

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**SECCIÓN DE POST-GRADO**



**INFLUENCIA DE LA PRESIÓN DE INFLADO DE LOS  
NEUMÁTICOS EN LA VIDA UTIL DE LOS PAVIMENTOS  
ASFÁLTICOS**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN  
EN INGENIERÍA DE TRANSPORTES**

**CÉSAR EDISON GUEVARA MALPARTIDA**

**LIMA – PERU**

**2001**

# INFLUENCIA DE LA PRESIÓN DE INFLADO DE LOS NEUMÁTICOS EN LA VIDA UTIL DE LOS PAVIMENTOS ASFALTICOS

## RESUMEN

El principio del diseño Mecanístico surgió en la década pasada y que en la actualidad es la herramienta principal para todo diseñador de Pavimentos, tanto así que la AASHTO, está en estudios para dar un giro implementando el diseño mecanístico complementados con su ya conocida prueba experimental.

Los pavimentos asfálticos constituyen casi el 100% de las carreteras pavimentadas del país; en este sentido surge la necesidad de un adecuado diseño, conservación y mantenimiento de las mismas.

Una de las variables que no ha sido considerada en los diferentes estudios de rehabilitación de las vías, viene a ser la presión de inflado de los neumáticos, cuyo inventario realizado nos revela las altas presiones que tienen los neumáticos de los vehículos especialmente pesados. Por otro lado el área de contacto o presión de contacto, que es función de la presión de inflado y la carga, es de suma importancia en todo método de diseño mecanístico de allí la consideración para determinar en la presente tesis la relación que existe entre ellas, para los tipos de neumáticos más usados en el parque automotor del país.

Después de una caracterización de las principales estructuras de los pavimentos usados en el país, y apoyado en la teoría de la elasticidad se determinó los principales esfuerzos y deformaciones adicionales que se originan solo por efecto de la presión de inflado. Para ello ha sido necesario el uso del programa ELSYM 5 desarrollado por la Universidad de California. Esto permitió calcular el número de repeticiones para un eje estándar, con una presión de inflado considerada en las pruebas AASHTO, y otro eje estándar variando la presión de acuerdo el rango encontrado en el inventario realizado en campo(75 psi a 130 psi).

En base a lo anterior el estudio propone factores de corrección de los ejes equivalentes a tomar en cuenta en el diseño de la estructura del pavimento. Se ha simulado por otro lado el comportamiento de un pavimento asfáltico a lo largo de su vida útil con la consideración de los factores antes mencionados y sin ellos.

Finalmente la investigación plantea el uso de un sistema automático que permita contrarrestar o disipar el efecto destructivo que tiene las altas presiones de inflado.

# **INFLUENCES OF THE PRESSURE OF INFLATED OF THE TIRES IN THE DETERIORATION OF THE ASPHALTIC PAVEMENTS**

## **SUMMARY**

The principle of the mechanistic design arose in last decade and at the present time it is the main tool for all designer of Pavements, so much so the AASHTO is in studies to give a turn implementing the mechanistic design supplemented with its acquaintance it already proves experimental.

The asphaltic pavements almost constitute 100% of the paved highways of the country; in this sense it arises the necessity of an appropriate design, conservation and maintenance of the same ones.

One of the variables that has not been considered in the different studies of rehabilitation of the roads, comes to be the pressure of having inflated of the tires whose carried out inventory reveals us the discharges pressures that they have the tires of the specially heavy vehicles. On the other hand the contact area or contact pressure that it is function of the pressure of having inflated and the load, is a supreme importance in all method of mechanistic design of there the consideration to determine in the present thesis the relationship that exists among them, for the types of tires more used in the Peruvian self-driven park.

After a characterization of the main structures of the pavements used in the country, and supported in the theory of the elasticity it was determined the main efforts and additional deformations that originate alone for effect of the pressure of having inflated. For it has been necessary the use of the program ELSYM 5 developed by the University of California. This allowed to calculate the number of repetitions for a standard axis, with a pressure of had inflated considered in the AASHTO's tests, and another standard axis varying the pressure according to the range found in the inventory (75 psi to 130 psi).

Based on the above-mentioned the study proposes factors of correction of the equivalent axes to take into account in the design of the structure of pavement. It has been simulated the behavior of an asphaltic pavement on the other hand along their useful life with the consideration of the factors before mentioned and without them.

Finally the investigation outlines the possible solutions that they allow to counteract or the destructive effect that has the discharges pressures of having inflated to vanish.

## INDICE

CAP	DESCRIPCION	PAG
	DEDICATORIA .....	03
	AGRADECIMIENTO.....	03
	RESUMEN.....	04
	SUMMARY.....	05
	INDICE.....	06
	INTRODUCCION.....	09
<b>CAP. I</b>	<b>PRINCIPIOS BÁSICOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS.....</b>	<b>10</b>
	I.1 FACTORES REQUERIDOS PARA EL DISEÑO.....	10
	I.1.1 TRÁFICO.....	10
	I.1.2 LA SUBRASANTE.....	11
	I.1.3 CLIMA.....	11
	I.1.4 MATERIALES.....	11
	I.1.5 OTROS FACTORES.....	11
	I.2 MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	11
	I.2.1 MÉTODOS EMPÍRICOS.....	11
	I.2.2 MÉTODOS QUE LIMITAN LA FALLA DE CORTE.....	12
	I.2.3 MÉTODOS QUE LIMITAN LA DEFLEXIÓN.....	12
	I.2.4 MÉTODOS DE REGRESIÓN BASADOS EN EL COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO O CAMINOS DE PRUEBA.....	12
	I.2.5 MÉTODOS EMPÍRICOS – MECANÍSTICOS.....	13
	I.3 TEORÍA DE ELASTICIDAD APLICADA AL DISEÑO DE PAVIMENTOS.....	14
	I.3.1 FORMULACIÓN GENERAL PARA SISTEMAS MULTICAPAS DE PAVIMENTOS.....	14
	I.3.2 ECUACIONES QUE GOBIERNAN LA TEORÍA DE BURMISTER.....	15
	1 ECUACIONES DE EQUILIBRIO.....	15
	2 RELACIONES DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES.....	15
	3 LEY CONSTITUTIVA.....	16
	4 CONDICIONES INICIALES Y DE BORDE.....	16
	I.4 CONCEPTO DE EQUIVALENCIA DE CARGA.....	17
<b>CAP. II</b>	<b>RANGO DE PRESIONES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS NEUMATICOS</b>	<b>18</b>
	II.1 REGLAMENTACIÓN EXISTENTE EN CUANTO A PESOS Y MEDIDAS DE LOS VEHÍCULOS.....	18
	II.2 ESTACIONES DE PESAJE DONDE SE REALIZÓ EL INVENTARIO DE PRESIONES.....	18
	II.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS NEUMÁTICOS.....	20
	II.3.1 COMPONENTES.....	20
	II.3.2 TIPOS DE NEUMÁTICOS.....	22
	II.3.3 TERMINOLOGÍA DE LOS NEUMÁTICOS.....	24

II.3.4 ESPACIAMIENTO ENTRE EJES Y NEUMÁTICOS DUALES.....	26
II.4 PRESIONES MÁXIMAS Y MÍNIMAS.....	28
II.4.1 CARGA Y PRESION.....	28
II.4.2 PRESIÓN DE INFLADO DE LOS NEUMÁTICOS.....	28
II.4.3 PRESION BAJA.....	28
II.4.4 PRESION ALTA.....	29
II.4.5 EFECTOS DE LA TEMPERATURA EN LA PRESIÓN DE INFLADO.....	30
<b>CAP. III PRESIÓN DE INFLADO Y LA PRESIÓN DE CONTACTO.....</b>	<b>32</b>
III.1 CARACTERÍSTICAS DEL CAMIÓN DE PRUEBA.....	32
III.2 PROCEDIMIENTO DE CAMPO.....	34
III.3 RELACIÓN ENTRE LA PRESIÓN DE INFLADO Y PRESIÓN DE CONTACTO.....	44
<b>CAP.IV CARACTERIZACIÓN DEL PAVIMENTO</b>	<b>48</b>
IV.1 CARPETA ASFALTICA.....	48
IV.2 BASE Y SUB BASE GRANULAR.....	53
IV.3 SUBRASANTE .....	54
IV.4 ESTRUCTURAS ANALIZADAS.....	55
<b>CAP. V SIMULACION Y ANALISIS DE RESULTADOS DEL MODELO ELSYM</b>	<b>57</b>
V.1 ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....	57
V.2 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA ELSYM5.....	58
V.2.1 DATOS REQUERIDOS POR ELSYM5.....	59
V.3 CÁLCULO DE FACTORES DE CORRECCIÓN POR PRESIÓN DE INFLADO.....	61
V.4 LEYES DE FATIGA - CRITERIOS DE FALLA.....	63
V.4.1 FATIGA EN CARPETA ASFÁLTICA.....	64
V.4.2 COMPRESIÓN EN LA SUBRASANTE – DEFORMACIÓN PERMANENTE EN LA SUBRASANTE .....	66
V.4.3 FATIGAS CRITICAS.....	67
V.5 PUNTOS DE MÁXIMA DEFORMACIÓN.....	67
V.6 RESULTADOS Y MODELOS MATEMÁTICOS PROPUESTOS.....	68
<b>CAP.VI COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO DURANTE SU VIDA ÚTIL POR EFECTO DE LA PRESIÓN DE INFLADO.....</b>	<b>73</b>
VI.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA VÍA A SIMULAR.....	74
VI.2 CALCULO DE LOS FACTORES DE EQUIVALENCIA DE CARGA.....	74
VI.3 DETERIORO DE LA VIA POR EFECTO DE LA PRESION DE INFLADO.....	75
VI.4 PLANTEAMIENTO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE LAS PRESION DE INFLADO EN CAMIONES PESADOS.....	79
VI.4.1 APLICACION DE FACTORES DE CORRECCIÓN.....	79
VI.4.2 SISTEMAS PARA EL CONTROL DE LA PRESION VARIABLE DE INFLADO	80

<b>CAP.VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	83
BIBLIOGRAFIA.....	88
LISTA DE TABLAS.....	91
LISTA DE FIGURAS.....	92
ANEXO .....	94
<b>TABLA 1: FORMATOS DE RECOLECCION DE DATOS DE CARGA Y PRESION DE INFLADO.....</b>	95
<b>TABLA 2: DATOS DE TEMPERATURA DE 75 ESTACIONES EN LAS TRES REGIONES DEL PAIS.....</b>	97
• <b>TABLA 3: PRINCIPALES ESTUDIOS REVISADOS PARA LA CARACTERIZACION DEL PAVIMENTO.....</b>	99
• <b>GRAFICO 1: PESOS Y PRESIONES DE INFLADO-VEHICULOS TIPO T3S3.....</b>	100
• <b>GRAFICO 2: PESOS Y PRESIONES DE INFLADO-VEHICULOS TIPO C2-C3.....</b>	101
• <b>PANEL FOTOGRAFICO 1: INVENTARIO DE LA PRESION DE INFLADO EN LA ESTACION DE PESAJE DE PASAMAYO.....</b>	102
<b>PANEL FOTOGRAFICO 2: INVENTARIO DE LA PRESION DE INFLADO EN LA ESTACION DE PESAJE DE CUT -OFF - LA OROYA.....</b>	105
• <b>PANEL FOTOGRAFICO 3: ENSAYO DE LA RELACION DE LA PRESION DE INFLADO Y LA PRESION DE CONTACTO.....</b>	107
<b>TABLA 4: MODELO DE INPUT Y OUTPUT DEL MODELO ELSYM 5.....</b>	112
• <b>TABLA 5: UBICACIÓN DE PUNTOS CRITICOS-MAXIMAS DEFORMACIONES</b>	113
• <b>TABLA 6 CÁLCULO DEL NÚMERO DE REPETICIONES.....</b>	114
• <b>GRÁFICO 3: FACTORES DE CORRECCIÓN EN COSTA CON 10% DE CBR.....</b>	115
• <b>GRÁFICO 4: FACTORES DE CORRECCIÓN EN COSTA CON 20% DE CBR.....</b>	116
• <b>GRÁFICO 5: FACTORES DE CORRECCIÓN EN COSTA CON 30% DE CBR.....</b>	117
• <b>GRÁFICO 6: FACTORES DE CORRECCIÓN EN SIERRA CON 5% DE CBR.....</b>	118
• <b>GRÁFICO 7: FACTORES DE CORRECCIÓN EN SIERRA CON 10% DE CBR.....</b>	119
• <b>GRÁFICO 8: FACTORES DE CORRECCIÓN EN SIERRA CON 20% DE CBR.....</b>	120
• <b>GRÁFICO 9: FACTORES DE CORRECCIÓN EN SELVA CON 3% DE CBR.....</b>	121
• <b>GRÁFICO 10: FACTORES DE CORRECCIÓN EN SELVA CON 10% DE CBR.....</b>	122
• <b>GRÁFICO 11: FACTORES DE CORRECCIÓN EN SELVA CON 20% DE CBR.....</b>	123
• <b>GRAFICO 12: FACTORES DE CORRECCION EN SELVA-CONDICION CRITICA</b>	124
• <b>TABLA 7: F.E DE CARGA Y PRESION DE INFLADO ESPESOR CAC=5cm.....</b>	125
• <b>TABLA 8: F.E DE CARGA Y PRESION DE INFLADO ESPESOR CAC=7.5cm.....</b>	125
• <b>TABLA 9: F.E DE CARGA Y PRESION DE INFLADO ESPESOR CAC=10cm.....</b>	126
• <b>TABLA 10: F.E DE CARGA Y PRESION DE INFLADO ESPESOR CAC=12.5cm....</b>	126
• <b>TABLA 11: F.E DE CARGA Y PRESION DE INFLADO ESPESOR CAC=15cm.....</b>	127
• <b>TABLA 12: F.E DE CARGA Y PRESION DE INFLADO ESPESOR CAC=17.5cm....</b>	127
• <b>TABLA 13: F.E DE CARGA Y PRESION DE INFLADO ESPESOR CAC=20cm.....</b>	128
• <b>GRÁFICO 13 PROGRESION DE LA RUGOSIDAD EN LA COSTA.....</b>	129
• <b>GRÁFICO 14 PROGRESION DE LA RUGOSIDAD EN LA SIERRA.....</b>	130
• <b>GRÁFICO 15 PROGRESION DE LA RUGOSIDAD EN LA SELVA.....</b>	131

## INTRODUCCION

La motivación para la realización de la presente tesis se debe al cambio de escenario de los siguientes factores.

- Incremento del volumen de los camiones.
- Incremento de la carga.
- Incremento de la presión del neumático.
- Nueva tecnología en el diseño del neumático.

A esto se agrega el alto porcentaje de las vías pavimentadas con carpetas asfálticas de espesores iguales a 5cm, donde la presión de inflado tiene mayor influencia. Cerca del 36% de 16,500 km. de carreteras de la Red Vial Nacional en nuestro país está construido con carpeta asfáltica, y el 70% de ellos tienen espesores menores o iguales de 5cm. Por otro lado es importante mencionar que el 98% de las carreteras asfaltadas han sido diseñadas con la metodología AASHTO que en su prueba experimental consideró una presión de inflado de sólo 75psi, en tanto que el inventario realizado para desarrollar la presente tesis, nos revela un incremento significativo de esta variable con presiones promedios entre 100 psi a 110 psi. presiones máximas de inflado de 135 psi, Esto nos da una imagen clara de lo que puede estar sucediendo con los pavimentos en el país.

Todas estas consideraciones sugieren determinar cual es el efecto real de las altas presiones de inflado del neumático sobre los pavimentos asfálticos. Para ello se han planteado los siguientes objetivos

### OBJETIVOS

- Obtener la relación entre la presión de inflado y la presión de contacto, para diferentes condiciones de carga. La presión de contacto es la variable que interviene en el diseño del pavimento.
- Proponer los factores de corrección de los ejes equivalentes por efecto de la presión de contacto en el diseño de los pavimentos asfálticos.
- Proponer un Sistema de Control automático de la presión de inflado que permita disipar su efecto.

## CAPITULO I

### PRINCIPIOS BASICOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS

El diseño de un pavimento debe apoyarse tanto en criterios técnicos y económicos, los primeros se refieren a las características estructurales, a las características funcionales o superficiales, al proceso constructivo y a la valoración de la evolución del pavimento tras su construcción y puesta en servicio. Los aspectos económicos deben incluir no sólo los costos de construcción, sino también los de conservación y costos de operación (usuarios)

El enfoque que daremos en el presente trabajo está referido a una variable del criterio técnico y viene a ser la presión de inflado de los neumáticos, variable que no ha sido considerado como parámetro de diseño, en gran parte de los pavimentos asfálticos construidos en el país.

#### I.1 FACTORES REQUERIDOS PARA EL DISEÑO

##### I.1.1 TRÁFICO

Es una variable de mucha importancia que requiere de mayor coeficiente de seguridad para estimar el tráfico futuro, cuando los volúmenes de tráfico son más intensos.

Esta actividad ha de concentrarse en una adecuada valoración de la incidencia de las cargas vehiculares sobre las estructuras de los pavimentos. Esta no es, por supuesto, una labor exenta de complejidad, por cuanto el efecto de las cargas sobre el pavimento depende de muchos factores, unos propios del vehículo y otros debido a las condiciones de operación en las cuales actúan. Entre los primeros, se encuentran la magnitud de las cargas por rueda, por eje de rodado simple o doble, la separación de ejes, su configuración, la suspensión del vehículo, el tipo de neumático y **presión de inflado**, materia de estudio en la presente tesis. Dentro de las condiciones de entorno principales se encuentran la capacidad estructural de la calzada, la acción ambiental, las características geométricas de la vía, el criterio de falla elegido, etc.



### **I.1.2 LA SUBRASANTE**

El comportamiento de la subrasante tiene una gran influencia en el comportamiento general del pavimento. Las características de los suelos no solo definen los requerimientos estructurales del pavimento sino que pueden dar origen a definir el tipo de pavimento, estrategias de construcción, así como la construcción por etapas.

### **I.1.3 CLIMA**

Suele tenerse más en cuenta en la selección de los materiales y en determinados elementos constructivos, como el drenaje, que en el mismo diseño de la estructura del pavimento. Son objeto de consideración las temperaturas extremas diarias y estacionales, el régimen y la cuantía de las precipitaciones y la posible presencia de hielo y nieve sobre el pavimento.

### **I.1.4 MATERIALES**

Son determinantes para la selección de la estructura del pavimento más adecuada técnica y económicamente, por una parte, se considerarán los áridos disponibles en canteras de la zona. Además de la calidad requerida, en la que se incluye la deseada homogeneidad, hay que atender a las cantidades disponibles, al suministro y a la disponibilidad, condicionada en gran medida por la distancia de transporte.

### **I.1.5 OTROS FACTORES**

Otros factores que en ocasiones afectan de manera muy importante al proyecto de un pavimento son los relacionados con el entorno o medio ambiente (ruido, limpieza, etc.), las dimensiones de la obra, el plazo de ejecución, el equipamiento y experiencia de las empresas constructoras, ciertas medidas políticas generales o locales, etc.

## **I.2 METODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES**

### **I.2.1 METODOS EMPIRICOS**

Los métodos empíricos se remontan a los días del sistema de clasificación de suelos desarrollado por el Public Roads en los Estados Unidos de Norteamérica allá por los años de 1929<sup>(18)</sup>. En 1945 fue modificado por el Highway Research Board (HRB)<sup>(36)</sup>,

donde los suelos se clasifican de A-1 a A-7 y se incluye el concepto de Índice de Grupo.

Es el California Highway Department que en 1929<sup>(10)</sup> empieza a usar un método empírico empleando la resistencia de los suelos. Los espesores de los pavimentos se empiezan a relacionar con el CBR de los suelos. La US Army Corps of Engineers<sup>(50)</sup> durante la segunda guerra mundial estudió el método profundamente convirtiéndose en un método muy popular en el ámbito mundial.

La desventaja de los métodos empíricos radica en que los mismos pueden aplicarse solamente a ciertas condiciones ambientales, de materiales y condiciones de carga para los que fueron desarrollados. Si dichas condiciones cambian, el diseño no es válido.

### **1.2.2 METODOS QUE LIMITAN LA FALLA DE CORTE**

Diferentes autores consideraron las fórmulas de carga de Terzaghi para determinar los espesores de pavimento.

El método es empleado para determinar el espesor del pavimento de modo que no ocurra la falla de corte en la subrasante, las principales propiedades de los materiales que son tomados en consideración constituyen su cohesión y ángulo de fricción interna.

En 1959 Yoder<sup>(9)</sup> hizo esta consideración mas no en la segunda edición de su libro en 1975 ya que primero era considerar la comodidad de manejo antes de prevenir el corte, debido al incremento de velocidades y volúmenes de tráfico.

### **1.2.3.- METODOS QUE LIMITAN LA DEFLEXION**

Estos métodos consideran limitar la deflexión vertical de modo que la misma esté por debajo de valores considerados admisibles. En 1947 la Kansas State Highway Commission<sup>(21)</sup> modificó las ecuaciones de Boussinesq (1855) y limitó la deflexión vertical de la subrasante a 2.24mm. El US Navy<sup>(51)</sup> en 1953 aplicó la teoría bicapa de Burmister (1943) y limitó la deflexión de la superficie del pavimento en 6.35mm.

### **1.2.4 METODOS DE REGRESION BASADOS EN EL COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO O CAMINOS DE PRUEBA**

Una de las mayores expresiones de este tipo de método constituye el uso de las ecuaciones de regresión para el diseño de pavimentos del método AASHTO, los cuales

se basaron en caminos de prueba. La desventaja que presenta es que para condiciones diferentes a las que se desarrollaron los caminos de prueba es necesario llevar a cabo extensas modificaciones del método basados en la teoría y en la experiencia. La Guía para el diseño de la estructura del pavimento de la AASHTO 1986<sup>(2)</sup>, incorpora el concepto de confiabilidad para contemplar la probabilidad de falla del pavimento durante el periodo de diseño seleccionado. En la guía de 1993<sup>(1)</sup>, el mayor cambio respecto al de 1986 se manifiesta en el procedimiento para el diseño de recapados, y otros cambios menores como el factor regional por el coeficiente de drenaje.

El método AASHTO es netamente empírico, aunque en la guía de 1993 hace un planteamiento del procedimiento de diseño Empírico – Mecanístico que desarrollará posteriormente, y que se diferenciará de todos los métodos hasta ahora existentes porque no sólo considerará las fisuras y el ahuellamiento como criterios de falla sino también la predicción de la rugosidad e indudablemente las presiones de inflado empleados por los camiones pesados en la actualidad

## **1.2.5 METODOS EMPIRICOS MECANISTICOS**

Por primera vez en 1953 Kerkoven y Dormon<sup>(22)</sup> plantearon el uso de la deformación unitaria por compresión en la superficie de la subrasante como criterio de falla para reducir la deformación permanente del pavimento. En 1960 Pell y Saal<sup>(30)</sup> recomendaron el uso de la deformación unitaria horizontal por tracción en el fondo de la capa asfáltica para minimizar las fisuras de fatiga. En 1965 el uso de tales conceptos fue presentado en Norteamérica por Dormon y Metcalf<sup>(11)</sup>.

El método empírico mecanístico de diseño de pavimentos está basado en el mecanismo que relaciona las condiciones aplicadas, por ejemplo una carga, con la respuesta del sistema subrasante - pavimento a tal condición, como esfuerzos y deformaciones unitarias en el sistema. Los valores de respuesta del sistema son usados para predecir daños en el pavimento basados en datos de pruebas de laboratorio y datos del comportamiento del pavimento en el campo. La dependencia en las observaciones del comportamiento en campo es necesaria puesto que la teoría por si sola ha demostrado no ser suficiente para diseñar pavimentos realísticamente.

El Asphalt Institute de 1991<sup>(6)</sup> y la Shell International Petroleum de 1977<sup>(41)</sup> para sus métodos de diseño empírico mecanísticos han adoptado los siguientes dos criterios: La deformación unitaria para controlar la deformación permanente del pavimento está

basado en el hecho que las deformaciones unitarias plásticas son proporcionales a las deformaciones unitarias elásticas en materiales de pavimentos. Entonces, al limitar la deformación unitaria elástica en la subrasante, la deformación unitaria elástica en las otras capas sobre la subrasante estaría también controlado; asimismo, de igual modo la magnitud de la deformación permanente en la superficie del pavimento.

La ventaja de los métodos mecanísticos radica en la confiabilidad del diseño, su habilidad de predecir diferentes tipos de deterioro y la facilidad de extrapolar datos limitados provenientes de ensayos de laboratorio y observaciones de comportamiento en campo.

Por otro lado el dimensionamiento mecanístico de los pavimentos se basa en el cálculo de las tensiones, deformaciones y desplazamientos producidos por la acción de las cargas del tráfico y las condiciones climáticas existentes y en su comparación con los valores admisibles en cada caso. En consecuencia, un método analítico de dimensionamiento consta de dos partes: un modelo de respuesta, con el que se determinan las tensiones, deformaciones y desplazamientos, y un modelo de comportamiento, con el que se determinan las condiciones en la que se produce la fatiga estructural del pavimento.

### **I.3 TEORIA DE ELASTICIDAD APLICADA AL DISEÑO DE PAVIMENTOS.**

Antiguamente una forma rápida de caracterizar el comportamiento de un pavimento flexible bajo neumáticos cargados fue considerarlo como una masa homogéneo semi infinito, hoy en día los pavimentos flexibles son sistemas de capas con mejores materiales en la parte superior y no puede ser representado como una masa homogénea. En este sentido la teoría más apropiada es la aplicada por Burmister(1943). Inicialmente se consideró 2 capas y en la actualidad esta teoría puede ser aplicada a un sistema multicapa

#### **I.3.1 FORMULACIÓN GENERAL PARA SISTEMAS MULTICAPAS DE PAVIMENTOS**

Los materiales que conforman un pavimento generalmente son locales y baratos, cuyas propiedades son altamente variables y dependen del tiempo, las cargas y condiciones ambientales. Idealmente, el comportamiento de estos materiales debería ser definido usando conceptos de no lineal, viscosidad, plasticidad, etc. Tal aproximación

no es aplicable en la actualidad, de hecho, la complejidad del problema del pavimento y las incertidumbres que envuelven en esta definición no justifica el uso de sino de simples idealizaciones. De esta manera muchos modelos multicapas entre ellos el ELSYM-5 toma como base la teoría de Burmister basada en las siguientes hipótesis:

- El sistema del pavimento está conformada por capas de diferentes materiales.
- Cada capa es de espesor uniforme y dimensión infinita en toda la dirección horizontal (Capa de Burmister), que descansa sobre una base semi-infinita elástica e isotrópica.
- Cada capa consiste de materiales homogéneos, isotrópicos, lineales y elásticos cuya ecuación está gobernada por la Ley de Hooke.
- Antes de la aplicación de las cargas externas del tráfico, el sistema está libre de esfuerzos y deformaciones.
- No hay una fuerza de cuerpo que actúa en el sistema. Todos los miembros se consideran sin peso.
- Se considera una carga simple, la cual es simétrica con respecto a la línea normal de la superficie del pavimento. (Esta suposición fue posteriormente superada por el principio de superposición y el uso de la computadora.)

