UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE MATRIZ CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ

Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico Automotriz

TÍTULO:

"ESTUDIO DE LA RIGIDEZ RADIAL ESTÁTICA DEL NEUMÁTICO EN VEHÍCULOS DE TURISMO Y DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA SU OBTENCIÓN SEGÚN LAS CARACTERÍSTICAS DEL NEUMÁTICO"

AUTORES:

Freddy Marcelo Chalco Criollo

Eddy Gabriel Sinchi Viñanzaca

DIRECTOR:

Ing. Paúl Méndez

Cuenca, Julio 2016

CESIÒN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Freddy Marcelo Chalco Criollo con C.I. 010479685-9 y mi compañero Eddy Gabriel Sinchi Viñanzaca con C.I. 010520735-1, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos los autores del trabajo titulado "**ESTUDIO DE LA RIGIDEZ RADIAL ESTÁTICA EN VEHÍCULOS DE TURISMO Y DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA SU OBTENCIÓN SEGÚN LAS CARACTERÍSTICAS DEL NEUMÁTICO***",* mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de ingeniería automotriz en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la ley de propiedad intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de Universidad Politécnica Salesiana.

Nombre. Freddy Marcelo Chalco Criollo

C.I. 010479685-9

Nombre. Eddy Gabriel Sinchi Viñanzaca

C.I. 010520735-1

Fecha 14 de Octubre de 2016

CERTIFICACIÓN DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA

Nosotros, Chalco Criollo Freddy Marcelo y Sinchi Viñanzaca Eddy Gabriel, declaramos que el trabajo de grado que presentamos, es de nuestra autoría y basada en el proceso de investigación establecida en la carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, Julio de 2016

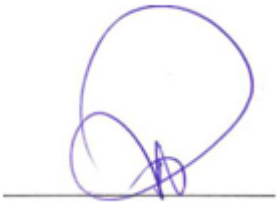
Chalco Criollo Freddy Marcelo

Sinchi Viñanzaca Eddy Gabriel

CERTIFICADO

Certifico que el presente Proyecto Técnico "ESTUDIO DE LA RIGIDEZ RADIAL ESTÁTICA DEL NEUMÁTICO EN VEHÍCULOS DE TURISMO Y DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA SU OBTENCIÓN SEGÚN LAS CARACTERÍSTICAS DEL NEUMÁTICO", realizado por los estudiantes: Chalco Criollo Freddy Marcelo y Sinchi Viñanzaca Eddy Gabriel, fue dirigido por mi persona.

Cuenca, Julio de 2016



Ing. Paúl Wilfrido Méndez Torres

AGRADECIMIENTO

En primera instancia agradezco a mi Dios por darme salud y vida, a mi padre Luis Chalco que me a enseñado a luchar por mis ideales, a mi madre Margarita Criollo por darme ese aliento a seguir adelante cada día, a mis hermanos que gracias a su apoyo y unión me han impulsado a continuar a pesar de las dificultades, también agradezco a la persona que cohabita mis anhelos mi Amada Michelle Ordoñez.

De manera muy especial agradezco a mi compañero Eddy Gabriel Sinchi por darme a comprender que en la vida el primer paso es el más difícil pero del que vamos a estar orgullosos toda una vida.

Freddy Chalco

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi Familia que siempre me apoya y a mi Dios que me brinda sus días para vivir y de esta manera poder presentar este proyecto, a mi mami Rosa Viñanzaca porque me enseña el valor del trabajo y el esfuerzo, a mi papi Néstor Sinchi porque me enseña el valor de la paciencia y la sabiduría, a mi hermano Juanfer y a mi cuñada Kaluchis que me han obsequiado un tesorito muy importante en mi vida mi sobrina Angelina y a una señorita muy bonita Tania Narváez que siempre ha estado presente apoyándome incondicionalmente.

De manera especial agradezco al Ing. Paul Méndez por formularnos el tema de nuestro proyecto, por el cual nos podemos graduar, y a mi compañero Freddy Chalco pues con sus ideas y las mías aprendimos más que un trabajo de titulación, aprendimos a observar e imaginar las mejores ideas que nos llevaran al éxito.

Gabriel Sinchi

DEDICATORIA

El presente proyecto de titulación va dedicado a los estudiantes, docentes y personas que buscan interés sobre el campo que incorpora el neumático, del presente proyecto se desglosan temas importantes de investigación, que pudiesen ofrecer una iniciativa para inmiscuirse en el comportamiento del neumático relacionado a la seguridad como factor primordial.

Freddy Chalco

DEDICATORIA

Este proyecto de grado se lo dedico a los estudiantes y futuros Ingenieros de la Universidad Politécnica Salesiana, para que lo revisen, analicen y puedan mejorarlo, de tal manera que puedan surgir nuevas ideas y propuestas, pues como proyecto de titulación fue estresante e interesante, pero llevado a otro nivel podría ser una excelente oportunidad para satisfacer las necesidades de la sociedad y formar parte de un gran negocio.

Gabriel Sinchi

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA I
CERTIFICADO III
AGRADECIMIENTO IV
AGRADECIMIENTO V
DEDICATORIA VI
DEDICATORIA VII
ÍNDICE GENERAL VIII
RESUMEN XIII
ABSTRACT XV
1. INTRODUCCIÓN XVII
2. PROBLEMA XVIII
3. OBJETIVOS XX
3.1. OBJETIVO GENERAL XX
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS XX
4. ESTADO DEL ARTE 1
5. CARACTERIZACION DEL NEUMÁTICO PARA VEHÍCULOS DE TURISMO 7
5.1. EL NEUMÁTICO 7
5.2. PARTES DEL NEUMÁTICO 7
5.3. CLASIFICACIÓN DE LOS NEUMÁTICOS 8
5.3.1. Neumáticos diagonales 9
5.3.2. Neumáticos radiales 9
5.4. IDENTIFICACIÓN DE LOS NEUMÁTICOS. 9
5.5. DESIGNACIÓN DIMENSIONAL. 10
5.6. NEUMÁTICOS MÁS UTILIZADOS EN LA ACTUALIDAD 13
5.7. RIGIDEZ RADIAL ESTÁTICA 13
6. MARCO METODOLÓGICO 15
6.1. NEUMÁTICOS EMPLEADOS 15
6.2. PARAMETROS PARA LA OBTENCION DE DATOS DE DEFLEXIÓN 16
6.2.1. Presión de inflado del neumático 16

6.2.2. Carga 17
6.2.3. Normas 17
6.3. MÉTODO PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS 19
6.3.1. Método carga-deflexión estática 20
6.4. INSTRUMENTOS DE MEDICION Y VERIFICACIÓN 20
6.4.1. Reloj comparador 20
6.4.2. Calibre 21
6.4.3. Flexómetro 22
6.4.4. Escuadra 23
6.4.5. Nivel 23
6.4.6. Medidor de presión de mano 24
6.5. INSTRUMENTOS AUXILIARES PARA LA MEDICIÓN 25
6.5.1. Soporte de sujeción para el neumático 25
6.6. PROCEDIMIENTO DEL MÉTODO EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS (METODOLOGÍA DE ENSAYO) 25
7. ESTUDIO EXPERIMENTAL ENTRE LAS VARIABLES CARGA, PRESIÓN, DEFLEXIÓN Y LAS DIMENSIONES DEL CONJUNTO LLANTA-NEUMÁTICO .28
7.1. PRIMER APARTADO: Variables de influencia para el estudio de la rigidez radial estática (carga, presión y deflexión) 28
7.1.1. Análisis de la influencia de la deflexión a diferentes presiones de inflado y fuerzas verticales aplicadas 29
7.1.2. Ajustes en la relación de la deflexión-fuerza vertical para diferentes presiones de inflado del neumático 32
7.1.3. Transformación de la variable dependiente 37
7.1.4. Ajuste de la transformación en la relación de la deflexión-fuerza vertical para diferentes presiones de inflado del neumático 38
7.1.5. Ajuste en la relación de la ordenada en el origen con la presión de inflado del neumático. 44
7.2. SEGUNDO APARTADO: Geometría del neumático 47
8. PLANTEAMIENTO DEL MODELO MATEMÁTICO PARA LA OBTENCIÓN DE LA RIGIDEZ RADIAL ESTÁTICA DEL NEUMÁTICO 50
8.1. Expresiones resultantes de deflexión y carga 50
9. VALIDACIÓN DEL MODELO DE LA RIGIDEZ RADIAL ESTÁTICA 51

