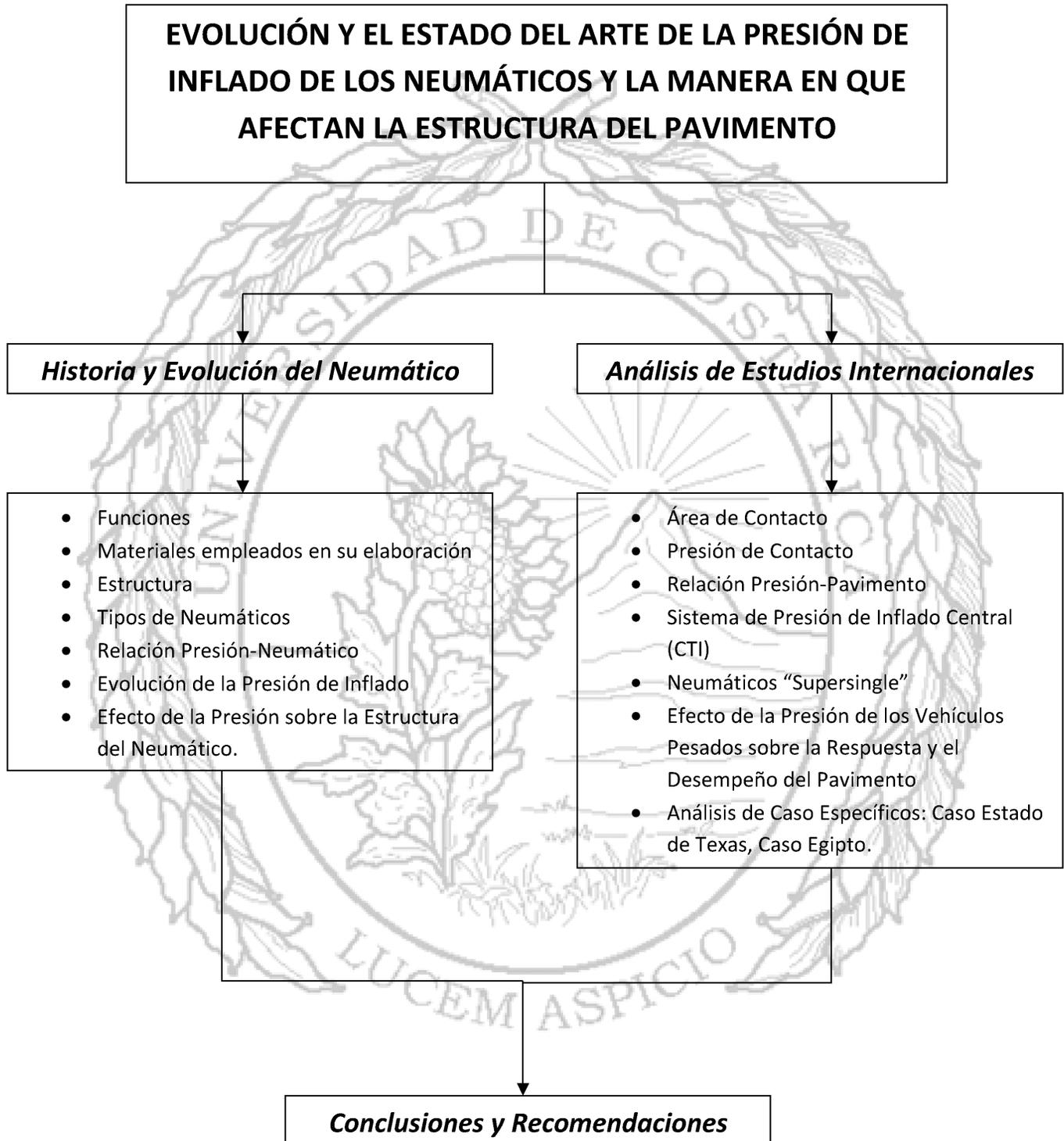
- Determinar la evolución histórica y el estado del arte en el conocimiento acerca de la medición de la presión de inflado de los neumáticos de los vehículos de carga y la manera en que ésta afecta el deterioro en la estructura del pavimento.

## 3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS DE LA INVESTIGACIÓN

- Analizar la evolución en el tiempo de los neumáticos y su presión de inflado en vehículos de carga debido al auge tecnológico y la demanda de cargas.
- Realizar una investigación bibliográfica de estudios realizados a nivel internacional acerca de presión de inflado de neumáticos de vehículos pesados y la manera en que afectan el pavimento.
- Concluir acerca del efecto de la presión de inflado de los neumáticos de los vehículos pesados sobre la respuesta y el desempeño del pavimento.
- Destacar los parámetros que aunados a la presión de inflado, tienen mayor incidencia sobre el deterioro del pavimento.

Informe: LM-PI-GM-08-2014	Fecha de emisión: 20 de febrero de 2014	Página 7 de 40
---------------------------	---	----------------

#### 4. ESQUEMA CONCEPTUAL



## 5. EVOLUCIÓN Y ESTADO DEL ARTE DE LA PRESIÓN DE INFLADO DE LOS NEUMÁTICOS DEBIDO AL AUGE TECNOLÓGICO

La evolución se refiere a todo aquel desarrollo o transformación gradual de las ideas o teorías existentes que lleven hacia un nuevo resultado. Dicho resultado tiene como fin mejorar o reforzar el estado original.

En el caso de los neumáticos y su presión de inflado, la evolución se refiere a la transformación estructural presentada debido al auge tecnológico. Dicha transformación engloba todos los parámetros que conforman el neumático, desde su producción (materiales empleados), hasta la presión interna y el tipo de llanta a utilizarse dependiendo del uso que se le vaya a dar al mismo.

A finales de 1800, se utilizaban llantas sólidas, las cuales no proporcionaban una adecuada protección mecánica al aro, ocasionando rupturas frecuentes. Fue por ello que se crearon las llantas neumáticas. No obstante, las llantas de hule sólidas aún son utilizadas para las carreras de fórmula 1 y algunos vehículos de construcción y agrícolas.

El neumático es un objeto mecánico, con forma de anillo circular, sólido o hueco, fabricado de hule y reforzado comúnmente con materiales textiles como acero u otros, el cual es montado sobre un aro. El material base utilizado en la construcción de un neumático es el caucho reforzado con fibras que le permiten mantener la resistencia y la flexibilidad (Rodríguez, 2004).

Es importante no confundir llanta, neumático y rueda, ya que los tres tienen denotaciones distintas:

- Aro: Cerco metálico de las ruedas de los vehículos.
- Llanta: cubierta deformable y elástica que se monta en la llanta de las ruedas y que sirve de envoltura protectora a una cámara de aire que puede ser o no independiente.
- Rueda: pieza de forma circular que gira alrededor de un eje, está compuesta por aro y disco.

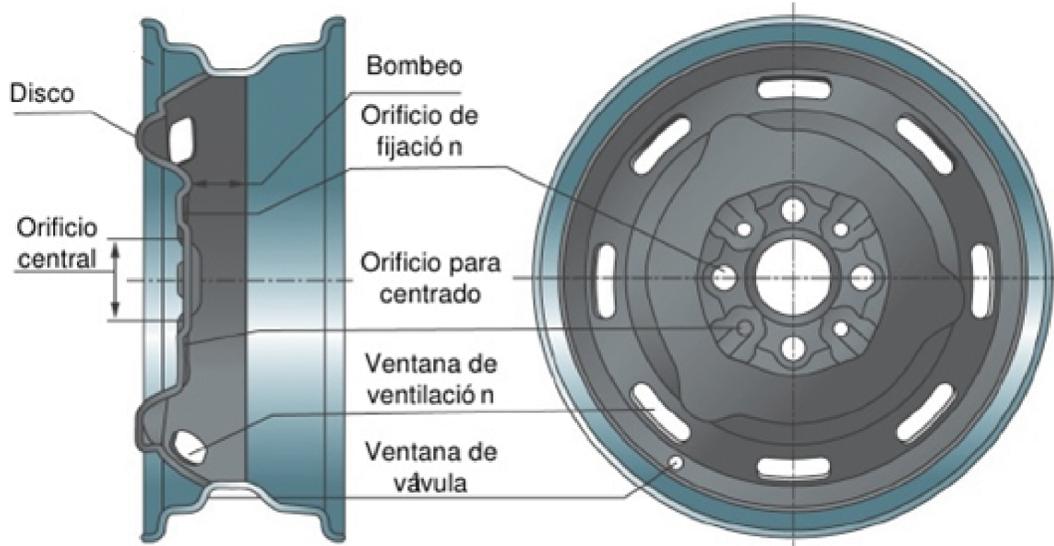


Figura 1. Esquema de una Rueda Metálica

Fuente: <http://www.slideshare.net/joaquinin1/ruedas-y-neumticos-69-pag-bueno>

La evolución de los neumáticos se debe principalmente a la necesidad de satisfacer las demandas de carga exigidas por los distintos tipos de vehículos. La mejoría ha implicado modificaciones en las propiedades de sus materiales para aumentar el desempeño en términos de capacidad de carga, maniobrabilidad al conducir y confort percibido por el usuario.