### **I.3.2 ECUACIONES QUE GOBIERNAN LA TEORIA DE BURMISTER**

El problema propuesto por un sistema multicapa de pavimento se reconoce como un problema de valor límite. La formulación y solución de cualquier valor límite involucra 4 componentes, para materiales isotrópicos, uniformes y continuos y pueden ser expresados en coordenadas cartesianas como sigue<sup>(15)</sup>

#### **1. ECUACIONES DE EQUILIBRIO.**

$$\sigma_{ij,j} = 0 \quad (1)$$

#### **2. RELACIONES DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES.**

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2)$$

### 3. LEY CONSTITUTIVA

$$\varepsilon_{ij} = (1+\mu)/E * \sigma_{i,j} - \mu * \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (3)$$

donde

$\varepsilon_{ij}$	=	Deformación tensorial de Cauchy.
$\sigma_{i,j}$	=	Esfuerzo tensorial de Cauchy
$u_{i,j}$	=	Vector desplazamiento
$\delta_{ij}$	=	Delta de Kronecker
$E$	=	Módulo de elasticidad del material
$\mu$	=	Coefficiente de Poisson.

### 4. CONDICIONES INICIALES Y DE BORDE.

#### Condiciones entre dos Capas

Las condiciones de borde consideradas en la interface de las capas de un pavimento son dos: interface rugosa e interface lisa. Ambos tipos de condiciones asumen continuamente el esfuerzo y desplazamiento vertical, cuya normal está en la dirección z. Así las siguientes condiciones son siempre satisfechas.

$$\sigma_z^{i,b} = \sigma_z^{i+1,t}, \quad w^{i,b} = w^{i+1,t} \quad (4)$$

$\sigma_z^{i,b}$	Esfuerzo vertical en la superficie inferior de la capa i
$\sigma_z^{i+1,t}$	Esfuerzo vertical en la superficie superior de la capa superior i+1
$w^{i,b}$	Desplazamiento vertical en la superficie inferior de la capa i
$w^{i+1,t}$	Desplazamiento vertical en la superficie superior de la capa i+1

La interface de la superficie rugosa también asume continuidad del desplazamiento horizontal y los esfuerzos cortantes transversales. Lo que se puede expresar de la siguiente manera.

$$\tau_{rz}^{i,b} = \tau_{rz}^{i+1,t}, \quad u^{i,b} = u^{i+1,t} \quad (5)$$

$\tau_{rz}^{i,b}$	Esfuerzo cortante en la superficie inferior de la capa i
$\tau_{rz}^{i+1,t}$	Esfuerzo cortante en la superficie superior de la capa superior i+1
$u^{i,b}$	Desplazamiento horizontal en la superficie inferior de la capa i
$u^{i+1,t}$	Desplazamiento horizontal en la superficie superior de la capa i+1

La interface de la superficie lisa no requiere continuidad del desplazamiento horizontal ni del esfuerzo cortante en la interface, pero permite el libre deslizamiento de

una capa con respecto a la otra en la dirección horizontal. Esto se expresa de la siguiente manera.

$$\tau_{rz}^{i,b} = 0, \tau_{rz}^{i+1,t} = 0 \quad (6)$$

$\tau_{rz}^{i,b}$  Esfuerzo cortante en la superficie inferior de la capa i

$\tau_{rz}^{i+1,t}$  Esfuerzo cortante en la superficie superior de la capa superior i+1

### Condiciones de borde en la interface entre una capa de Burmister y una base rígida

Puede darse como el caso anterior esta interface en una superficie rugosa o lisa. Ambas condiciones en la interface requieren un desplazamiento vertical cero en la base de la capa de Burmister, n, sobre la base rígida.

$$w^{n,b} = 0 \quad (7)$$

La interface rugosa requiere la condición que el desplazamiento horizontal también se haga cero en la superficie de la base de la capa de Burmister.

$$u^{n,b} = 0 \quad (8)$$

En la interface lisa no existe resistencia horizontal al desplazamiento a lo largo de la base de la capa de Burmister y conduce a que desaparezca el esfuerzo cortante:

$$\tau_{rz}^{n,b} = 0 \quad (9)$$

Teniendo en cuenta todas estas condiciones de borde es que se genera un sistema de ecuaciones que se resuelve por el modelo Elsym-5.

## I.4 CONCEPTO DE EQUIVALENCIA DE CARGA

Las cargas aplicadas sobre un pavimento son muy variadas. El conjunto de todos los valores con sus correspondientes frecuencias de aplicación constituye un espectro de cargas. Para no tener que trabajar con todo el espectro que a menudo no se conoce, se suele resumir a establecer su equivalencia con una carga tipo.

Entonces la equivalencia de carga es un Factor utilizado para convertir las aplicaciones de cargas por eje de cualquier magnitud, a un número de cargas por eje simple equivalente a 80 kn (18,000 lb).

## **CAPITULO II**

### **RANGO DE PRESIONES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS NEUMÁTICOS**

El inventario realizado en las dos redes viales más importantes del país, tuvo por finalidad conocer el rango de las presiones de inflado de los neumáticos de los vehículos especialmente pesados. Estos rangos nos ha permitido evaluar los efectos de las presiones de inflado sobre los pavimentos asfálticos. En este sentido se eligieron las estaciones de pesaje de Pasamayo y Cut Off ubicadas en la Carretera Panamericana Norte y la Carretera Central respectivamente.

Otros datos importantes que se tomaron en campo fueron: el tipo de neumático utilizado, la separación entre ejes y neumáticos dobles así como su estado de conservación.

#### **II.1.- REGLAMENTACION EXISTENTE EN CUANTO A PESOS Y MEDIDAS DE LOS VEHICULOS**

El Ministerio de Transportes Comunicaciones, Vivienda y Construcción a través del Decreto Supremo No 013-98-MTC y la Resolución Ministerial No 375-98-MTC/15.02 aprobó el Reglamento de Peso y Dimensión Vehicular para la Circulación en la Red Vial Nacional y tiene por objetivo determinar el peso y dimensiones permisibles de los vehículos de carga y pasajeros para su circulación en la Red Vial Nacional. La verificación de carga se hace mediante balanzas fijas y móviles, documentos que sustenten la operación de transporte, tales como: guía de remisión, manifiesto de carga, factura comercial, etc. y el dimensionamiento se hace manualmente.

El encargado de su aplicación y cumplimiento es el Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción a través del Sistema Nacional de Mantenimiento de Carreteras SINMAC con el concurso de la Policía Nacional del Perú.

#### **II.2.- ESTACIONES DE PESAJE DONDE SE REALIZÓ EL INVENTARIO DE PRESIONES**

Las estaciones de pesaje tienen por finalidad controlar las cargas máximas y las dimensiones permitidas en el reglamento de pesos y medidas.



## **ESTACION DE PASAMAYO**

Está ubicada en el Km 48 de la Carretera Panamericana Norte. Tiene 4 balanzas, dos por sentido separado aproximadamente 80m una de otra. La primera de ellas es la balanza selectiva por donde circulan todos los vehículos sin excepción. Esto permite seleccionar a los vehículos que se consideran sobrecargados para luego pasar por la balanza de precisión que se ubica exactamente en línea con la caseta de control y se determina el peso por eje y total con mayor precisión.

En esta estación a todos los vehículos que ingresaron a la balanza se les hizo una medición de la presión de inflado en todos los neumáticos; asimismo, se tomó medidas de la separación de ejes y neumáticos. Los formatos modelos de recolección de datos de carga y presión de inflado se muestra en la tabla 1 del anexo así como las representaciones gráficas modelo 1 y 2.

## **ESTACION DE CUT – OFF**

Ubicado en el Km 180 de la Carretera Central con una balanza fija de precisión para aquellos vehículos que se dirigen de la zona central a Lima. Eventualmente se usa una balanza móvil cuando se encuentra en mantenimiento la balanza principal. El inventario en esta estación fue para todos los vehículos que ingresan a la balanza, camiones, trailer y buses. El tipo de información que se tomó fue similar a la estación de Pasamayo.



**Fig. 1 Estaciones de Pesaje de Pasamayo y Cut Off**

Los paneles fotográficos 1 y 2 del anexo muestra la secuencia del inventario realizado en estas dos estaciones.

## II.3.- CARACTERÍSTICAS DE LOS NEUMÁTICOS

Para tener un pleno conocimiento del comportamiento de los neumáticos es necesario conocer sus componentes, características y tipos de los neumáticos. Se sabe que ellos forman parte integral de los sistemas de suspensión, frenos y dirección del vehículo e influyen de manera decisiva en la seguridad y maniobrabilidad.

### II.3.1.- COMPONENTES

Las partes que componen externamente un neumático se muestran en la fig. 2 y en general son:

- **Banda de rodamiento (A).** - Es la parte que hace contacto con el suelo. Generalmente está fabricado de hule de alta resistencia. Su grosor debe sobrepasar los 1.6 mm, pues debajo de este límite la llanta se considera insegura.
- **Hombros (B).**- Son pequeñas hendiduras localizadas en el costado de la llanta y la banda de rodamiento. Proporcionan estabilidad al girar la dirección.
- **Costados (C).**- Son los lados del neumático y abarcan desde la banda de rodamiento hasta la ceja deben ser duros y flexibles al mismo tiempo.
- **Cejas (D).**- Son las partes del neumático que entran en contacto con el aro. Deben ser muy resistentes para soportar la tensión cuando el aro es removido.



Fig.. 2 Partes externas de un neumático

Internamente las partes de un neumático son:

- **Cuerdas** Son hilos sintéticos o de acero dispuestos en capas en la banda de rodamiento.
- **Capas** : Abarcan el neumático de ceja a ceja y están fabricadas de nylon, poliéster o rayón. A menudo están recubiertas de hule para reducir la fricción. Su número varía según el tipo de neumático y tienen la función de proporcionar estabilidad, flexibilidad y resistencia de carga.
- **Cinturones estabilizadores**: Son capas de ancho de la banda de rodamiento dispuestas para dar rigidez al neumático y por los accidentes de carreteras. En los neumáticos radiales contribuyen a disminuir la fricción sobre la banda de rodamiento, con la cual se economiza cerca de un 20% de combustible.

### **Materiales Componentes de un Neumático.-**

Existen en la actualidad muchos componentes que van dentro de la construcción de un neumático. La vida útil de un neumático depende en gran medida de la calidad de estos componentes, además de la manera de conducir, la alineación y balanceo, frecuencia de uso, presión de inflado y la carga que tienen que soportar. Algunos de estos componentes son:

- ✓ Goma
- ✓ Acero
- ✓ Nylon
- ✓ Polyster
- ✓ Rayón
- ✓ Carbón negro
- ✓ Goma sintética
- ✓ Fibra de vidrio
- ✓ Aramid
- ✓ Latón.

No todos estos componentes están en cada neumático y no todos los componentes están listados, pero esto nos dará una idea que hay gran cantidad de componentes en un neumático diferente de la goma.

## II.3.2 TIPOS DE NEUMÁTICOS

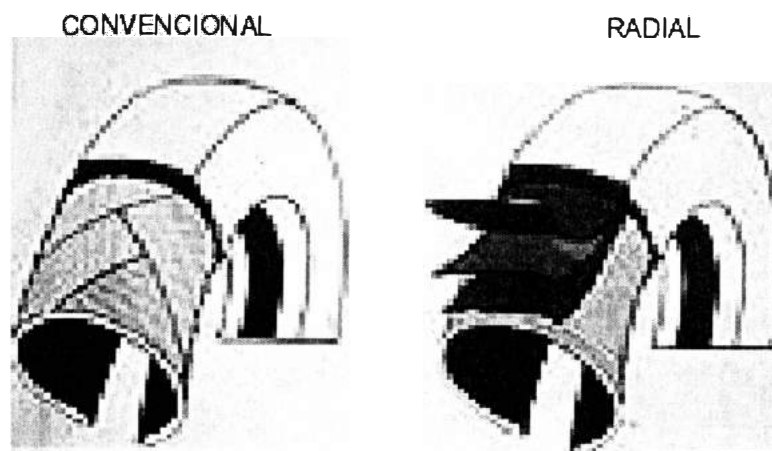
### Neumáticos Convencionales.

Los neumáticos están construidas en capas. Estas capas son colocadas una sobre otra a cierto ángulo una de otra, generalmente  $45^\circ$ , característica de los neumáticos convencionales. Están siempre colocadas en pares, y en los costados va reforzada la cubierta para incrementar la capacidad de carga. La desventaja de los neumáticos convencionales radica en que su configuración genera mucho calor y acelera el desgaste. Este tipo de neumático es el más usado en las carreteras del país por los vehículos pesados con aproximadamente un 60% del total

### Neumáticos Radiales.

Los neumáticos radiales también están construidas en capas, pero no al grado del ángulo de las convencionales que son a  $45^\circ$ , sino a no más de  $1^\circ$  ó  $2^\circ$ . Así, las capas se colocan radialmente hacia el centro del neumático. Tienen un diseño abombado en los costados y requieren de verificaciones más cuidadosas. Para estar seguro de que los neumáticos tienen la presión de inflado adecuada, usar siempre un buen calibrador.

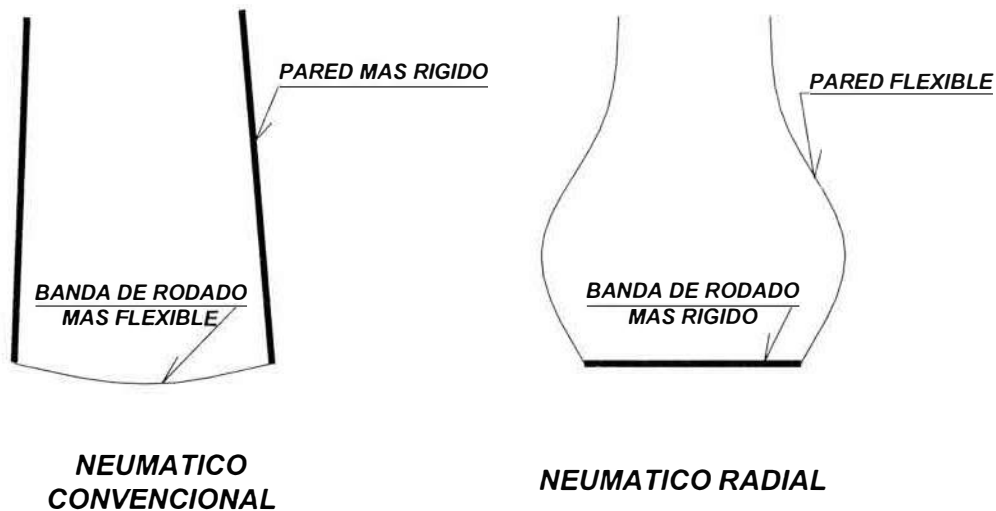
En el Perú el uso de este tipo de neumáticos se da básicamente en vehículos pequeños y buses y en menor porcentaje en camiones. La fig. 3 muestra la estructura de las capas de estos dos tipos de neumáticos.



**Fig. 3 Detalle de capas en neumáticos convencionales y radiales**

Un aspecto importante a considerar es que las configuraciones de las capas en los neumáticos radiales dan lugar a que la parte lateral de estas sean flexibles y dan la sensación de anchura, mientras que la banda de rodadura se muestra más rígida. En los

neumáticos convencionales sucede lo contrario las paredes laterales son rígidas y la banda de rodadura flexible. La figura 4 muestra esta explicación.



**Fig. 4. Comportamiento de neumáticos convencionales y radiales**

Por otro lado en nuestro país está más difundido el uso de neumáticos convencionales para vehículos pesados especialmente camiones, mientras que el uso de los neumáticos radiales esta más difundido en buses y vehículos livianos. En países europeos y Norte América casi la totalidad de los vehículos pesados y livianos usan los neumáticos radiales, es más, están en una tercera generación con el uso de los neumáticos radiales de base ancha (Super-single) y no hay duda que muy pronto se estén implementado en nuestro país.

### **Neumáticos con cámara y sin cámara**

En general, los neumáticos tipo sin cámara trabajan más tiempo con costos de operación y mantenimiento menores. La menor frecuencia de cambios de neumáticos y menos tiempos muertos por neumáticos bajos, especialmente en carreteras, ahorra mano de obra y dinero en costos de mantenimiento.

Los neumáticos sin cámara tienen mejor desgaste de piso y mayor vida de la banda de rodamiento frente a los neumáticos con cámara ya que tienden a rodar más frías, lo que permite ser renovadas mas veces con un costo por kilómetro bajo.

Presentan mayor seguridad porque es poco usual sufrir súbitamente una pérdida de aire o de control de vehículo por el repentino contacto del aro con el pavimento. Los

neumáticos tipo con cámara pueden explotar y causar serios problemas para controlar el vehículo. Finalmente, para un neumático sin cámara, se necesita: neumático, válvula y aro. Para un neumático con cámara, se necesita: neumático, cámara, corbata, Aro y Arillo.

### **II.3.3 TERMINOLOGIA DE LOS NEUMATICOS**

Todos los fabricantes de vehículos han normalizado el uso de la nomenclatura de los neumáticos de los vehículos, según el DOT (Department of Transportation) de Canadá. A pesar del aspecto misterioso las letras y símbolos en los costados de los neumáticos proporcionan información muy útil, que es bueno conocer para mantener la seguridad y sobre todo mantener niveles adecuados de presión de inflado, que es materia de estudio del presente trabajo.

Nuestra sociedad ha mostrado gran interés en la seguridad, economía así como en el avance de la tecnología utilizada para el desarrollo de los neumáticos más avanzadas. Aún así el NEUMATICO UNIVERSAL no se ha inventado.

Todos los neumáticos tienen sus ventajas y desventajas, consiguientemente la industria, juntamente con las entidades de gobierno correspondiente, han establecido el sistema para la clasificación de los neumáticos cubriendo los siguientes aspectos:

#### **Tracción:**

La clasificación de los grados de tracción va de mayor a menor y son A= mejor, B = Intermedio, y C = aceptable. Estos representan la capacidad de los neumáticos para frenar sobre el pavimento mojado medido bajo las condiciones controladas sobre superficies de prueba especificadas. Los grados de tracción se basan en las pruebas de frenado “en línea recta” esto indica la capacidad del frenado en el viraje. Los compuestos de hule duro determinan una duración más larga (treadwear), pero se obtiene una tracción más pobre. El grado de tracción le permite comparar en piso mojado el treadwear con el grado de tracción.

#### **Temperatura**

La clasificación de los grados de temperatura son de tres tipos A, B y C, donde el primero representa la más alta y C la más baja. Estas representan la resistencia de los

neumáticos a la generación de calor al ser probados en laboratorio bajo condiciones controladas con especificaciones de prueba de neumáticos.

### Rango de velocidad.

Algunos códigos de velocidad que se mencionan en las partes laterales de los neumáticos se muestran a continuación.

**TABLA N° 1 CODIGOS DE VELOCIDAD EN NEUMATICOS**

Código	Km/hr	mp/h	Código	Km/hr	mp/h
L	120	74.5	S	180	111.8
M	130	80.7	T	190	118.0
N	140	86.9	H	210	130.4
P	150	93.2	V	240	149.1
Q	160	99.4	Z	>240	>149.1
R	170	105.6			

La terminología de los neumáticos que se menciona en la fig. 5 es poco usada en camiones y está más orientada a camiones pequeños y automóviles.



**Fig. 5. Terminología de los neumáticos**

- 1.- 205 = Ancho del neumático en mm.
- 2.- 55 = Relación de aspecto (la altura del lado lateral es Aprox. el 55% del ancho del neumático)
- 3.- R = Construcción radial.

- 4.- 16 = Diámetro del neumático en pulgadas.
- 5.- 66 = Código numérico asociado con la carga máxima que puede llevar.
- 6.- V = Código de velocidad máxima.
- 7.- XGT V 0 Nombre de los fabricantes, diseñadores y arquitectos.

La mayoría de camiones que circulan por las carreteras del país usan las siguientes nomenclaturas: 10-20.00, 10-22.5, 11-20, 11-22.5, 12-20.00, 12-22.5, etc., donde el primer número indica el ancho del neumático en pulgadas, el guión indica que se trata de un neumático convencional y el segundo número el diámetro del aro. Cuando se trata de neumáticos radiales el guión es reemplazado por la letra R, así 10R20, 10R22.5, 11R22.5, así el primer y segundo número tienen el mismo significado que el convencional. Adicionalmente se encuentran con un índice de capas que reflejan la capacidad de carga del neumático.

### **II.3.4.-ESPACIAMIENTO ENTRE EJES Y NEUMATICOS DUALES**

Según el Reglamento de Pesos y Medidas emitido por el MTC, la separación máxima entre ejes en buses y camiones se menciona lo siguiente:

“ En un conjunto de dos ejes cuyas distancias entre los centros de las ruedas sea superior a 2.40 m cada eje será considerado como independiente”

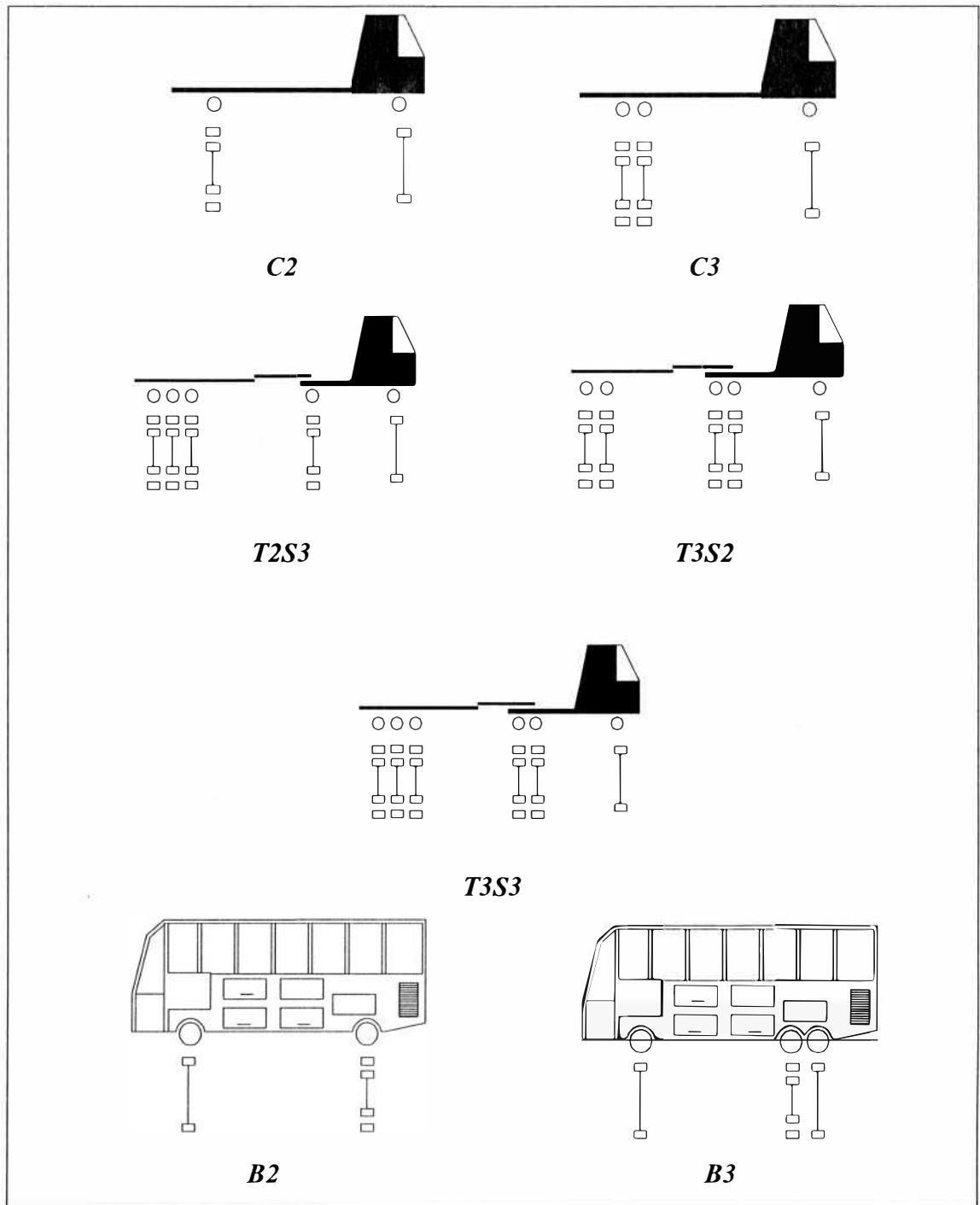
“Eje doble es un conjunto de dos ejes, cuya distancia entre centros de ruedas es superior a 1.20 m e inferior a 2.40 m”

“Eje triple es un conjunto de tres ejes, cuya distancia entre centros de ruedas extremas es superior a 2.40m e inferior a 3.60m”

En la evaluación de campo se ha obtenido una separación promedio entre ejes sean estos tandem y/o tridem de 1.37m y de 0.36m. de separación entre neumáticos.

La configuración de ejes y de neumáticos encontrado en el inventario realizado se muestra esquemáticamente en la fig. 6. Los que fueron analizados y simulados por el modelo ELSYM5.





**Fig. 6. Tipo de vehículos, configuración de ejes y neumáticos.**

Cabe señalar la preocupación sobre el efecto destructivo del uso de los neumáticos radiales de base ancha que reemplazan a los neumáticos duales ampliamente utilizado en Europa y recientemente en Norteamérica.

## **II.4.-PRESIONES MAXIMAS Y MINIMAS.-**

### **II.4.1 CARGA Y PRESION**

La carga determina la presión en los neumáticos de todos los camiones y buses. Es por ello que la selección de puntos para el inventario de la presión de inflado de los neumáticos tiene que estar ubicado en las estaciones de pesaje implementadas en las carreteras del país o en los pesajes móviles.

Todos los fabricantes de neumáticos ofrecen tablas de cargas y presiones que pueden ser usadas para determinar la presión apropiada para las carga que soporta el neumático, siempre y cuando cumpla los otros requisitos de operación.