10. CONCLUSIONES 57
11. RECOMENDACIONES 58
BIBLIOGRAFÍA 58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: *Sección Transversal de un Neumático Radial.* 8
Figura 2: *Sección de un Neumático Radial y Diagonal.* 9
Figura 3: *Identificación del Neumático.* 10
Figura 4: *Sección dimensional del neumático* 11
Figura 5: *Neumáticos radiales* 13
Figura 6: *Modelo lineal del neumático.* 14
Figura 7: *Curvas deformación-carga de un neumático diagonal de dimensiones 5,6 x 13.* 15
Figura 8: *Reloj comparador analógico.* 21
Figura 9: *Calibre o pie de rey.* 22
Figura 10: *Flexometros de distintas longitudes.* 22
Figura 11: *Escuadras metálicas.* 23
Figura 12: *Nivel* 23
Figura 13: *Medidor de presión de mano.* 24
Figura 14: *Base de sujeción para el neumático de prueba.* 26
Figura 15: *Discos (50 Lbs c/u).* 26
Figura 16: *Conjunto base sujeción, neumático con el peso establecido.* 27
Figura17: *Relación experimental entre deflexión y la carga aplicada, para las diferentes presiones.* 29
Figura18: *Relación experimental entre deflexión y la carga aplicada, para las diferentes presiones.* 30
Figura 19: *Relación experimental entre deflexión y la carga aplicada. Neumático R15.* 30
Figura 20: *Relación experimental entre deflexión y la carga aplicada, para las diferentes presiones.* 31
Figura 21: *Relación experimental entre deflexión y la carga aplicada ajustada linealmente. Neumático R13.* 32
Figura 22: *Relación experimental entre deflexión y la carga aplicada ajustada linealmente. Neumático R14.* 33
Figura 23: *Relación experimental entre deflexión y la carga aplicada ajustada linealmente. Neumático R15.* 34
Figura 24: *Relación experimental entre deflexión y la carga aplicada ajustada linealmente. Neumático R16.* 35
Figura 25: *Transformación en la relación experimental entre deflexión y la carga aplicada. Neumático R13.* 38
Figura 26: *Ajuste lineal de la transformación en la relación experimental entre deflexión y la carga aplicada. Neumático R13. Presión de inflado 260 kpa.* 38
Figura 27: *Transformación en la relación experimental entre deflexión y la carga aplicada. Neumático R14.* 39
Figura 28: *Transformación en la relación experimental entre deflexión y la carga aplicada. Neumático R15.* 40
Figura 29: *Transformación en la relación experimental entre deflexión y la carga aplicada. Neumático R16.* 41
Figura30: *Ajuste lineal de la transformación en la relación experimental entre deflexión y la carga aplicada. Neumático R16. Presión de inflado 260 kpa.* 42
Figura31: *Relación experimental entre la ordenada en el origen y la presión de inflado del neumático ajustada linealmente. Neumático R13.* 43
Figura 32: *Ajuste lineal de la transformación en la relación experimental entre deflexión y la carga aplicada. Neumático R14. Presión de inflado 260 kpa.* 39
Figura33: *Relación experimental entre la ordenada en el origen y la presión de inflado del neumático ajustada linealmente. Neumático R15.* 44
Figura 34: *Relación experimental entre la ordenada en el origen y la presión de inflado del neumático ajustada linealmente. Neumático R16.* 44
Figura 35: *Sección dimensional del neumático con la incorporación de la deflexión y deformación del conjunto llanta neumático.* 46
Figura 36: *Ajuste lineal de la transformación en la relación experimental entre deflexión y la carga aplicada.* 41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla1: *Neumáticos utilizados para el planteamiento del modelo matemático de rigidez radial estática.* 16
Tabla2: *Valores correspondientes a la transformaciones de box cox.* 36
Tabla 3: *Pesaje del vehículo de prueba 1.* 50
Tabla 4: *Pesaje del vehículo de prueba 2.* 51
Tabla 5: *Deformaciones conjunto llanta neumático.* 52
Tabla 6: *Designación de los neumáticos utilizados.* 52
Tabla 7: *Valor de a según el tipo de rin y la presión de inflado del neumático.* 52
Tabla 8: *Resultados de carga vehículo 1.* 53
Tabla 9: *Resultados de carga vehículo 2.* 53
Tabla 10: *Resultados de Rigidez radial estática para vehículo 1.* 54
Tabla 11: *Resultados de Rigidez radial estática para vehículo 2.* 54

RESUMEN

El presente proyecto trata sobre el estudio de la rigidez radial estática del neumático y el desarrollo de un modelo matemático para su obtención según las características del neumático (Dimensiones del neumático), la revisión de fuentes bibliográficas muestra que la rigidez radial estática del neumático está dada por la carga aplicada en el conjunto llanta neumático dividido para la deflexión producida, la relación carga-deflexión ante diferentes presiones de inflado del neumático presenta un comportamiento lineal y es el parámetro principal para el desarrollo del presente proyecto.

La obtención de la carga que se ejerce en un tipo de neumático conjuntamente con la medición de la deflexión producida por ésta, permiten obtener el valor de rigidez radial estática del neumático, por lo tanto el procedimiento a seguir en el presente proyecto en primera instancia es obtener una expresión que proporcione el valor de carga que soporta el conjunto llanta-neumático a distintas presiones de inflado y que esta incorpore las características geométricas del mismo. Con la implementación de un método experimental, que consiste en colocar carga al conjunto llanta neumático y registrar el valor de deflexión producida, se relacionan las variables de influencia y posteriormente se analiza las gráficas de la relación carga (variable independiente), deflexión (variable dependiente) y mediante el ajuste pertinente (lineal) se obtiene las expresiones de dicha relación.

En el análisis de la relación se observa datos atípicos, el ajuste da como resultado expresiones que no presentan características semejantes para cada presión de inflado del neumático en valores de pendiente y ordenada en el origen, por lo cual el siguiente paso es linealizar el comportamiento mediante una trasformación de la variable dependiente, una transformación adecuada es mediante el uso del comando box cox, el ajuste de esta relación da como resultado un valor de pendiente casi constante para las distintas presiones de inflado del neumático. Esta constante queda establecida posteriormente como el valor único para cada presión de inflado del neumático, subsecuentemente se analiza la ordenada en el origen con las distintas presiones de inflado. En esta relación se utiliza un ajuste lineal y se puede observar que los valores de las constantes tanto de

la pendiente y la ordenada en el origen toman valores próximos entre sí, estableciendo una ecuación general con dos constantes experimentales en esta relación.

La expresión resultante es entonces la deflexión en función de la carga y la presión de inflado del neumático, de esta expresión lineal procedemos a despejar la carga que es la variable de interés, de esta manera se obtiene la expresión de carga y queda en función de la deflexión y la presión de inflado del neumático, sin embargo la deflexión queda incorporada por las medidas de la geometría del neumático ancho de sección, relación de aspecto y diámetro de rin o llanta, incorporar estos factores para la obtención de un valor de rigidez radial estática del neumático es simplemente colocar la expresión de carga que soporta el conjunto llanta neumático y la deflexión producida como se mencionó al inicio de este apartado.

El proyecto finaliza con la verificación de la expresión de carga planteada, se procedió al pesaje de dos vehículos y se calculó la carga que soporta un neumático en condiciones reales y el valor se compara con el valor que proporciona la expresión de carga.

ABSTRACT

This project deals with the study of the static radial stiffness of the tire and the development of a mathematical model for obtaining according to the characteristics of the tire (tire dimensions), review of literature sources shows that the static radial stiffness of the tire is given by the load applied to the tire to set the tire divided produced deflection, the deflection charge ratio to different tire inflation pressures has a linear behavior and is the main parameter for the development of this project.

Obtaining the load exerted on a type of tire in conjunction with the measurement of the deflection produced by it, they allow to obtain the value of static radial stiffness of the tire, so the procedure to be followed in this project in the first instance is obtain an expression that provides the value of load on the wheel-tire assembly to different inflation pressures and that incorporate the geometric characteristics. With the implementation of an experimental method, which involves placing load the whole rim tire and record the value of deflection produced variables influence relate and then the graphs of the charge ratio (independent variable), deflection is analyzed (dependent variable) and by appropriate adjustment (linear) relationship such expressions is obtained.

In the analysis of the relationship outliers observed, the adjustment results in expressions that do not have similar characteristics for each inflation pressure of the tire on slope and intercept, so the next step is to linearize the behavior by a transformation of the dependent variable, a suitable transformation is through the use of box cox command, setting this ratio results in a nearly constant slope value for different tire inflation pressures. This constant is established later as the only value for each tire inflation pressure, subsequently ordered discussed in origin with different inflation pressures. In this connection a linear fit is used and it can be seen that the values of the constants of both the slope and intercept values taken next to each other, establishing a general equation with two experimental constants in this relationship.

The resulting expression is then the deflection function of load and inflation pressure of the tire, of a linear spline proceed to clear the cargo is the variable of interest, thus the term load is obtained and is based on deflection and the inflation pressure of the tire,

however the deflection is incorporated by measures geometry wide tire section, aspect ratio and diameter of rim or tire, incorporating these factors to obtain a value of radial stiffness static tire is simply place the expression of load on the tire and rim assembly deflection produced as mentioned at the beginning of this section.

The project ends with the verification of expression raised load, we proceeded to weigh two vehicles and the load on a tire in real conditions and the value is compared to the value it provides load expression was calculated.

1. INTRODUCCIÓN

Sin duda el vehículo ha sido uno de los inventos de mayor relevancia en el mundo, desde su aparición las mejoras en cuanto a desempeño, eficiencia, confort y estética han sido mejoradas progresivamente, es así que en la actualidad el vehículo es un conjunto de componentes mecánicos y electrónicos, que favorecen al conductor y ocupantes, esto gracias al avance tecnológico y a la incorporación de gestión electrónica.

El neumático no queda descartado en este aspecto, los estudios se han centrado en el neumático considerándolo como un elemento donde toda la potencia, confort y sobretodo seguridad están dispuestos por este, "de nada o poco valdría un potente motor sin los neumáticos adecuados". Conocer las propiedades y características de un neumático nos acercan a la interpretación e interacción que este tiene con el vehículo, una de las propiedades de suma importancia es la rigidez radial estática, valor relacionado estrictamente con la presión de inflado y la carga que soporta el conjunto llanta neumático.

El estudio de la rigidez radial estática está enfocado en la relación carga deflexión que sufre el neumático, el presente proyecto técnico estudia las variable que influyen en la rigidez radial estática del neumático en distintas llantas, con el fin de apreciar de mejor manera su comportamiento (Deflexión ante carga), para la obtención de datos de deflexión se implemento un soporte de sujeción para el conjunto llanta neumático, adecuándolo a ciertos aspectos tanto de facilidad de medición y seguridad.

Para el desarrollo de un modelo matemático, es necesario un estudio experimental que permiten delimitar las variables inmersas para el estudio de rigidez radial estática, y las condiciones para la ejecución del método experimental, posteriormente en la recopilación de datos se varían ciertas variables para observar la variación producida.

Consiguientemente se adopta de una metodología para analizar la relación entre variables, se realizan los respectivos ajustes que mejor se aproximen a los datos experimentales y obtener las expresiones que mejor favorezcan en el planteamiento del modelo matemático, el proyecto técnico finaliza con la validez del modelo matemático

de rigidez radial estática del neumático, las correspondientes conclusiones y recomendaciones.

2. PROBLEMA

El análisis del comportamiento del neumático se ven limitados por la carencia de información técnica, en gran medida, al contexto comercial en el que están involucrados su desarrollo, sus materiales y su fabricación.

La importancia de las características mecánicas y propiedades de los neumáticos, hacen de éste uno de los elementos centrales para el estudio, el conocimiento de estas propiedades nos ayudan a entender del porque la utilización y el comportamiento del neumático bajo ciertas circunstancias de manejo.