A continuación se detallan las funciones principales del neumático y los materiales utilizados para su elaboración:

### 5.1. Funciones del neumático

- Soportar el peso del vehículo y las cargas verticales que se le apliquen.
- Asegurar la transmisión de la fuerza del motor con el fin de generar el movimiento del vehículo.
- Promover una correcta maniobrabilidad del vehículo en movimiento.
- Coadyuvar con el frenado del vehículo.

## 5.2. Materiales utilizados en la elaboración de los neumáticos

- Caucho (natural, proveniente del árbol de hule) o Polímeros Sintéticos (derivados del petróleo): aproximadamente el 50% de la composición del neumático.
- Negro de humo: se encuentra dentro del 20-25% de la composición del neumático, brinda propiedades de resistencia y dureza al caucho.
- Fibras o cuerdas de acero o textiles: se encuentra entre 15-20% de la composición del neumático, se utilizan en el armazón de la llanta.
- Productos químicos: alrededor del 8% del neumático, dependen del fabricante y tipo de llanta y se emplean como estabilizantes, endurecedores, catalizadores y aditivos especiales.
- Existen otros materiales que facilitan la construcción de los neumáticos, éstos funcionan como refuerzos estructurales.

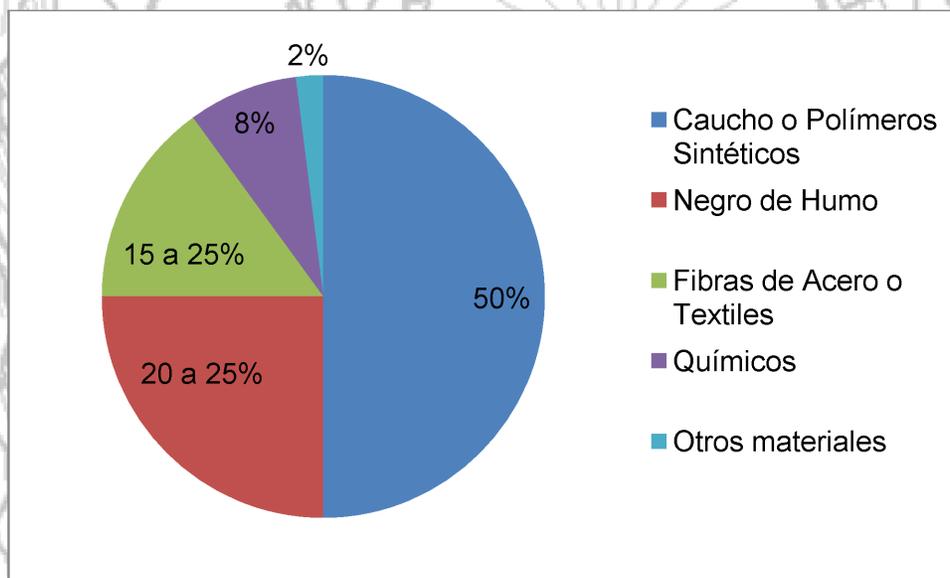


Figura 2. Porcentajes de los Materiales Empleados en la Elaboración de los Neumáticos.

Fuente: Rodríguez, P., Fabela, M. y Martínez, M., Publicación No.239, 2004.

## 5.3. Estructura y Tipos de Neumáticos

A inicios de los años 1970s, la ingeniería aplicada a neumáticos tomaba en consideración simplemente la respuesta bajo cargas aplicadas de manera estática y comparaba los resultados para cada diseño. Al ser tan simple el análisis, excluía parámetros importantes

Informe: LM-PI-GM-08-2014	Fecha de emisión: 20 de febrero de 2014	Página 11 de 40
---------------------------	---	-----------------



a la hora de aplicarse el aumento en la demanda de carga. Por esto, a mediados de los años 1980s, se refinó el análisis y se incluyó el efecto de fuerzas y pares dinámicos experimentados por el neumático, dado que ellos son los que producen la deformación de la llanta. Como conclusión a este análisis, se optó por mejorar la estructura del neumático. (Rodríguez, P., Fabela, M. y Martínez, M., Publicación No.239, 2004.)

### 5.3.1. Estructura

El elemento de mayor importancia es la carcasa, la cual se encuentra compuesta por un gran número de capas de fibras o cuerdas flexibles con alto módulo de elasticidad, dichas fibras se encuentran embebidas en una matriz de hule o caucho la cual tiene un módulo de elasticidad bajo. El acomodo de dichas fibras es lo que diferencia los tipos de neumático existentes. (Rodríguez, et al., Publicación No.239, 2004.)

### 5.3.2. Tipos de Neumáticos

Principalmente existen dos estructuras en la construcción de los neumáticos, en la cual la mayor diferencia es la dirección de las cuerdas o fibras dado que esta afecta las propiedades mecánicas definidas por el ángulo formado entre la cuerda y la línea circunferencial central de la llanta (Martínez, 2008).

Los neumáticos diagonales (bias-ply) fueron utilizadas desde los primeros años de industria automotriz de Norteamérica hasta los años 1960s que aparecieron los radiales (desarrolladas en Europa). Éstos sustituyeron las diagonales para los automóviles de pasajeros. Sin embargo, la transición al uso de los mismos no fue igual para los vehículos de carga, en los cuales el cambio se fue presentando periódicamente. En la actualidad existe una preferencia hacia los neumáticos radiales y prácticamente se han dejado de lado los diagonales.

Los neumáticos diagonales son más rígidos que los radiales, lo que impide una deformación del neumático en detrimento del área de contacto. Los neumáticos radiales son físicamente más uniformes debidos a la presión de inflado. Eso implica una reducción en la fatiga (desgaste) de la carcasa, además proporcionan menor resistencia a la rodadura y por ende una reducción de aproximadamente el 20% del consumo de combustible. (Rodríguez, et al., Publicación No.239, 2004.)

Informe: LM-PI-GM-08-2014	Fecha de emisión: 20 de febrero de 2014	Página 12 de 40
---------------------------	---	-----------------



Figura 3. Neumático diagonal (izquierda) y Radial (derecha)

Fuente: <http://www.livsa.com.mx/neumaticos-radiales-y-convencionales.htm>

### 5.3.2.1. Neumáticos Diagonales (Bias-ply)

Su carcasa está conformada por dos o más capas de fibras, dichas fibras tienen ángulos entre sí y la línea central de la circunferencia de  $35^\circ$  a  $40^\circ$  (ángulo de corona), alternando las direcciones del recorrido de las fibras. Al utilizar un mayor ángulo aumenta la flexibilidad en los costados de las llantas pero aporta poca estabilidad direccional, refiriéndose este concepto a la aptitud del vehículo para mantenerse en una trayectoria determinada.

### 5.3.2.2. Neumáticos Radiales

Su carcasa está conformada por recorridos paralelos de capas engomadas con refuerzo de fibras de nylon, poliéster o fibras de vidrio. Las cuerdas se encuentran colocadas radialmente con un ángulo formado entre sí y la línea central de circunferencia de  $90^\circ$  (ángulo de corona). Una vez colocadas, se les añaden cinturones formados por tejidos de cuerdas de alto módulo de elasticidad que se encuentran en la circunferencia del neumático, estos se encuentran entre la carcasa y la banda de rodamiento. Los cinturones tienen la función de brindar estabilidad direccional y el arreglo de las fibras radiales proporciona suavidad y confort al movilizarse.

Las cuerdas de los cinturones se encuentran colocadas de manera alternada entre capas adyacentes, con ángulos entre sí de  $20^\circ$ . Sumado a toda la estructura anterior, las llantas radiales cuentan con capas o telas angostas de acero llamadas estabilizadores o protectores, cuyas cuerdas forman un ángulo entre  $70^\circ$  y  $80^\circ$  con respecto a las cuerdas radiales.

La tendencia a utilizar únicamente los neumáticos de tipo radial se debe principalmente a la cantidad considerable de ventajas que presenta con relación a los neumáticos diagonales, a continuación se presentan dichas ventajas:

- Cubierta Flexible (aumento en el confort).
- Bajo calentamiento a la hora de operar el vehículo.
- Alta capacidad de carga.
- Fácil y efectiva reparación.
- Menos ruidosas.
- Menor resistencia a la rodadura (disminuye el consumo de combustible).
- Mejoría en la tracción (agarre) del vehículo.
- Reducción del desgaste.