### **II.4.2 PRESIÓN DE INFLADO DE LOS NEUMÁTICOS**

El neumático soporta la carga del vehículo, usando para ello un gas comprimido (usualmente aire) el mismo que crea una tensión en las capas del casco. Es importante mencionar que la banda de rodamiento tiene una alta resistencia a la tensión, pero muy poca a la compresión. Es la presión de aire que crea la tensión en el casco la que permite al neumático soportar carga. Aquí radica la importancia de la presión de inflado.

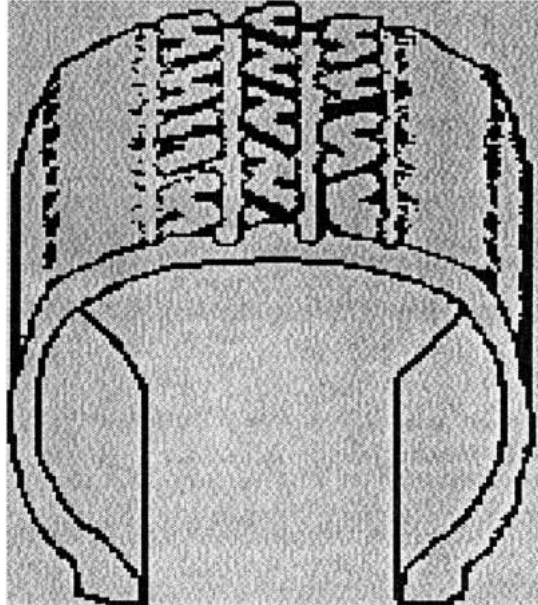
Con una presión de inflado apropiada, los neumáticos tienen más agarre y soportan mejor los baches y el peso de la carga. Asimismo, trabajan a temperaturas más bajas, lo que evita un desgaste prematuro. La presión es crucial, pero hay que tener en cuenta que la presión que la fabrica sugiere es la máxima, para altas velocidades y no necesariamente la ideal para su estilo de manejo, condiciones de manejo y de operación, etc.

### **II.4.3 PRESIÓN BAJA**

Las presiones bajas tienen efectos negativos en el comportamiento de los neumáticos ya que existe un incremento en el desgaste irregular del neumático, reducción de la vida del casco y alto consumo de combustible. (Fig. 7).

Investigaciones realizadas por la Good Year han mostrado que solo un 15% de baja presión, es el resultado de aproximadamente el 8% de caída en el kilometraje esperado de un neumático y un 2.5% de aumento en el consumo de combustible. Adicionalmente una baja presión puede causar:

- Separaciones de componentes.
- Ruptura del armazón.
- Desgastes rápidos e irregulares.
- Mayor riesgo de daños al neumático y al aro.
- Gastos por tiempos muertos del vehículo
- Baja renovabilidad del casco.

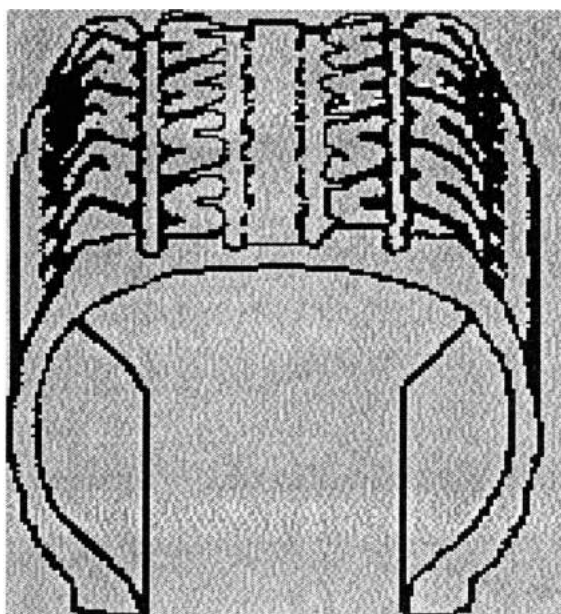


**Fig. 7 Desgaste típico de Neumáticos por Efecto de una baja presión de inflado**

#### **II.4.4 PRESIÓN ALTA**

Las presiones altas de los neumáticos tienen efectos negativos en el comportamiento del pavimento tanto como en ellos mismos, ya que para una misma carga la presión de contacto se reduce, por consiguiente el deterioro es mayor tal como se demuestra en los capítulos posteriores. Por otro lado existe un incremento en el desgaste irregular del neumático (fig. 8), Adicionalmente el uso de una presión alta puede causar.

- Desgastes rápidos e irregulares.
- Excesivos daños al armazón del neumático.
- Manejo poco confortable
- Daños a la suspensión y/o a la carrocería del vehículo.
- Deterioro del pavimento



**Fig. 8 Desgaste Típico de Neumáticos por Efecto de una alta presión de Inflado**

Este tipo de desgaste se encontró con frecuencia en el inventario de presión realizado en Pasamayo y Cut Off, con lo que se demuestra que los usuarios de los vehículos pesados y buses están usando presiones por encima de lo especificado por el fabricante, en desmedro de mayores costos de operación y deterioro del pavimento.

#### **II.4.5 EFECTOS DE LA TEMPERATURA EN LA PRESIÓN DE INFLADO**

La presión de aire es afectada por la temperatura. El aire bajo presión en un neumático no es la excepción. Típicamente la presión de inflado puede cambiar 1 psi por cada por cada 10 Fahrenheit (5.6 grados centígrados) de cambio de temperatura. Una temperatura alta significa incremento de la presión.

Por otro lado ningún país donde proceden los diferentes métodos de diseños de pavimentos más conocidos y empleados en el país, tiene la variación de niveles de presión atmosférica como en nuestras carreteras, que se desarrollan desde alturas bajo el nivel del mar hasta los 4,800 msnm.

El inventario de presiones de inflado realizado en las dos estaciones de pesaje ubicadas en las dos redes más importantes del país nos reveló un rango de presiones variable que en este caso fue de 60 psi como mínimo y de 135 psi como máximo.

Se ha encontrado por otro lado 2 tipos de neumáticos más usados en el país: convencional y radial. Otra información básica que se encontró fue la separación promedio de los ejes en la configuración de los ejes analizados. Se ha verificado también que los usuarios no usan las presiones adecuadas para las condiciones de operación de sus vehículos.

Fue importante del mismo modo interpretar las características, nomenclatura y letras que llevan impresos los neumáticos en los costados; que a pesar del aspecto misterioso, estos proporcionan información muy útil, que es bueno conocer para mantener la seguridad y los niveles adecuados de presión de inflado, de acuerdo a las condiciones de operación del vehículo. Por otro lado estas características nos ha permitido identificar en campo el desgaste típico de los neumáticos por el uso inadecuado de presiones de inflado.

Toda la información anterior nos ha permitido en el capítulo III calcular la presión de contacto de los neumáticos que es de suma importancia para todo diseño mecánico. Y es la presión de contacto un dato de entrada, en los gráficos determinados en el capítulo V, para calcular los factores de corrección por efecto de la presión de inflado de los neumáticos.

## **CAPITULO III**

### **PRESION DE INFLADO Y PRESION DE CONTACTO**

Con el objetivo de poder determinar la relación existente en la presión de inflado y la presión de contacto de un neumático, se realizó este ensayo en la Estación de Pesaje de Pasamayo, teniendo como base el inventario previo realizado sobre el rango de presiones de inflado y los tipos de neumáticos. Este ensayo también permitió graficar las áreas de impresión bajo diferentes condiciones de carga y presión.

El área de contacto, que es función de la presión de inflado, es de suma importancia en todo método de diseño mecánico, donde la carga es asumida uniformemente distribuida sobre esa área.

El equipo mínimo y los materiales empleados fueron los siguientes.

- Balanza de precisión (Estación de Pesaje).
- Camión de prueba tipo plataforma.
- Un millar de ladrillos tipo pandereta de 4 Kg c/u (total 4,030 Kg, sumados a los 2,970kg del peso propio del eje del camión totalizan 7000 Kg y viene a ser la Carga legal admisible por eje simple con neumáticos simples)
- 1 gata.
- 2 kilos de tinta tipográfico, color Negro Periódico.
- Un rollo de papel milimetrado.
- 2 bloques de madera de 0.40\*0.50m.
- Balde con agua y esponja.

#### **III.1.- CARACTERISTICAS DEL CAMION DE PRUEBA**

El vehículo de prueba que permitió realizar el ensayo fue un camión C2 de plataforma, marca DODGE año 1980 y tiene una capacidad de carga de 5400 kg. El eje ensayado fue el posterior y se acondicionó el eje simple con neumáticos duales a otro simple con neumáticos simples de tal manera que se pueda variar la carga hasta lograr la máxima permitida por neumático.

Para determinar las áreas de impresión de los neumáticos, el camión de prueba se implementó con dos neumáticos convencionales 12.00-20 (nuevas) denominados

neumático convencional 1y 2, un neumático radial 12R20 (nueva) y otra 12.00-20 de recambio (desgastada), que son los tipos con mayor incidencia de uso en las carreteras del país.

La carga se inicia con el peso propio del eje y va incrementándose hasta lograr una carga cercana a la estándar, asimismo; la presión para cada carga se incrementó entre 10 y 20 psi desde un mínimo de 60 psi hasta un máximo de 106 psi. Previamente se realizó un balanceo del eje para distribuir adecuadamente la carga.

La carga máxima fue de 7000 Kg que viene a ser la máxima admisible por eje simple con neumático simple, según el Reglamento de Peso y Dimensión Vehicular.

Las condiciones evaluadas se muestran en la tabla N° 2 para los neumáticos convencionales y radiales.

**Tabla N° 2 Características de Carga y Presión de Inflado de los Neumáticos del Camión Usado en el Ensayo**

<i>CONDICION</i>	<i>NEUMATICO CONVENCIONAL 1</i>		<i>NEUMATICO RADIAL</i>	
	<i>Carga/neumático (Kg.)</i>	<i>Presión (psi)</i>	<i>Carga/neumático (Kg)</i>	<i>Presión (psi)</i>
<i>1</i>	<i>1485</i>	<i>60</i>	<i>1485</i>	<i>60</i>
<i>2</i>	<i>1485</i>	<i>80</i>	<i>1485</i>	<i>80</i>
<i>3</i>	<i>1485</i>	<i>90</i>	<i>1485</i>	<i>90</i>
<i>4</i>	<i>1485</i>	<i>104</i>	<i>1485</i>	<i>104</i>
<i>5</i>	<i>2250</i>	<i>60</i>	<i>2250</i>	<i>60</i>
<i>6</i>	<i>2250</i>	<i>80</i>	<i>2250</i>	<i>80</i>
<i>7</i>	<i>2250</i>	<i>90</i>	<i>2250</i>	<i>90</i>
<i>8</i>	<i>2250</i>	<i>106</i>	<i>2250</i>	<i>102</i>
<i>9</i>	<i>3000</i>	<i>60</i>	<i>3000</i>	<i>60</i>
<i>10</i>	<i>3000</i>	<i>80</i>	<i>3000</i>	<i>80</i>
<i>11</i>	<i>3000</i>	<i>100</i>	<i>3000</i>	<i>100</i>
<i>12</i>	<i>3500</i>	<i>60</i>	<i>3500</i>	<i>60</i>
<i>13</i>	<i>3500</i>	<i>80</i>	<i>3500</i>	<i>80</i>
<i>14</i>	<i>3500</i>	<i>100</i>	<i>3500</i>	<i>100</i>

**Tabla N° 3 Características de Carga y Presión de Inflado de los Neumáticos del Camión Usado en el Ensayo**

<i>CONDICION</i>	<i>NEUMATICO CONVENCIONAL 2</i>		<i>NEUMATICO DESGASTADO</i>	
	<i>Carga/neumático (Kg)</i>	<i>Presión (psi)</i>	<i>Carga/neumático (Kg)</i>	<i>Presión (psi)</i>
<i>1</i>	<i>1500</i>	<i>60</i>	<i>1500</i>	<i>60</i>
<i>2</i>	<i>1500</i>	<i>75</i>	<i>1500</i>	<i>75</i>
<i>3</i>	<i>1500</i>	<i>90</i>	<i>1500</i>	<i>90</i>
<i>4</i>	<i>2250</i>	<i>60</i>	<i>2250</i>	<i>60</i>
<i>5</i>	<i>2250</i>	<i>75</i>	<i>2250</i>	<i>75</i>
<i>6</i>	<i>2250</i>	<i>90</i>	<i>2250</i>	<i>90</i>
<i>7</i>	<i>3000</i>	<i>60</i>	<i>3000</i>	<i>60</i>
<i>8</i>	<i>3000</i>	<i>75</i>	<i>3000</i>	<i>75</i>
<i>9</i>	<i>3000</i>	<i>90</i>	<i>3000</i>	<i>90</i>

Teniendo en cuenta estas condiciones el procedimiento que se planteó para el ensayo fue el siguiente:

### **1.1 III.2.- PROCEDIMIENTO DE CAMPO**

- Se midió el peso propio del eje ensayado del camión de prueba.
- Se calibró la presión inicial de inflado de los neumáticos derecho e izquierdo a 60 psi.
- Se levantó con la gata el eje ensayado del vehículo.
- Se limpió el neumático con la esponja y agua.
- Se Colocó la madera lisa y sobre ella el papel milimetrado ubicado debajo del neumático.
- Se pintó con tinta la parte inferior del neumático levantado sin exagerar para evitar que se derrame la tinta sobre el papel cuando se baje el neumático.
- Se giró el neumático para evitar que se derrame la tinta sobre el papel cuando está bajando.
- Se bajó la gata cuidadosamente hasta que se apoye completamente sobre la madera y el papel.
- Se levantó la gata cuando este haya dejado una impresión sobre el papel.
- Se recogió el papel milimetrado para su secado.



- Luego se repitió este procedimiento para cada una de las condiciones de carga y presión que se indican en las Tablas N° 2 y 3.

Este procedimiento del ensayo realizado en la estación de Pasamayo se muestra en el panel fotográfico 3 del anexo.

Después del secado se procedió a calcular el área de la impresión dejada por el neumático, para luego determinar la presión de contacto, que se determinó por la siguiente expresión.

$$P = \frac{F}{A} \quad (10)$$

Donde.

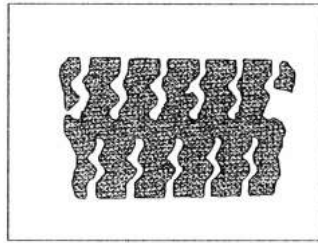
P = Presión de contacto (psi)

F = Peso sobre el neumático (lbs)

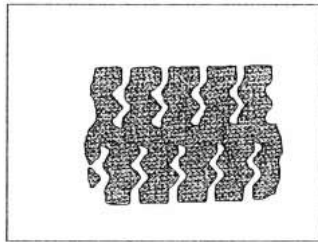
A = Area de contacto (in<sup>2</sup>)

Los figuras que se ilustran a continuación muestran las áreas de contacto para neumáticos convencionales, radiales en condiciones nuevas y desgastadas para diferentes rangos de carga y presión de inflado.

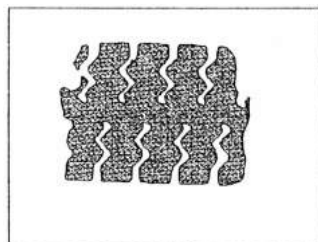
**NEUMATICO CONVENCIONAL 1**



**60 PSI**

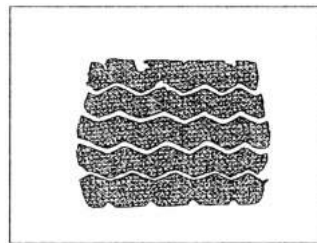


**80 PSI**

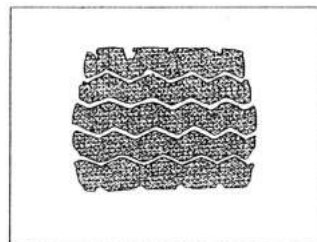


**100 PSI**

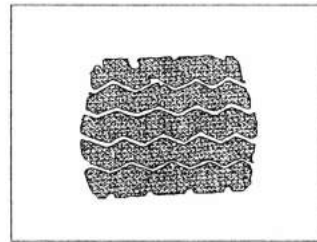
**NEUMATICO RADIAL**



**60 PSI**



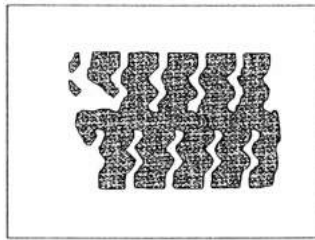
**80 PSI**



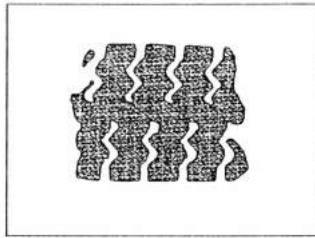
**100 PSI**

**Fig 9 Impresión de neumático convencional tipo 1 y neumático radial, con una carga por neumático de 3,500kg y presión de inflado variable**

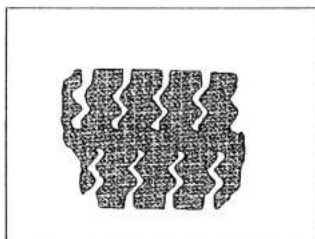
**NEUMATICO CONVENCIONAL 1**



**60 PSI**

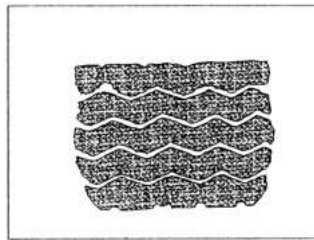


**80 PSI**

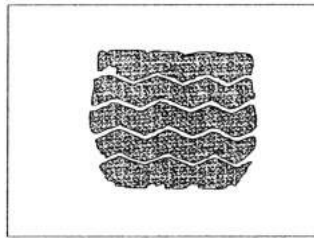


**100 PSI**

**NEUMATICO RADIAL**



**60 PSI**



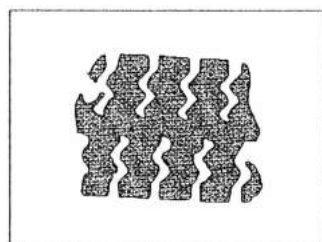
**80 PSI**



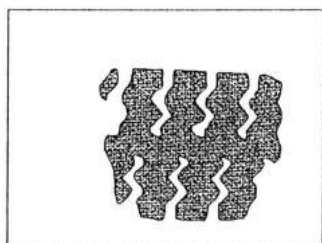
**100 PSI**

**Fig 10 Impresión de neumático convencional tipo 1 y neumático radial, con una carga por neumático de 3,000kg y presión de inflado variable**

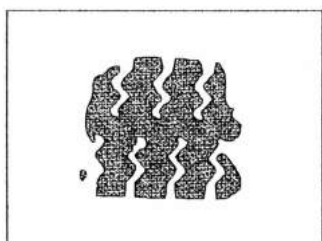
**NEUMATICO CONVENCIONAL 1**



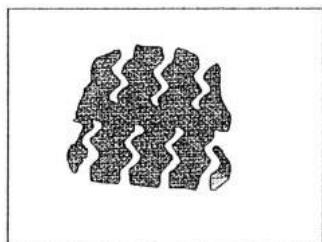
**60 PSI**



**80 PSI**

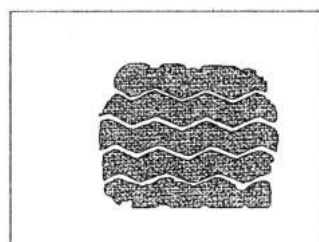


**90 PSI**

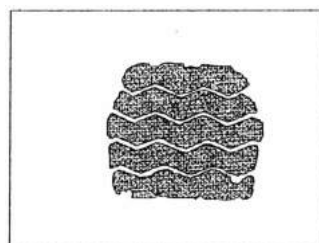


**106 PSI**

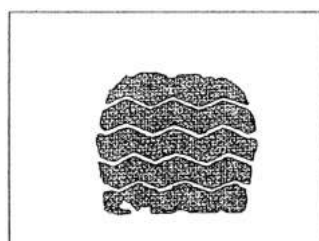
**NEUMATICO RADIAL**



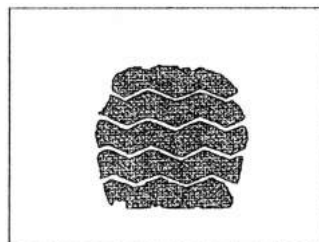
**60 PSI**



**80 PSI**



**90 PSI**

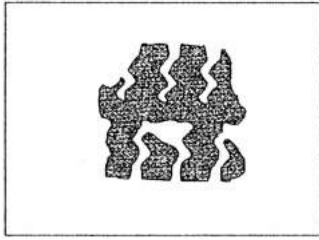


**102 PSI**

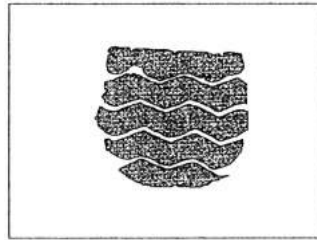
**Fig 11 Impresión de neumático convencional tipo 1 y neumático radial, con una carga por neumático de 2,250kg y presión de inflado variable**

NEUMATICO CONVENCIONAL 1

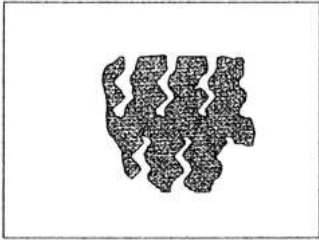
NEUMATICO RADIAL



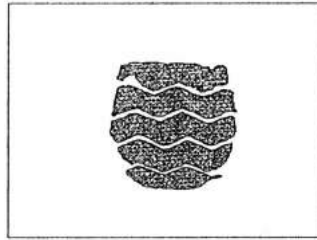
60 PSI



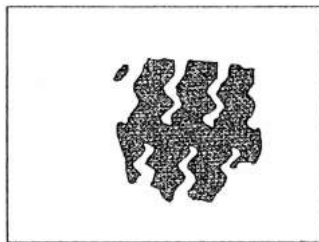
60 PSI



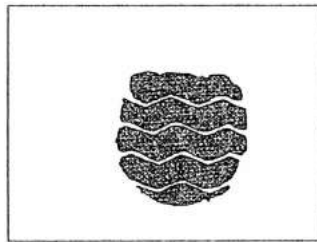
80 PSI



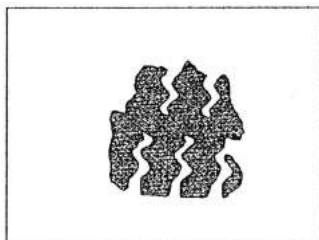
80 PSI



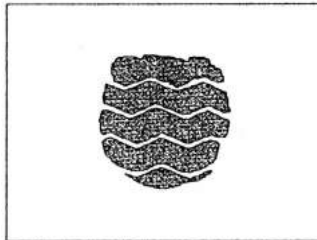
90 PSI



90 PSI



104 PSI

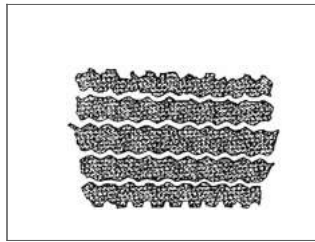


104 PSI

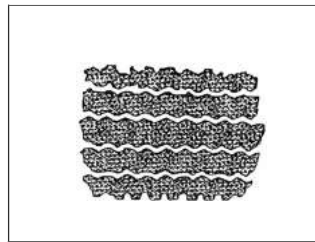
---

**Fig 12 Impresión de neumático convencional tipo 1 y neumático radial, con una carga por neumático de 1,485kg y presión de inflado variable**

**NEUMATICO CONVENCIONAL 2**



**60 PSI**

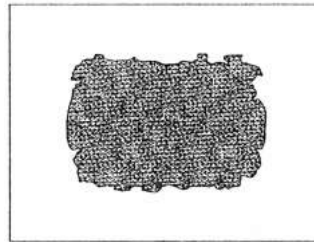


**75 PSI**

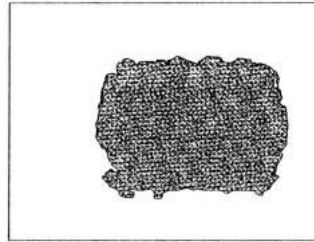


**90 PSI**

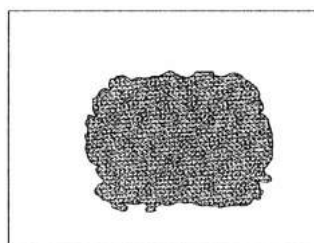
**NEUMATICO GASTADO**



**60 PSI**



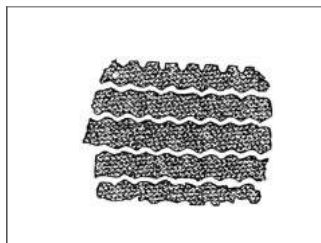
**75 PSI**



**90 PSI**

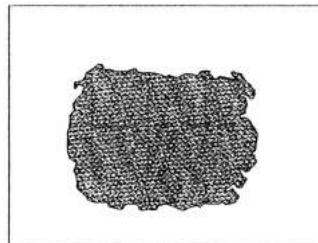
**Fig 13 Impresión de neumático convencional tipo 2 y neumático gastado, con una carga por neumático de 3,000kg y presión de inflado variable**

**NEUMATICO CONVENCIONAL 2**

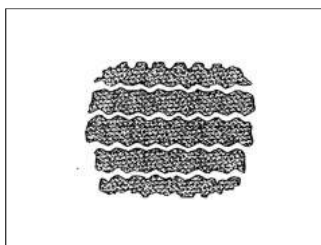


**60 PSI**

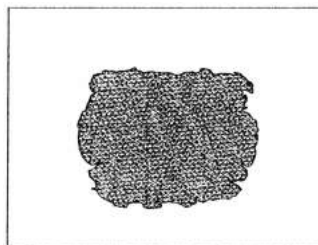
**NEUMATICO GASTADO**



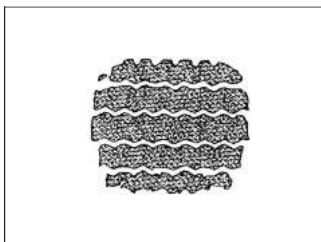
**60 PSI**



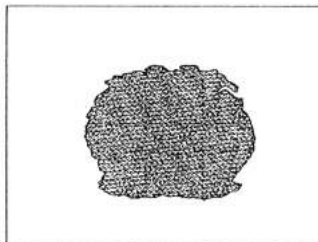
**75 PSI**



**75 PSI**



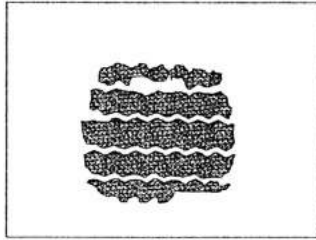
**90 PSI**



**90 PSI**

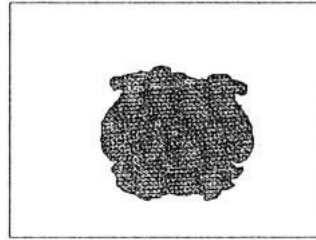
**Fig 14 Impresión de neumático convencional tipo 2 y neumático gastado, con una carga por neumático de 2,250kg y presión de inflado variable**