El escaso conocimiento del valor de rigidez radial del neumático, conlleva a excluir de ciertos análisis, tal es caso de la materia de Dinámica del Automóvil, el valor de rigidez varia a diferentes presiones de inflado y carga en el vehículo, una adecuada interpretación de este valor se la puede relacionar para obtener la carga que soporta el vehículo en los ejes, el valor carga entre ejes se la puede relacionar para el cálculo del centro de gravedad del vehículo.

La rigidez radial estática del neumático en conjunto con sus propiedades mecánicas favorecen en absorber y filtrar las irregularidades producidas por la carretera, siempre que el neumático disponga de las características de operación correctas, tanto juntas e uniones de suspensión están sometidas a vibraciones considerables evitando así deterioros prematuros.

Antecedentes

El neumático es considerado el elemento de vital importancia al momento del diseño y fabricación de un vehículo automotor, es el único componente que está en interacción directa con la calzada y sobre el neumático se realizan esfuerzos de tracción laterales y

frenados al momento de la conducción, es necesario que este opere en las mejores condiciones de funcionamiento y estén siempre en buen estado.

Organizaciones internacionales como T&RA, Tire & Rim Association (Asociación de llantas y Rines) y European Tyre y ETRTO Rim Technical Organisation (Organización Técnica de la llanta), proporcionan valores de las propiedades del neumático, al momento de la fabricación, los fabricantes se rigen a dichos valores para incorporarlos a un neumático para un vehículo en particular.

Un factor a considerar es el valor de rigidez radial estática, valor donde sus características son poco consideradas al momento de la elección de un neumático, este valor va relacionado directamente con la presión de inflado del neumático y la carga que soporta el conjunto llanta neumático, un valor de presión adecuado es el culpable de ofrecer la mayor garantía de seguridad y confort en el vehículo sin descartar su eficiente desempeño.

Importancia y alcances

Tener un equilibrio adecuado entre componentes del vehículo comprende la correcta calibración de valores entre ellos, los valores correspondientes al neumático parten con la correcta presión de inflado, un valor demasiado alto de presión aumenta el valor de rigidez radial estática, lo contrario ocurre con presiones de inflado bajas. Este es un requisito fundamental ya que la eficiencia del vehículo, consumo de combustible y coste km/h se ven afectados, aspectos que el conductor pasa por alto sin tener en cuenta sus consecuencias a largo plazo.

El alcance del proyecto técnico va dirigido hacia los vehículos de turismo pertenecientes a la ciudad de Cuenca de la Provincia del Azuay, es decir la utilidad será, dar a comprender al propietario de un vehículo el comportamiento del neumático ante presiones de inflado inadecuados y las consecuencias que contrae a sus valores de rigidez radial estática.

Delimitación

El estudio se centra en el comportamiento de la rigidez radial estática, mediante una metodología experimental establecida, observar el comportamiento del neumático mediante pruebas de carga y registrar los valores de deflexión con rangos de presión distintos, el procedimiento facilita observar y analizar el comportamiento de estos valores para relacionarlos y establecer un modelo matemático de la rigidez radial estática para un neumático cualesquiera.

El presente proyecto aporta de forma académica a la materia de Dinámica del Automóvil para estudios de temas relacionados, además considerando la influencia del estudio ha factores de seguridad, incorpora al grupo de investigación planificación del transporte, seguridad y gestión de la movilidad, apuntando al neumático como componente importante para traslado seguro de conductor y ocupantes.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar la rigidez radial estática del neumático en vehículos de turismo y desarrollar un modelo matemático para su obtención según las características del neumático.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recolectar información de estudios relacionados de la rigidez radial estática del neumático y temas relacionados al presente proyecto de investigación.
- Caracterizar el neumático para vehículos de turismo, relaciona los tipos de neumáticos, dimensiones, e identificación.
- Implementar una metodología para obtener valores de deflexión ante carga del neumático en condición estática.
- Analizar las relaciones entre variables y plantear un modelo matemático para el cálculo de la rigidez radial estática según las características del neumático.
- Analizar y validar los resultados obtenidos.

ESTADO DEL ARTE

Después de una investigación para enfocar conocimiento sobre estudios de la rigidez estática del neumático y el desarrollo de un modelo matemático planteado en el tema del presente proyecto técnico, a continuación se presenta un artículo que revisa, modelos para el desarrollo de una nueva fórmula que predice requisitos de la rigidez, dando hincapié que una presión de inflado correcta es crítica para el óptimo funcionamiento del neumático y a su vez obtener mayor eficiencia en el vehículo. Otro artículo encontrado compara el valor de la rigidez experimentalmente con un análisis de un modelo de simulación realizado en Ansys 14.0, los dos artículos están abordados a continuación.

Las presiones de inflado a cargas menos que la máxima de los neumáticos. (Inflation Pressures at Less- That-Maximum Tire Loads).

***Autores**: John W. Daws, Ph.D., P. E.,Daws Engineering, LLC,W. Marcus Dr.,Phoenix, AZ.*

***Año de presentación:** Septiembre de 2009, Reunión de la Sociedad de Neumático*

Básicamente este artículo revisa modelos matemáticos planteados por distintos organismos reguladores de neumáticos las cuales se mencionan más adelante del apartado, consiguientemente es el desarrollo de un modelo matemático basado en la rigidez del neumático, el trabajo continua con un análisis de resultados adyacente con el impacto en la deformación de los neumáticos.

Procedimiento de desarrollo

Este artículo parte con la revisión de métodos para la determinación de la carga adecuada de los vehículos, uno de ellos es buscar el neumático en las tablas de los anuarios publicados por T&RA, Tire & Rim Association (Asociación de llantas y Rines), consolidado como el organismo de normalización para el neumático, la llanta, la válvula y aliado industria de piezas para los Estados Unidos.

Los anuarios son entregados a los fabricantes de neumáticos y estos su vez a los vendedores, las tablas deben ser usados bajo ciertas consideraciones algunas de ellas dispuestas por el DOT Department of Transportation (Departamento de Transporte), los fabricantes de vehículos consideran este aspecto al momento de elegir un tamaño de neumático y la presión adecuada para un vehículo determinado, la presión aprobada puede ser mayor que la presión de inflado mínimo en pro de optimizar el manejo y la resistencia a la rodadura.

Los mismos valores de las tablas también se las puede calcular matemáticamente por medio de fórmulas EDI Engineering Design Information (Ingeniería de Diseño de Información) o fórmulas provistas por organizaciones como la European Tyre y ETRTO Rim Technical Organisation (Organización Técnica de la llanta), o formulaciones teóricamente basadas en la desviación a carga para cualquier presión inflado.

En el avance del desarrollo el presente artículo considera los siguientes puntos tomados directamente de [1]:

- El T & RA Asociación de Llantas y Rines ha declarado que la carga máxima en un neumático diseñado para funcionar a una cierta presión máxima de inflado se podría expresar como:

$$MaxLoad = G\ x\ MaxPressure^{n} \qquad \text{[Ecu. 4.1]}$$

Donde que G representa una función constante de la geometría de las llantas, el artículo menciona que el detalle de su origen fue tratado empíricamente por S. Padula.

- T & RA Asociación de Llantas y Rines en su primera fórmula fijó un valor de n= 0.585, sin embargo al pasar algún tiempo se comprendería que esta fórmula se aplica a cualquier presión, teniendo como resultado la eliminación de la expresión G, adecuando la fórmula de presión a:

$$Pressure = MaxPressure\ x\ (\frac{Load}{MaxLoad})^{\frac{1}{n}} \qquad \text{[Ecu. 4.2]}$$

En 1970 se fija un valor de n=0,5 para neumáticos P- métricas.

- Una revisión de la última edición de la guía EDI la T & RA muestra el valor de n= 0,7 para neumáticos radiales para camiones ligeros y n=0,585, otros valores son fijados para neumáticos de camiones, dependiendo el tipo y relación de aspecto.

- El trabajo de T & RA desde principios de 2006 ha sido la armonización de sus normas con las de otras organizaciones internacionales como la ETRTO con el fin de facilitar el cálculo de la presión de inflado.

- El artículo recalca que las fórmulas demostradas por Padula se rigen en una formulación empírica de la rigidez vertical del neumático establecida por Rhyne, de esta manera Paluda mostró que la rigidez vertical de los neumáticos se simplifica a una función relacionada con la geometría del neumático expresada como:

$$k_z = Pressure\ x\ F + 3.45 \qquad \text{[Ecu. 4.3]}$$

Donde

Kz= es rigidez vertical del neumático (la carga dividida por la desviación),

F= Función de la geometría del neumático, (contiene los parámetros de los neumáticos como: anchura de la sección, relación de aspecto, y diámetro de la llanta.

La ecuación considera que la rigidez del neumático es una función lineal de la presión de inflado, y Rhyne lo demostró empíricamente al aplicarlos a numerosos tamaños y tipos de neumáticos.

Y finalmente atribuyendo las tablas establecidas por T& RA, ETRTO la presión en una carga dada se puede calcular como:

$$Presure = \frac{\left(\frac{Load}{MaxLoad} x(Maxpressure\ x\ F + 3.45)\right) - 3.45}{F} \qquad \text{[Ecu. 4.4]}$$

Discusión

Los autores del artículo en su seguimiento de información indica que Padula se basa en las formulaciones planteadas empíricamente por Rhyne, sin embargo los modelos de la forma de la ecuación 1 se desarrollaron originalmente por Padula, a partir de relaciones empíricas a capacidad de carga máxima del neumático en alguna presión máxima de inflado, se recalca que para el paso de la formulación 4.2 el registro no muestra claramente el desarrollo para su obtención.

De igual manera la metodología de la rigidez que aquí se presenta se ha desarrollado a partir de un modelo empírico que representa carga frente a presión a través de un rango de presiones, los datos de rigidez pueden ser interpretados como una representación de cómo se comportan los neumáticos en realidad a presiones de menos que la máxima presión de inflado.

Uno de los aspectos de interés en un neumático radial utilizado hoy en día es que se ha demostrado que la rigidez del neumático es lineal con la presión de inflado, en el rango de presiones de funcionamiento normal.