### 5.3.3. Nomenclatura de los Neumáticos

Para comprender mejor las propiedades de los neumáticos y sus capacidades, es necesario poder interpretar de una manera adecuada su nomenclatura. Independientemente de la marca, existen una serie de números y letras que permiten identificar las principales características dimensionales y de aplicación, los anteriores toman en cuenta las siguientes características:

- Ancho de la sección (mm)
- Relación de altura/ancho de la sección (%)
- Diámetro de llanta (pulgadas)
- Índice de carga
- Índice de velocidad

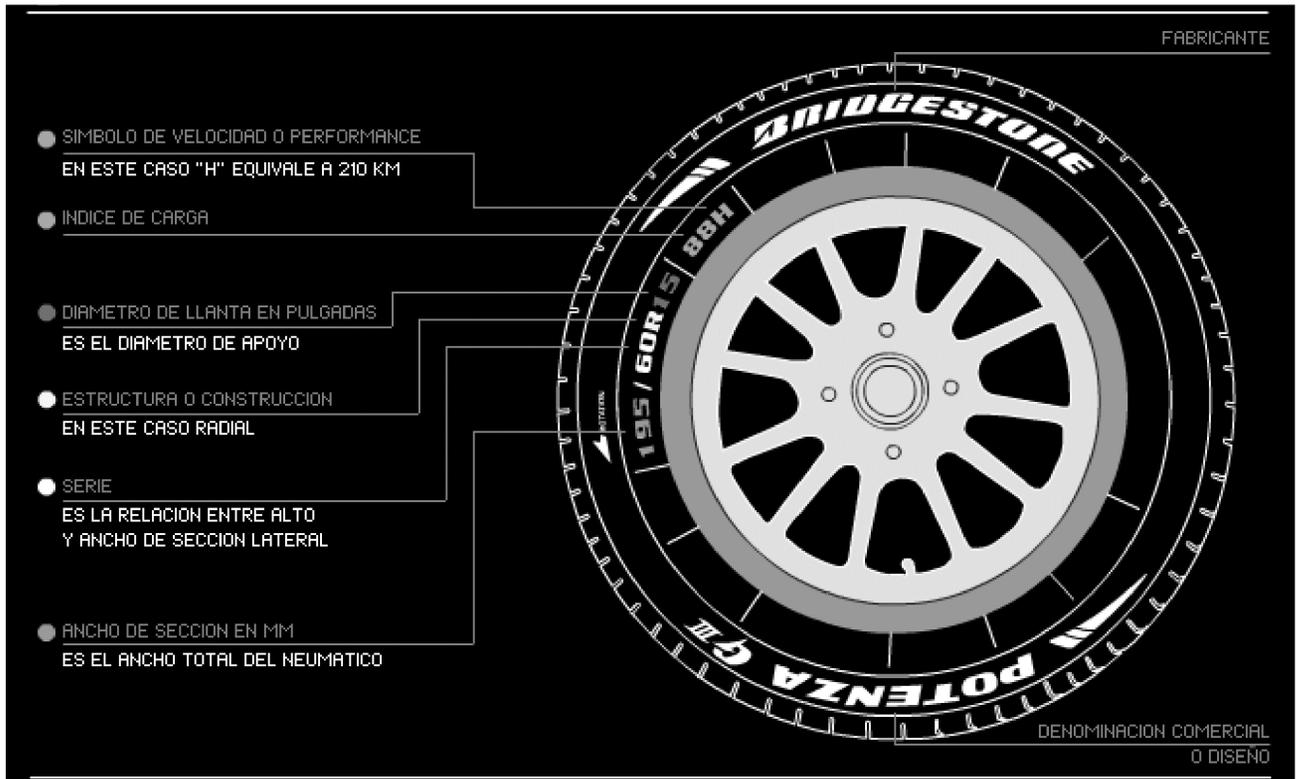


Figura 4. Ejemplo de Nomenclatura

Fuente: [http://www.bridgestonet.com.ar/contenidos/leer\\_neumatico.html](http://www.bridgestonet.com.ar/contenidos/leer_neumatico.html)

### 5.3.3.1. Índice de velocidad

Indica la velocidad máxima a la que el neumático puede soportar el peso correspondiente a su índice de carga.

**Cuadro 1. Equivalencia de índices de velocidad**

Índice de Velocidad	V <sub>máxima</sub> (km/h)						
<b>B</b>	50	<b>J</b>	100	<b>Q</b>	160	<b>W</b>	270
<b>C</b>	60	<b>K</b>	110	<b>R</b>	170	<b>Y</b>	300
<b>D</b>	65	<b>L</b>	120	<b>S</b>	180	<b>ZR</b>	>240
<b>E</b>	70	<b>M</b>	130	<b>T</b>	190		
<b>F</b>	80	<b>N</b>	140	<b>H</b>	210		
<b>G</b>	90	<b>P</b>	150	<b>V</b>	240		

### 5.3.3.2. Índice de Carga

Indicación de la carga máxima que un neumático puede soportar para la velocidad indicada por su índice de velocidad y a una determinada presión de inflado.

**Cuadro 2. Equivalencia de índices de carga**

Índice de Carga	Carga (kg)	Índice de Carga	Carga (kg)
<b>50</b>	190	<b>120</b>	1400
<b>60</b>	250	<b>130</b>	1900
<b>70</b>	335	<b>140</b>	2500
<b>80</b>	450	<b>150</b>	3350
<b>90</b>	600	<b>160</b>	4500
<b>100</b>	800	<b>170</b>	6000
<b>110</b>	1060	<b>200</b>	14000

### 5.4. Relación entre presión y neumático

En general, cada neumático tiene presiones y cargas recomendadas dependiendo de las dimensiones, estructura y el uso que se le vaya a dar.

Sin embargo dependiendo del montaje de los neumáticos (simple o dual), la carga que va a soportarse por llanta bajo la misma presión de inflado va a ser mayor para ejes simples,



de igual manera que al aumentarse la carga, va a ser necesario un aumento en la presión de inflado.

Cabe destacar que como una previsión de seguridad, el límite de carga recomendado para los ejes duales es menor que para los ejes simples. Lo anterior con el fin de que si uno de los neumáticos perdiese presión, los demás neumáticos tendrían un aumento en la carga recibida, carga que aún se encontrará dentro de los márgenes aceptables del neumático debido a esa previsión de seguridad implementada.

### **5.5. Evolución de la presión de inflado de los neumáticos**

Como se mencionó anteriormente, al aumentarse los límites máximos de peso por eje permitidos, los neumáticos tipo bias-ply se vieron sustituidos por los radiales de alta capacidad de resistencia. Aunado a la variación anterior, la American Association of State Highway Officials (antes conocida como AASHO, actualmente AASHTO) generó una carretera de prueba en la cual los vehículos transitaban con presiones entre los 75 y 80 psi, lo que llevó a estudios adicionales que avalaron el uso de presiones más elevadas. Actualmente, en países en los cuales se realizan estudios sobre esta materia, los promedios de presiones de inflado empleados en carretera varían entre 95 y 105 psi e incluso algunos vehículos utilizan hasta 120 y 130 psi. (Wang, 2003).

### **5.6. Efecto de la presión del neumático sobre su estructura y las condiciones de manejo**

Una disminución en la presión adecuada del neumático mantiene en contacto con la superficie de rodamiento los extremos de la banda, provocándose una disminución en su capacidad de carga, un desgaste prematuro en las paredes del mismo e incremento en la temperatura de la llanta debido a la excesiva flexión provocada, lo anterior puede ocasionar un desprendimiento o falla de las capas que conforman la estructura del neumático.

Aunado a esto, un exceso de presión incrementa la rigidez del neumático y disminuye el área de contacto con la superficie de rodamiento (disminuyéndose la fricción en la interfaz neumático-pavimento), lo que conlleva a una menor estabilidad del vehículo (Wang,

2010). Como consecuencia de este exceso, también se observa que las paredes de la llanta no flexionan de la manera para la cual fueron diseñadas, reduciéndose la absorción elástica de las irregularidades del camino, provocando un efecto negativo a la seguridad, el confort y el consumo de combustible.



**Figura 5. Zona de Contacto del Neumático Dependiendo de su Presión.**

Fuente: Varela, M., 2009.

## 6. ANÁLISIS DE ESTUDIOS INTERNACIONALES ACERCA DEL DAÑO PRODUCIDO A LAS ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO DEBIDO A LA PRESIÓN DE INFLADO DE LOS NEUMÁTICOS.

En la próxima sección se presenta un análisis de los estudios consultados y en ellos se mencionan distintos tipos de pavimentos flexibles y parámetros de interés, las figuras a continuación aclaran los espesores aproximados de los pavimentos y parámetros mencionados.