**NEUMATICO CONVENCIONAL 2**

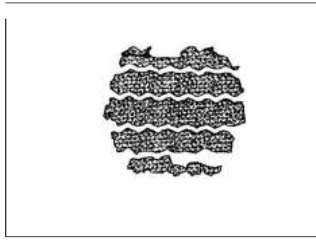


**60 PSI**

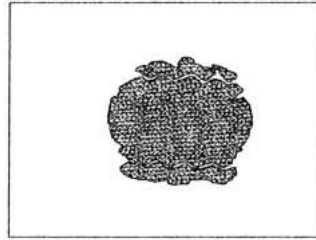
**NEUMATICO GASTADO**



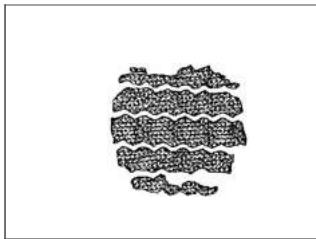
**60 PSI**



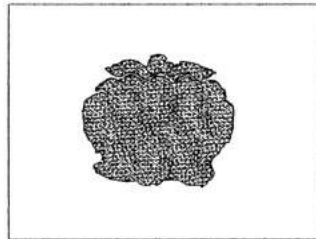
**75 PSI**



**75 PSI**



**90 PSI**



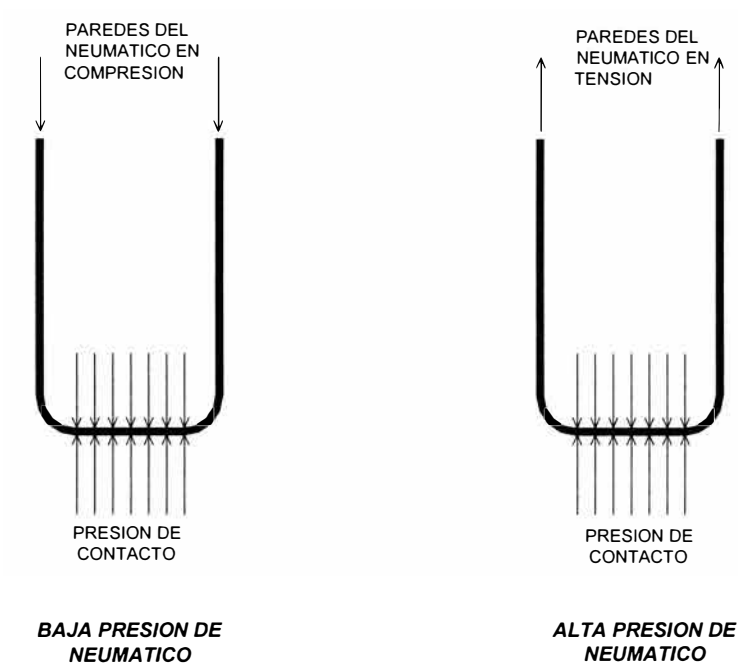
**90 PSI**

---

**Fig 15 Impresión de neumático convencional tipo 2 y neumático gastado, con una carga por neumático de 1,500kg y presión de inflado variable**



La huella de los neumáticos nos demuestra que para la condición de una misma carga, el área de contacto es más grande en un neumático con baja presión de inflado, debido a que las paredes laterales del neumático están en compresión y la suma de las fuerzas verticales debido a la pared y la presión de la llanta tiene que ser igual a la fuerza debido a la presión de contacto. Contrariamente para una presión alta las áreas de contacto son menores ya que las paredes del neumático están en tensión y absorben parte de la presión de inflado. Esta última condición es la más crítica para el deterioro del pavimento porque la carga está distribuida en un área más pequeña. Esquemáticamente la fig. 16 muestra esta teoría.



**Fig 16 Presión de contacto en neumáticos con baja y alta presión de inflado**

### III.3 RELACION ENTRE LA PRESION DE INFLADO Y LA PRESION DE CONTACTO

El ensayo antes descrito permitió encontrar la relación o factor de corrección de la presión de inflado medido en campo con la presión de contacto calculado por la expresión (10), para los neumáticos convencionales y radiales, bajo diferentes rangos de desgaste, encontrándose que la condición crítica se da cuando los neumáticos están nuevos.

Las tablas 4, 5, 6 y 7 muestran el cálculo de la relación entre la presión de contacto y la presión de inflado para las diferentes condiciones de carga y presión

**TABLA N° 4 RELACIÓN ENTRE LA PRESIÓN DE CONTACTO Y LA PRESIÓN DE INFLADO EN UN NEUMATICO CONVENCIONAL TIPO 1**

	<i>CARGA POR NEUMATICO Kg</i>	<i>AREA DE IMPRESIÓN Cm2</i>	<i>PRESION DE INFLADO(Pi) psi</i>	<i>PRESION DE CONTACTO(Pc) psi</i>	<i>RELACION Pc/Pi</i>
<i>PESO 1</i>	<i>3500</i>	<i>647.22</i>	<i>60</i>	<i>76.85</i>	<i>1.28</i>
	<i>3500</i>	<i>591.47</i>	<i>80</i>	<i>84.09</i>	<i>1.05</i>
	<i>3500</i>	<i>563.43</i>	<i>100</i>	<i>88.28</i>	<i>0.88</i>
<i>PESO 2</i>	<i>3000</i>	<i>617.57</i>	<i>60</i>	<i>69.03</i>	<i>1.15</i>
	<i>3000</i>	<i>545.25</i>	<i>80</i>	<i>78.19</i>	<i>0.98</i>
	<i>3000</i>	<i>503.57</i>	<i>100</i>	<i>84.66</i>	<i>0.85</i>
<i>PESO 3</i>	<i>2250</i>	<i>486.16</i>	<i>60</i>	<i>65.77</i>	<i>1.10</i>
	<i>2250</i>	<i>456.16</i>	<i>80</i>	<i>70.09</i>	<i>0.88</i>
	<i>2250</i>	<i>426.22</i>	<i>90</i>	<i>75.02</i>	<i>0.83</i>
	<i>2250</i>	<i>422.49</i>	<i>106</i>	<i>75.68</i>	<i>0.71</i>
<i>PESO 4</i>	<i>1485</i>	<i>322.14</i>	<i>60</i>	<i>65.51</i>	<i>1.09</i>
	<i>1485</i>	<i>318.89</i>	<i>80</i>	<i>66.17</i>	<i>0.83</i>
	<i>1485</i>	<i>289.62</i>	<i>90</i>	<i>72.86</i>	<i>0.81</i>
	<i>1485</i>	<i>289.50</i>	<i>104</i>	<i>72.89</i>	<i>0.70</i>

**TABLA N° 5 RELACIÓN ENTRE LA PRESION DE CONTACTO Y LA PRESION DE INFLADO EN UN NEUMATICO RADIAL**

	<b>CARGA POR NEUMATICO</b> <i>Kg</i>	<b>AREA DE IMPRESIÓN</b> <i>cm2</i>	<b>PRESION DE INFLADO(Pi)</b> <i>psi</i>	<b>PRESION DE CONTACTO(Pc)</b> <i>psi</i>	<b>RELACION Pc/Pi</b>
<i>PESO 1</i>	<i>3500</i>	<i>660.29</i>	<i>60</i>	<i>75.33</i>	<i>1.26</i>
	<i>3500</i>	<i>553.96</i>	<i>80</i>	<i>89.78</i>	<i>1.12</i>
	<i>3500</i>	<i>540.94</i>	<i>100</i>	<i>91.94</i>	<i>0.92</i>
<i>PESO 2</i>	<i>3000</i>	<i>620.60</i>	<i>60</i>	<i>68.69</i>	<i>1.14</i>
	<i>3000</i>	<i>518.93</i>	<i>80</i>	<i>82.15</i>	<i>1.03</i>
	<i>3000</i>	<i>476.90</i>	<i>100</i>	<i>89.39</i>	<i>0.89</i>
<i>PESO 3</i>	<i>2250</i>	<i>506.80</i>	<i>60</i>	<i>63.09</i>	<i>1.05</i>
	<i>2250</i>	<i>438.70</i>	<i>80</i>	<i>72.88</i>	<i>0.91</i>
	<i>2250</i>	<i>414.07</i>	<i>90</i>	<i>77.22</i>	<i>0.86</i>
	<i>2250</i>	<i>408.44</i>	<i>102</i>	<i>78.28</i>	<i>0.77</i>
<i>PESO 4</i>	<i>1485</i>	<i>414.19</i>	<i>60</i>	<i>50.95</i>	<i>0.85</i>
	<i>1485</i>	<i>339.84</i>	<i>80</i>	<i>62.10</i>	<i>0.78</i>
	<i>1485</i>	<i>334.99</i>	<i>90</i>	<i>62.99</i>	<i>0.70</i>
	<i>1485</i>	<i>321.43</i>	<i>104</i>	<i>65.65</i>	<i>0.63</i>

**TABLA N° 6 RELACION ENTRE LA PRESION DE CONTACTO Y LA PRESION DE INFLADO EN UN NEUMATICO CONVENCIONAL TIPO 2**

	<b>CARGA POR NEUMATICO</b> <i>Kg</i>	<b>AREA DE IMPRESIÓN</b> <i>cm2</i>	<b>PRESION DE INFLADO(Pi)</b> <i>psI</i>	<b>PRESION DE CONTACTO(Pc)</b> <i>psi</i>	<b>RELACION Pc/Pi</b>
<i>PESO 3</i>	<i>3000</i>	<i>545.12</i>	<i>60</i>	<i>78.21</i>	<i>1.30</i>
	<i>3000</i>	<i>488.78</i>	<i>75</i>	<i>87.22</i>	<i>1.16</i>
	<i>3000</i>	<i>455.54</i>	<i>90</i>	<i>93.58</i>	<i>1.04</i>
<i>PESO 2</i>	<i>2250</i>	<i>497.87</i>	<i>60</i>	<i>64.22</i>	<i>1.07</i>
	<i>2250</i>	<i>452.52</i>	<i>75</i>	<i>70.66</i>	<i>0.94</i>
	<i>2250</i>	<i>384.13</i>	<i>90</i>	<i>83.24</i>	<i>0.92</i>
<i>PESO 1</i>	<i>1500</i>	<i>322.84</i>	<i>60</i>	<i>66.03</i>	<i>1.10</i>
	<i>1500</i>	<i>294.09</i>	<i>75</i>	<i>72.48</i>	<i>0.97</i>
	<i>1500</i>	<i>278.88</i>	<i>90</i>	<i>76.43</i>	<i>0.85</i>

**TABLA N° 7 RELACION ENTRE LA PRESION DE CONTACTO Y LA PRESION DE INFLADO EN UN NEUMATICO CONVENCIONAL DESGASTADO**

	<b>CARGA POR NEUMATICO</b> <i>Kg</i>	<b>AREA DE IMPRESIÓN</b> <i>cm2</i>	<b>PRESION DE INFLADO(Pi)</b> <i>psi</i>	<b>PRESION DE CONTACTO(Pc)</b> <i>psi</i>	<b>RELACION Pc/Pi</b> <i>psi</i>
<i>PESO 1</i>	<i>3000</i>	<i>785.09</i>	<i>60</i>	<i>54.30</i>	<i>0.91</i>
	<i>3000</i>	<i>757.33</i>	<i>75</i>	<i>56.29</i>	<i>0.75</i>
	<i>3000</i>	<i>614.55</i>	<i>90</i>	<i>69.37</i>	<i>0.77</i>
<i>PESO 2</i>	<i>2250</i>	<i>655.89</i>	<i>60</i>	<i>48.75</i>	<i>0.81</i>
	<i>2250</i>	<i>605.68</i>	<i>75</i>	<i>52.79</i>	<i>0.70</i>
	<i>2250</i>	<i>530.20</i>	<i>90</i>	<i>60.30</i>	<i>0.67</i>
<i>PESO 3</i>	<i>1500</i>	<i>459.60</i>	<i>60</i>	<i>46.38</i>	<i>0.77</i>
	<i>1500</i>	<i>383.01</i>	<i>75</i>	<i>55.65</i>	<i>0.74</i>
	<i>1500</i>	<i>354.92</i>	<i>90</i>	<i>60.06</i>	<i>0.67</i>

Tal como se observa en los cuadros N° 4, 5 6 y 7 la relación entre la presión de contacto y la presión de inflado, está muy relacionada a la carga soportada por el eje y en menor porcentaje al tipo de neumático. El Instituto del asfalto considera un solo factor de corrección para el cálculo de la presión de contacto y es 0.90 la presión de inflado.

En este trabajo se ha encontrado que estos factores difieren de este valor lo que nos ha permitido agrupar los siguientes rangos que permiten calcular la presión de contacto(PC) en función presión de inflado(PI), de las cargas, tipo y desgaste del neumático:

**TABLA N° 8 FACTOR DE CORRECCION DE LA PRESION DE INFLADO**

<b>TIPO DE NEUMATICO</b>	<b>CONVENCIONAL</b>			<b>RADIAL</b>			<b>DESGASTADO</b>		
	<b>RANGO DE PRESIÓN DE INFLADO (PI en psi)</b>	<b>60-70</b>	<b>70-80</b>	<b>&gt;90</b>	<b>60-70</b>	<b>70-80</b>	<b>&gt;90</b>	<b>60-70</b>	<b>70-80</b>
<b>CARGA LEGAL</b>	1.10	1.00	<b>0.90</b>	1.10	1.00	<b>0.90</b>	<b>0.90</b>	0.85	0.80
<b>CARGA ESTÁNDAR</b>	0.95	<b>0.90</b>	0.85	1.00	<b>0.90</b>	0.80	0.75	0.72	0.70
<b>CARGA &lt; A LA ESTANDAR</b>	<b>0.90</b>	0.80	0.75	0.80	0.75	0.65	0.70	0.70	0.70

Del cuadro anterior, los factores de corrección para un neumático convencional y radial a una carga legal son similares, mostrando una ligera diferencia a medida que la carga se reduce. Para la condición de un neumático desgastado, los factores son siempre menores a la unidad lo que significa que siempre la presión de contacto es mayor que la presión de inflado. Esta condición influye positivamente en el comportamiento del pavimento ya que se tiene mayor área de contacto para un mismo peso; sin embargo, cuando se encuentra demasiado desgastado puede atentar con la seguridad vial. Por otro lado se observa que el factor de 0.90 considerado por el Instituto del Asfalto es válido para la condición de los valores resaltados en el cuadro anterior.

La Presión de Contacto es la variable que en los capítulos posteriores permite el ingreso a los gráficos y/o modelos matemáticos para calcular el factor de corrección de los ejes equivalentes.

## CAPITULO IV

### CARACTERIZACION DEL PAVIMENTO

El trabajo para la caracterización consistió en una recopilación de toda la información existente en el PERT - MTC de todos los estudios existentes, de los cuales la gran mayoría ya se han ejecutado. Un resumen de los tramos más importantes relevados en las tres regiones del país, se muestra en la tabla N° 3 del anexo. Esto permitió obtener información básica para la simulación del modelo Elsym-5.

La caracterización se hizo en dos fases; una referida a los espesores de las diferentes capas del pavimento y otra referida a las características geomecánicas de los materiales que conforman las capas del pavimento incluida la subrasante. Este análisis y caracterización se hizo para las tres regiones del país Costa, Sierra y Selva.

Respecto a la caracterización de la carpeta asfáltica, base granular y sub base granular, se realizó conforme a los requisitos que deben cumplir los materiales en la etapa de diseño y los reportes de la supervisión en obra. De esta forma se determinaron los parámetros para cada una de las capas que conforman el pavimento tales como:

Módulo de elasticidad.

Coefficiente de Poisson y

Espesor de cada capa.

#### IV.1 CARPETA ASFALTICA

##### **Espesor de Capa**

Respecto a los espesores de la carpeta asfáltica, se ha encontrado una variación desde los 5cm como mínimo hasta 15 cm como máximo para las diferentes regiones del país. Sin embargo, fue necesario considerar el análisis para espesores mayores a los encontrados con variación de 2.5 cm hasta un máximo de 20 cm, para verificar la influencia de la presión de inflado de los neumáticos frente a los espesores de la carpeta asfáltica

##### **Módulo Elástico**

Esta variable se determinó de acuerdo a las siguientes fórmulas de regresión obtenidas por Hwang y Witczak(1979) <sup>(55)</sup>, sobre la base de las características del asfalto, de la mezcla y la temperatura del pavimento.

$$|E_C| = 100000x10^{\beta_1} \quad (11)$$

$$\beta_1 = \beta_3 + 0.000005\beta_2 - 0.00189\beta_2 f^{-1.1}$$

$$\beta_2 = \beta_4^{0.5} T^{\beta_5}$$

$$\beta_3 = 0.553833 + 0.028829(P_{200} f^{-0.1703}) - 0.03476V_v + 0.070377\lambda + 0.931757 f^{-0.02774}$$

$$\beta_4 = 0.483V_b$$

$$\beta_5 = 1.3 + 0.49825 \log f$$

$E_C$  = módulo Elástico de la carpeta asfáltica (psi)

Donde  $\beta_1$  a  $\beta_5$  son constantes temporales

-  $f$  = es la frecuencia de la carga en Hz.

$$f = \frac{1}{2\pi t} \quad (12)$$

$$\log t = 0.005e - 0.2 - 0.94 \log V$$

$t$  = Tiempo de aplicación de la carga (seg.)

$e$  = espesor de la carpeta asfáltica (cm)

$V$  = velocidad del vehículo (km/hr)

$T$  = temperatura de la mezcla en °F

Para obtener la temperatura media a la cual se encuentra el pavimento, se ha utilizado la fórmula empírica desarrollado por (George and Husain 1986):

$$T_{ca} = T_{aire} \left(1 + \frac{76.2}{(h_{ca} + 304.8)}\right) - \left(\frac{84.7}{(h_{ca} + 304.8)}\right) + 3.3 \quad (13)$$

donde:

$T_{ca}$  = temperatura referencial de la carpeta asfáltica (°C)

$T_{aire}$  = temperatura media del aire (°C)

$h_{ca}$  = espesor de la carpeta asfáltica (mm)

$P_{200}$  = % del agregado en peso que pasa la malla N° 200

$V_v$  = volumen de vacíos en la mezcla en %.

$V_b$  = volumen del bitumen en %

$\lambda$  = viscosidad del asfalto a 70°F en  $10^6$  poises

$$\lambda = 29508.2(P_{25^\circ C})^{-2.1939} \quad (14)$$

$P_{25^{\circ}\text{C}}$  = es la penetración del asfalto a  $25^{\circ}\text{C}$

Los valores de  $V_v$ ,  $V_b$  y  $\lambda$  se han tomado los típicos utilizados en las diferentes obras de rehabilitación según los reportes de la Supervisión y los planteados en los estudios a ejecutarse en las tres regiones del país.

Para determinar la temperatura media del aire se tomó el criterio de la Oficina de Control de Calidad (OCC) del MTC<sup>(29)</sup>, así como información adicional del SENAMHI. El criterio consistió en la recopilación de información de 75 estaciones climatológicas con registros de temperatura tanto máximas y mínimas de los últimos 20 años. La ubicación de las estaciones se hizo en las tres regiones del país y abarcaron todos los circuitos importantes de la red vial.

Con los datos del SENAMHI, la OCC determinó las temperaturas máximas de los días más calurosos (7 días) consecutivos de cada año para un lapso de 20 años. Para el cálculo de las temperaturas mínimas, tomaron los valores anuales para un período también de 20 años. Con esta información estadística calcularon las temperaturas del aire para 7 días, promediando los datos de los 20 años tanto para las temperaturas máximas como mínimas. Con estas dos temperaturas medias máximas y medias mínimas se hizo el análisis de las temperaturas medias representativas de cada región del país según se muestra en la tabla 2 del anexo.

La tabla N° 9 muestra la aplicación de la expresión (13) para la determinación de la temperatura de la carpeta asfáltica para diferentes espesores. La segunda columna de este cuadro muestra el resumen de la Temperatura Media del Aire en las tres regiones del país

**Tabla N° 9 Temperatura de la Carpeta Asfáltica**

REGION	TMA(*) °C	ESPESOR cm (pulg)						
		5(2)	7.5(3)	10(4)	12.5(5)	15(6)	17.5(7)	20(8)
<b>COSTA</b>	22	30	29	29	29	29	29	28
<b>SIERRA</b>	10	15	15	15	15	15	15	15
<b>SELVA</b>	25	33	33	33	33	32	32	32

\*TMA Temperatura media del aire



Las tablas N° 10, 11 y 12 muestran la caracterización típica del módulo elástico de la carpeta asfáltica para diferentes espesores en las tres regiones del país según la expresión (11)

**Tabla N° 10 Módulo Elástico representativo de Carpeta Asfáltica – Región Costa**

Velocidad Km/hr	Cod	Variable	Espesor (cm)						
			5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
		<i>t(seg.)</i>	0.011	0.011	0.012	0.012	0.012	0.013	0.013
	1	<i>f</i>	14	14	13	13	13	12	12
	2	<b>B<sub>5</sub></b>	1.871	1.871	1.855	1.855	1.855	1.838	1.838
	3	<i>Vb(%)</i>	6	6	6	6	6	6	6
	4	<b>B<sub>4</sub></b>	2.898	2.898	2.898	2.898	2.898	2.898	2.898
	5	<i>Pen a 25°</i>	85	85	85	85	85	85	85
	6	<i>Visc.</i>	1.726	1.726	1.726	1.726	1.726	1.726	1.726
80	7	<i>P200</i>	6	6	6	6	6	6	6
	8	<i>Vv(%)</i>	5	5	5	5	5	5	5
	9	<b>B<sub>3</sub></b>	1.478	1.478	1.481	1.481	1.481	1.484	1.484
	10	<i>T(°C)</i>	30	29	29	29	29	29	28
	11	<i>T(°F)</i>	86	84.2	84.2	84.2	84.2	84.2	82.4
	12	<b>B<sub>2</sub></b>	7087.5	6812.5	6346	6346	6346	5885.4	5656.2
	13	<b>B<sub>1</sub></b>	0.779	0.806	0.799	0.799	0.799	0.79	0.817
	14	<b>IEI (psi)</b>	<b>601,174</b>	<b>639,735</b>	<b>629,506</b>	<b>629,506</b>	<b>629,506</b>	<b>616,595</b>	<b>656,145</b>

**Tabla N° 11 Módulo Elástico representativo de Carpeta Asfáltica – Región Sierra**

Velocidad Km./hr	Cod	Variable	Espesor (cm)						
			5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
		<i>t(seg)</i>	0.024	0.024	0.025	0.026	0.027	0.027	0.028
	1	<i>f</i>	7	7	6	6	6	6	6
	2	<b>B<sub>5</sub></b>	1.721	1.721	1.688	1.688	1.688	1.688	1.688
	3	<i>Vb(%)</i>	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
	4	<b>B<sub>4</sub></b>	3.381	3.381	3.381	3.381	3.381	3.381	3.381
	5	<i>Pen a 25°</i>	135	135	135	135	135	135	135
	6	<i>Visc.</i>	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625	0.625
35	7	<i>P200(%)</i>	6	6	6	6	6	6	6
	8	<i>Vv(%)</i>	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
	9	<b>B<sub>3</sub></b>	1.483	1.483	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49
	10	<i>T(°C)</i>	15	15	15	15	15	15	15
	11	<i>T(°F)</i>	59	59	59	59	59	59	59
	12	<b>B<sub>2</sub></b>	2051.9	2051.9	1793.6	1793.6	1793.6	1793.6	1793.6
	13	<b>B<sub>1</sub></b>	1.037	1.037	1.027	1.027	1.027	1.027	1.027
	14	<b>IEI (psi)</b>	<b>1,088,930</b>	<b>1,088,930</b>	<b>1,064,143</b>	<b>1,064,143</b>	<b>1,064,143</b>	<b>1,064,143</b>	<b>1,064,143</b>

**Tabla N° 12 Módulo Elástico representativo de Carpeta Asfáltica – Región Selva**

Velocidad Km/hr	Cod	Variable	Espesor (cm)						
			5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
		<i>t(seg)</i>	<b>0.017</b>	<b>0.017</b>	<b>0.018</b>	<b>0.018</b>	<b>0.019</b>	<b>0.02</b>	<b>0.02</b>
	1	<i>f</i>	9	9	9	9	8	8	8
	2	<b>B<sub>5</sub></b>	1.775	1.775	1.775	1.775	1.75	1.75	1.75
	3	<i>Vb(%)</i>	6	6	6	6	6	6	6
	4	<b>B<sub>4</sub></b>	2.898	2.898	2.898	2.898	2.898	2.898	2.898
	5	<i>Pen a 25°</i>	65	65	65	65	65	65	65
	6	<i>Visc.</i>	3.109	3.109	3.109	3.109	3.109	3.109	3.109
50	7	<i>P200</i>	6	6	6	6	6	6	6
	8	<i>Va(%)</i>	5	5	5	5	5	5	5
	9	<b>B<sub>3</sub></b>	1.594	1.594	1.594	1.594	1.6	1.6	1.6
	10	<i>T(°C)</i>	33	33	33	33	32	32	32
	11	<i>T(°F)</i>	91.4	91.4	91.4	91.4	89.6	89.6	89.6
	12	<b>B<sub>2</sub></b>	5149.1	5149.1	5149.1	5149.1	4442.1	4442.1	4442.1
	13	<b>B<sub>1</sub></b>	0.752	0.752	0.752	0.752	0.77	0.77	0.77
	14	<b>IEI (psi)</b>	<b>564,937</b>	<b>564,937</b>	<b>564,937</b>	<b>564,937</b>	<b>588,844</b>	<b>588,844</b>	<b>588,844</b>

Adicionalmente se hizo un análisis para la temperatura crítica del aire de la selva que es igual a 35° C. La tabla N° 13 muestra la caracterización del módulo elástico a esta temperatura.