La diferencia de valores de *n* en la ecuación 4.2 a través de organizaciones de diferentes estándares no parece consistente con la realidad física ya que la capacidad de carga de un neumático está relacionada con su volumen y su presión interna. Además, la formulación basada en la rigidez en condiciones menos que la carga máxima sugiere que todas las formulaciones de tipo regla de la potencia proporciona presiones que son demasiado bajos para la carga de que se trate.

La verificación del modelo de simulación con la experimentación real, de la rigidez radial para neumáticos de turismos bajo una carga estática.

Autores: *P.Y.Mhaske, P.N.Narwade*

Año de presentación: *22 de noviembre de 2015, Consejo de Europa Ahmednagar, Maharashtra, India*

La investigación tiene como finalidad optimizar la rigidez radial, considerando que afecta en el rendimiento del vehículo al momento de circular. Una correcta presión de inflado y una carga aceptable, asegura la durabilidad de un neumático y evita fallos. El análisis por elementos finitos Ansys-14 aporta gran ayuda en el análisis del comportamiento del neumático en condición estática, con la aplicación de una carga sobre una superficie plana horizontal y rígida.

Una prueba experimental en un neumático P135/ 70R12 bajo la mismas condiciones a las simuladas en el software, experimenta la deflexión y carga para la obtención de valores de la rigidez radial, la presión de inflado (fluido aire) utilizada fue de 1.3, 1.7, 2 y 2.4 bar, carga vertical de (300, 400, 500, y 600 kg).

Por tanto la simulación y la prueba experimental se compararon para analizar estadísticamente la desviación estándar para verificar el modelo numérico del neumático.

Para la prueba experimental estática el neumático fue montado sobre un soporte, con la adecuación de un gato hidráulico se pudo dar la carga deseada y posteriormente medir la deflexión causada.

Metodología de la investigación

- **Fase I:** Análisis FEM (Análisis por elementos finitos) para obtener el desplazamiento del neumático desde el centro del eje.

Se consideraron las siguientes propiedades del neumático para la simulación.

- Propiedades del caucho.
- Propiedades de los materiales de capa de hilos.
- Especificaciones del neumático P 135 / 70R12.

Donde la rigidez está dada por:

$$\boldsymbol{kz} = \frac{\boldsymbol{Carga\ aplicada}}{\boldsymbol{Deflexion}} = \frac{\boldsymbol{Fz}}{\boldsymbol{\delta}} \qquad \text{[Ecu. 4.5]}$$

Para crear la geometría del neumático se utilizó el software de modelado 3D CATIA.

- **Fase II:** Análisis experimental (con presión en el neumático - 1.3bar, 1.7bar, 2 bar, 2.4 bar,).

Se seccionó el neumático P 135 / 70R12, sujeto en un marco de ensayo pivotante construido con una longitud L de 1235mm desde el pivote al centro del eje. Para la prueba de deflexión vertical consistía en una placa de base de acero dulce con un soporte en forma de U invertida para soportar el eje. La distancia desde la placa de base de las pestañas era de 450 mm, lo que coloca el centro del eje 470 mm de la placa base.

Los puntos a analizar son:

- Efecto de la variación de la presión (fluido aire).
- Efecto de la presión de inflado en la rigidez (fluido aire)

- **Fase III:** Análisis analítico.

El resultado del análisis FEM y lectura experimental basado en la presión de inflado, la deformación de los neumáticos y la carga aplicada, se analizaron estadísticamente para determinar la desviación estándar de una sola medición de la desviación estándar, el valor de presión es un número que se usa para decir cómo las mediciones para un grupo se extienden desde los valores esperados.

Los resultados de la medición obtenidos no se observaron errores excesivos. Después de realizar este análisis, se calculó el porcentaje de error relativo. Los resultados del análisis con respecto a la experimentación real de la deflexión se caracterizan por los valores del error relativo.

Discusión

En la gráfica del efecto carga deflexión se observa que a medida que aumenta la carga la deflexión también lo hace en forma lineal, al tener una presión baja como en la prueba experimental de 1.3 bar de presión se muestra más deflexión en todos los valores de

carga, lo contraria ocurre cuando se aplica mayor presión las deformaciones de los neumáticos disminuyen gradualmente.

Mediante el uso de métodos de análisis para las desviaciones estándar calculadas para una única medición tomada en el análisis de presiones y cargas, una desviación estándar baja en 2 bar de presión es 2,8849, significa que los valores obtenidos están cerca de los valores esperados. Los valores del error superior al 30% se refieren a los valores dependientes de la presión [2].

5. CARACTERIZACIÓN DEL NEUMÁTICO PARA VEHÍCULOS DE TURISMO

5.1. EL NEUMÁTICO

El neumático, es una pieza fabricada con un compuesto basado en el caucho que se coloca en la rueda de un vehículo para conferirle adherencia, estabilidad y confort. Constituye el único punto de contacto del vehículo con el suelo y, por tanto, del neumático depende en buena medida el comportamiento dinámico del vehículo: es decir, cómo se mueve el vehículo sobre el terreno.

Del neumático depende, también en buena parte, que la rueda pueda realizar sus funciones principales: tracción, dirección, amortiguación de golpes, estabilidad, soporte de la carga. Pero para que eso sea posible, el estado del neumático debe ser correcto, sin cortes, grietas o deformaciones, y su presión de inflado debe ser la adecuada [3].

5.2. PARTES DEL NEUMÁTICO

En la figura 2 se puede apreciar las partes de un neumático radial comúnmente utilizado en la actualidad.

Figura 1: *Sección Transversal de un Neumático Radial.*

Fuente: [4]

Sus partes se enumeran a continuación:

- Sellantes.
- Capa radial o carcasa.
- Banda de rodadura.
- Talón.
- Flanco, costado o pared lateral.
- 6, 7 Cinturón estabilizador
- 8 Ribete.

5.3. CLASIFICACIÓN DE LOS NEUMÁTICOS

La clasificación de los neumáticos se debe a la tecnología constructiva utilizada en la fabricación del neumático, así se clasifican en:

- Neumáticos diagonales.
- Neumáticos radiales.

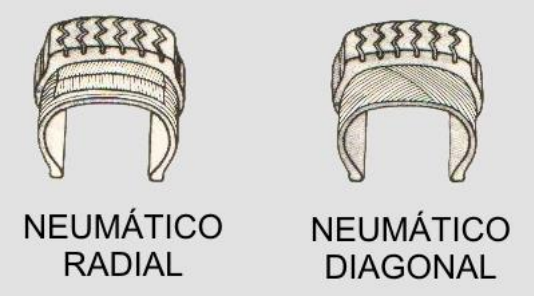


Figura 2: *Sección de un Neumático Radial y Diagonal.*

Fuente: [5]

5.3.1. Neumáticos diagonales

Los neumáticos diagonales se componen de capas de tejido alternas y cruzadas colocadas diagonalmente en la carcasa, formando un ángulo que suele estar entre 40 y 45 grados. La superposición de las capas pueden ir entre seis y ocho para un neumático de turismo, y llegar hasta 12 en uno de camión, que van de lado a lado y se encuentran por tanto en los flancos y en la cima del neumático, aporta una gran rigidez, pero su punto débil era la estabilidad lateral [6].

5.3.2. Neumáticos radiales

Aquí, la armadura del neumático se compone de capas de tejido colocada en forma radial, directamente de un talón a otro del neumático, formando una especie de "tubo" que da forma a la carcasa, y se remata en su parte superior por telas de cables metálicos cruzadas. Así, el flanco es más ligero y aporta mayor flexibilidad, con ventajas añadidas en duración y seguridad al calentarse menos y garantizar mayor área de contacto con el suelo que los neumáticos diagonales [6].

5.4. IDENTIFICACIÓN DE LOS NEUMÁTICOS.

La lectura de los neumáticos es uno de los aspectos más importantes, en la parte lateral del flanco lleva marcado una serie de números, letras y símbolos que indican la capacidad del neumático, en la siguiente figura se puede apreciar cada uno de ellos.

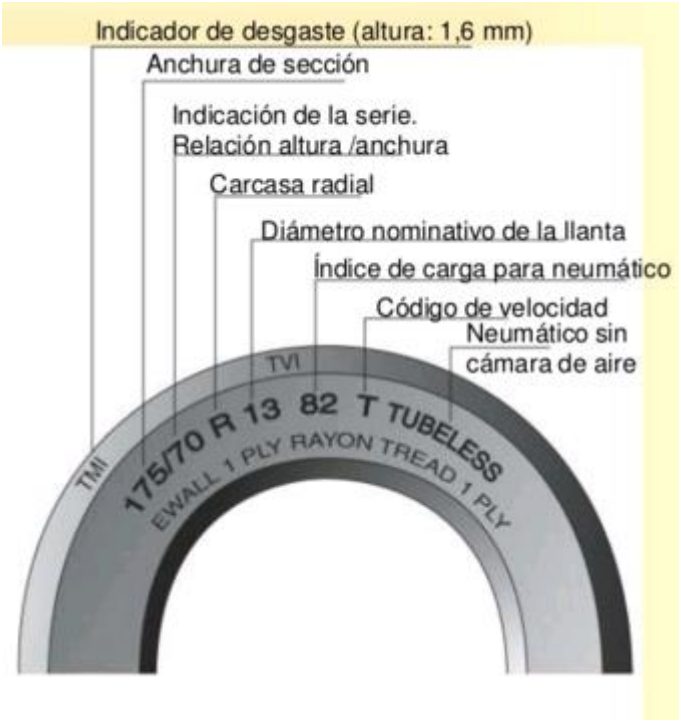


Figura 3: *Identificación del Neumático.*

Fuente: [7]

5.5. DESIGNACIÓN DIMENSIONAL.

A continuación se detalla aquellas inscripciones sobre el neumático que hacen referencia a sus características dimensionales.