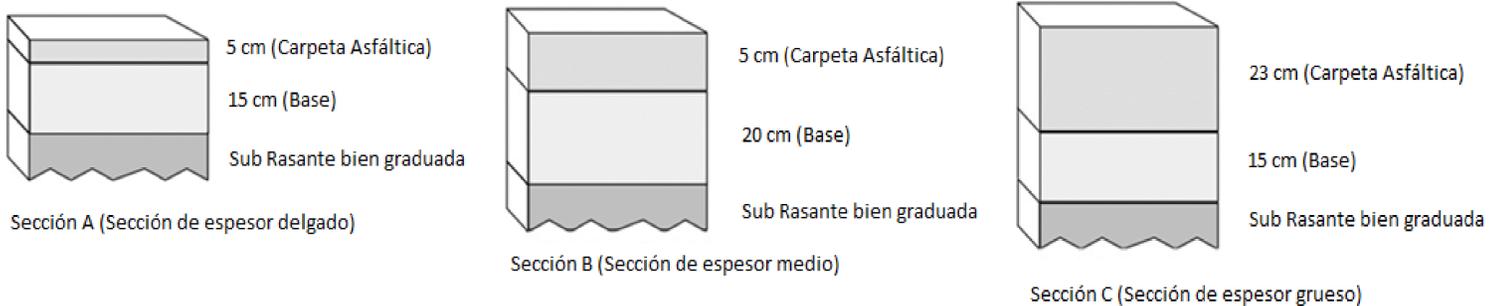


Figura 6. Secciones "Típicas" de Pavimento

Fuente: Modificado de <http://www.pavementinteractive.org/article/flexible-pavement-response/#refmark3>

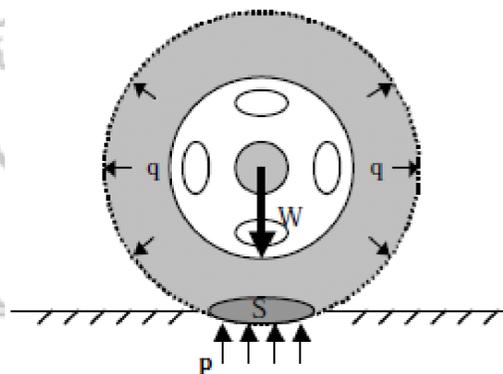


Figura 7. Carga del eje ( $W$ ), presión de contacto ( $p$ ), área de contacto ( $S$ ), presión de inflado del neumático ( $q$ )

Fuente: Wang, F (2003).

## 6.1. Área de Contacto

Comúnmente el área de contacto del neumático con el pavimento es asumido como circular (teoría elástica de capas múltiples). No obstante, la forma verdadera del área de contacto de un neumático se desvía principalmente a un área elipsoidal debido a la forma de la banda de rodadura y los hilos de refuerzo de los que se compone el neumático. El ángulo de corona del neumático afecta directamente el área de contacto, lo que implica que los neumáticos bias-ply aproximan a una elipse mientras que los neumáticos radiales asemejan un rectángulo.

Para aproximar la forma y el área de contacto de llantas duales, pueden utilizarse las siguientes ecuaciones (Huang, 2003):

$$A_c = \pi(0.3 * L)^2 + (0.4 * L)(0.6 * L) = 0.5227 * L^2$$

$$A_c = \frac{\text{Peso sobre cada neumático}}{\text{Presión de contacto}}$$

$$L = \sqrt{\frac{A_c}{0.5227}}$$

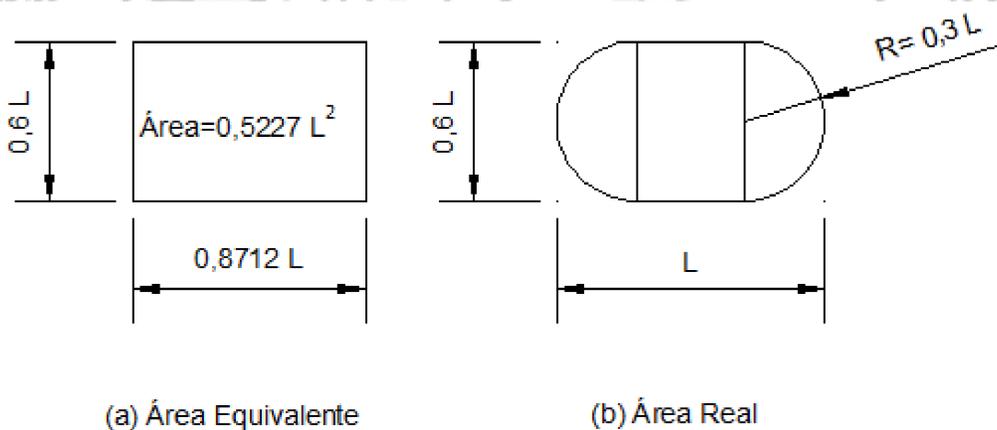


Figura 8. Dimensión del Área de Contacto.

Fuente: Modificado de Huang (2003).



Ante una presión de inflado elevada, el área de contacto neta producida es menor, para un aumento de la presión de inflado de 50%, existe una disminución de entre 8 y 20% del área de contacto neta.

Los neumáticos radiales generan áreas de contacto menores que las bias-ply, sin embargo, el rango de cambio en el área de contacto al alterarse las presiones de inflado para ambos tipos de neumático es aproximadamente el mismo.

El diseño de la banda de rodadura de un neumático tiene un efecto significativo sobre el tamaño y la forma del área de contacto. Presiones de inflado altas se encuentran en la interfaz entre la banda de rodadura y los surcos sobre la misma, al igual que en los extremos de la banda de rodadura. Al desgastarse la superficie de rodamiento, puede esperarse un aumento en el área de contacto neta y una reducción de las presiones pico, implicándose así una distribución de presiones continua. (Marshek, K., FHWA/TX-86/47+386-1, 1985)

Presiones de inflado bajas dan como resultado áreas de contacto amplias y presiones altas cercanas a los extremos de la banda de rodadura. Por el contrario, presiones de inflado elevadas reducen significativamente el área de contacto y movilizan las presiones altas a la parte central de la huella del neumático (Garnica, 2002) (Ver figura 4).

## 6.2. Presión de Contacto

La presión entre el neumático en movimiento y el pavimento presenta un comportamiento no uniforme. La no uniformidad se debe a la rigidez ante la flexión y por ende el diseño del mismo. Para un neumático cualquiera, la distribución de la presión de contacto se ve afectada principalmente por dos variables de operación, la presión de inflado del neumático y la carga sobre el neumático: la fuerza vertical aplicada sobre él (Tielking, 1987).

Dado que la rigidez ante la flexión se ve significativamente influenciada por la presión de inflado del neumático, la distribución de la presión de contacto se ve afectada al alterar la presión de inflado (Huang, 2003).



Debido a que las presiones no son las mismas para todos los vehículos de carga, las cuales pueden ser hasta dos veces mayores en áreas específicas de la huella del neumático sobre el pavimento, no es apropiado tomar en cuenta el concepto de presión de contacto uniforme ya que puede desembocar en altas deformaciones en pavimentos delgados (Gillespe, 1993).

Estudios realizados respaldan el hecho de que las presiones de contacto de los neumáticos radiales son más uniformes que los neumáticos diagonales, ya que la presión de contacto para este último tipo tiende a producir concentraciones de esfuerzo muy altas. Lo anterior implica que, para igual presión de inflado, los neumáticos radiales tienden a ser menos perjudiciales para la estructura del pavimento que los diagonales (Fernando, 2006).

Según el estudio "Laboratory Measurement of the Actual Tire-Pavement Contact Pressure Using a Static Test Device" (Hu, X., Sun, L. y Walubita, L., 2009), en el cual se tomaron en cuenta distintas configuraciones de carga, presión de inflado, tipos de neumático, patrones de banda de rodadura y edad del neumático se llegó a las siguientes conclusiones:

1. La magnitud y distribución de la presión de contacto son función de la carga aplicada sobre éste, la presión de inflado, el tipo de neumático, los patrones de la banda de rodadura y la edad del neumático.
2. En general, la presión de contacto promedio se asemeja a la presión de inflado del neumático.
3. Existe una aproximación lineal entre:
  - Presión de contacto promedio y presión de inflado del neumático.
  - Área efectiva de contacto y la carga aplicada al neumático a presión de inflado constante.
  - Presión de contacto promedio y la carga aplicada al neumático a presión de inflado constante.
4. Cuando la presión de inflado se mantiene constante, un incremento en la carga aplicada sobre el neumático afectará principalmente los costados y marginalmente

el centro del mismo. Cuando la presión de inflado es menor, la presión de contacto promedio es mayor a la presión de inflado del neumático. Contrariamente, cuando la presión de inflado es mayor, la presión de contacto promedio se acerca al valor de la presión de inflado.

5. La presión de contacto de un neumático nuevo es más uniforme que la de un neumático usado. Si se hace la suposición de que todos los demás factores funcionan de la misma manera, un neumático usado probablemente va a causar mayor daño a la estructura del pavimento que un neumático nuevo, dicho daño sería proporcional al cambio en la presión de contacto del neumático.
6. Para una carga constante sobre el neumático, un aumento unitario en la presión de inflado va a aumentar cerca de 1.5 veces la presión de contacto.

### 6.3. Relación entre Presión de Inflado y Pavimento

La presión de inflado para los vehículos de carga es especificada por el productor del neumático con el fin de permitir la totalidad de su carga útil, a ciertas velocidades estipuladas, evitando el sobrecalentamiento y obteniendo a cambio una manejabilidad adecuada y confortable (Roberts, 1986).