**Tabla N° 13 Módulo Elástico de Carpeta Asfáltica – Región Selva (Condición crítica)**

Velocidad Km/hr	Cod	Variable	Espesor (cm)						
			5	7.5	10	12.5	15	17.5	20
		<i>t(seg)</i>	<b>0.016</b>	<b>0.016</b>	<b>0.016</b>	<b>0.016</b>	<b>0.016</b>	<b>0.016</b>	<b>0.016</b>
	a	<i>F</i>	10	10	10	10	10	10	10
	b	<b>B<sub>5</sub></b>	1.798	1.798	1.798	1.798	1.798	1.798	1.798
	c	<i>Vb(%)</i>	6	6	6	6	6	6	6
	d	<b>B<sub>4</sub></b>	2.898	2.898	2.898	2.898	2.898	2.898	2.898
	e	<i>Pen a 25°</i>	65	65	65	65	65	65	65
	f	<i>Visc.</i>	3.109	3.109	3.109	3.109	3.109	3.109	3.109
50	g	<i>P200</i>	6	6	6	6	6	6	6
	h	<i>Va(%)</i>	5	5	5	5	5	5	5
	i	<b>B<sub>3</sub></b>	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59	1.59
	j	<b>(*)T(°C)</b>	<b>46</b>	<b>45</b>	<b>45</b>	<b>44</b>	<b>44</b>	<b>44</b>	<b>43</b>
	k	<i>T(°F)</i>	114.8	113	113	111.2	111.2	111.2	109.4
	l	<b>B<sub>2</sub></b>	8606.5	8365.4	8365.4	8127.3	8127.3	8127.3	7892.3
	m	<b>B<sub>1</sub></b>	0.341	0.376	0.376	0.411	0.411	0.411	0.445
	n	<b>IEI (psi)</b>	<b>219,280</b>	<b>237,684</b>	<b>237,684</b>	<b>257,632</b>	<b>257,632</b>	<b>257,632</b>	<b>278,612</b>

(\*) Temperatura de la carpeta asfáltica calculado según la expresión (13)

Con los módulos elásticos de las tablas 10, 11, 12 y 13, es que se han determinado los esfuerzos y deformaciones para el cálculo de los factores de corrección por efecto de la presión de inflado de los neumáticos en el siguiente capítulo.

## **Coefficiente de Poisson**

Con respecto al coeficiente de Poisson, es un dato requerido en todo método mecanístico para el diseño de pavimentos. Este coeficiente se define como la relación de la deformación lateral y la deformación axial. Esto se puede determinar durante el ensayo del Módulo Resiliente midiendo las deformaciones anteriores. Debido a que el coeficiente de Poisson tiene una respuesta muy insignificante sobre el pavimento, es costumbre asumir un valor razonable para el uso en el diseño. Por lo tanto el coeficiente de Poisson se determinó de acuerdo a la temperatura de la capa asfáltica <sup>(34)</sup>. Como sigue:

0.30 para temperaturas menores o iguales a 10°C.

0.35 para temperaturas mayores o iguales que 10°C. y menores o iguales que 22°C

0.40 para temperaturas mayores que 22°C. y menores o iguales que 40°C

## **IV.2 BASE Y SUBBASE GRANULAR**

### **Espesor de Capa**

La base presenta espesores muy variables de 15 a 25 cm y la sub base espesores variables entre 15 y 35 cm en las tres regiones del país.

### **Módulo Elástico o Módulo de Resilencia**

Para el caso de las capas granulares, la metodología para determinar sus propiedades mecánicas es compleja, debido que no existe una relación lineal entre tensiones y deformaciones, existiendo por lo tanto un módulo de elasticidad que es variable con el nivel de tensiones. Sin embargo, en pavimentos con mezcla asfáltica de un cierto espesor, las tensiones y deformaciones que solicitan a las capas granulares son de menor magnitud, de modo que se puede considerar que para esos niveles de tensiones es válida la teoría lineal para el comportamiento del pavimento.

Para estimar los módulos de elasticidad de las capas granulares se adoptó la metodología propuesta por Barker y Brabston <sup>(40)</sup>, donde el módulo de cada capa, depende del módulo de la capa subyacente, tal como se muestra en la siguiente expresión:

### **Subbase Granular**

$$E_{SB} = E_{SR} [5.35 \log h + 0.62 \log E_{SR} - 1.56 \log E_{SR} \log h - 1.13] \quad (15)$$

Base Granular

$$E_B = E_{SB} [8.05 \log h_1 + 0.84 \log E_{SB} - 2.1 \log E_{SB} \log h_1 - 2.21] \quad (16)$$

donde:

$E_{SB}$  = Módulo de elasticidad de la subbase (kg/cm<sup>2</sup>)

$E_{SR}$  = Módulo de elasticidad de la subrasante (kg/cm<sup>2</sup>)

$E_B$  = Módulo de elasticidad de la capa de base (kg/cm<sup>2</sup>)

$h$  = Espesor de la capa de subbase (cm)

$h_1$  = Espesor de capa de base (cm)

Esta determinación no es sorprendente dado que el módulo depende del grado de compactación alcanzado y es conocido que cuando un material granular sin ligante es compactada sobre un suelo más débil, no puede alcanzar la densidad máxima de la cual es capaz.

### **Coefficiente de Poisson**

Respecto al coeficiente de Poisson para la base y subbase se tomó el valor de 0.35 y corresponde a materiales granulares.

## **IV.3 SUB RASANTE**

### **Espesor de capa**

La sub rasante para efectos del presente análisis se consideró con un espesor semi infinito.

### **Módulo Elástico o Módulo de Resiliencia**

Para la caracterización de la capacidad de soporte del suelo de fundación y teniendo la dificultad de disponer del equipamiento necesario para el ensayo del Módulo Resiliente según el método de Ensayo AASHTO T-294, se ha considerado la estimación de este parámetro a través de correlaciones con el ensayo CBR <sup>(32)</sup>

$$Mr = 180 \times CBR^{0.64} \quad 2 < CBR < 12\% \quad (17)$$

$$Mr = 225 \times CBR^{0.55} \quad 12 < CBR < 80\% \quad (18)$$

Donde

$M_r$  =Módulo de resiliencia (kg/cm<sup>2</sup>).

CBR = California Bearing Ratio (%).

Los valores de CBR corresponden a suelos encontrados en los diferentes estudios y reportes de supervisión de obras ejecutadas y son representativos de las tres regiones del país y varían desde 3% hasta 30% de CBR.

La tabla N°14 muestra en resumen el cálculo del módulo elástico de las capas de subrasante, subbase y base de acuerdo a las expresiones 15, 16, 17 y 18.

**Tabla N° 14 Módulos Elásticos de Subrasante, Subbase y Base – Tres Regiones**

	COSTA			SIERRA			SELVA		
<b>SUBRASANTE</b>									
CBR(%)	10	20	30	5	10	20	3	10	20
$E_{SR}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	786	1,169	1,461	504	786	1,169	364	786	1,169
$E_{SR}$ (psi)	11,170	16,612	20,762	7,162	11,170	16,612	5,173	11,170	16,612
<b>SUBBASE</b>									
H (cm)	20	20	20	20	20	20	25	25	25
$E_{SB}$ (K/cm <sup>2</sup> )	1,375	1,761	2,001	1,019	1,375	1,761	856	1,438	1,825
$E_{SB}$ (psi)	19,537	25,020	28,435	14,476	19,537	25,020	12,164	20,438	25,928
<b>BASE</b>									
H <sub>1</sub> (cm)	15	15	15	20	20	20	20	20	20
$E_B$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	2,946	3,465	3,756	2,620	3,197	3,736	2,324	3,291	3,818
$E_B$ Esb (psi)	41,864	49,233	53,378	37,226	45,427	53,091	33,021	46,766	54,258

### Coefficiente de Poisson

El valor considerado de este coeficiente es de 0.35 para la capa de la subrasante.

## IV.4 ESTRUCTURAS ANALIZADAS

La elección de las estructuras de pavimentos analizados se hizo teniendo en cuenta condiciones como: representar el tipo de pavimento usados en las carreteras del Perú y sensibilizar los parámetros que los caracterizan que pudieran influir en la magnitud del factor de corrección obtenido.

Es por ello que se analizó una estructura tipo, la que se sensibilizó con respecto a las siguientes variables: Variación del Espesor de la carpeta asfáltica y variación del CBR de la subrasante de tal manera que estos contemplen las características de los pavimentos representativos. Las estructuras analizadas se muestran en resumen en la tabla N° 15, elegidas de acuerdo a los espesores típicos usados en el país.

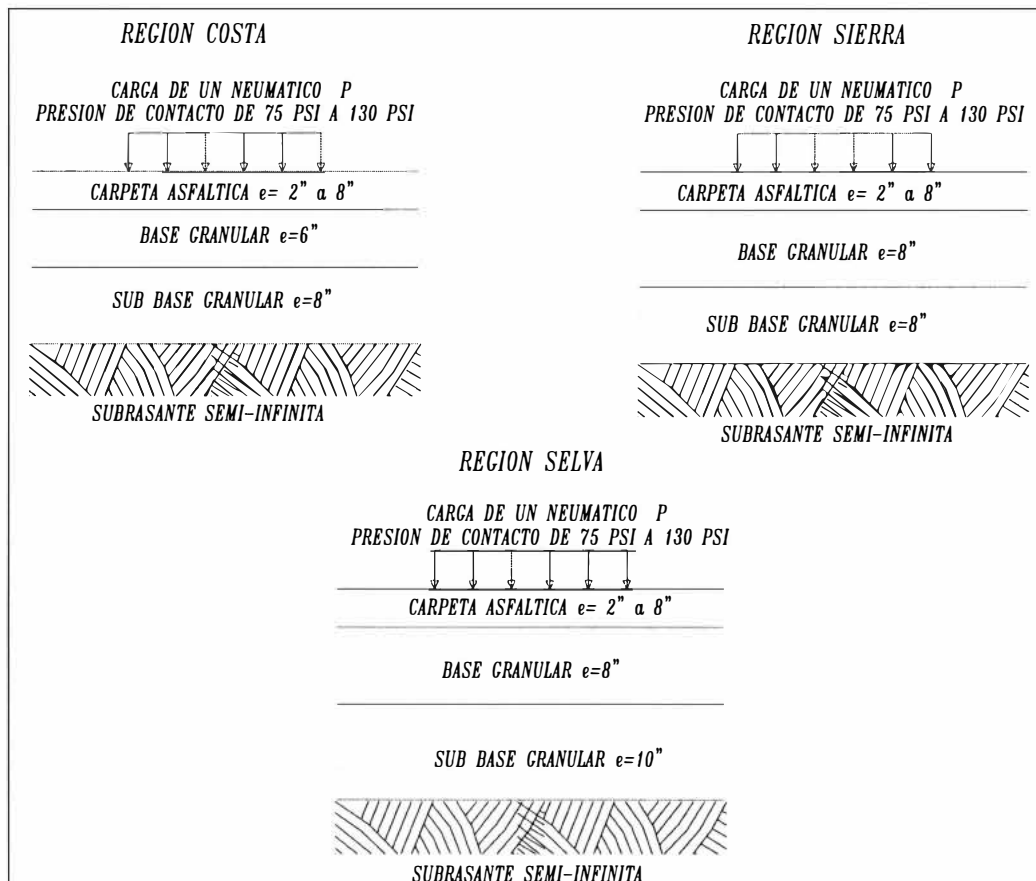
**Tabla N° 15 Espesores de las diferentes capas del pavimento**

<i>REGION</i>	<i>COSTA</i>			<i>SIERRA</i>			<i>SELVA</i>		
<i>Cm (Pulg)</i>	<i>CA</i>	<i>BG</i>	<i>SBG</i>	<i>CA</i>	<i>BG</i>	<i>SBG</i>	<i>CA</i>	<i>BG</i>	<i>SBG</i>
<i>Alternativas Analizadas</i>	5.0(2)	15(6)	20(8)	5.0(2)	20(8)	20(8)	5.0(2)	20(8)	25(10)
	7.5(3)			7.5(3)			7.5(3)		
	10.0(4)			10.0(4)			10.0(4)		
	12.5(5)			12.5(5)			12.5(5)		
	15.0(6)			15.0(6)			15.0(6)		
	17.5(7)			17.5(7)			17.5(7)		
	20.0(8)			20.0(8)			20.0(8)		

CA Carpeta asfáltica, BG Base granular, SBG Subbase granular

Cada una de estas combinaciones se analizaron para presiones desde 75 psi, que es la presión con la que se realizaron las pruebas de la AASHTO, hasta 130 psi, que es la máxima presión encontrada en los inventarios realizados en campo.

Esquemáticamente las estructuras analizadas con el modelo ELSYM 5, que resuelve un sistema elástico lineal, se muestran en la fig. 17.



**Fig. 17. Estructuras representativas de pavimentos asfálticos analizados**

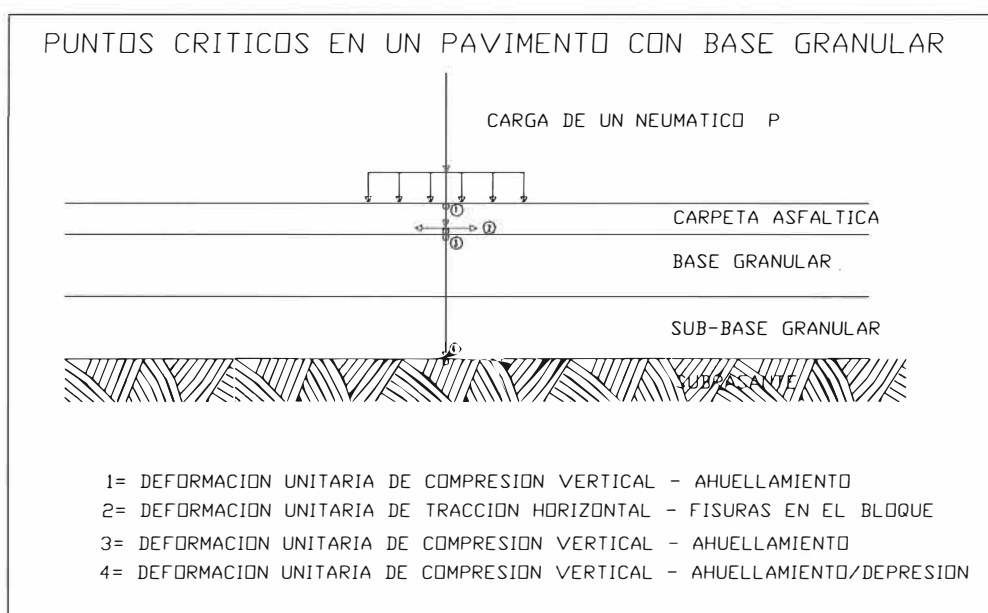
## CAPITULO V

### SIMULACION Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO ELSYM 5.

#### V.1 ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN PAVIMENTOS FLEXIBLES.

Los esfuerzos y las deformaciones unitarias críticas son los valores máximos que ocurren en el Sistema carpeta – base, o carpeta – subrasante, bajo ciertas condiciones de carga del tráfico. Los niveles críticos ocurrirán en las diferentes capas de la estructura del pavimento dependiendo de la combinación de los materiales,. Cada material usado en el pavimento tiene valores particulares de resistencia a la compresión, tracción y cortante. Cuando la resistencia del material es excedida por la condición de carga simple o repetidas, el material fallará. Por tanto es muy importante conocer precisamente la magnitud y ubicación de los esfuerzos o las deformaciones unitarias críticas en la capa asfáltica, base granular, subbase granular y subrasante. La herramienta que nos permitió determinar estas deformaciones es el programa de computo Elsym-5.

La figura 18 muestra los puntos críticos en un pavimento asfáltico de los cuales 2 de ellos son los más importantes (2 y 4), considerados así por la SHELL y el Instituto del Asfalto. Este mismo criterio se adoptó para el desarrollo de la presente tesis.



**Fig. 18 Deformaciones unitarias en las diferentes capas del pavimento**

La metodología de análisis para abordar el estudio sobre la influencia de la presión de inflado en la vida útil de los pavimentos asfálticos, consistió primero en determinar los factores de equivalencia, para las diversas estructuras planteadas y caracterizadas en el capítulo anterior, mediante el uso de métodos mecanísticos. De este modo, las diferentes capas del pavimento fueron modeladas como un sistema elástico multicapa (Teoría de Burmister).

Las tensiones y deformaciones producidas por la carga axial, tanto en la subrasante como en la base de la carpeta asfáltica fueron determinadas mediante la utilización del programa computacional ELSYM5, que a continuación se hace una breve descripción.

## **V.2 DESCRIPCION DEL PROGRAMA ELSYM-5**

Este programa fue desarrollado por la Universidad de California en Berkeley. Es un Procedimiento computarizado que modela el pavimento en tres dimensiones idealizando un Sistema elástico de capas. El pavimento puede ser cargado con una o más cargas circulares uniformes normales e idénticas sobre la superficie del pavimento, calculando varios componentes dentro de las diferentes capas, como esfuerzos, deformaciones y desplazamientos con valores principales ubicados según lo especificado por el usuario.

Se ha demostrado en el Capítulo 3 que las áreas de contacto tienen una forma casi circular para cargas pequeñas y varía de elipses a casi rectangulares a medida que se incrementa la carga, sin embargo, la elección de la teoría de capas elásticas permite sólo cargas distribuidas uniformemente en áreas simétricas en todas las direcciones. Las otras soluciones son posibles modularlas a través del método de elementos finitos.

El programa asume que cada capa está compuesta de un material elástico, homogéneo e isotrópico. Los materiales se comportan elásticamente de acuerdo a la Ley de Hooke. Cada capa se considera de espesor uniforme y ancho infinito en toda la dirección horizontal. La capa elástica inferior puede ser semi-infinito en espesor o puede considerarse de espesor finito, en cualquier caso el programa asume que la capa de la base es soportada por una base rígida. Las condiciones de borde entre las capas son asumidas completamente en fricción con excepción de la interface entre la capa inferior y la base rígida donde puede ser especificada una fricción nula. La superficie es libre de corte y las cargas aplicadas son asumidas idénticas, verticales y uniformes sobre un área circular.

Se aplica el principio de superposición para determinar la respuesta del pavimento en un punto dado, cuando son especificadas cargas múltiples.



La entrada de datos consiste en las propiedades de cada capa, datos de carga y posición de cada uno de ellos.

La salida del ELSYM5 contiene una tabla de resumen con las respuestas calculadas en cada punto. Estas respuestas incluyen esfuerzos principales, deformaciones y desplazamientos y se usan para determinar el número de repeticiones de carga antes de que el pavimento falle por fatiga o ahuellamiento.

## V.2.1 DATOS REQUERIDOS POR ELSYM5

La entrada de datos está dividido en tres categorías:

- **Datos de las propiedades de cada capa del pavimento**

Cada capa analizada por ELSYM5 está compuesta de uno a cinco capas elásticas. Las tres propiedades requeridas para cada capa son el espesor, Coeficiente de Poisson y Módulo de Elasticidad que ya fueron definidas en el capítulo 4.

- **Datos de carga**

Las cargas son aplicadas sobre el pavimento hasta un máximo de 10 cargas circulares uniformes y normales. Estas son definidas por dos de las siguientes tres propiedades: peso (lb), presión de contacto del neumático (psi), y radio de la carga circular uniformemente distribuida (pulg). La ubicación de la carga es definida por las coordenadas X e Y a lo largo de la superficie de la capa superior del pavimento. Todos los valores de las cargas tienen que ser positivos y las coordenadas pueden ser positivas y/o negativas.

Las cargas por neumático se representaron por un área circular distribuida uniformemente con una presión de contacto de 75 psi, para el eje estándar fijo que se utilizó en el estudio de la prueba AASHTO y el eje comparativo con presiones variables desde 75 psi hasta 130 psi. Las cargas estándar de los ejes en ambos casos son los siguientes:

Eje simple con neumático simple	13,650 lb (6.2 tn)
Eje simple con neumático doble	18,000 lb (8.2 tn)
Eje tandem con neumático doble y simple (6 neumáticos)	27,300 lb (12.4 tn)

Eje tandem con neumático doble (8 neumáticos)	34,140 lb (15.5 tn)
Eje tridem con neumático doble.	49,150 lb (22.3 ton)

- **Coordenadas de los puntos analizados**

El programa evalúa los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en lugares determinados por el usuario. Los valores de X e Y pueden ser positivos o negativos y los valores de Z solo positivos. Z se limita a la base de la última capa en un pavimento de base rígida.

En vista que en el programa Elsym 5 se cumple el principio de simetría, no fue necesario evaluar las deformaciones en los puntos con simetría

Los puntos analizados para el cálculo de las deformaciones se hizo en base a la configuración de ejes y neumáticos.

- ✓ Eje simple con neumático simple y doble

Las deformaciones fueron evaluadas en el centro de los neumáticos y en el caso de neumáticos dobles se evaluó además en el centro del rodado

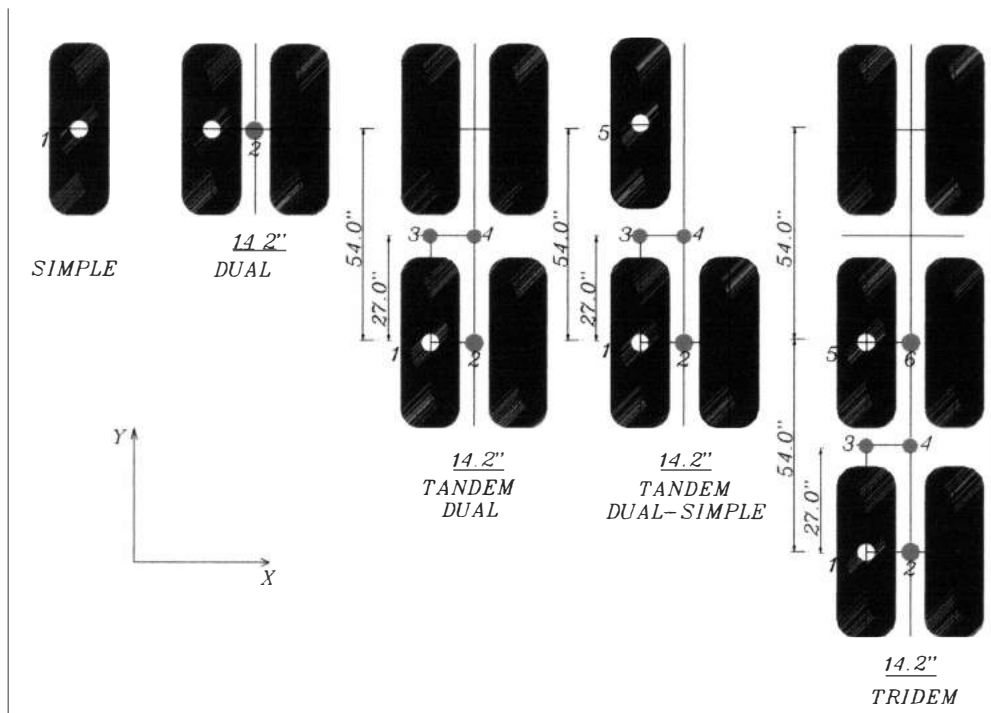
- ✓ Eje Tandem con neumático doble y neumático doble-simple.

Las deformaciones se evaluaron en los dos casos en el centro del rodado, en el centro del neumático y en los puntos intermedios entre ejes.

- ✓ Eje Tridem con neumáticos dobles.

Las deformaciones se evaluaron en el centro de los neumáticos, los puntos intermedios entre ejes y en el eje central.

La figura 19 muestra la configuración de ejes y la ubicación de los puntos donde fueron analizadas las deformaciones.



**Fig. 19 Configuración de ejes y ubicación de puntos analizados**

### V.3 CÁLCULO DE FACTORES DE CORRECCION POR PRESION DE INFLADO.

El factor de corrección por presión de inflado se aplica al Factor de Equivalencia (FE) y es éste el que relaciona las vidas útiles de una estructura relativa a otra que se toma como referencia; El factor de equivalencia implica considerar las repeticiones de carga estándar para los criterios de falla anteriormente mencionados: agrietamiento por deformaciones repetidos en la carpeta asfáltica o ahuellamiento y deformaciones permanentes en la subrasante.

De acuerdo a la AASHTO la expresión que determina el factor de equivalencia (FE) de un eje cualquiera es la siguiente.

$$\text{Log} \left[ \frac{N_{eje}}{N_{18}} \right] = 4.79 \times \text{Log}_{10}(18 + 1) - 4.79 \times \text{Log}_{10}(P_{eje} + L) + 4.33 \times \text{Log}_{10} L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad (19)$$

$$G_t = \text{Log}_{10} \left[ \frac{4.2 - p_t}{4.2 - 1.5} \right]$$

$$\beta_x = 0.40 + \frac{0.081 \times (P_{eje} + L)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19} \times L^{3.23}}$$

$P_{eje}$  = Carga de un eje simple o tandem

L = código de eje (1=eje simple, 2= eje tandem y 3=tridem)

SN = número estructural

$P_t$  = serviciabilidad terminal

$\beta_{18}$  = valor de  $\beta_x$ , cuando P es igual a 18 y  $L_2$  es igual a 1

$N_{18}$  = número de aplicaciones de carga de un eje estándar de 18,000lb.

$N_{eje}$  = número de aplicaciones de carga de un eje cualquiera

De la expresión (19) el factor de equivalencia se define como:

$$FE_1 = \frac{N_{18}}{N_{eje}} \quad (20)$$

Si se analiza la expresión anterior la variable carga es la que mayor influencia tiene sobre el factor de equivalencia. Este mismo criterio se planteó para la determinación del factor de corrección del eje equivalente por presión de inflado del neumático, teniendo en cuenta que los neumáticos de los vehículos en la prueba AASHTO usaron una presión de inflado constante de 75 psi. y en la actualidad los neumáticos de los vehículos que transitan por las carreteras del país superan en promedio el valor de 100 psi

De la expresión (20) podemos definir que el factor de corrección de los factores de equivalencia, de los diferentes ejes analizados, por efecto de la presión de inflado, se obtiene por:

$$FC_{FE} = \frac{N_{18}}{N_{18pv}} \quad (21)$$

$FC_{FE}$  = factor de corrección de un eje equivalente por presión de inflado.