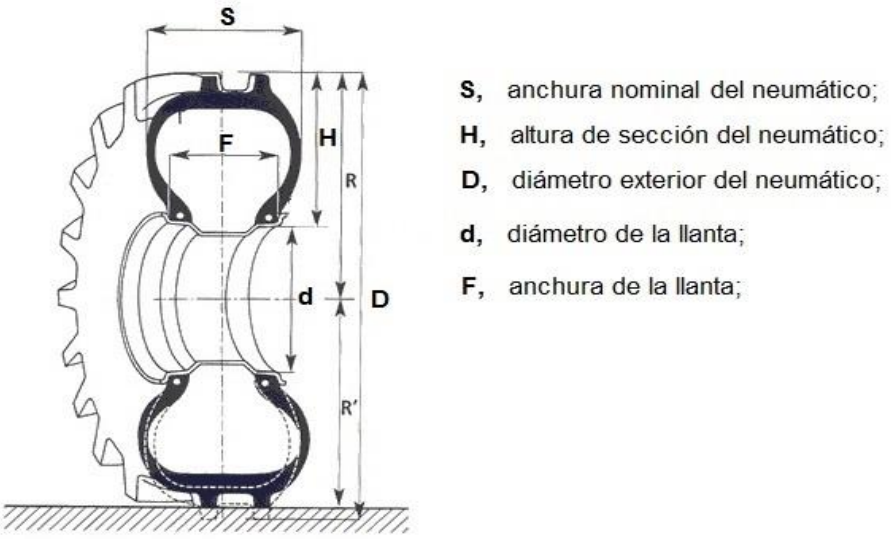


Figura 4: *Sección dimensional del neumático*

Fuente: [4]

- Anchura se refiere a la anchura nominal (S) de la sección del neumático. Es la distancia lineal que existe entre el exterior de los flancos del neumático inflado, debe expresarse en milímetros, salvo excepciones. La gama de anchos de los neumáticos convencionales suele estar entre 125 mm (por ejemplo, 125/80R12) y 335 mm (por ejemplo, 335/30R19). El valor de la misma se expresa en intervalos de 10 milímetros.

- Relación de forma o también llamado serie del neumático: se refiere a la relación entre la altura del perfil (H) y el ancho (S) del neumático expresado en porcentaje. Dicho de otra manera, es el valor porcentual (Ra) obtenido al dividir la altura por la anchura de sección, expresadas ambas en milímetros y multiplicado por cien, según se indica en la siguiente expresión matemática:

$$Ra = \frac{H}{S} * 100(\%) \qquad \text{[Ecu. 5.1]}$$

Generalmente, las series que se utilizan más comúnmente son las series 50, 60, 70 y 80.

- Altura o altura de sección o de perfil (H): esta información no aparece inscrita en el neumático, pero puede ser calculada. Es la distancia (H) entre el asiento del talón hasta la banda de rodamiento, estando el neumático sin carga. Esta distancia se corresponde a la semi-diferencia entre el diámetro exterior del neumático (D) y el diámetro nominal de la llanta (d), según se indica en la siguiente expresión matemática:

$$H = \frac{D-d}{2} * (mm) \qquad \text{[Ecu. 5.2]}$$

- Diámetro nominal de la llanta: el diámetro de la llanta (d) sobre el cual se monta el neumático medido en diagonal, de borde a borde de la llanta, se expresa en pulgadas. Suele estar comprendido entre 10 y 20 pulgadas.

- Diámetro exterior del neumático (D): esta información no aparece inscrita en el neumático, sin embargo también puede ser calculada. Para obtener el diámetro teórico de rodadura (D) bajo las condiciones de neumático nuevo e inflado, se utiliza la siguiente expresión matemática:

$$D = d * 25{,}4 + \frac{2Ra}{100} * S(mm) \qquad \text{[Ecu. 5.3]}$$

Siendo:

Ra = Relación de forma (adimensional)
S = Anchura de la sección del neumático en mm.
d = Diámetro de la llanta en pulgadas
D = Diámetro exterior en mm, a calcular [4].

5.6. NEUMÁTICOS MÁS UTILIZADOS EN LA ACTUALIDAD

El neumático diagonal era el más utilizado hasta mediado la década de los años 50, hasta la aparición del neumático radial, en el que se disocian por completo las funciones que ejerce el flanco del neumático y la cima.

A la hora de comprar neumáticos para un vehículo no es un problema, en la actualidad prácticamente todos los neumáticos de turismo son neumáticos de carcasa radial [6].

Figura 5: *Neumáticos radiales*

Fuente: [6]

5.7. RIGIDEZ RADIAL ESTÁTICA

La rigidez radial del neumático es calificada por la elasticidad característica de cada neumático, el neumático se somete a fuerzas verticales, por ende sufre una deformación vertical que modifica su radio. La rigidez radial estática se define como la variación de la fuerza vertical del neumático en función de la deformación radial del mismo, según la siguiente expresión.

$$k_z = \frac{F_z}{\delta} \qquad \text{[Ecu. 5.4]}$$

La carga vertical de un neumático es soportada por el aire a presión y por la carcasa, dependiendo del tipo de neumático, la proporción de la carga soportada y transmitida por cada uno de estos elementos es diferente. Tanto la rigidez y el amortiguamiento radial se utilizan para caracterizar la deformación vertical, de esta manera la rigidez

radial estática Kz, se determina con la curva carga-deflexión, considerando el neumático como un modelo de resorte.

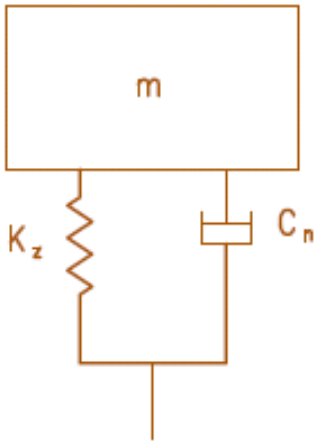


Figura 6: *Modelo lineal del neumático.*

Fuente: [8]

La resultante de las fuerzas normales que actúan sobre el neumático, está lógicamente relacionada con la deformación radial del neumático; es evidente que ésta aumentará con la carga. En la figura 7 se indica la variación de la carga con la deformación radial, considerando diferentes presiones de inflado, para un neumático diagonal de dimensiones 5,6 x 13. Cada curva carga-deformación está desplazada, a lo largo del eje de deformaciones, una cantidad proporcional a la presión de inflado [8].

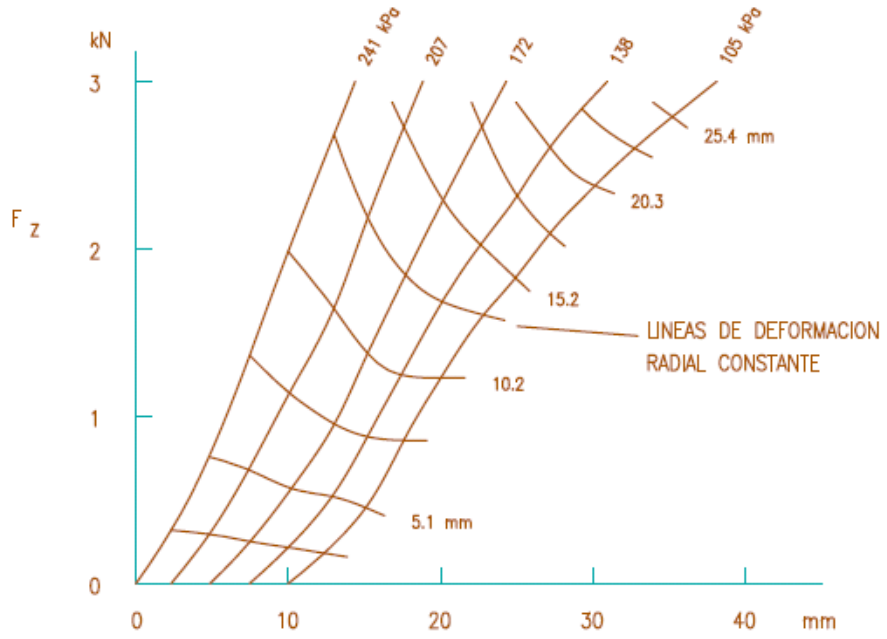


Figura 6: *Curvas deformación-carga de un neumático diagonal de dimensiones 5,6 x 13.*

Fuente: [8]

6. MARCO METODOLÓGICO

En este apartado se analizan los métodos para el desarrollo del proyecto técnico, los neumáticos utilizados para la realización del método experimental, el uso de los instrumentos de medición y mecanismos auxiliares para las pruebas así como los criterios para su elección, y la secuencia de procedimientos para llegar al objetivo general planteado anteriormente.

6.1. NEUMÁTICOS EMPLEADOS

Hoy en día todos los vehículos de turismo utilizan neumáticos de tipo radial, debido a las ventajas que estos ofrecen como mayor duración, menor desgaste, mejor adherencia y mayor rendimiento, por tal razón los neumáticos utilizados para la aplicación de método experimental son exclusivamente de tipo radial, los criterios para la elección de los neumáticos para la prueba experimental se mencionan a continuación:

- Los neumáticos utilizados para el método experimental deben estar en muy buenas condiciones es decir tener escaso desgaste.
- Utilizar rines que incorporen en el vehículo de fábrica.
- Utilizar una gama considerable de rines comúnmente usados en nuestro medio en los vehículos de turismo.

Una vez especificados los criterios para la elección de los neumáticos de prueba y considerado el estado del arte referente al tema en estudio que señala, la relación entre rigidez radial y presión de inflado del neumático tienen un comportamiento lineal, independientemente del rin que éste incorpore, se consiguió 4 neumáticos de distintas marcas, para analizar la variabilidad de deflexión ante las variantes de presión y carga en un rin en específico, estos se presentan a continuación:

Tabla1: *Neumáticos utilizados para el planteamiento del modelo matemático de rigidez radial estática.*

Fuente: Autores.

NEUMÁTICOS	DESIGNACIÓN
215/60 R16	R16
205/75 R15	R15
185/65 R14	R14
175/70 R13	R13

6.2. PARAMETROS PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS DE DEFLEXIÓN

Para obtener los datos de deflexión es importante tener en cuenta los parámetros a los que se va a realizar las pruebas, los principales parámetros a establecer son los rangos de la presión y carga los cuales se detallan a continuación.