Debido al aumento en las cargas, la tendencia a aumentar la presión de inflado del neumático se ha vuelto común, dado que un aumento permite reducir el área de contacto y por ende la fricción entre el neumático y la superficie de ruedo (resistencia al deslizamiento). Dicho aumento va en detrimento del pavimento, pues aumenta los esfuerzos que se transmiten al mismo, contribuyendo así con mayores deformaciones en pavimentos flexibles que se manifiestan mediante ahuellamientos de alta severidad bajo la huella del neumático, en los cuales se puede acumular agua y permitir el hidroplaneo afectándose directamente la seguridad vial. Además de esto, el aumento de las cargas aplicadas promueve un agrietamiento por fatiga más severo (Kim, 1989).

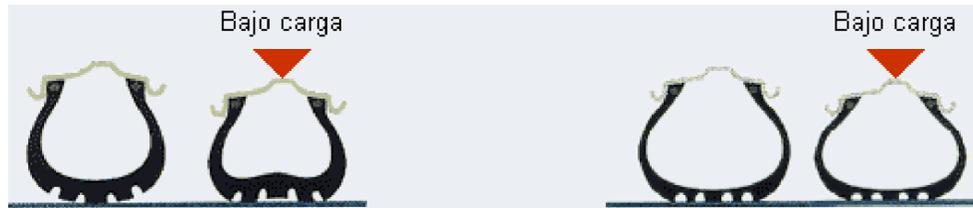


Figura 9. Comportamiento Bajo Carga de Neumáticos Diagonales (izquierda) y Radiales (derecha).

Fuente: <http://www.viarural.com.ar/viarural.com.ar/insumosagropecuarios/agricolas/cubiertas/indices/e-l-neumatico-radial.htm>

Es por ello que nace la importancia de tomar en cuenta una presión de inflado de neumático adecuada a la hora de realizar un diseño de pavimento, pues utilizar una presión inferior implicaría un sub-diseño de la estructura del pavimento, provocándose una reducción considerable en la vida útil del mismo. Lo anterior se debe a que la magnitud de la máxima deformación por tensión aumenta al aumentarse la presión de inflado.

Lo anterior justifica decir que para predecir el desempeño o deterioro de un pavimento existente o nuevo, es imprescindible tomar en cuenta la interfaz neumático-pavimento (esfuerzo de contacto) y para ello los parámetros esenciales son la presión de inflado, el tipo de neumático y la carga sobre el mismo (Marshek, 1985).

#### 6.4. Sistema de presión de inflado central

Con el afán de minimizar el deterioro sobre el pavimento, estudios realizados recomiendan utilizar presiones de inflado variables. Lo anterior puede afirmarse mediante la observación de que cuando el vehículo de carga se encuentra vacío (sin carga), parcialmente cargado o a velocidades bajas, los neumáticos se encuentran sobre-inflados, contribuyéndose así con la deformación estructural del pavimento flexible y manifestándose en la carpeta como deterioros funcionales o estructurales (Mabood, 2008).

El sistema de presión de inflado central permite al usuario del vehículo alterar la presión de inflado de los neumáticos desde su cabina mientras este se encuentra conduciendo. Presiones de inflado menores reducen el desgaste sobre la carretera y mejoran el



desempeño de los vehículos en las áreas de tracción, frenado, manejo y mantenimiento del vehículo (Woodrooffe, 1998).

El uso de presiones de inflado variables en lastre o pavimentos asfálticos delgados reduce los costos de mantenimiento de las carreteras, vehículos y neumáticos, no obstante en pavimentos de espesores considerables los resultados de utilizar presiones bajas no son tan evidentes (Owende, 2001).

En los caminos pavimentados, las deformaciones estructurales son menores al adaptarse la presión de inflado del neumático a la velocidad de movimiento y a las cargas sobre la misma. Las presiones bajas reducen la severidad del agrietamiento, implicando un aumento en la vida útil de pavimentos delgados y puede reducirse hasta en un 10% el espesor de la sub base granular. Además, una presión de inflado alta reduce la deflexión y el esfuerzo sobre el neumático, aumentándose así la vida útil del neumático y disminuyendo la resistencia al rodamiento y como consecuencia se obtiene un ahorro en el uso del combustible. Sin embargo, a presiones altas se producen mayores variaciones en el esfuerzo de contacto neumático-pavimento a lo largo del ancho del neumático, provocándose desgastes diferenciales en el neumático (Owende, 2001).

La huella del neumático aumenta a manera que se reduce la presión de inflado, lo cual reduce la tensión horizontal y vertical aplicada a la superficie de rodamiento, permitiéndose así cargas mayores sin aumentar los daños sobre el pavimento (Grau, 1993).



**Figura 10. Ejemplo de Sistema de Presión de Inflado Central**

Fuente: <http://www.aircti-usa.com/About-Us.html>

Por ende, puede fundamentarse el uso de presiones de inflado variables en vehículos de carga dependiendo de la magnitud de la carga que transporte y el tipo de pavimento por el que se encuentre transitando, ya que mediante este sistema, puede minimizarse el daño provocado por esta clase de vehículos (Smith, 1993).

### **6.5. Utilización de Neumáticos “Supersingle”**

La búsqueda del aumento en términos de eficiencia y economía de la industria de vehículos de carga ha llevado al aumento en el uso de los neumáticos de base ancha (supersingle). Según estudios, esta clase de neumáticos generan mayores esfuerzos de contacto vertical y transversal a lo largo del pavimento debido a una mayor área de contacto (Kim, 2005).

Los estudios indican que los esfuerzos de contacto verticales creados son hasta 2.5 veces la presión de inflado al utilizar este tipo de neumático, especialmente cuando se utilizan altas presiones de inflado y cargas.

La tendencia a utilizar cargas y presiones de inflado más altas, aunado a la utilización de los neumáticos de base ancha, ha causado una preocupación por la integridad de la estructura del pavimento, pues podría inclusive verse afectada la sub rasante. Una excesiva deformación de la sub rasante implicaría un estado crítico de la estructura del pavimento.

Informe: LM-PI-GM-08-2014	Fecha de emisión: 20 de febrero de 2014	Página 26 de 40
---------------------------	---	-----------------



Para los neumáticos de base ancha, el área de contacto es mayor en la dirección transversal que en la dirección longitudinal (opuesto al caso común de neumáticos convencionales). El área de los neumáticos de un vehículo de carga depende principalmente de la carga sobre el eje, la presión de inflado y el tipo de neumático.

El estudio realizado (Kim, D., 2005) describe el comportamiento del pavimento al utilizarse los neumáticos de base ancha en comparación a utilizarse neumáticos duales bajo las mismas cargas y con la misma presión de inflado, algunas de las conclusiones son las siguientes:

- Los neumáticos de base ancha inducen deformaciones por compresión vertical mayores en todas las capas.
- Los neumáticos de base ancha producen mayores deformaciones por tensión en la fibra inferior de la carpeta asfáltica.
- Los neumáticos de base ancha producen aproximadamente el doble de ahuellamiento que los neumáticos duales.
- La vida útil del pavimento según el análisis por fatiga se vio reducido a una cuarta parte al utilizar neumáticos de base ancha en comparación a los neumáticos duales.
- Los neumáticos de base ancha son aproximadamente 2.8 veces más dañinos sobre pavimento delgado y 2.5 veces más dañinos sobre pavimentos gruesos.
- Los neumáticos de base ancha son más dañinos que los neumáticos duales por un factor de 2.3 a 4 para las mismas condiciones del pavimento.
- Cuando la presión de inflado se aumenta en un 20%, el daño en términos de factores de equivalencia de carga (LEF: Load Equivalent Factor) aumenta entre un 10 y un 40%.
- De acuerdo a la comparación de neumáticos convencionales bajo condiciones elastoplásticas, los neumáticos de base ancha inducen deformaciones permanentes aproximadamente cuatro veces mayores, lo que implica que un diseño que tome en cuenta los LEF de ejes duales estaría sobreestimando la vida útil del pavimento.



- Ejes simples con neumáticos de base ancha inducen la mayor deformación plástica vertical en la primera fibra de la sub rasante (aproximadamente 1.5 veces más grande que el inducido por un eje tipo trídem).
- A mayor velocidad del vehículo, menor es la carga percibida por la sub rasante.

## **6.6. Efecto de la presión de inflado de los neumáticos de los vehículos pesados sobre la respuesta y el desempeño del pavimento**

Como se menciona anteriormente, presiones de inflado elevadas en los neumáticos implican un aumento en los deterioros de la estructura del pavimento, específicamente el agrietamiento por fatiga y la forma y profundidad de los ahuellamientos.

El efecto de la presión de inflado de los neumáticos duales en un eje simple es semejante a aquel de los neumáticos duales en cada uno de los ejes tipo tándem, mientras que los ejes direccionales tienen un comportamiento bastante diferente a ellos.