$N_{18}$  = número de repeticiones de un eje cualquiera con una carga estándar bajo una presión de inflado constante de 75 psi

$N_{18pv}$  = número de repeticiones de un eje cualquiera con una carga estándar y presión de inflado variable de 75, 80, 90, 100, 110, 120, y 130 psi

#### V.4 LEYES DE FATIGA – CRITERIOS DE FALLA

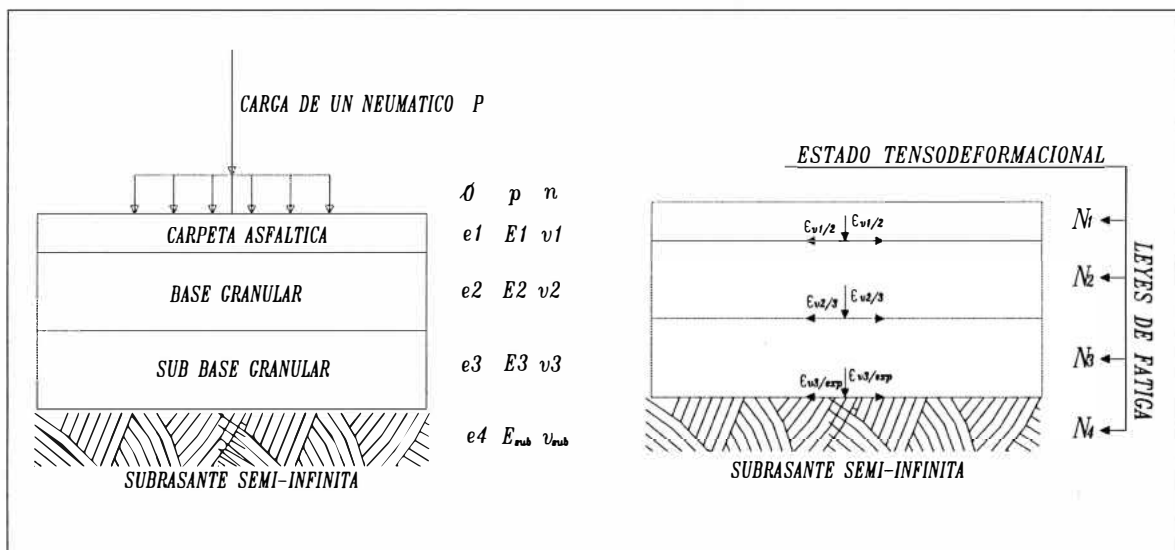
La fatiga es un fenómeno acumulativo de fractura como consecuencia de cargas repetidas que no superan la resistencia del material, pero que terminan con el agotamiento total del pavimento con la consiguiente pérdida de resistencia y la necesidad de proceder a lo que se denomina refuerzo del mismo. Las leyes de fatiga determinan la relación entre una sollicitación (tensión o deformación) y el número de repeticiones de la misma que produce el fallo en el material.

Las leyes de fatiga son expresiones matemáticas obtenidas de numerosos ensayos de laboratorio y calibradas en estudios a escala real con las que se determinan el número  $N$  de aplicaciones de una carga tipo que puede soportar el material estudiado antes de llegar al agotamiento estructural, si cada aplicación individual produce una determinada deformación.

Las carpetas asfálticas pierden rigidez a lo largo de su vida útil, a causa de la microfisuración producida por el paso repetido de vehículos pesados. Este fenómeno se llama agotamiento por fatiga.

En la actualidad existen una serie de leyes de fatiga de los materiales según el tipo de capa estructural; sin embargo, la mayoría de estas leyes de fatiga o criterios de falla presentan sólo la fisura inicial como criterio de falla, y son las planteadas por el Instituto del Asfalto las que presentan límites en cuanto a estos dos tipos de falla: fisuramiento y ahuellamiento, adicionalmente contempla la correlación de pruebas de campo y laboratorio de allí la elección de estas leyes de fatiga para el desarrollo del presente trabajo.

El criterio de falla adoptado para el presente estudio es la deformación tensional horizontal, en la base de la capa asfáltica, que causa la fatiga y fisuramiento y la otra es la deformación compresional vertical que causa deformación permanente o ahuellamiento en la subrasante.



**Fig. 20 Esquema de cálculo analítico de las deformaciones unitarias en las diferentes capas del pavimento**

#### V.4.1 FATIGA EN LA CARPETA ASFÁLTICA

Es el criterio de falla que permite calcular el número de repeticiones de un eje cualquiera en función de la deformación horizontal crítica en la base de la carpeta asfáltica. El modelo matemático general del criterio de falla es el siguiente:

$$N_{EJE} = f_1(\varepsilon_t)^{-f_2} (E_C)^{-f_3} \quad (22)$$

Donde: las constantes  $f_2$  y  $f_3$  son determinados en laboratorio en ensayos de fatiga,  $f_1$  es un factor que calibra la información de laboratorio con el campo.

Para la presente tesis se usaron las ecuaciones de fatiga de Laboratorio desarrollado por el Instituto del Asfalto (AI-1981) basados en el criterio de esfuerzos constantes y puede ser expresado como:

$$N_{EJE-t} = 0.00432C\varepsilon_t^{-3.291} [E_C]^{-0.854} \quad (23)$$

Donde

$N_{EJE-t}$  = número de aplicaciones de carga de un eje cualquiera

C es un factor de corrección expresado como

$$C=10^Z \quad \text{y} \quad Z= 4.84 [(V_b/V_v+ V_b)-0.69]$$

$V_b$  = Volumen del asfalto en porcentaje (%)

$V_v$  = Volumen de huecos en porcentaje (%)

$\varepsilon_t$  = deformación tensional horizontal crítica

$E_c$  = módulo elástico de la carpeta asfáltica

Para computar las diferencias entre el laboratorio y las condiciones del campo, el Instituto del Asfalto determinó un factor de calibración (fc) de 18.4 que daría una probabilidad de falla por fatiga en la carpeta asfáltica en el orden del 20% del área total, tal como se observó en las secciones seleccionadas de la carretera de ensayo de la AASHO.

Por consiguiente la expresión (23) multiplicada por el factor de calibración de 18.4 permite calcular el número de repeticiones de carga de un eje cualquiera que da una probabilidad de falla del 20% del área total por fatiga de la carpeta, así:

$$N_{EJE-t} = 18.4 * 0.00432C \varepsilon_t^{-3.291} [E_C]^{-0.854} \quad (24)$$

Los coeficientes de la expresión 24 puede reducirse en una constante P que está en función del módulo elástico de la carpeta asfáltica multiplicada por la deformación  $\varepsilon$  en la base de la misma, así:

$$N_{EJE-t} = P / \varepsilon_t^{-3.291} \quad (25)$$

El cálculo del coeficiente P se muestra en la tabla N° 16 para las diferentes características de mezcla, espesores de carpeta y módulos elásticos característicos de cada región. En el análisis por fatiga,  $\varepsilon_t$  corresponde a la deformación unitaria radial máxima de tracción en la parte inferior de la carpeta asfáltica.

Cabe aclarar que el programa ELSYM calcula los resultados en coordenadas cartesianas (x,y,z) y una de las configuraciones analizadas (eje tandem con 6 neumáticos) no tienen simetría cilíndrica, por lo que fue necesario emplear la siguiente expresión para determinar  $\varepsilon_t$

$$\varepsilon_t = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}}{2}\right)^2 + \gamma_{xy}^2} \quad (26)$$

Sin embargo, debido a que el valor de  $\gamma_{xy}$  es muy pequeño, para el cálculo del número de repeticiones en el plano X, Y se consideró la mayor de las 2 deformaciones específicas unitarias  $\varepsilon_{xx}$ , o  $\varepsilon_{yy}$

**Tablas N° 16 Coeficiente “P” de la Ley de fatiga**

**REGION COSTA**

<i>Espesor(cm)</i>	<b>5</b>	<b>7.5</b>	<b>10</b>	<b>12.5</b>	<b>15</b>	<b>17.5</b>	<b>20</b>
<i>Vb(%)</i>	6	6	6	6	6	6	6
<i>Vv(%)</i>	5	5	5	5	5	5	5
<b><i>IEI (psi)</i></b>	<b>601,174</b>	<b>639,735</b>	<b>629,506</b>	<b>629,506</b>	<b>629,506</b>	<b>616,595</b>	<b>656,145</b>
<i>Fc</i>	18.40	18.40	18.40	18.40	18.40	18.40	18.40
<i>Coeficiente P</i>	1.84E-07	1.75E-07	1.77E-07	1.77E-07	1.77E-07	1.81E-07	1.71E-07

## REGION SIERRA

<i>Espesor(cm)</i>	<b>5</b>	<b>7.5</b>	<b>10</b>	<b>12.5</b>	<b>15</b>	<b>17.5</b>	<b>20</b>
<i>Vb(%)</i>	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
<i>Vv(%)</i>	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
<b><i>IEI (psi)</i></b>	<b>1,088,930</b>	<b>1,088,930</b>	<b>1,064,143</b>	<b>1,064,143</b>	<b>1,064,143</b>	<b>1,064,143</b>	<b>1,064,143</b>
<i>F<sub>c</sub></i>	18.40	18.40	18.40	18.40	18.40	18.40	18.40
<i>Coeficiente P</i>	4.29E-07	4.29E-07	4.37E-07	4.37E-07	4.37E-07	4.37E-07	4.37E-07

## REGION SELVA

<i>Espesor(cm)</i>	<b>5</b>	<b>7.5</b>	<b>10</b>	<b>12.5</b>	<b>15</b>	<b>17.5</b>	<b>20</b>
<i>Vb(%)</i>	6	6	6	6	6	6	6
<i>Va(%)</i>	5	5	5	5	5	5	5
<b><i>IEI (psi)</i></b>	<b>564,937</b>	<b>564,937</b>	<b>564,937</b>	<b>564,937</b>	<b>588,844</b>	<b>588,844</b>	<b>588,844</b>
<i>F<sub>c</sub></i>	18.40	18.40	18.40	18.40	18.40	18.40	18.40
<i>Coeficiente P</i>	1.95E-07	1.95E-07	1.95E-07	1.95E-07	1.88E-07	1.88E-07	1.88E-07

## REGION SELVA (CONDICION CRITICA)

<i>Espesor(cm)</i>	<b>5</b>	<b>7.5</b>	<b>10</b>	<b>12.5</b>	<b>15</b>	<b>17.5</b>	<b>20</b>
<i>Vb(%)</i>	6	6	6	6	6	6	6
<i>Va(%)</i>	5	5	5	5	5	5	5
<b><i>IEI (psi)</i></b>	<b>219,280</b>	<b>237,684</b>	<b>237,684</b>	<b>257,632</b>	<b>257,632</b>	<b>257,632</b>	<b>278,612</b>
<i>F<sub>c</sub></i>	18.40	18.40	18.40	18.40	18.40	18.40	18.40
<i>Coeficiente</i>	4,4E-07	4,1E-07	3,8E-07	3,8E-07	3,8E-07	3,8E-07	3,56E-07

### V.4.2 COMPRESIÓN EN LA SUBRASANTE–DEFORMACIÓN PERMANENTE EN LA SUBRASANTE.

Para este criterio de falla se pueden plantear dos procedimientos, uno limitando la deformación vertical de compresión en la parte superior de la subrasante y el segundo limitando la permanente deformación acumulada en la carpeta asfáltica, basada en las deformaciones permanentes de cada capa individual El primer procedimiento es el que se adoptó en el desarrollo de la presente tesis. El modelo matemático general de este criterio de falla es el siguiente:

$$N_{EJE} = f_4(\varepsilon_{ZZ})^{-f_5} \quad (27)$$



Donde las constantes  $f_4$  y  $f_5$  son determinadas por correlaciones de mucha información de campo. En la presente tesis se tomó las correlaciones llevadas a cabo por el Instituto del Asfalto, que limitó la deformación vertical de compresión en 0.5”, estas constantes se muestran en la siguiente expresión

$$N_{EJE-z} = 1.365 \times 10^{-9} (\varepsilon_{zz})^{-4.477} \quad (28)$$

donde

$N_{EJE-z}$  = Número de aplicaciones de carga de un eje cualquiera hasta obtener un ahuellamiento de 0.5”

$\varepsilon_{zz}$  = deformación vertical en la parte superior de la subrasante en in/in

El cálculo del número de repeticiones se realizó sobre la base de los criterios de falla, que están en función a su vez de las máximas deformaciones unitarias  $\varepsilon_{zz}$

#### V.4.3 FATIGAS CRITICAS

La fatiga crítica es aquella que finalmente interviene en el cálculo del FE, por ser ésta la que produce el colapso del pavimento. Esta fatiga corresponde al menor valor entre las fatigas máximas  $N_{EJE-t}$  y  $N_{EJE-z}$ , producidas en la capa asfáltica y en la subrasante, respectivamente. De esta forma, la fatiga crítica N se obtiene de la siguiente manera:

$$N = \min(N_{EJE-t}, N_{EJE-z}) \quad (29)$$

#### V.5 PUNTOS DE MAXIMA DEFORMACION.

Se ha encontrado que la máxima deformación tiene una ubicación muy variable dependiendo de la configuración de los ejes analizados, así como de las características de las diferentes capas de un pavimento.

Los puntos donde se producen las máximas deformaciones para un eje simple con neumático simple, eje simple con neumático doble, eje tandem con neumático doble (8 neumáticos), eje tandem con neumático doble y simple (6 neumáticos) y eje tridem con neumático doble, se muestra en la tabla 5 del anexo.

Una vez simulado el modelo ELSYM-5 e identificado las deformaciones máximas, se procedió a calcular el número de repeticiones para los dos criterios de falla (ver cuadros 4 y 6 del anexo) para luego con la expresión (21) determinar los factores de corrección por presión de inflado. Estos factores calculados fueron graficados en ejes cartesianos donde el eje X representa los rangos de presión de contacto y el eje Y representa los factores de corrección del un eje equivalente por efecto de la presión de inflado, (ver anexo)

## V.6 RESULTADOS Y MODELOS MATEMATICOS PROPUESTOS

Los distintos gráficos obtenidos para las tres regiones del país, donde se muestra la influencia de la presión de inflado de los neumáticos, en función del espesor de la carpeta asfáltica, configuración de ejes y calidad de materiales, muestra la misma tendencia para cada uno de los ejes analizados en costa, sierra y selva. El efecto del CBR es despreciable en la determinación de estos factores. Esto nos ha permitido determinar modelos matemáticos generales o ecuaciones de correlación, que sirven para calcular el factor de corrección por presión de inflado en función de la presión de contacto y el espesor de la carpeta asfáltica. Por lo tanto las ecuaciones se redujeron a 5 igual al número de configuraciones de ejes analizados.

Este modelo matemático, realizado mediante regresiones simples, tiene la siguiente forma:

$$FC = Ax(PC)^B \quad (30)$$

Donde:

$FC$  = Factor de corrección por presión de inflado

$A$  y  $B$  = Constantes de correlación.

$PC$  = Presión de contacto (psi)

Las constantes de correlación  $A$  y  $B$  se encuentran tabuladas en las tablas N° 17, 18, 19 20 y 21 para las 5 configuraciones de ejes y cumplen el requerimiento de mostrar la influencia de la presión de inflado en función del espesor de la carpeta asfáltica a un nivel de confiabilidad del 97% en promedio

**Tabla N° 17 Constantes de correlación - Eje Simple Neumático Simple**

<b>ESPEJOR CA(cm)</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
5.00	3.60E-06	2.906	0.97
7.50	1.24E-04	2.084	0.96
10.00	7.50E-04	1.669	0.98
12.50	2.79E-03	1.363	0.98
15.00	8.35E-03	1.111	0.97
17.50	1.98E-02	0.908	0.97
20.00	4.10E-02	0.740	0.97

CA =Carpeta asfáltica

**Tabla N° 18 Constantes de correlación - Eje Simple Neumático Doble**

<b>ESPEJOR CA(cm)</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
5.00	3.10E-05	2.404	0.97
7.50	8.10E-04	1.649	0.96
10.00	5.05E-03	1.225	0.97
12.50	1.89E-02	0.920	0.96
15.00	5.05E-02	0.691	0.96
17.50	1.06E-01	0.520	0.92
20.00	2.56E-01	0.315	0.82

CA =Carpeta asfáltica

**Tabla N° 19 Constantes de correlación - Eje Tandem Neumático Doble**

<b>ESPEJOR CA(cm)</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
5.00	3.55E-05	2.374	0.97
7.50	8.60E-04	1.636	0.97
10.00	5.20E-03	1.221	0.97
12.50	1.87E-02	0.923	0.97
15.00	4.91E-02	0.700	0.97
17.50	9.83E-02	0.539	0.96
20.00	2.12E-01	0.360	0.83

CA =Carpeta asfáltica

**Tabla N° 20 Constantes de correlación - Eje Tandem Neumático Doble-Simple**

<b>ESPEJOR CA(cm)</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
5.00	2.90E-05	2.421	0.97
7.50	7.60E-04	1.663	0.97
10.00	4.70E-03	1.242	0.97
12.50	1.73E-02	0.940	0.97
15.00	4.60E-02	0.714	0.96
17.50	9.84E-02	0.538	0.92
20.00	2.56E-01	0.315	0.82

CA =Carpeta asfáltica

**Tabla N° 21 Constantes de correlación - Eje Tridem Neumático Doble**

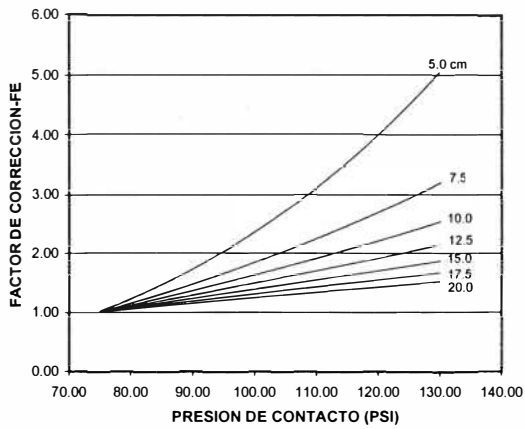
<b>ESPEJOR CA(cm)</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
5.00	4.05E-05	2.343	0.97
7.50	9.28E-04	1.618	0.97
10.00	5.50E-03	1.205	0.97
12.50	1.97E-02	0.910	0.97
15.00	5.17E-02	0.687	0.97
17.50	1.02E-01	0.529	0.97
20.00	1.99E-01	0.374	0.87

CA =Carpeta asfáltica

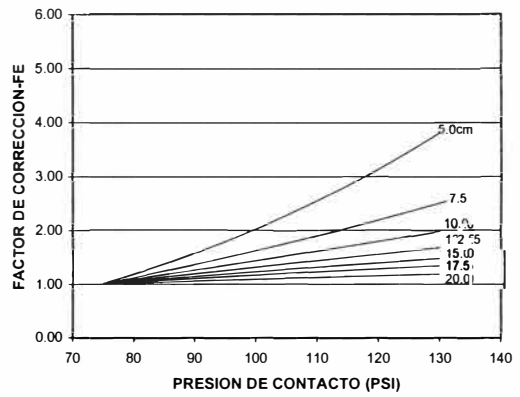
Las curvas de correlación que consideran los parámetros estudiados y que tienen influencia se muestra en los siguientes gráficos.

**FACTORES DE CORRECCION POR PRESION DE INFLADO EN FUNCION DE LA PRESION DE CONTACTO Y DEL ESPESOR DE LA CARPETA ASFALTICA**

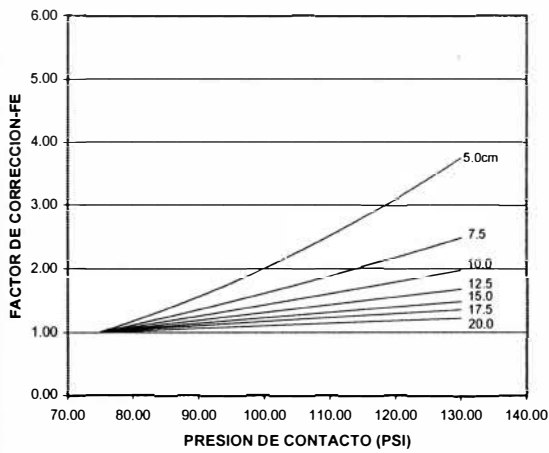
**EJE SIMPLE NEUMATICO SIMPLE**



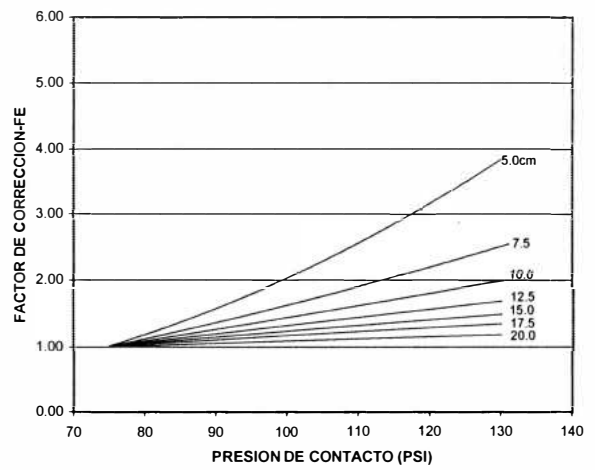
**EJE SIMPLE NEUMATICO DOBLE**



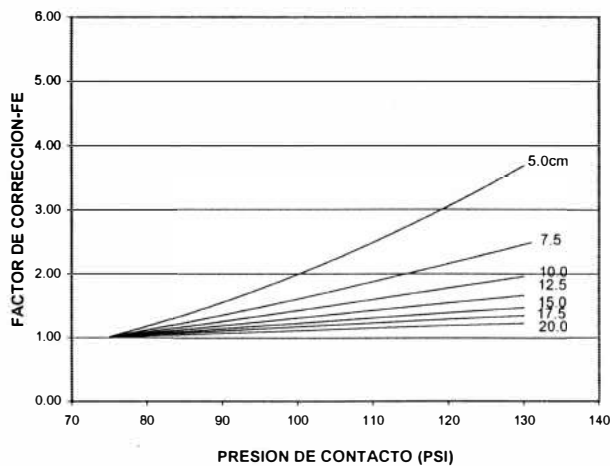
**EJE TANDEM NEUMATICO DOBLE**



**EJE TANDEM NEUMATICO DOBLE-SIMPLE**



**EJE TRIDEM NEUMATICO DOBLE**



Cabe señalar que los factores de corrección por presión de inflado de los neumáticos se han calculado para las cinco configuraciones de ejes y espesores de carpeta asfáltica de 5cm, 7.5cm, 10cm, 12.5cm, 15cm, 17.5cm y 20cm. La variación de los valores del CBR no tiene mayor influencia tal como se muestra en los gráficos del 3 al 11 mostrados en el anexo. De allí que de acuerdo a la tendencia de las curvas se han determinado las correlaciones solo para 5 configuraciones de ejes.

La configuración más crítica viene a ser el eje simple neumático simple a diferencia de las otras configuraciones que muestran un comportamiento homogéneo. Respecto a la influencia de la presión de inflado y el espesor de la carpeta asfáltica, se nota que la mayor incidencia se da en espesores pequeños y va decreciendo a medida que esta aumenta.

Los factores aquí determinados presentan mayor alcance respecto a lo del Instituto del asfalto. El instituto del asfalto considera solo el eje estándar dual mientras que en esta investigación se ha comprobado que el efecto de la presión de inflado es más crítica en una configuración de eje simple con neumático simple. El gráfico del Instituto del asfalto considera espesores de carpeta asfáltica mínimo de 10 cm y máximo de 25 cm. en tanto que en la presente investigación se consideraron espesores desde los 5cm hasta los 20 cm, usados en el país con predominio de las carpetas con espesores menores a los 10 cm.

Se ha encontrado en general que los factores de ajuste del eje equivalente en el manual MS-1 del IA, por efecto de la presión de inflado de los neumáticos, presentan valores conservadores para espesores menores a los 15cm. y valores similares para mayores espesores, y a medida que la presión aumenta ésta variación se incrementa debido a la función cuadrática de su comportamiento. A efectos de comparar adecuadamente los resultados obtenidos en esta investigación con los del Instituto del Asfalto consideramos los valores de entrada que coinciden en ambas investigaciones tales como: eje simple neumático doble, espesores de carpeta entre los 10 y 20 cm y presiones de inflado de 80, 90, 100, 110, 120 y 130psi. Las conclusiones a las que arribamos son las siguientes:

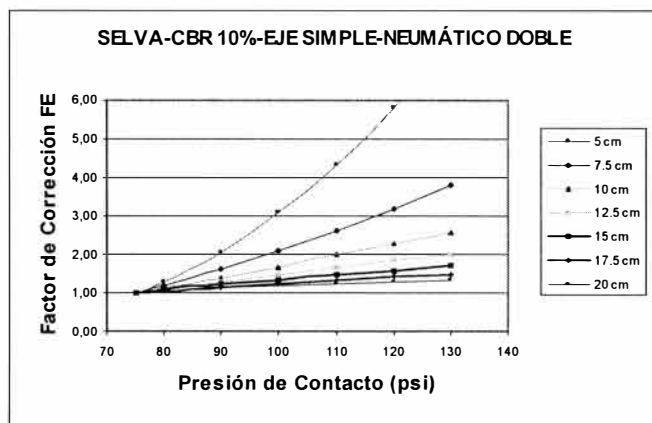
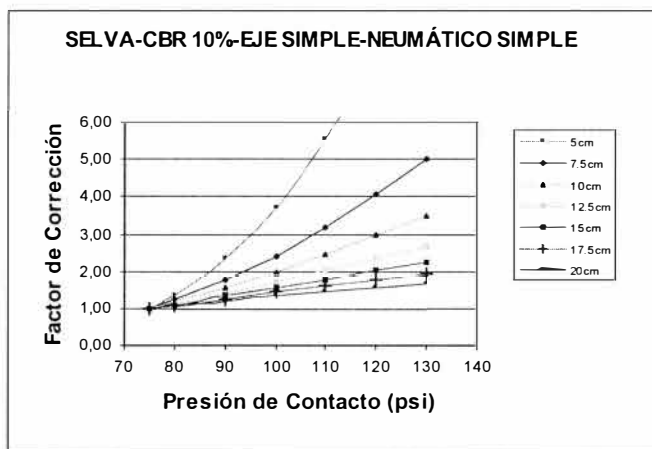
Para presiones entre 80psi-90psi y e=10cm de carpeta asfáltica, el IA presenta valores superiores, respecto a los determinados en la presente investigación, en 20%, para e=12.5cm en 12%, e=15cm en 7%, e=17.5 en 3% y para e=20cm en 1%.

Para presiones entre 100psi-110psi y e=10cm presentan valores superiores en 25%, para e=12.5cm en 20%, e=15cm en 15%, e=17.5 en 3% y para e=20cm en 1%.

Para presiones entre 120psi-130psi y e=10cm presentan valores superiores en 40 %, para e=12.5cm en 30%, e=15cm en 15%, e=17.5 en 5% y para e=20cm en 2%.

A medida que se incrementa la presión la tendencia a la variación es mayor.

Las correlaciones y los modelos matemáticos determinados no involucra las corridas adicionales que se hizo para la condición crítica de la temperatura máxima de la selva. Por otro lado en vista que la variación entre los ejes: dual simple, tandem dual-simple, tandem dual y tridem dual no tienen mucha variación se ejecutó la simulación sólo para las dos condiciones: eje simple neumático simple y otro eje que representa todos los anteriores. Los gráficos que a continuación se mencionan muestran los factores de corrección por efecto de la presión de inflado para la condición crítica (temperatura máxima).