6.2.1. Presión de inflado del neumático

La presión de inflado para un determinado vehículo viene especificado en la etiqueta del vehículo colocado en la mayoría de casos en la puerta del conductor, en el interior de la puerta de combustible, o en el interior de la tapa del maletero, este valor será mayor que la presión mínima requerida para soportar la carga máxima establecida para cada eje, este dato nos da una idea del rango de presión de inflado que tiene un neumático en específico.

Por otra parte la normativa Ecuatoriana para neumáticos NTE INEN 2 101:98 establece los requisitos dimensionales, cargas y presiones que deben cumplir los neumáticos de acuerdo a su tamaño para ser usados correctamente en vehículos, estos valores ayudan a observar las presiones establecidas entre rines, en neumáticos de pasajeros tipo radial (R13 Y R14) las presión de inflado varían entre 140 a 240 Kpa, dependiente de la carga, en neumáticos excepto pasajeros (camioneta R14, R15 y R16) tipo radial las presiones de inflado varían entre 250 a 350 Kpa.

Otro aspecto a considerar es la designación de cada neumático, la cual indica la presión máxima de inflado de este, así pues los valores seleccionados para el método experimentas son 140, 180, 220, 240 y 260 Kpa.

6.2.2. Carga

Basándonos en la misma normativa Ecuatoriana para neumáticos mencionada anteriormente observamos el límite de cargas establecidas para un neumático en específico, en neumáticos de pasajeros tipo radial (R13 Y R14) la carga límite varía entre 425 a 650 Kg, en neumáticos excepto pasajeros (camioneta R14, R15 y R16) tipo radial el límite de carga varía entre 690 - 900 kg, estos datos nos dan a conocer los rangos de carga para los distintos neumáticos, sin embargo en nuestro estudio las pruebas abarcan un rango de carga no mayor al peso neto de un vehículo, a esto se suman ciertos criterios que se mencionan a continuación:

- Establecer una carga máxima de tal forma que el soporte de sujeción para el neumático no presente inconvenientes por sobrecarga.
- Usar una carga máxima que no ponga en riesgo de accidentes al momento de la toma de valores.

Analizados los puntos anteriores se establece una carga límite entre 600 a 1000 Lbs para la aplicación del método experimental.

6.2.3. Normas

En el país el control referente al uso de un determinado neumático para un vehículo en particular no es estricto, es decir no existe regulación que sancione el uso indebido de

neumáticos de acuerdo a sus especificaciones, la información en cuanto a las propiedades y características que podrían afectar en la estabilidad del vehículo.

Sin embargo en Ecuador se cuenta con normas que establece los requisitos técnicos y de rotulado que deben cumplir los neumáticos, con el fin de garantizar la seguridad humana, la salud y medio ambiente, entre las normas destinadas a neumáticos para vehículos se tiene las siguientes.

- NTE INEN 2 101:98 NEUMÁTICOS. NEUMÁTICOS PARA VEHÍCULOS. DIMENSIONES, CARGAS Y PRESIONES. REQUISITOS
- RTE INEN 011:2006 NEUMÁTICOS.
- NTE INEN 2616:2012 NEUMATICOS REENCAUCHADOS. MÉTODOS DE ENSAYO.

Para el establecimiento de estas normas se ha tomado como base normas regionales e internacionales, procedentes de países como Estados Unidos, Japón, Alemania Italia y Francia, cuya finalidad es ser empleadas como guía para la adecuación de la unidades físicas, uniformizar el lenguaje técnico en la industria de llantas, además de la identificación, clasificación, estructura, etc.

Algunas de las normas establecidas hacen referencia a pruebas realizadas en bancos que relacionan los parámetros de funcionamiento del neumático tal como si se estuviese en el vehículo, con la aplicación de fuerzas longitudinales, transversales, laterales, aplicación de momentos e incluso la disponibilidad de la variación de ángulos en el neumático, estudios que favorecen el entendimiento del comportamiento dinámico del neumático en funcionamiento.

Si se centra en parámetros que sirvan como guía para el desarrollo de pruebas de tipo estático, no existen normas que hagan referencia a métodos de prueba para la completa caracterización de las llantas neumáticas, regirse al método carga-deflexión da como consecuencia flexibilidad para establecer las variables de prueba y a consideración de los aspectos para aplicación del método experimental mencionados con anterioridad.

6.3. MÉTODO PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS

Desde años atrás los investigadores de neumáticos han optado por distintos métodos para comprender el comportamiento de un neumático, la utilización de un método apropiado nos facilita en la obtención de datos, hoy en día varios son los equipos para las mediciones de las propiedades de un neumático, la mayoría de estos son de uso computacional y de costes elevados, sin embargo no hay la disponibilidad de un equipo de características similares en la Universidad Politécnica Salesiana, obligándonos a buscar alternativas que proporcione resultados confiables.

Estudios relacionados al tema planteado describen que la deformación de la carcasa de un neumático, depende de la fuerza vertical aplicada que presiona el neumático sobre la superficie rígida (calzada) [9].

Por tanto el método apropiado que se emplea a continuación relacionan 3 factores: presión, carga y geometría del neumático, idónea para el registro de valores de deformación y rigidez.

Los elementos utilizados para la adquisición de datos son:

- Neumático de prueba(Varios de distinta geometría)
- Carga (Discos de gimnasio)
- Instrumento para medir la deflexión
- Software Matlab para mostrar los datos y resultados.

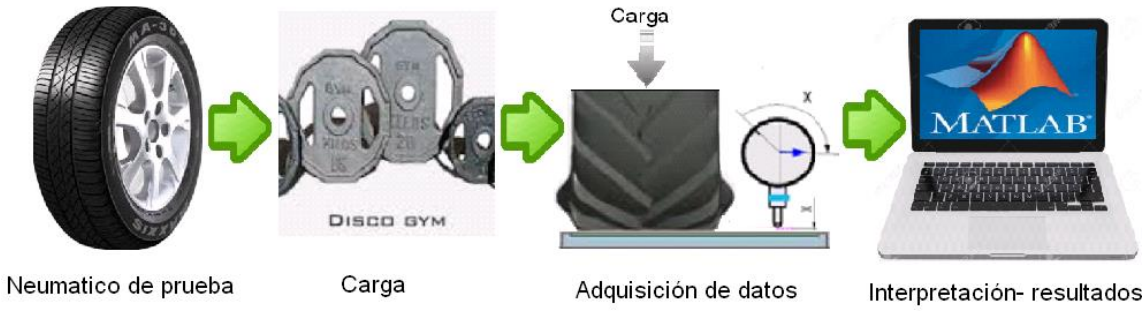


Figura 7: *Proceso para la adquisición de datos y resultados.*

Fuente: *Autores*

6.3.1. Método carga-deflexión estática

Los investigadores han utilizado durante mucho tiempo las pruebas de carga-deflexión para determinar la rigidez vertical del neumático, la aplicación de este método presenta flexibilidad al momento de elegir el rango de las variables de carga y presión, a esto se suma que la relación carga-deflexión varía linealmente [10].

Diferentes cargas deben ser aplicadas verticalmente sobre el neumático colocado sobre una superficie plana y rígida, la deflexión estática se determina con la medición transversal del neumático (altura de sección), este procedimiento se detalla en el capítulo correspondiente al procedimiento del método experimental.

6.4. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y VERIFICACIÓN

Las herramientas de medición y de verificación se han venido usando desde el principio de los días para la construcción de todo tipo de cosas y se utilizan para la nivelación y alineación de las piezas o para la medición geométrica o dimensional de las mismas.

Se clasifican de acuerdo a la magnitud física que se desee medir teniendo así instrumentos para medir la masa, tiempo, longitud, velocidad, temperatura y presión.

Los instrumentos de medición y verificación utilizados para la recolección de datos en el presente proyecto técnico son básicamente instrumentos para la medición de longitud, presión y un instrumento de verificación de nivel, los mismos se mencionan a continuación citados directamente de la fuente [11].

6.4.1. Reloj comparador

Un reloj comparador es un instrumento de medida que transforma el movimiento rectilíneo de los palpadores o puntas de contacto en movimiento circular de las agujas. La capacidad para detectar la diferencia de medidas es posible gracias a un mecanismo de engranajes y palancas, que van metidos dentro de una caja metálica de forma circular. Dentro de esta caja se desliza un eje, que tiene una punta esférica que hace contacto con

la superficie. Este eje, al desplazarse, mueve la aguja del reloj, y hace posible la lectura directa y fácil de las diferencias de medida.

Figura 8: *Reloj comparador analógico.*

Fuente: [11]

6.4.2. Calibre

El calibre o pie de rey es un instrumento de acero aleado, que se utiliza para la medición para longitudes, es el más universal que existe. Consta de una "regla" con una escuadra en un extremo, sobre la cual se desliza otra destinada a indicar la medida en una escala. Mediante piezas especiales en la parte superior y en su extremo, permite medir dimensiones internas y profundidades. Posee dos escalas: la inferior milimétrica y la superior en pulgadas.

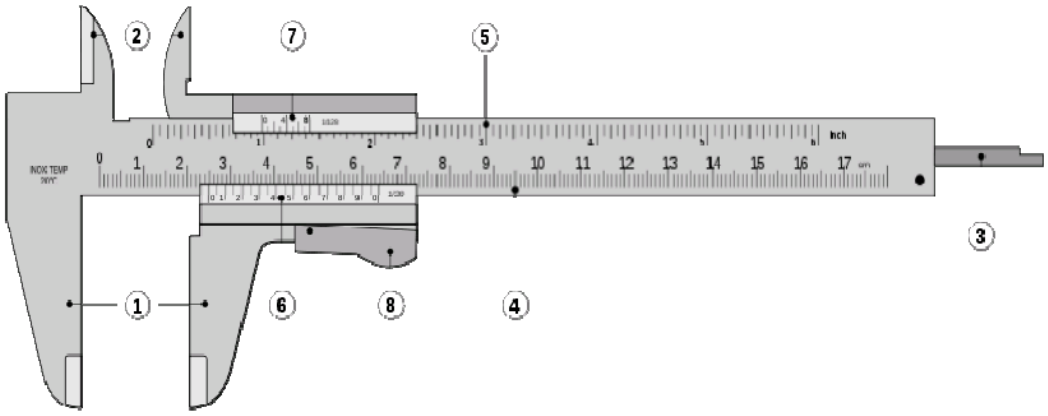


Figura 9: *Calibre o pie de rey.*

Fuente: [11]

Sus partes se enumeran a continuación:

- 1 Mordazas para medidas externas.
- 2 Mordazas para medidas internas.
- 3 Sonda o colisa para medida de profundidades.
- 4 Escala con divisiones en centímetros y milímetros.
- 5 Escala con divisiones en pulgadas y fracciones de pulgada.
- 6 Nonio para la lectura de las fracciones de milímetros en que esté dividido.
- 7 Nonio para la lectura de las fracciones de pulgada en que esté dividido.
- 8 Botón de deslizamiento y freno.