Para los tres tipos de configuraciones, la respuesta del pavimento ante el ahuellamiento se presenta debajo del área de contacto de cada neumático. Empero, la localidad de la respuesta crítica se encuentra cercana al borde del ancho del neumático al utilizarse presión de inflado baja y en el centro del área de contacto cuando la presión es alta. Además, la localidad de las deformaciones por tensión en la fibra inferior de la carpeta asfáltica que dan como producto el agrietamiento por fatiga, se encuentran en una pequeña área debajo del centro del área de contacto de cada neumático (Gillespe, T., 1992).

Las variaciones en la presión de inflado del neumático afectan el daño sobre el pavimento debido al cambio en la superficie de contacto de la huella y la rigidez vertical del neumático. Al disminuir el área de contacto debido al empleo de altas presiones de inflado, el pavimento flexible se ve afectado enormemente dado que los cambios mencionados pueden incrementar hasta un 50% el daño provocado con tan solo un aumento de 10 psi en la presión de inflado del neumático.

El tipo de neumático tiene un impacto directo mínimo sobre la fatiga del pavimento flexible, sin embargo, si ya existe una rodera, los neumáticos radiales van a tener la

tendencia a continuar por la rodera mientras que los neumáticos bias-ply van a tender a salirse de la misma. Lo anterior implica una aceleración en el daño producido por los vehículos de carga que utilizan neumáticos radiales, cuando ya existen roderas.

El efecto de la presión de inflado del neumático sobre la estructura del pavimento con respecto al ahuellamiento y la falla por fatiga depende principalmente de dos propiedades del pavimento, el espesor y la rigidez de la base, sub-base y sub-rasante (Gillespe, T., 1992).

No obstante, la influencia de la presión de inflado del neumático es principalmente sobre las capas superiores, pues a profundidades mayores el efecto de dicha presión disminuye y es entonces cuando la carga total aplicada exhibe su influencia sobre las magnitudes de los esfuerzos verticales de la estructura del pavimento.

### 6.6.1. Fatiga del Pavimento Flexible

El comportamiento de un pavimento flexible al movilizarse un vehículo sobre ella es el que se presenta en la siguiente figura.

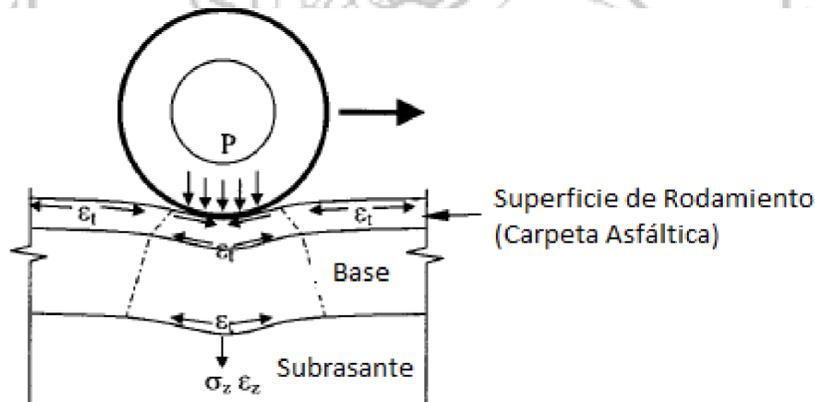


Figura 11. Respuesta del pavimento flexible ante el movimiento vehicular.

Fuente: Modificado de Owende (2001).

El movimiento vehicular provoca un cambio repentino de tensión a compresión en las fibras superiores e inferiores del pavimento, las cuales debido a movimientos repetitivos sobre el mismo, se reflejan como grietas en la superficie de rodadura.



El aumento en la presión de inflado da como resultado deformaciones por tensión en la parte inferior de la carpeta asfáltica. El efecto de dichas deformaciones es claramente de mayor significancia en pavimentos delgados (carpeta asfáltica de aproximadamente 5 cm y base aproximadamente de 15 cm) que en pavimentos de espesores mayores, lo cual sugiere que el aumento en la magnitud de la presión de inflado tiende a provocar mayor agrietamiento por fatiga sobre pavimentos delgados.

Un sobre inflado de neumáticos convencionales prácticamente duplica la fatiga percibida por el pavimento flexible. Similarmente, el sobre inflado de neumáticos de base ancha es sumamente crítico ya que aumenta la fatiga percibida en un factor de hasta cuatro bajo las mismas condiciones.

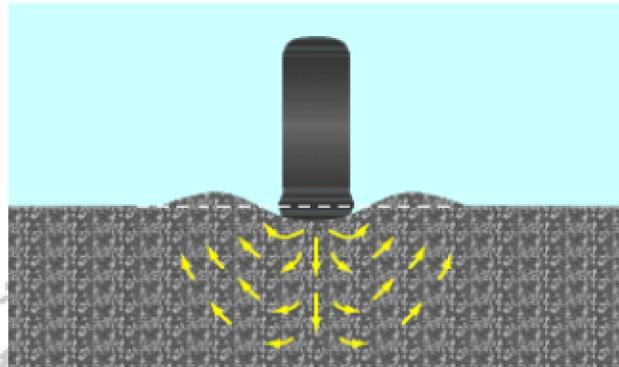
Presiones de inflado elevadas en los neumáticos de los ejes simples producen efectos de fatiga mayores que los ejes duales a la estructura del pavimento (el efecto es aún mayor cuando se trata el eje direccional), ya que los ejes duales tienen la capacidad de distribuir de manera más efectiva la carga al pavimento.

Cuando la presión promedio de los vehículos de carga se aumenta de 70 a 130 psi, el índice de agrietamientos transversales aproximadamente se triplica mientras que el longitudinal se duplica. Lo cual refleja la sensibilidad a la presión de inflado de los neumáticos del agrietamiento, específicamente el agrietamiento transversal pues es más sensible que el longitudinal (Wang, 2005).

Lo anterior se cumple tanto para pavimentos de espesores anchos como delgados. No obstante, la carpeta asfáltica de mayor espesor refleja menor cantidad de agrietamiento, lo que sirve para indicar que el espesor de la carpeta asfáltica juega un papel de suma importancia en el control del agrietamiento por fatiga.

### **6.6.2. Ahuellamiento del Pavimento Flexible**

El ahuellamiento se define como una excesiva deformación de las capas de asfalto que se agrava gradualmente al aumentarse las repeticiones de carga producto del movimiento vehicular (Said, 2012).



**Figura 12. Mecanismo de Ahuellamiento Bajo el Neumático.**

**Fuente: Said (2012).**

El ahuellamiento es ocasionado por dos mecanismos:

- Densificación: disminución de volumen y por ende aumento de densidad de la capa de concreto asfáltico bajo cargas de tránsito repetitivas.
- Deformación por cortante: provoca desplazamientos de material debido a los esfuerzos de cortante inducidos por el tráfico vehicular.

La deformación permanente desarrollada en el pavimento debajo de las cargas repetitivas del neumático puede dividirse en tres períodos.

1. La densificación debida a la carga de tránsito repetitiva, sucede aproximadamente durante los dos primeros años luego de la apertura de la vía.
2. La deformación se continúa desarrollando de manera constante en el tiempo. En este tiempo la deformación se relaciona principalmente con el movimiento lateral de los materiales, inducido por los esfuerzos repetitivos de cortante provocados por los vehículos pesados. Lo anterior produce levantamientos a lo largo de los costados de la huella del neumático (debido a esto es importante tomar en cuenta el desplazamiento lateral del tránsito).
3. La deformación presenta un crecimiento acelerado y la vía presenta índices de serviciabilidad completamente inaceptables.

Al aumentarse la presión de 70 a 130 psi, la profundidad del ahuellamiento promedio (en la superficie, no producto de una deformación en la sub rasante) aumenta cerca de un

Informe: LM-PI-GM-08-2014	Fecha de emisión: 20 de febrero de 2014	Página 31 de 40
---------------------------	---	-----------------

40%. El desempeño ante ahuellamiento no exhibe una relación importante con el espesor de la carpeta asfáltica, lo que permite concluir que el espesor de la carpeta asfáltica no tiene una incidencia importante sobre el control del ahuellamiento de la estructura. El hecho que la presión de inflado no presente una relación significativa con el ahuellamiento producto de una deformación de la sub rasante pero si con la formación del ahuellamiento en la carpeta asfáltica sugiere que el efecto de la presión de inflado se ve limitado a un rango de profundidad cercano a la superficie del pavimento. Utilizar un material asfáltico de mayor rigidez en la superficie puede verse como una solución que mitigue este efecto de la presión de inflado de los neumáticos (Wang, 2005).

La temperatura del pavimento demuestra una relación directa con el desempeño ante el ahuellamiento, al aumentarse de 12° C a 30°C, la profundidad promedio de los ahuellamientos aumento en un 80% para ambos espesores de carpeta asfáltica (Wang, 2005). Cabe destacar que en temperaturas más elevadas como las de algunas zonas de Costa Rica, las carpetas asfálticas de espesores mayores son más propensos a deformarse que aquellas de menor espesor.