Tal como se pueden observar los factores de corrección son mayores para temperaturas elevadas del aire (35°C constantes), que se supone soportará durante todo el año y por el periodo de diseño del pavimento. Estos incrementos son más críticos en un eje simple neumático simple y carpeta de 5 cm donde la variación llega hasta más del 60%. A mayores espesores la reducción es en el orden del 25 a 20% respecto a las consideraciones iniciales de temperatura en la región de la Selva.

La forma más generalizada de caracterizar la carpeta asfáltica es a través de la teoría elástica o visco-elástica. En la primera se asume que cada capa es homogénea, isotrópica y lineal. La teoría visco-elástica considera la misma teoría lineal pero además considera los esfuerzos y deformaciones a diferentes tiempos de duración de aplicación de la carga.

## CAPITULO VI

### COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO DURANTE SU VIDA ÚTIL POR EFECTO DE LA PRESIÓN DE INFLADO.

Para estimar la influencia de la presión de Inflado de los Neumáticos en la vida útil de los Pavimentos asfálticos se utilizó el modelo HDM III del banco mundial que simula el deterioro de la vía para luego estimar el PSI que es uno de los conceptos fundamentales derivados de las conclusiones del ensayo AASHTO, el cual representa el estado del pavimento. Esta influencia se traduce por la aplicación del factor de corrección por presión de inflado sobre Factor de Equivalencia de Carga del vehículo por eje.

La predicción se ejecuta con 5 tipos de falla: fisuramiento por fatiga, peladuras, formación de baches, ahuellamiento y progresión de la rugosidad siendo esta última la que más influyen en la serviciabilidad de la vía. La progresión de la rugosidad se predice como una función de las fisuras, ahuellamiento y formación de baches.

El deterioro del pavimento es computado como un cambio incremental de la condición del pavimento durante el año de análisis debido al tráfico, medio ambiente y mantenimiento de la condición actual del pavimento.

Es común en el país la determinación analítica del PSI utilizando la expresión establecida por Sayers<sup>(52)</sup> que relaciona la rugosidad con el Índice de Serviabilidad y es la siguiente

$$R = 5.5Ln\left(\frac{5.0}{PSI}\right) \pm 25\% \quad \text{para } R < 12 \quad (31)$$

R = Rugosidad, IRI (International Roughness Index)

PSI = Índice de Serviabilidad Presente.

La transitabilidad de la vía que brinda en un determinado momento el pavimento, se evalúa en función de los valores de PSI, calculados de acuerdo a los rangos de la tabla 22.

**Tabla N° 22 Transitabilidad de la Vía en función del PSI**

PSI	TRANSITABILIDAD
0-1	Muy mala
1-2	Mala
2-3	Regular
3-4	Buena
4-5	Muy Buena

## VI.1 CARACTERISTICAS TECNICAS DE LA VIA A SIMULAR

Se plantearon las características de las tres regiones del país para simular el modelo de deterioro con y sin efecto de la presión de inflado

Los parámetros de calibración del modelo HDM III se hizo sobre la base del entorno ambiental donde se desarrollan. Los volúmenes de tráfico para la simulación se han tomado de las estaciones de peaje de Serpentín (Panamericana Norte), Corcona (Carretera Central) y Ambo (Huánuco) como representativos de las tres regiones del país.

Las características técnicas de la vía, planteadas para la simulación del modelo son las siguientes

**Tabla N° 23 Características Técnicas del tramo de análisis**

<i>CARACTERISTICA</i>	<i>COSTA</i>	<i>SIERRA</i>	<i>SELVA</i>
<i>Tipo de pavimento</i>	<i>CAC</i>	<i>CAC</i>	<i>CAC</i>
<i>Longitud (Km)</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>	<i>1.00</i>
<i>Ancho de calzada (m)</i>	<i>7.2</i>	<i>6.6</i>	<i>6.6</i>
<i>Ancho de bermas (m)</i>	<i>2.4</i>	<i>0.75</i>	<i>1.0</i>
<i>Subidas y bajadas (m/km.)</i>	<i>15</i>	<i>40</i>	<i>20</i>
<i>Curvatura (°/Km)</i>	<i>50</i>	<i>400</i>	<i>60</i>
<i>Altitud (m)</i>	<i>500</i>	<i>4,000</i>	<i>600</i>
<i>Precipitación (m/mes)</i>	<i>0.0001</i>	<i>0.09</i>	<i>0.11</i>
<i>Espesor superficie(mm)</i>	<i>50-200</i>	<i>50-200</i>	<i>50-200</i>
<i>Espesor Base(mm)</i>	<i>150</i>	<i>200</i>	<i>200</i>
<i>Espesor subbase (mm)</i>	<i>200</i>	<i>200</i>	<i>250</i>
<i>Numero Estructural</i>	<i>Variable</i>	<i>Variable</i>	<i>Variable</i>
<i>CBR subrasante %</i>	<i>10</i>	<i>5</i>	<i>3</i>

## VI.2 CALCULO DE LOS FACTORES DE EQUIVALENCIA CARGA

Los factores de equivalencia de carga por eje se han calculado para las cargas legales y tipo de vehículos considerados en el modelo, a través de la siguiente expresión.

$$FE_{eje} = \left( \frac{P_{eje-legal}}{P_{eje-estandar}} \right)^{4.5} \quad (32)$$

Donde

$FE_{eje}$  = factor de equivalencia de carga por eje

$P_{eje legal}$  = carga legal por eje cualquiera



$P_{\text{eje estándar}}$  = carga estándar por eje cualquiera

Por otro lado teniendo en cuenta que el promedio de la presión de contacto es de 100 psi se calculó el factor de corrección (FC) por efecto de la presión de inflado, con el modelo matemático propuesto en la expresión (30). Este análisis se hizo para las diferentes configuraciones de eje. El detalle de este cálculo se muestra en las tablas 7 al 13 del anexo.

La expresión (33) nos permite determinar el factor camión, cuyo resumen se muestra en la tabla N° 24.

$$F_{\text{camión}} = \sum_2 FC_{\text{eje},n} \times FE_{\text{eje},n} \quad (33)$$

Donde

$F_{\text{camión}}$  = factor camión o factor de equivalencia por tipo de vehículo

$FC_{\text{eje},n}$  = factor de corrección por presión de inflado por eje

$FE_{\text{eje},n}$  = factor de equivalencia de carga por eje.

**Tabla N° 24: Factores Camión por tipo de vehículo con y sin la consideración del factor de corrección (FC) por presión de inflado**

TIPO DE VEHICULO(*)	ESPESOR DE CARPETA ASFALTICA (cm)													
	5		7.5		10		12.5		15		17.5		20	
	Sin FC	Con FC	Sin FC	Con FC	Sin FC	Con FC	Sin FC	Con FC	Sin FC	Con FC	Sin FC	Con FC	Sin FC	Con FC
<b>CAMION LIGERO</b>	5.48	11.50	5.48	9.20	5.48	8.14	5.48	7.47	5.48	6.98	5.48	6.6	5.48	6.23
<b>CAMION MEDIO</b>	7.44	15.40	7.44	12.35	7.44	10.94	7.44	10.04	7.44	9.39	7.44	8.91	7.44	8.40
<b>CAMION PESADO</b>	7.10	14.69	7.10	11.79	7.10	10.42	7.10	9.57	7.10	8.97	7.10	8.51	7.10	8.03
<b>CAMION ARTICULADO</b>	5.31	11.13	5.31	8.91	5.31	7.90	5.31	7.23	5.31	6.80	5.31	6.47	5.31	6.11
<b>BUS</b>	4.89	10.33	4.89	8.25	4.89	7.30	4.89	6.70	4.89	6.26	4.89	5.91	4.89	5.59

\* Elegido en base a los tipos de vehículos considerados en el Modelo HDM III

### VI.3 DETERIORO DE LA VIA POR EFECTO DE LA PRESION DE INFLADO

Como se indicó antes, la variable que más influencia tiene tanto en el deterioro como en el cálculo de los costos de operación es la rugosidad de la vía.

La expresión (34) nos permite el cálculo de la progresión de la rugosidad según el modelo HDM III, y está en función de las otras variables de deterioro.

$$\Delta QI_d = 13K_{gp} \left[ 134EMT(SN + 1)^{-5} F_{camión} + 0.114(RDS_b - RDS_a) + 0.0066\Delta CRX_{D+} + 0.42\Delta APOT_d \right] + K_{ge} \cdot 0.023QI_A \quad (34)$$

Donde

- $K_{gp}$  = factor de deterioro de la progresión de la rugosidad.  
 $EMT$  =  $10^{(0.023K_{gp}AGE3)}$   
 $AGE3$  = edad de construcción definido por capas desde el último recapado  
 $SN$  = número estructural modificado por efecto de las fisuras  
 $F_{camión}$  = factor camión  
 $RDS_a$  = desviación estándar del ahuellamiento después del mantenimiento  
 $RDS_b$  = desviación estándar del ahuellamiento antes del mantenimiento  
 $\Delta CRX_d$  = predicción del área total de baches durante el periodo de análisis en %  
 $\Delta APOT_d$  = predicción del área total de baches durante el periodo de análisis en %  
 $K_{ge}$  = factor de deterioro ambiental del incremento de la rugosidad  
= rugosidad de la vía pavimentada antes del mantenimiento previo en (QI)

Los valores de la progresión de la rugosidad de estas corridas y el Índice de Serviciabilidad Presente, se muestran en las tablas N°25 al N°31, para un período de 10 años, diferentes espesores de carpeta asfáltica y para las tres regiones del país. Por otro lado también es posible observar esta progresión de la rugosidad en los gráficos del anexo.

**Tabla N° 25 Rugosidad IRI (m/Km) y PSI de la vía para una carpeta de 5cm**

AÑO	COSTA				SIERRA				SELVA			
	SIN PRESION		CON PRESION		SIN PRESION		CON PRESION		SIN PRESION		CON PRESION	
	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI
2001	3,3	2,7	3,5	2,6	3,5	2,6	3,9	2,5	3,2	2,8	3,2	2,8
2002	3,6	2,6	4,1	2,4	4,2	2,3	4,9	2,1	3,3	2,7	3,5	2,6
2003	3,9	2,5	4,7	2,1	4,9	2,1	6,1	1,6	3,6	2,6	3,8	2,5
2004	4,3	2,3	5,4	1,9	5,8	1,7	7,6	1,3	3,8	2,5	4,2	2,3
2005	4,8	2,1	6,2	1,6	6,8	1,5	9,3	0,9	4,1	2,4	4,6	2,2
2006	5,4	1,9	7,2	1,4	8,1	1,1	11,5	0,6	4,4	2,2	5,1	2,0
2007	6,2	1,6	8,4	1,1	9,8	0,8	11,5	0,6	4,9	2,1	5,7	1,8
2008	7,2	1,4	10,0	0,8	11,5	0,6	11,5	0,6	5,3	1,9	6,4	1,6
2009	8,5	1,1	11,5	0,6	11,5	0,6	11,5	0,6	5,8	1,7	7,1	1,4
2010	10,3	0,8	11,5	0,6	11,5	0,6	11,5	0,6	6,4	1,6	8,0	1,2

**Tabla N° 26 Rugosidad IRI (m/Km) y PSI de la vía para una carpeta de 7.5cm**

AÑO	COSTA				SIERRA				SELVA			
	SIN PRESION		CON PRESION		SIN PRESION		CON PRESION		SIN PRESION		CON PRESION	
	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI
2001	3,2	2,8	3,3	2,7	3,4	2,7	3,6	2,6	3,1	2,8	3,2	2,8
2002	3,4	2,7	3,6	2,6	3,9	2,5	4,2	2,3	3,3	2,7	3,4	2,7
2003	3,7	2,6	4,0	2,4	4,5	2,2	5,0	2,0	3,5	2,6	3,6	2,6
2004	4,0	2,4	4,4	2,2	5,1	2,0	5,9	1,7	3,7	2,6	3,8	2,5
2005	4,3	2,3	4,9	2,1	5,9	1,7	6,9	1,4	3,9	2,5	4,1	2,4
2006	4,8	2,1	5,5	1,8	6,9	1,4	8,3	1,1	4,2	2,3	4,5	2,2
2007	5,3	1,9	6,3	1,6	8,2	1,1	10,0	0,8	4,5	2,2	4,9	2,1
2008	6,0	1,7	7,2	1,4	9,7	0,9	11,5	0,6	4,9	2,1	5,3	1,9
2009	6,8	1,5	8,2	1,1	11,5	0,6	11,5	0,6	5,3	1,9	5,8	1,7
2010	7,8	1,2	9,5	0,9	11,5	0,6	11,5	0,6	5,7	1,8	6,3	1,6

**Tabla N° 27 Rugosidad IRI (m/Km) y PSI de la vía para una carpeta de 10cm**

AÑO	COSTA				SIERRA				SELVA			
	SIN PRESION		CON PRESION		SIN PRESION		CON PRESION		SIN PRESION		CON PRESION	
	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI
2001	3,2	2,8	3,2	2,8	3,4	2,7	3,4	2,7	3,1	2,8	3,1	2,8
2002	3,3	2,7	3,4	2,7	3,8	2,5	3,9	2,5	3,3	2,7	3,3	2,7
2003	3,5	2,6	3,7	2,6	4,2	2,3	4,5	2,2	3,4	2,7	3,5	2,6
2004	3,8	2,5	4,0	2,4	4,8	2,1	5,1	2,0	3,6	2,6	3,7	2,6
2005	4,0	2,4	4,3	2,3	5,4	1,9	5,9	1,7	3,8	2,5	3,9	2,5
2006	4,4	2,2	4,8	2,1	6,3	1,6	6,9	1,4	4,1	2,4	4,2	2,3
2007	4,8	2,1	5,3	1,9	7,2	1,4	8,1	1,1	4,4	2,2	4,5	2,2
2008	5,4	1,9	5,9	1,7	8,4	1,1	9,6	0,9	4,7	2,1	4,9	2,1
2009	6,0	1,7	6,7	1,5	9,8	0,8	11,3	0,6	5,0	2,0	5,3	1,9
2010	6,6	1,5	7,5	1,3	11,4	0,6	11,5	0,6	5,3	1,9	5,6	1,8

**Tabla N° 28 Rugosidad IRI (m/Km) y PSI de la vía para una carpeta de 12.5cm**

AÑO	COSTA				SIERRA				SELVA			
	SIN PRESION		CON PRESION		SIN PRESION		CON PRESION		SIN PRESION		CON PRESION	
	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI
2001	3,1	2,8	3,2	2,8	3,3	2,7	3,3	2,7	3,1	2,8	3,1	2,8
2002	3,3	2,7	3,3	2,7	3,7	2,6	3,7	2,6	3,2	2,8	3,2	2,8
2003	3,4	2,7	3,5	2,6	4,1	2,4	4,2	2,3	3,4	2,7	3,4	2,7
2004	3,6	2,6	3,7	2,6	4,6	2,2	4,7	2,1	3,5	2,6	3,6	2,6
2005	3,9	2,5	4,0	2,4	5,1	2,0	5,4	1,9	3,7	2,6	3,8	2,5
2006	4,2	2,3	4,4	2,2	5,8	1,7	6,2	1,6	4,0	2,4	4,0	2,4
2007	4,5	2,2	4,8	2,1	6,7	1,5	7,1	1,4	4,2	2,3	4,3	2,3
2008	4,9	2,1	5,3	1,9	7,7	1,2	8,3	1,1	4,5	2,2	4,6	2,2
2009	5,4	1,9	5,8	1,7	8,8	1,0	9,6	0,9	4,8	2,1	5,0	2,0
2010	6,0	1,7	6,4	1,6	10,1	0,8	11,1	0,7	5,1	2,0	5,3	1,9

**Tabla N° 29 Rugosidad IRI (m/Km) y PSI de la vía para una carpeta de 15cm**

AÑO	COSTA				SIERRA				SELVA			
	SIN PRESION		CON PRESION		SIN PRESION		CON PRESION		SIN PRESION		CON PRESION	
	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI
2001	3,1	2,8	3,1	2,8	3,3	2,7	3,3	2,7	3,1	2,8	3,1	2,8
2002	3,2	2,8	3,3	2,7	3,6	2,6	3,6	2,6	3,2	2,8	3,2	2,8
2003	3,4	2,7	3,4	2,7	4,0	2,4	4,0	2,4	3,4	2,7	3,4	2,7
2004	3,5	2,6	3,6	2,6	4,4	2,2	4,5	2,2	3,5	2,6	3,5	2,6
2005	3,7	2,6	3,8	2,5	4,9	2,1	5,1	2,0	3,7	2,6	3,7	2,6
2006	4,0	2,4	4,1	2,4	5,5	1,8	5,7	1,8	3,9	2,5	4,0	2,4
2007	4,3	2,3	4,4	2,2	6,3	1,6	6,5	1,5	4,2	2,3	4,2	2,3
2008	4,7	2,1	4,8	2,1	7,2	1,4	7,5	1,3	4,4	2,2	4,5	2,2
2009	5,1	2,0	5,3	1,9	8,1	1,1	8,6	1,0	4,7	2,1	4,8	2,1
2010	5,5	<b>1,8</b>	5,7	<b>1,8</b>	9,2	<b>0,9</b>	9,8	<b>0,8</b>	5,0	<b>2,0</b>	5,1	<b>2,0</b>

**Tabla N° 30 Rugosidad IRI (m/Km) y PSI de la vía para una carpeta de 17.5cm**

AÑO	COSTA				SIERRA				SELVA			
	SIN PRESION		CON PRESION		SIN PRESION		CON PRESION		SIN PRESION		CON PRESION	
	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI
2001	3,1	2,8	3,1	2,8	3,3	2,7	3,3	2,7	3,1	2,8	3,1	2,8
2002	3,2	2,8	3,2	2,8	3,6	2,6	3,6	2,6	3,2	2,8	3,2	2,8
2003	3,3	2,7	3,4	2,7	3,9	2,5	3,9	2,5	3,3	2,7	3,3	2,7
2004	3,5	2,6	3,5	2,6	4,3	2,3	4,4	2,2	3,5	2,6	3,5	2,6
2005	3,7	2,6	3,7	2,6	4,8	2,1	4,9	2,1	3,7	2,6	3,7	2,6
2006	3,9	2,5	3,9	2,5	5,4	1,9	5,5	1,8	3,9	2,5	3,9	2,5
2007	4,2	2,3	4,2	2,3	6,0	1,7	6,2	1,6	4,1	2,4	4,2	2,3
2008	4,5	2,2	4,6	2,2	6,8	<b>1,5</b>	7,0	<b>1,4</b>	4,4	2,2	4,4	2,2
2009	4,8	2,1	4,9	2,1	7,7	1,2	7,9	1,2	4,6	2,2	4,7	2,1
2010	5,2	<b>1,9</b>	5,3	<b>1,9</b>	8,7	1,0	9,0	1,0	4,9	<b>2,1</b>	4,9	<b>2,1</b>

**Tabla N° 31 Rugosidad IRI (m/Km) y PSI de la vía para una carpeta de 20cm**

AÑO	COSTA				SIERRA				SELVA			
	SIN PRESION		CON PRESION		SIN PRESION		CON PRESION		SIN PRESION		CON PRESION	
	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI	IRI	PSI
2001	3,1	2,8	3,1	2,8	3,3	2,7	3,3	2,7	3,1	2,8	3,1	2,8
2002	3,2	2,8	3,2	2,8	3,5	2,6	3,6	2,6	3,2	2,8	3,2	2,8
2003	3,3	2,7	3,3	2,7	3,9	2,5	3,9	2,5	3,3	2,7	3,3	2,7
2004	3,4	2,7	3,5	2,6	4,3	2,3	4,3	2,3	3,5	2,6	3,5	2,6
2005	3,6	2,6	3,6	2,6	4,7	2,1	4,7	2,1	3,7	2,6	3,7	2,6
2006	3,8	2,5	3,8	2,5	5,2	1,9	5,3	1,9	3,9	2,5	3,9	2,5
2007	4,0	2,4	4,1	2,4	5,9	1,7	5,9	1,7	4,1	2,4	4,1	2,4
2008	4,3	2,3	4,3	2,3	6,6	<b>1,5</b>	6,7	<b>1,5</b>	4,3	2,3	4,4	2,2
2009	4,6	2,2	4,6	2,2	7,4	1,3	7,5	1,3	4,6	2,2	4,6	2,2
2010	4,9	<b>2,1</b>	5,0	<b>2,0</b>	8,2	1,1	8,4	1,1	4,8	<b>2,1</b>	4,8	<b>2,1</b>

Las tablas anteriores revelan la progresión de la rugosidad promedio anual así como el Índice de Serviciabilidad Presente con y sin la consideración del efecto de la presión de

inflado de los neumáticos, para diferentes espesores de carpeta asfáltica desde los 5cm hasta los 20 cm. Tal como se encontró en el modelo, el caso crítico se da en carpetas asfálticas delgadas (5 cm) donde el efecto de la presión de inflado puede reducir hasta el 20% la vida útil del pavimento. Para espesores entre los 7.5cm y 12.5 cm esta reducción puede ser de hasta el 10% la Vida útil. Este porcentaje va reduciéndose a medida que se incrementa el espesor de la carpeta asfáltica, llegando a ser casi despreciable a partir de los 15cm de espesor.

Por otro lado las condiciones ambientales, tráfico, geometría de vía, sumadas al efecto de la presión de inflado de los neumáticos dieron lugar a una mayor influencia de la progresión de la rugosidad en la Sierra en 50% mayor al de la Costa y en 60% mayor que la Selva. Cabe aclarar que estos porcentajes son particulares para las condiciones específicas del análisis por el que no se puede generalizar.

#### **VI.4 PLANTEAMIENTO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE LA PRESIÓN DE INFLADO EN CAMIONES PESADOS.**

Los neumáticos son diseñados para soportar una carga mientras rueda. La presión de inflado de un neumático está generalmente especificado para permitir al vehículo llevar una carga útil completa a una velocidad dada sin sobre calentar el neumático.

Consecuentemente cuando el vehículo está parcialmente cargado, descargado o viajando a velocidades reducidas, estos neumáticos están sobreinfladas para las condiciones de operación. Sobreinflar los neumáticos puede contribuir a una variedad de problemas incluido el incremento de la vibración del vehículo, desgaste del rodado en la parte central, ocurrencia de huecos y sobre todo deterioro al pavimento. En nuestro país se dan condiciones especiales de operación debido a que las carreteras circulan por alturas que varían desde el nivel del mar hasta cerca de los 4800 msnm. Por ello es de interés el control de la presión de inflado de los neumáticos y su consideración adecuada en los diseños.

##### **VI.4.1 APLICACION DE FACTORES DE CORRECCIÓN**

Una consideración adecuada de la presión de inflado en los diseños de pavimentos asfálticos, es la aplicación de los factores de corrección a los ejes equivalentes por este efecto. Previamente se hace un inventario de las presiones de inflado de los neumáticos

por un periodo similar a la evaluación de los pesos por eje. Este inventario determinará los tipos de neumáticos y condiciones de desgaste a fin de calcular la presión de contacto que resulta del producto entre el factor (presión de contacto/presión de inflado) por la presión de inflado. Con esta presión de contacto se ingresa al modelo matemático propuesto para determinar el factor de corrección del eje equivalente para cada uno de las configuraciones de ejes encontrados en el inventario.

Los ejes equivalentes así determinados permiten el diseño adecuado de la estructura del pavimento que disipará la magnitud de los esfuerzos, deformaciones y deflexiones adicionales por influencia de la presión de inflado de los neumáticos.

#### **VI.4.2.-SISTEMAS MERITOR PARA EL CONTROL DE LA PRESION VARIABLE DE INFLADO**

Son sistemas que permiten al operador del vehículo optimizar el comportamiento del neumático variando su presión de inflado, en respuesta a los cambios de las condiciones de operación.

Estos sistemas son mecánicos y pueden instalarse sobre los vehículos permitiendo:

Al conductor ajustar y monitorear la presión del neumático cuando el vehículo está en movimiento.

- Tener en cabina controles de ajuste de la presión de inflado.
- Utilizar a bordo un compresor de aire para la presión de inflado del neumático.
- Mantener automáticamente la presión del neumático

Analizando el problema desde el punto de vista de costos de operación, los neumáticos representan en las flotas de camiones el segundo gasto financiero más alto después del combustible.

#### **Sistema Automático de Inflado de Neumáticos**

El sistema automático de neumáticos (Automatic Tire Inflation System), permite comprobar y mantener la presión de aire a un nivel adecuado y constante. La secuencia de mantenimiento es la siguiente:

El aire de la fuente existente del remolque se envía a una caja de control y de allí a cada eje.

Actuando de conductor, los ejes llevan el aire a través de un conjunto de unión rotativa en la punta del eje, que después distribuye el aire a cada neumático según lo necesite (la unión rotativa es la única pieza que tiene movimiento en todo el sistema, por lo tanto, prácticamente no necesita mantenimiento).

Una válvula de protección de presión asegura que el sistema nunca compromete la integridad del sistema de frenos.

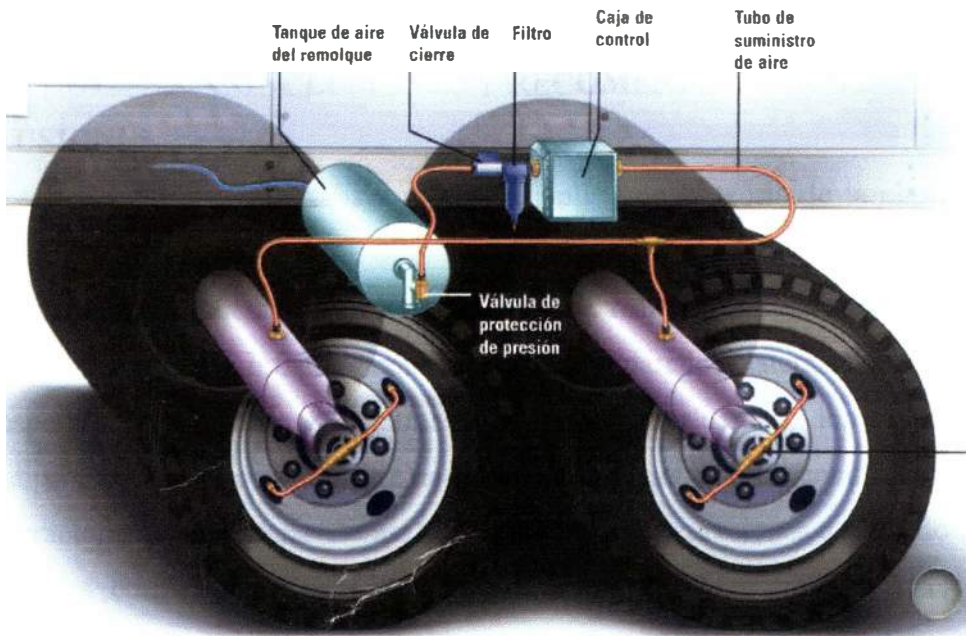
Una luz de emergencia le informa al conductor si llegara a haber una pérdida excesiva de presión de aire, lo cual sirve de advertencia adelantada de la necesidad de mantenimiento o servicio.