6.4.3. Flexómetro

El flexómetro como vulgarmente lo conocemos es una cinta métrica metálica con forma de media caña (para darle rigidez), alojada en una carcasa de plástico o metálica, con un muelle de retorno para una recogida rápida. Sus longitudes varían desde 1 hasta15 metros.

Figura 10: *Flexometros de distintas longitudes.*

Fuente: [11]

6.4.4. Escuadra

Una escuadra como vulgarmente se conoce es una plantilla con forma de ángulo rectángulo (90 grados) normalmente, aunque también las hay con otros ángulos (120º), ya que es una plantilla. No deberían llevar escala gráfica al no ser herramientas de medición, pero algunos fabricantes las producen con una escala gráfica para usarse como instrumento de medición. Suelen ser de acero aleado.

Figura 11: *Escuadras metálicas.*

Fuente: [11]

6.4.5. Nivel

El nivel es un instrumento de medición utilizado para determinar la horizontalidad o verticalidad de un elemento, incorpora un pequeño tubo transparente (cristal o plástico)

el cual está lleno de líquido con una burbuja de aire en su interior. Si la burbuja se encuentra simétricamente entre las dos marcas, el instrumento indica un nivel exacto, que puede ser horizontal, vertical u otro, dependiendo de la posición del nivel.

Figura 12: *Nivel*

Fuente: [11]

6.4.6. Medidor de presión de mano

Existen diferentes tipos de medidores de presión para neumáticos entre los convencionales está el medidor de presión de mano, está construido de plástico resistente, consta de una varilla graduada, mide presiones de rango entre 0 a 120 psi.

Figura 13: *Medidor de presión de mano.*

Fuente: [11]

- **Error del instrumento**

En la revisión de un artículo que trata sobre la comparación de productos para la medición de presión de inflado, se encontró que un medidor de presión de mano que

mide presiones en un rango de 20 a 120 Psi, tiene un error de + 5-5,5 psi en todo el rango, este artículo compara también instrumentos de tipo digital y se lo puede encontrar en [12].

6.5. INSTRUMENTOS AUXILIARES PARA LA MEDICIÓN

Para la realización de las pruebas es necesario el uso de instrumentos correctamente adecuados para la medición correspondiente, la adecuación de estos instrumentos facilitan la toma de datos para el desarrollo de los objetivos plateados anteriormente, la construcción se detalla a continuación.

6.5.1. Soporte de sujeción para el neumático

El soporte para el neumático se basa en un mecanismo que mantiene el neumático estático al momento que se coloque la carga establecida, se considera una carga máxima de 700 Lbs para la construcción optando por el perfil G8 (8 mm de ancho), incorpora dos guías para el fácil desplazamiento vertical al colocar la carga deseada.

Características generales del soporte para el neumático:

- Altura 79,5 cm.
- Ancho 35,5 cm.
- La dimensión de la base de sujeción está limitada para un neumático de 4,5 y 6 huecos (Para aros 13,14,15,y16)

6.6. PROCEDIMIENTO DEL MÉTODO EXPERIMENTAL PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS (METODOLOGÍA DE ENSAYO)

La adopción de este método provee un registro de valores, para lo cual uno de los principales pasos es la adecuación de un mecanismo base de sujeción para el neumático, la construcción del mecanismo es de perfil G8 (8 mm de ancho), la sujeción al neumático es tal y cual como si estuviese montado en el vehículo, permitiendo que el peso repose de manera vertical y desde la parte central del neumático, consta de dos guías para permitir la deflexión del neumático a medida que se coloquen la cantidad de carga deseada, con la ayuda de un nivel aseguramos la perpendicularidad del neumático

con el piso en todo momento de la prueba y un reloj comparador nos ayuda a registrar el valor de deformación a medida que se colocan los discos.

Figura 14: *Base de sujeción para el neumático de prueba.*

Fuente: Autores

La dimensión de la base de sujeción está limitada para un neumático de 6 huecos, la estructura tiene una altura de 79,5 cm y un ancho de 35,5 cm. Se debe aclarar que cada disco tiene un peso de entre (49,96)-(50,26) Lbs es decir existe un variación de 1 Lb entre discos, la medida considerada para el cálculo de la rigidez es de 50 lbs para cada disco.

Figura 15: *Discos (50 Lbs c/u).*

Fuente: Autores

Las presiones elegidas para la prueba fueron consideras entre valores no tan distantes entre rangos en los cuales un vehículo circula en distintos tipos de pista (260, 240, 220, 180, 140 KPa), reconsiderando lo mencionado innecesario la recolección de valores de deformación a presiones demasiado bajas.

La prueba fue realizada en un gimnasio para la fácil colocación de lo pesos establecidos, sobre una superficie completamente plana tal como se muestra en la figura.

Figura 16: *Conjunto base sujeción, neumático con el peso establecido.*

Fuente: Autores

7. ESTUDIO EXPERIMENTAL ENTRE LAS VARIABLES CARGA, PRESIÓN, DEFLEXIÓN Y LAS DIMENSIONES DEL CONJUNTO LLANTA-NEUMÁTICO

El estudio de la rigidez radial estática parte considerando que este valor cambia dependiendo de la carga aplicada y la deflexión producida en el neumático, por tanto una adecuada interpretación del comportamiento de estas variables nos favorecerá al planteamiento del modelo matemático de la rigidez radial estática.

Para el desarrollo del estudio experimental se toma en consideración dos apartados muy importantes, el primero es el estudio de la deflexión del neumático de acuerdo a la fuerza vertical o carga aplicada el cual nos brinda un modelo linealizado que es analizado más adelante. El segundo apartado es el desarrollo de una expresión matemática de la deflexión pero de acuerdo a la geometría del neumático (ancho de sección, relación de aspecto y radio). La finalidad del primer punto es despejar la fuerza vertical y tener una relación de acuerdo a la deflexión y presión. Del segundo punto el alcance es poder determinar o medir la deflexión en método de ensayo de acuerdo a las características del neumático.

A continuación se estudia la influencia experimental entre las distintas variables (presión, carga, deflexión) para los neumáticos comúnmente usados en vehículos de turismo de nuestro medio, con el software Matlab R2015a se analiza su comportamiento y la variación producida ante las pruebas efectuadas en cada neumático, el correcto ajuste de los datos y su interpretación contribuyen al planteamiento del modelo matemático de la rigidez radial estática.

7.1. PRIMER APARTADO: Variables de influencia para el estudio de la rigidez radial estática (carga, presión y deflexión)

Para la obtención de la rigidez radial estática kz, se tiene en cuenta que existe una expresión matemática determinada 4.5 de la bibliografía antes mencionada, que consiste

en dividir la fuerza vertical para la deflexión del neumático, como se observa a continuación:

$$Kz = \frac{Fz}{\delta} \cdot \frac{(N)}{(mm)}$$

A partir de esta expresión, el interés de estudio está centrado en la fuerza vertical y deflexión, los mismos que debemos relacionar de acuerdo a dos parámetros fundamentales que son la presión P y las características geométricas del neumático (215/60 R16).

7.1.1. Análisis de la influencia de la deflexión a diferentes presiones de inflado y fuerzas verticales aplicadas

La variación de presión de inflado del neumático afecta directamente a los valores correspondientes de la deflexión ante carga y por ende a los valores de la rigidez radial estática, para comprender dicho comportamiento se analiza la influencia a diferentes presiones de inflado y con distintos rines, como se puede observar en la figura 17, para valores bajos de presión de inflado el comportamiento de la curva de relación entre deflexión (δ) y fuerza vertical o carga (Fz) presenta un comportamiento casi lineal, a medida que aumenta la presión de inflado del neumático, el comportamiento de la relación es más notoria, este comportamiento es similar entre los neumáticos utilizados en la prueba experimental, a continuación se muestra esta relación para los neumáticos en estudio.

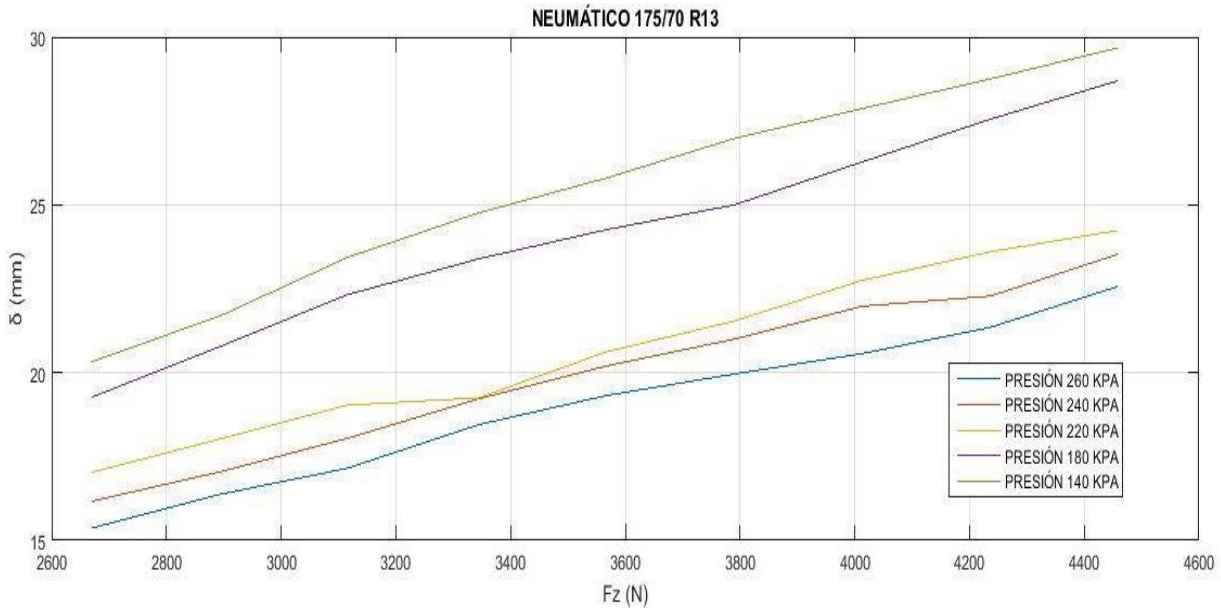


Figura17: *Relación experimental entre deflexión y la carga aplicada, para las diferentes presiones.*

Neumático R13.