### **6.7. Análisis del Caso Específico de los Vehículos de Carga en el Estado de Texas y Comparación con Respecto a Encuesta de Presión realizada en Egipto.**

El análisis se realizó para medir distintas variables que podrían afectar el parámetro en estudio: la presión de inflado de los neumáticos de camiones circulando por el estado de Texas (Wang, 2003).

#### **1. Efecto de Temperatura del Neumático**

Estudios de laboratorio y estadísticos realizados a los datos recolectados durante el muestreo permitieron desarrollar la siguiente ecuación, derivada de la ley del Gas Ideal, para relacionar la temperatura con la presión de inflado del neumático. La ecuación sirve para proyectar las presiones obtenidas a otras temperaturas en distintas estaciones climáticas al igual que estandarizar los datos para realizarle análisis estadísticos.

$$P_2 = P_1 + 0.22(T_2 - T_1)$$



Donde:

- $P_2$  y  $P_1$  son valores de presión en psi
- $T_2$  y  $T_1$  son valores de temperatura en °F

La estación climática por ende, afecta el comportamiento de la presión, pues durante el verano las presiones son mayores que en el invierno debido al aumento en la temperatura tanto del medio ambiente como del pavimento.

## 2. Efecto Sobre la Presión de Inflado Debido a la Carga por Eje

Existe una diferencia significativa en las presiones de inflado entre vehículos cargados y sin cargar. El peso adicional por eje ocasiona una compresión mayor del aire encapsulado en el neumático y como resultado un aumento en la presión de inflado.

## 3. Efecto de la Dirección de Circulación sobre la Autopista

La dirección en la que los vehículos circulan no afecta en lo absoluto las presiones de los neumáticos ya que no existe ninguna diferencia entre las presiones medidas en una u otra dirección, por ende se descarta la necesidad de investigar dicho parámetro a fondo.

## 4. Efecto del Área Geográfica

Las presiones utilizadas tienden a ser muy distintas a lo largo del estado de Texas, siguiéndose un patrón ascendente asociado a la diversidad de la producción y transporte de productos en la extensión del estado. Las presiones tienen un comportamiento ascendente comenzando con las zonas fronterizas, Austin/San Antonio, Houston, Dallas, Corpus Christi y Midland/Lubbock. Lo anterior aclara que las principales ciudades del estado son aquellas en las que las presiones son elevadas, esto debido a la mayor demanda de ingreso de productos diversos para lo cual es indispensable el uso de vehículos pesados que los transporten.

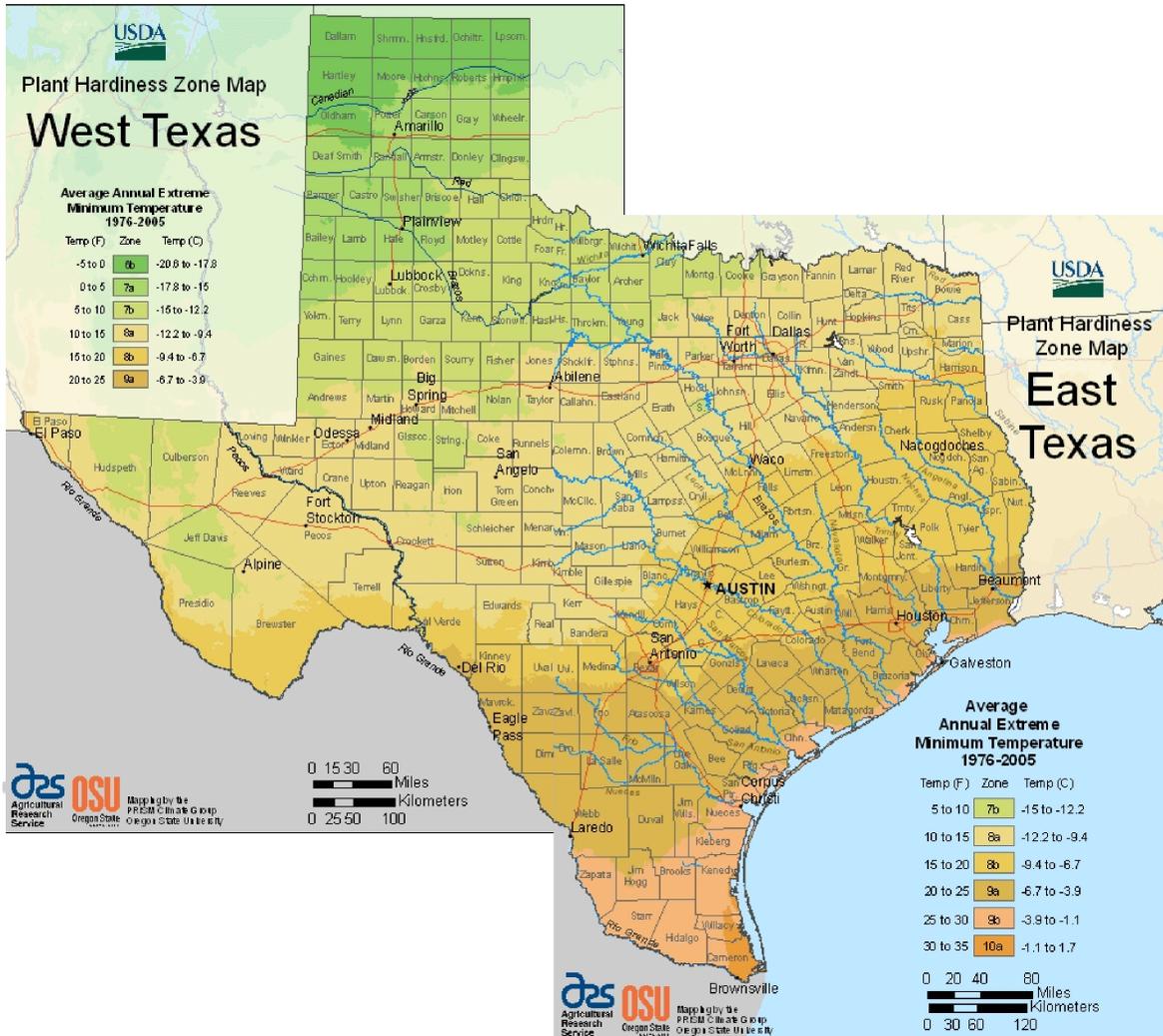


Figura 13. Temperaturas Promedio Anuales Mínimas del Estado de Texas.

Fuente: United States Department of Agriculture, 2014.

### 5. Comparación entre Zonas Fronterizas y No-Fronterizas

Existe una diferencia significativa entre las presiones obtenidas para las zonas fronterizas y las no fronterizas. En las zonas fronterizas se encuentran valores más bajos de presión de inflado, sin embargo esto no implica que los vehículos mejicanos sean menos dañinos para el pavimento que los norteamericanos, sino que por efectos de ley, los vehículos mejicanos tienen que encontrarse descargados a la hora de realizarles la medición, ya que no se les permite trasladarse cargados por el estado de Texas.



## 6. Comparación del Efecto de Ejes tipo 3-S2 (T3-S2 para Costa Rica)

En promedio el eje direccional posee una presión de inflado por eje mucho mayor a los restantes ejes, mientras que el eje tándem del centro posee entre ambos ejes una variación prácticamente inexistente, caso contrario al eje tándem trasero, en el cual si existen variaciones significativas entre los ejes. A modo de conclusión, el eje direccional del vehículo T3-S2 es sin duda alguna el más dañino para la estructura del pavimento.

## 7. Efecto de la Distancia del Viaje

El comportamiento del parámetro presión de inflado es directamente proporcional a la distancia que va a recorrer el vehículo, es decir, que para viajes mayores se utilizan valores mayores de presión de inflado de los neumáticos.

Una vez finalizado el análisis del muestreo, puede concluirse que las presiones de inflado mayores se presentan cuando se cumple una o más de las siguientes condiciones:

- Cargas por eje altas.
- Distancias de viaje largas.
- Autopistas interestatales.
- Altas temperaturas de operación.
- En ciertas regiones geográficas (principales ciudades del estado de Texas).

Comparándose el estudio realizado en el estado de Texas contra el conducido en las estaciones de descanso en las carreteras Cairo-Suez y Cairo-Alexandria en Egipto, puede observarse una diferencia de entre 20 y 30 psi entre el promedio de presión de inflado obtenido de ambas encuestas (Abdel-Motaleb, 2007).

Dicha diferencia va en detrimento de las carreteras de Egipto, ya que utilizan presiones de hasta 140 psi en promedio con diferencias de entre 20 y 60 psi entre los neumáticos de un mismo vehículo y entre 10 y 50 psi entre los neumáticos de un mismo eje dual, a diferencia del promedio de 100 psi utilizado en el estado de Texas y el comportamiento más estable entre los neumáticos de esos vehículos. El principal problema que se



observa producto de estas presiones elevadas y diferentes entre sí es el agrietamiento por fatiga y ahuellamiento a tempranas edades en la estructura del pavimento.