Si un neumático llegara a tener una falla, las válvulas de retención en las líneas de alimentación evitarán la pérdida de presión de los demás neumáticos.

La instalación del sistema Meritor se hace fácilmente en cualquier tipo de remolque y algunos fabricantes incluyen el sistema en remolques nuevos inclusive aquellos equipados con ejes de mantenimiento prolongado, ejes fijos o móviles, ejes múltiples y con todo tipo de suspensiones.

Hoy en día los neumáticos de los camiones están diseñadas para recorrer entre 800,000 y 1,100,000 Km, pero la experiencia muestra que la mayoría de estos fallan antes de cumplir este periodo. La razón para el desgaste prematuro es la inapropiada presión de inflado.

Este sistema permite un continuo mantenimiento de la presión de inflado de cada neumático de un eje simple, tandem y tridem. El sistema es ligero y de bajo costo comparado con la pérdida que representa en los costos de operación del desgaste de los neumáticos. Es indestructible bajo condiciones normales de operación.



**Fig. 21 Mecanismo de funcionamiento del sistema mecánico de control de la presión de inflado**



## CAPITULO VII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### CONCLUSIONES

- El desarrollo del presente trabajo se realizó aplicando la teoría de la elasticidad y la teoría de Burmister así como los diferentes criterios de falla de los materiales.
- La indicación de los fabricantes de neumáticos respecto a la recomendación de la presión máxima de inflado, impresos en las paredes laterales del neumático, corresponde a condiciones máximas de carga y velocidad, los cuales en esta investigación se ha encontrado que no siempre corresponde a las condiciones presentes de operación en nuestras carreteras. Por consiguiente las presiones de inflado extremas, no son las correctas. La presión adecuada es aquella que está en función de las condiciones de operación tales como carga, tipo de neumático, velocidad de recorrido y comodidad de manejo. Por lo tanto es de suma importancia educar a los usuarios sobre el adecuado uso de las presiones de inflado.
- Es de suma importancia que se realice un inventario de presiones simultáneamente con el inventario de pesos, ya que se ha encontrado en este estudio que tiene mucha influencia en la determinación de la presión de contacto.
- El inventario de la presión de inflado en las dos carreteras más importantes del país nos revela la costumbre de usar altas presiones de inflado, sin importar que este cargado o no el vehículo. El promedio para vehículos pesados está en el orden de 95 y 105 psi y en buses entre 100 y 110 psi con un máximo de 125 y 135 psi respectivamente, muy por encima al considerado en las pruebas de la carretera experimental de la AASHO.
- La guía AASHTO no considera corrección de diseño por efecto de la presión de inflado, como si lo hace el Instituto del Asfalto, considerando un factor de corrección de 0.90 en general, por el que hay que multiplicar la presión de inflado para obtener la presión de contacto. En este trabajo, se ha encontrado los siguientes factores que permiten calcular la presión de contacto(PC) en función de las cargas y de la presión de inflado(PI):

<i>TIPO DE NEUMATICO</i>	<i>CONVENCIONAL</i>			<i>RADIAL</i>			<i>DESGASTADO</i>		
	<i>60-70</i>	<i>70-80</i>	<i>&gt;90</i>	<i>60-70</i>	<i>70-80</i>	<i>&gt;90</i>	<i>60-70</i>	<i>70-80</i>	<i>&gt;90</i>
<i>RANGO DE PRESIÓN DE INFLADO (PI en psi)</i>									
<i>CARGA LEGAL</i>	<i>1.10</i>	<i>1.00</i>	<i>0.90</i>	<i>1.10</i>	<i>1.00</i>	<i>0.90</i>	<i>0.90</i>	<i>0.85</i>	<i>0.80</i>
<i>CARGA ESTÁNDAR</i>	<i>0.95</i>	<i>0.90</i>	<i>0.85</i>	<i>1.00</i>	<i>0.90</i>	<i>0.80</i>	<i>0.75</i>	<i>0.72</i>	<i>0.70</i>
<i>CARGA &lt; A LA ESTÁNDAR</i>	<i>0.90</i>	<i>0.80</i>	<i>0.75</i>	<i>0.80</i>	<i>0.75</i>	<i>0.65</i>	<i>0.70</i>	<i>0.70</i>	<i>0.70</i>

Del cuadro anterior, los factores de corrección para un neumático convencional y radial a una carga legal son similares, mostrando una ligera diferencia a medida que la carga se reduce. Para la condición de un neumático desgastado, los factores son siempre menores a la unidad lo que significa que siempre la presión de contacto es mayor que la presión de inflado. Por otro lado se observa que el factor de 0.90 considerado por el Instituto del Asfalto es válido para la condición de los valores resaltados en el cuadro anterior.

La Presión de contacto es uno de los datos, con el que se ingresa a los gráficos y/o modelos matemáticos determinados en esta investigación, para calcular el factor de corrección de los ejes equivalentes.

Desde que el aire es un gas, este se contrae en climas fríos y se incrementa en climas calurosos, por ello es necesario considerar la temperatura del medio ambiente en la presión de inflado. Es importante tener en cuenta este detalle cuando se realiza el inventario de presiones en una carretera transversal o en carreteras de la sierra donde hay niveles de temperatura variadas.

El desgaste del neumático es un aspecto importante en la determinación de la presión de contacto. De allí la importancia para que un inventario de presiones de neumáticos contemple: Tipo de neumático, grado de desgaste y además de la carga por eje.

Las huellas que deja la impresión de los neumáticos demuestran que el área de contacto entre el neumático y el pavimento tiene una forma casi circular para cargas pequeñas y va tomando una forma elíptica a medida que se incrementa la carga.

En casi todos los casos aquí analizados, la fatiga crítica resulta ser aquella producida por la deformación radial máxima de tracción que se produce en la interface carpeta asfáltica - base granular.

La fatiga por presión de inflado está controlada más por el espesor de la carpeta asfáltica que por el espesor de la base o de la sub base. Además los diferentes valores de CBR analizados tienen poca influencia en la determinación de los factores de corrección de los ejes equivalentes.

Se demuestra que el efecto de la presión de inflado tiene mayor influencia cuando los espesores de la carpeta asfáltica son pequeños. Cuando los espesores de la carpeta superan los 15cm este efecto se reduce considerablemente.

El tipo de eje más crítico es el eje simple con neumático simple respecto a los otros ejes analizados por generar mayores esfuerzos para una misma presión de inflado.

La ubicación en el pavimento donde ocurre la deformación crítica es variada, y está en función de la carga, tipo de neumático y espesor de la carpeta asfáltica, siendo el común el ubicado a plomo en el centro del neumático.

El efecto de la presión de inflado en las tres regiones del país presenta algunas variaciones, por lo que para efectos prácticos se realizaron regresiones para obtener modelos matemáticos que representen las tres regiones del país.

Se han hecho simulaciones adicionales para considerar la condición crítica, el cual sucede con la temperatura máxima de la selva, resultando los factores de corrección por efecto de la presión de inflado, mayores a las condiciones medias estacionales consideradas inicialmente.

- Se ha encontrado en general que los factores de ajuste del eje equivalente en el manual MS-1 del Instituto del Asfalto, por efecto de la presión de inflado de los neumáticos, presentan valores conservadores para espesores menores a los 15cm. y valores similares para mayores espesores, y a medida que la presión aumenta ésta variación se incrementa debido a la función cuadrática de su comportamiento.
- Tal como se encontró en el modelo, el caso crítico se da en carpetas asfálticas delgadas (5 cm) donde el efecto de la presión de inflado puede reducir hasta el 20% la vida útil del pavimento. Para espesores entre los 7.5cm y 12.5 cm esta reducción puede ser de hasta el 10% la Vida útil. Este porcentaje va reduciéndose a medida que se incrementa el espesor de la carpeta asfáltica, llegando a ser casi despreciable a partir de los 15cm de espesor. Por ello es necesario absorber este efecto con el incremento del espesor o mejorando la calidad de los materiales de la carpeta asfáltica. Por otro lado la influencia de la presión de inflado combinado con otras consideraciones como clima, medio ambiente altitud, etc., es más notoria en la sierra. En la selva y costa tienen un comportamiento parecido bajo las hipótesis analizadas.

La validación del modelo Empírico-Mecanismo del presente, para el cálculo de los factores de corrección del eje equivalente por efecto de la presión de inflado de los neumáticos, se da desde dos puntos de vista: **Un modelo de respuesta y un modelo de comportamiento**. El primero de ellos está referido al cálculo de los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos producidas por la acción de las presiones de inflado variables, para el cual se usó el programa ELSYM 5, de amplio conocimiento, cuyos resultados fueron validados mediante comparaciones con otros modelos existentes y con

resultados de ensayos de campo realizados por la AASHTO según el tomo II de la guía de diseño de 1986. válida también para la guía de 1993.

Por otro lado la tendencia actual de los diseñadores de pavimentos esta orientada al diseño empírico mecanístico, donde inclusive la ASSHTO está en estudios para dar un giro implementando el diseño mecanístico ligado a su ya conocida prueba experimental.

El modelo de comportamiento determina las condiciones en las que se produce el agotamiento estructural del pavimento y está representada por leyes de fatiga, que se basa en datos experimentales de laboratorio y calibraciones de campo. Los datos experimentales de laboratorio se calibraron con las características de las de las mezclas asfálticas usadas en las diferentes carreteras del país.

La calibración del modelo (por efecto de la presión de inflado) en campo, requiere de un seguimiento e inventario de la progresión del agrietamiento y/o ahuellamiento desde el inicio de la construcción hasta su colapso, lo que en el presente se hizo imposible calibrar ya que no se tiene información de como han progresado dichas grietas.

Sin embargo a razón de estas limitaciones de tiempo y costo, en el presente trabajo se han usado calibraciones en campo realizadas por entidades de credibilidad como el Instituto del Asfalto (MS-1 –81) los cuales representan una alternativa viable en el estudio de los pavimentos asfálticos en el país.

En conclusión se propone la ejecución de tramos experimentales y la elaboración de leyes de fatiga propias, de acuerdo a las condiciones de operación, de manera tal, se refleje con mayor certeza el comportamiento de los pavimentos en las tres regiones. Es necesario el esfuerzo mancomunado de Universidades y entidades del estado como el MTC para la realización de tramos experimentales donde se haga un seguimiento de la progresión del deterioro bajo la acción de muchas variables entre ellos la presión de inflado de los neumáticos.

Un trabajo de este tipo a gran escala es la que se está realizando en Hanover, New Hampshire ([www.vtpProject.com](http://www.vtpProject.com)) denominado Cooperative Variable Tire Pressure Demonstration Project con participación de entidades como U.S Army, el CRREL, el FERF, FERIC y el Minesota DOT, donde el propósito principal es la validación en campo del resultado mecanístico que demuestra que los camiones con presiones bajas de inflado reducen el daño por fatiga e incrementan la vida útil del pavimento. Este tramo experimental se inició en junio de 1996 y tiene programado finalizar en noviembre del 2001.

## RECOMENDACIONES

La recomendación que surge a razón de las conclusiones anteriores, es que la variable presión de inflado de los neumáticos debe ser considerado por los diseñadores de pavimentos en el país. El método de diseño que mayor aplicación tiene en el país es de la AASHTO, donde no se considera la aplicación de la presión de inflado; sin embargo en la guía de 1993 se menciona que el diseñador debe guardar un factor de seguridad debido a este efecto. Por otro lado también se hace un planteamiento de un diseño empírico – mecánico, donde esta variable no podrá estar ausente en este futuro método de diseño, que tiene programado salir el 2003. El método que si considera la presión de inflado como variable de diseño es la del Instituto del Asfalto.

Debido al efecto de la presión de inflado de los neumáticos y a la dificultad de su control en las estaciones de pesaje; es de suma importancia la regulación de un Sistema Automatizado del control de presión de inflado de los neumáticos, incorporado a las flotas de vehículos pesados y buses, porque les representa ahorros en sus costos de operación y a la sociedad el ahorro en el mantenimiento de la vía.

Se recomienda realizar investigaciones referidas al uso de neumáticos de base ancha que en un futuro no muy lejano se estarían implementando en el país.

Se recomienda realizar inventarios para determinar la real influencia de la presión atmosférica sobre la presión de inflado de los neumáticos.

Se sabe que la hipótesis planteada y aplicada en el presente estudio es la teoría elástica lineal. Sin embargo se recomienda en futuras investigaciones la verificación en un análisis no lineal y con un comportamiento visco-elástico de la carpeta asfáltica.

La problemática del diseño de pavimentos en el país requieren investigaciones referentes a la magnitud de las cargas por neumático, por eje de rodado simple o doble, la separación de ejes, su configuración, la suspensión del vehículo, velocidad del vehículo, tipo de neumático y el aporte del presente trabajo dentro de todo este contexto es la variable **presión de inflado de los neumáticos.**

## BIBLIOGRAFIA

1. AASHTO - "AASHTO Interim Guide For Desing Of Pavement Structures" 1,993. Washington D.C. AASHTO 1993.
2. AASHTO "AASHTO Interim Guide For Desing Of Pavement Structures" Volumen 2. Washington D.C. AASHTO 1986.
3. A.C. Collop – D. Cebon – "Parametric Study of Factors Affecting Flexible Pavement Performance". ASCE November 1,995.
4. Anandarajah A.– Khaled Sobhan "Incremental Stress-Strain Behavior of Granular Soil" Journal of Geotechnical Engineering Vol 121 No 1 January 1995.
5. Anastasios M. Ioannides, Lev Khazanovich "General Formulation for Multilayered Pavement Systems" – Journal Of Transportation Engineering January/February 1998
6. ASPHALT INSTITUTE. "Diseño de Pavimentos." Manual Series N°1 (MS-1). Febrero 1991.
7. Bisso Fernández Ricardo E. - "Los Asfaltos y sus Aplicaciones"– Petróleos del Perú- Lima 1998.
8. C.A. Bell. – Z.K. Xu - "Oregon Study looks at Potential Pavement Damage from High Pressure Truck tires and single-tired axles". 1,986.
9. E. J. Yoder -"Principles of Pavement Design" - Chapman & Hall, Ltd – New York – 1,959.
10. Development of the original Method for Higway Design ASCE pp 421-467.
11. Dormon G.M-C.T. Metcalf-"Design Curves for Flexible Pavements Based Layered System Theory" HBR pp 69-84
12. D.Stor "The Control of axial weight and Gross Vehicle Weght on Slovene Roads" - The Motorway Company in the Republic of Eslovenia – DARS - 1998.
13. Egor P. Popov – "Introducción a la mecánica de sólidos" – Editorial Limusa – 1,980.
14. Federal Highway Administration – Elsym 5. User's Manual Interactive Microcomputer Versión.
15. Fernández Júnior José Leomar y col. "Impactos Económicos dos Efeitos das Solicitacoes do Trafego sobre o Desempenho de Pavimentos no Brasil". 8vo. Congreso Ibero - Latinoamericano del Asfalto. Santa Cruz de la Sierra - Bolivia. Noviembre 1996.

16. Fernandez Odóñez Hernan Otoniel. - “Calidad Total Aplicado al Mantenimiento Vial” – Instituto Nacional de Vias de Colombia – Abril de 1,995.
17. Garcia Lopez Hector Alberto.” Principios básicos del diseño de Pavimentos” – Louis Berger Intyernational, Inc. 9ª Congreso Iberoamericano del Asfalto. Asunción Paraguay-Nov – 1997.
18. Hogentogler C.A. and C Terzagui 1929-“Interrelationship of load and subgrade. Public Road. Pp 37-64
19. Jairo A. Espejo M. – “Verificación del Factor de Equivalencia de carga por Eje F.E.C.E. la Calera –Guasca”. II Congreso Nacional del Asfalto. – Lima, Noviembre de 1,998.
20. Jikk Ovik – Bjorn Birgisson – David E. Newe Omb. “Characterizing Seasonal Variations in Flexible Pavement Material Properties” Transportation Research Board 78ª Annual Meeting. Washington January 10-14,1999.
21. Kansas State Highway Commision 1947. “Design of Flexible Pavement Using the Triaxial Compression Test Bulletin 8 HRB”
22. Kerkoven, R.E and G.M Dormon – “Some Considerations on the California Bearing Ratio Method For the Design of Flexible Pavements” Shell Bitumen Monograph. 1953.
23. Kraemer Carlos - Morilla Ignacio –Miguel Angel del Val –Carreteras II Colección Escuelas, Madrid 1999.
24. Marcela Balige. ”El ahuellamiento en Mezclas dosificadas con diferentes cementos asfálticos” – Servicio Técnico YPF S.A. 9ª Congreso Iberoamericano del Asfalto.Asunción Paraguay-Nov – 1997.
25. Maria de Lourdes Antunes “Analysis of Road Pavements under Dynamic Axle Loads” Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Portugal – 1998.
26. Michael Divinsky – Ilan Ishai – Moshe Livneh “Probabilistic Aproach to Pavement Design Based on Generalized California Bearing Ratio Equation”. ASCE Novemver 1,998.
27. Murgueitio Valencia Alfonso – “Metodología para la Realización de Estudios de Rehabilitación de Pavimentos Flexibles”. 10º Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos.
28. Myung Chan Roo “A study standarization of thickness Design For Asphalt Concrete Pavement” Highway Research Center - Asphalt Pavement.
29. Oficina Central de Calidad DGC MTCVC “Desarrollo de un mapa de áreas geográficas del Perú basadas en las condiciones de clima y temperatura del Pavimento, para la



- selección de los grados del asfalto SUPERPAVE” - Décimo congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto- Sevilla España del 1 al 6 de noviembre de 1999.
30. Pell P.S. “Keynote Lecture-Pavements Materials pp36-70”
  31. Per Ullidtz – Pavement Analysis – Tokio 1987.
  32. Ponce H. Marco A. – “Utilización del Penetrómetro Dinámico de Cono Portátil en la caracterización y evaluación de los suelos en el diseño estructural de pavimentos flexibles de caminos de tránsito medio y bajo”. 6º Congreso latinoamericano del Asfalto.
  33. Prithvi S. Kandhal – Stephen A. Cross “Evaluation of Bituminous Pavements For High Pressure Truck Tires” National Center For Asphalt Technology – Pennsylvania Department of Transportation. Final Report december 1,990.
  34. Punya P. Khanal-Michael S. Mamlouk “Program BIMODPAV for Analysis of Flexible Pavements”. ASCE February 1,987.
  35. Raj V. Siddharthan – Jian Yao – Peter E. Sebaaly “Pavement Strain From Moving Dynamic 3D Load Distribution”. ASCE ,. November 1,998.
  36. Report of Commitee on Clasification of Materials for Subgrade and Granular Type Roads. HRB Vol. 25 pp 376-384
  37. Repsol – Tecnología de REPSOL sobre Asfaltos. Presentación a la Asociación Peruana de Caminos – Julio 1998.
  38. Rodriguez Deras Jorge A. “Incidencia de los agregados en el comportamiento de las carpetas asfálticas” – Centro de investigaciones Geotécnicas – Ministerio de Obras Públicas – Colombia –1,996.
  39. R.Scott Artin, P.E. “1,998 Pavement Condition Report” – Alaska Department of Transportation & Public Facilities. – 1,998.
  40. Sanchez Sabogal Fernando – “Cien Fórmulas útiles para el Ingeniero de Pavimentos” – Mayo de 1992.
  41. Shell International Petroleum Company limited, Shell Pavement Design Manual. London 1978.
  42. Sistema Nacional de Mantenimiento de Carreteras SINMAC – Reglamento de peso y dimensión vehicular para la circulación en le Red Vial Nacional – Lima, Junio 1998.
  43. S. Timoshenko – Teoría de placas y láminas – Urmo, S.A. Ediciones. – 1,975.
  44. Souza J.B. – “Dinamic Loads: Effects on the performance of Asphalt Concrete Pavements” Transportation Research Board.



45. Steven J.Harris – Bernard Eckmann “Pavimentos Flexibles, mejores por diseño”  
Décimo congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto- Sevilla España del 1 al 6 de  
noviembre de 1999.
46. Susan R.Bigl and Richard L. Berg. “Modeling of Mn/ROAD Test Sections with the  
CRREL Mechanistic Pavement Design Procedure” Special Report 96-21 CRREL –  
Minesota Setiembre de 1,996.
47. Timoshenko y J.N.Goodier – Teoría de la Elasticidad - 1968
48. Transport Research. - Weing in Motion of Road Vehicles. - 1998.
49. TRB Transportation Research Board National Academy of Sciences.”Layered  
Pavement Systems”. Washington, D.C. 1981.
50. US. Army Corps of Engineers – “Method of Tekneas Design of Flexible Highway  
Pavements” Technical Report N° 3-582.
51. US Navy, - “Airfiel Pavement. Technical Publication “,1953
52. Watanada T. The Hihgway Design and Maintenance Standards Model.Volumen I.  
Published for Tha Worl Bank.Washington D.C, 1987
53. Wayne K. Y Wendy L. Pechman- “Estimación del daño causado a los pavimentos por  
los camiones pesados en Nueva Inglaterra”
54. Woojin Lee- N.C.Bohra “Resilent Modulus of Cohesive Soils”- Journal of  
Geotechnical And Geoenvironmental Engineering Vol 123 No 2 February 1997.
55. XI Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos – Ingeniería de Pavimentos –  
Junio de 1,997.
56. Yang H. Huang. – Pavement Analysis and Design. Pag 2 y 3 – USA 1993.

## **LISTA DE TABLAS**

- Tabla N° 1 Códigos de velocidad en neumáticos
- Tabla N° 2 Características de la carga y presión de inflado de los neumáticos del  
camión usado en la evaluación
- Tabla N° 3 Características de la carga y presión de inflado de los neumáticos del  
camión usado en la evaluación
- Tabla N° 4 Relación entre la presión de contacto y presión de inflado en un  
neumático convencional tipo 1
- Tabla N° 5 Relación entre la presión de contacto y presión de inflado en un  
neumático radial.

- Tabla N° 6 Relación entre la presión de contacto y presión de inflado en un neumático convencional tipo 2
- Tabla N° 7 Relación entre la presión de contacto y presión de inflado en un neumático convencional desgastado.
- Tabla N° 8 Factores de Corrección de la presión de la presión de inflado.
- Tabla N° 9 Temperatura de la carpeta asfáltica
- Tabla N° 10 Módulo elástico representativo de Carpeta asfáltica – Región Costa.
- Tabla N° 11 Módulo elástico representativo de Carpeta asfáltica – Región Sierra.
- Tabla N° 12 Módulo elástico representativo de Carpeta asfáltica – Región Selva.
- Tabla N° 13 Módulo elástico de Carpeta asfáltica – Región Selva.(Condición crítica)
- Tabla N° 14 Módulos Elásticos de Subrasante, Subbase y Base – Tres Regiones.
- Tabla N° 15 Espesores de las diferentes capas del pavimento.
- Tabla N° 16 Coeficiente “P” de la ley de fatiga
- Tabla N° 17 Constantes de correlación - Eje Simple Neumático Simple
- Tabla N° 18 Constantes de correlación - Eje Simple Neumático Doble.
- Tabla N° 19 Constantes de correlación - Eje Tandem Neumático Doble
- Tabla N° 20 Constantes de correlación - Eje Tandem Neumático Doble-Simple
- Tabla N° 21 Constantes de correlación - Eje Tridem Neumático Doble
- Tabla N° 22 Transitabilidad de la Vía en función del PSI.
- Tabla N° 23 Características Técnicas del tramo de análisis.
- Tabla N° 24 Factores Camión por tipo de vehículo con y sin la consideración del factor de corrección (FC) por presión de inflado
- Tabla N° 25 Rugosidad de la vía para una carpeta de 5cm
- Tabla N° 26 Rugosidad de la vía para una carpeta de 7.5cm
- Tabla N° 27 Rugosidad de la vía para una carpeta de 10cm
- Tabla N° 28 Rugosidad de la vía para una carpeta de 12.5cm
- Tabla N° 29 Rugosidad de la vía para una carpeta de 15cm
- Tabla N° 30 Rugosidad de la vía para una carpeta de 17.5cm
- Tabla N° 31 Rugosidad de la vía para una carpeta de 20cm

## **LISTA DE FIGURAS**

- Figura N° 1 Estaciones de pesaje de Pasamayo y Cut Off
- Figura N° 2 Partes externas de un neumático

- Figura N° 3 Detalle de capas en neumáticos convencionales y radiales
- Figura N° 4 Comportamiento de neumáticos convencionales y radiales
- Figura N° 5 Terminología de los neumáticos.
- Figura N° 6 Tipo de vehículos, configuración de ejes y neumáticos.
- Figura N° 7 Desgaste típico de neumáticos por efecto de una baja presión de inflado.
- Figura N° 8 Desgaste típico de neumáticos por efecto de una alta presión de inflado.
- Figura N° 9 Impresión de neumático convencional tipo 1 y neumático radial, con una carga por neumático de 3,500kg y presión de inflado variable.
- Figura N° 10 Impresión de neumático convencional tipo 1 y neumático radial, con una carga por neumático de 3,000kg y presión de inflado variable.
- Figura N° 11 Impresión de neumático convencional tipo 1 y neumático radial, con una carga por neumático de 2,250kg y presión de inflado variable.
- Figura N° 12 Impresión de neumático convencional tipo 1 y neumático radial, con una carga por neumático de 1,485kg y presión de inflado variable.
- Figura N° 13 Impresión de neumático convencional tipo 2 y neumático gastado, con una carga por neumático de 3,000kg y presión de inflado variable.
- Figura N° 14 Impresión de neumático convencional tipo 2 y neumático gastado, con una carga por neumático de 2,250kg y presión de inflado variable.
- Figura N° 15 Impresión de neumático convencional tipo 2 y neumático gastado, con una carga por neumático de 1,500kg y presión de inflado variable.
- Figura N° 16 Presión de contacto en neumáticos con baja y alta presión de inflado.
- Figura N° 17 Estructuras representativas de pavimentos asfálticos.
- Figura N°18 Deformaciones unitarias en las diferentes capas del pavimento.
- Figura N°19 Configuración de ejes y ubicación de puntos analizados
- Figura N° 20 Esquema de cálculo analítico de las deformaciones unitarias en las diferentes capas del pavimento
- Figura N° 21 Mecanismo de funcionamiento del sistema mecánico de control de la presión de inflado