Luego de realizarse el muestreo en Egipto y de analizar los resultados obtenidos, se tomó la decisión de calcular nuevos factores camión dependiendo de la presión de inflado y el criterio de falla con el fin de obtener aquel que fuese el más crítico. Los nuevos factores resultaron ser dos veces mayores a los que tradicionalmente eran utilizados, lo que les permitió concluir que es indispensable diseñar la estructura del pavimento tomando en consideración los nuevos factores camión.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Los neumáticos radiales prácticamente dominan el mercado de neumáticos en detrimento de los bias-ply, pues por su capacidad de soportar mayores demandas de carga son preferidos por los conductores de los vehículos pesados.
- La presión de inflado de los neumáticos tiene influencia directa sobre el desempeño de un pavimento. Deterioros como el ahuellamiento y el agrietamiento por fatiga pueden agravarse dependiendo de las configuraciones de presión que tengan los vehículos de carga que los transiten. Presiones muy altas o bajas pueden agravar el estado de aquellas vías que ya se encuentren deterioradas por cargas y paso vehicular excesivos, o comenzar a deteriorar las estructuras a edades tempranas debido a la combinación de los parámetros ya mencionados. Los parámetros que aunados a la presión de inflado generan y agravan el estado del pavimento son la carga sobre el eje y la temperatura del pavimento, ya que este último es transmitido a los neumáticos de modo que generan un aumento o disminución (dependiendo de si la temperatura es muy alta o muy baja) temporal en la presión de inflado interna del neumático.
- Los neumáticos de base ancha (supersingle) no deben ser permitidos para ser utilizados en carreteras de espesores delgados. Para pavimentos de espesores mayores, deben de contemplarse en el diseño, con la intención de evitar deterioros a edades tempranas del pavimento, sin embargo, dicho diseño, puede necesitar de un análisis previo y puede implicar una inversión mayor. Eventualmente, podría resultar más sencillo solicitar una prohibición para los neumáticos de base ancha,



esto, sin menoscabo de que eventualmente se tomen previsiones de diseño especiales para incorporarlo.

- Se recomienda utilizar el sistema de control de presión de inflado central (o controlar manualmente las presiones si no es posible adquirir el sistema) con el fin de calibrar de la mejor manera posible las presiones para los distintos escenarios por los cuales se va a conducir. Lo anterior con el afán de mitigar el efecto nocivo que tiene la variación de la presión de inflado de los neumáticos de los vehículos de carga sobre la estructura del pavimento.
- Es recomendable recalcular y ajustar los factores camión del país para la presión promedio de los vehículos de carga, para así mitigar el daño que genera el parámetro de presión de inflado de los neumáticos sobre la carreteras de Costa Rica, similar al estudio realizado por Abdel-Motaleb (2007).
- Se recomienda implementar leyes y reglamentaciones que multen a todos aquellos usuarios que infrinjan los rangos de presión estipulados como admisibles y obliguen a las empresas que liciten para un proyecto de diseño de pavimentos a apearse estrictamente a los factores camión calculados a la hora de realizar el cálculo de los ejes equivalentes de diseño.
- La presente investigación proporciona los insumos necesarios para implementar una investigación en Costa Rica sobre el parámetro de presión de inflado de las llantas de vehículos de carga, tipo de llantas, sus dimensiones, condición de desgaste, temperaturas, carga por eje, y demás factores que influyen en el desempeño de los pavimentos asfálticos.



## 8. REFERENCIAS

- Abdel-Motaleb, M. (2007). *"Impact of High Pressure Truck Tires on Pavement Design in Egypt"*. Zagazig, Egipto: Emirates Journal for Engineering Research.
- Allen, J. (2013). *Propuesta de Línea de Investigación: Determinación de Parámetros de Carga Diseño Estructural de Pavimentos en Costa Rica*. San José, Costa Rica: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR).
- Fernando, E., Musani, D., Park, D. y Liu, W. (2006). *"Evaluation of Effects of Tire Size and Inflation Pressure on Tire Contact Stresses and Pavement Response"*. Texas, Estados Unidos: Texas Transportation Institute.
- Garnica, P., Gómez, J. y Sesma, J. (2002). *"Mecánica de Materiales para Pavimentos"*. Querétaro, México: Instituto Mexicano del Transporte.
- Gillespe, T., Karamihas, S., Cebon, D., Sayers, M., Nasim, M., Hansen, W. y Ehsan, N. (1993). *"Effects of Heavy Vehicle Characteristics on Pavement Response and Performance"*. Michigan, Estados Unidos: Transportation Research Council.
- Grau, R. (1993). *"Effects of variable tire pressure on road surfacings: Volume I"*. Mississippi, Estados Unidos: US Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Hu, X., Sun, L. y Walubita, L. (2009). "Laboratory Measurement of the Actual Tire-Pavement Contact Pressure Using A Static Test Device". *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 38, No.1.
- Huang, Y. (2003). *"Pavement Analysis and Design: Second Edition"*. Estados Unidos: Pearson Prentice Hall.
- Kim, D., Salgado, R. y Altschaeffl, A. (2005). "Effects of Supersingle Tire Loadings on Pavements". *Journal of Transportation Engineering*, 131(10), 732-743.
- Kim, O., Bell, C. y Wilson, J. (1989). "Effect of Increased Truck Tire Pressure on Asphalt Concrete Pavement". *Journal of Transportation Engineering*, 115(4), 329-350.
- Mabood, F., Tighe, S., Klement, T., Kazmierowski, T. y Mercier, S. (2008). *"Evaluating Tire Pressure Control Systems (TPCS) to Improve Productivity and Mitigate Pavement Damage"*. Ontario, Canada: Annual Conference of the Transportation Association of Canada.
- Marshek, K., Hudson, R., Connell, R., Chen, H. y Saraf, Chhote. (1985). *"Experimental Investigation of Truck Tire Inflation Pressure on Pavement-Tire Contact Area and Pressure Distribution"*.



Texas, Estados Unidos: Center for Transportation Research of The University of Texas at Austin.

Martínez, A. (compilador). (2008). *"Manual de Información Técnica de Neumáticos"*. México D.F., México: Dirección de Transporte CONUEE.

Owende, P., Hartman, A., Ward, S., Gilchrist, M. y O'Mahony, M. (2001). "Minimizing Distress on Flexible Pavements Using Variable Tire Pressure". *Journal of Transportation Engineering*, 254-262.

Roberts, F., Tielking, J., Middleton, D. y Tseng, K. (1986). *Effects of Tire Pressures on Flexible Pavements*. Texas, Estados Unidos: Texas Transportation Institute.

Rodriguez, P., Fabela, M. y Martínez, M. (2004). *"Diseño Conceptual de un Banco de Pruebas para Determinar Rigidez en Llantas Neumáticas"*. Querétaro, México: Instituto Mexicano del Transporte.

Ruiz, M. (2009). *"Procedimiento de control de calidad para la manufactura de neumáticos para automóvil"*. Zacatecas, México: Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez, Departamento de Ingeniería Industrial.

Said, S. y Hakim, H. (2012). *"Influence of Traffic Variables on Rut Formation In Asphalt Concrete Layers"*. Stockholm, Suecia: International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology - HVTT12.

Siddharthan, R., Krishnamenon, N., El-Mously, M. y Sebaaly, P. (2002). "Investigation of Tire Contact Stress Distributions on Pavement Response". *Journal of Transportation Engineering*, 128(2), 136-144.

Smith, D. (1993). *"Effects of variable tire pressure on road surfacings: Volume II, Analysis of Test Results"*. Mississippi, Estados Unidos: US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station.

Tielking, J. y Roberts, F. (1987). "Tire Contact Pressure and its Effect on Pavement Strain". *Journal of Transportation Engineering*, 113(1), 56-71.

Wang, F. (2005). *"Mechanistic-Empirical Study of Effects of Truck Tire Pressure on Asphalt Pavement Performance"*. Texas, Estados Unidos: University of Texas at Austin.

Wang, F. y Machemehl, R. (2003). *"The Current Status and Variability of In-Service Truck Tire Pressures in Texas"*. Washington D.C, Estados Unidos: 82nd Transportation Research Board Meeting.

Informe: LM-PI-GM-08-2014	Fecha de emisión: 20 de febrero de 2014	Página 39 de 40
---------------------------	---	-----------------



Wang, H., Al-Qadi, I. y Stanciulescu, I. (2010). *"Effect of Friction on Rolling Tire-Pavement Interaction"*. Estados Unidos: NEXTRANS.

Woodrooffe, J. y Burns, N. (1998). *"Effects of Tire Inflation Pressure and CTI on Road Life and Vehicle Stability"*. Australia: Norm Burns Saskatchewan Highways and Transportation.

Yoder, E. y Witzcak, M. (1975). *"Principles of Pavement Design: Second Edition"*. Nueva York, Estados Unidos: Wiley-Interscience.