Fuente: *Autores.*

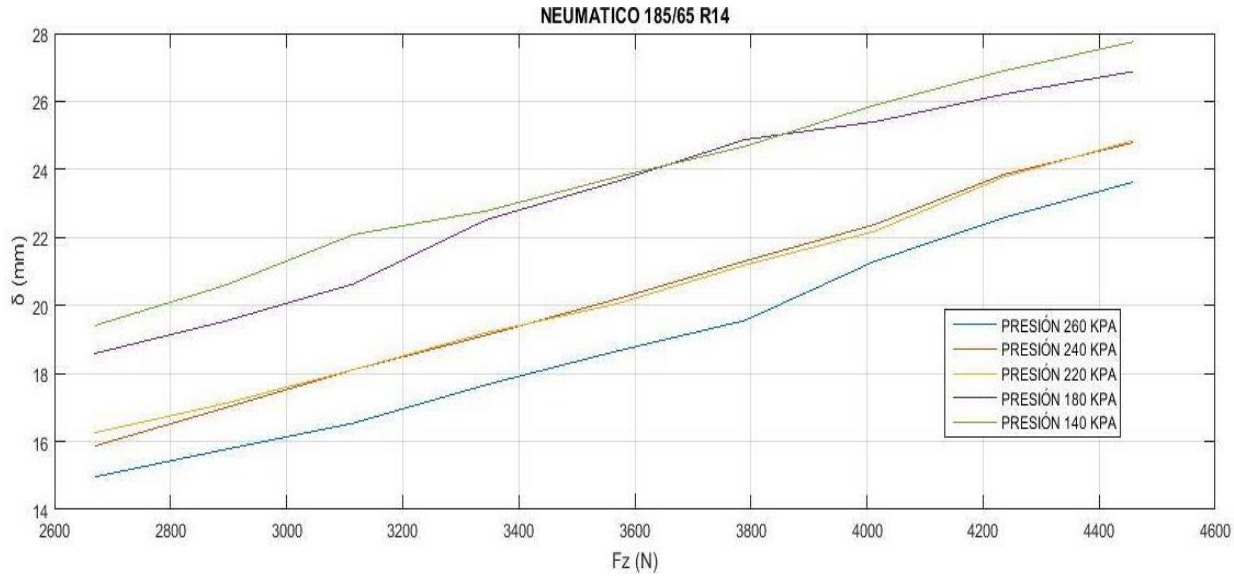


Figura18: *Relación experimental entre deflexión y la carga aplicada, para las diferentes presiones.*

Neumático R14.

Fuente: *Autores.*

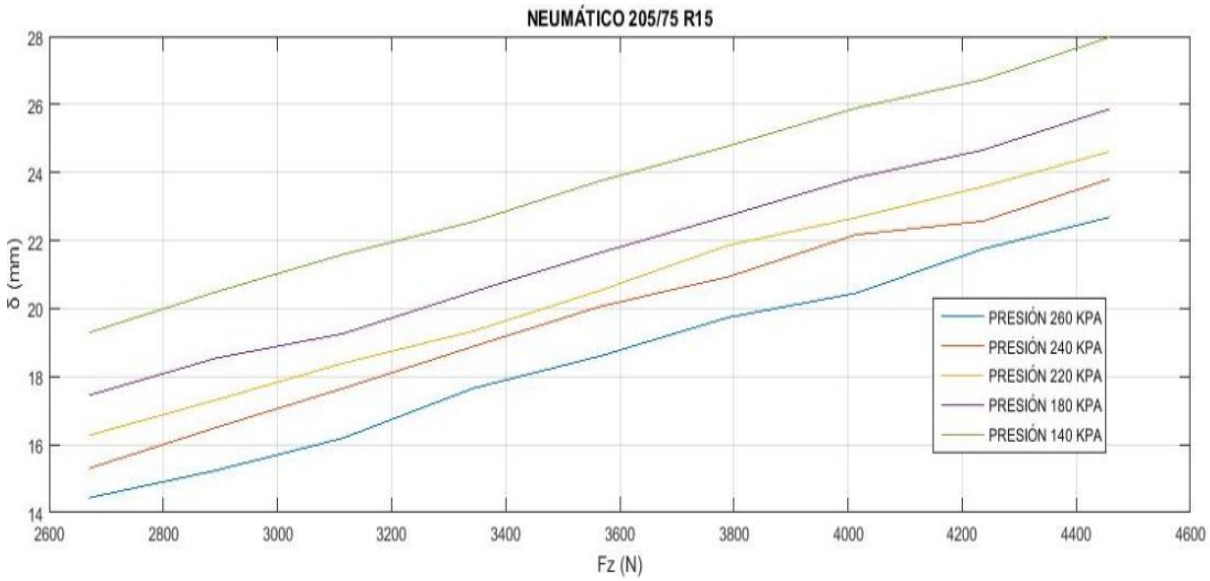


Figura 19: *Relación experimental entre deflexión y la carga aplicada. Neumático R15.*

Fuente: *Autores.*

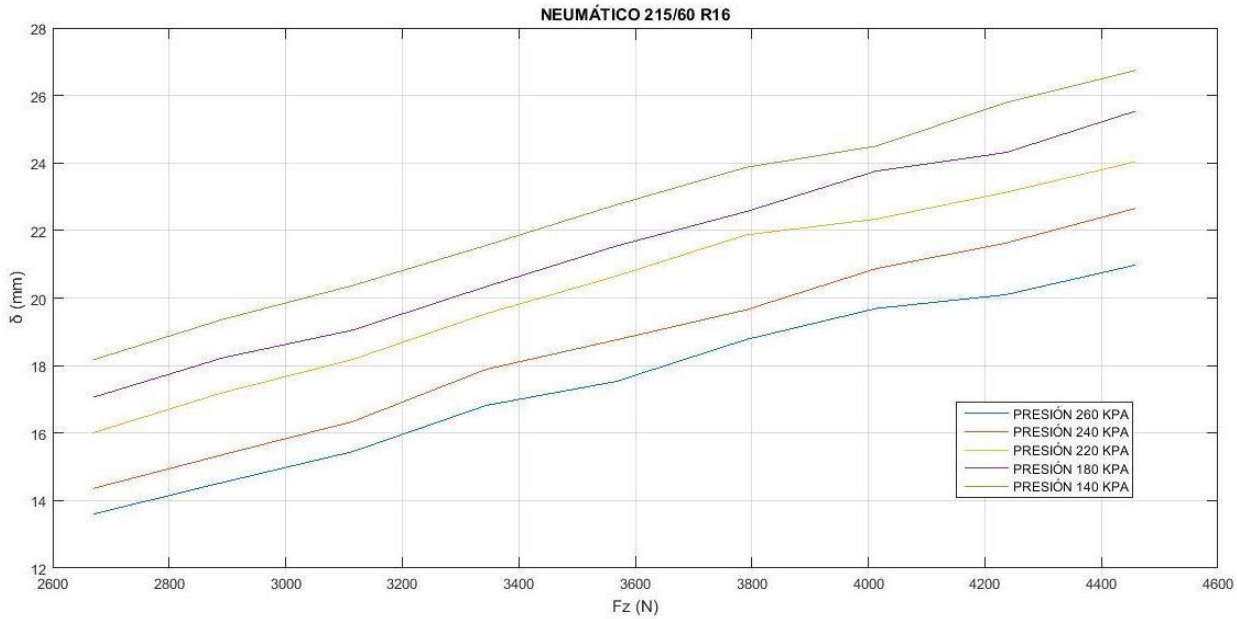


Figura 20: *Relación experimental entre deflexión y la carga aplicada, para las diferentes presiones.*

Neumático R16.

Fuente: *Autores.*

De esta gráfica se puede sacar una conclusión muy importante que nos ayuda al planteamiento del modelo para la obtención de la rigidez radial estática, como se puede

observar, a medida que la presión de inflado toma valores altos, la recta cambia en relación a su pendiente, por lo cual podemos asegurar que un valor de presión de inflado va relacionado con la de un valor de pendiente, entre deflexión y carga aplicada, además se comprueba que la tendencia de las curvas no presenta alteraciones significativas por tanto se estable que son parámetros con dependencia, esta conclusión se analizara detalladamente en el punto pertinente al planteamiento del modelo matemático de la rigidez radial estática del neumático.

7.1.2. Ajustes en la relación de la deflexión-fuerza vertical para diferentes presiones de inflado del neumático

Con la finalidad de plantear un modelo matemático que incorpore las características del neumático, se opta por el ajuste de datos y así obtener una ecuación que mejor satisfaga los datos obtenidos en la prueba experimental, como se observa en las relaciones anteriormente expuestas el comportamiento en la relación deflexión-carga, un ajuste lineal es el que mejor satisface esta relación ya que abarca a los cuatro neumáticos en estudio para las distintas presiones de inflado. En las siguientes figuras se muestra el ajuste lineal que conjuntamente con el coeficiente de terminación R^2 se evalúa la bondad de ajuste, valores cercanos a 1 indican que el ajuste escogido justifica la mayor parte de la variabilidad de datos, y resulta apropiado para representar los datos de las pruebas experimentales.

Las expresiones matemáticas de los ajustes están indicadas para cada presión de inflado del neumático tal como se presenta a continuación.

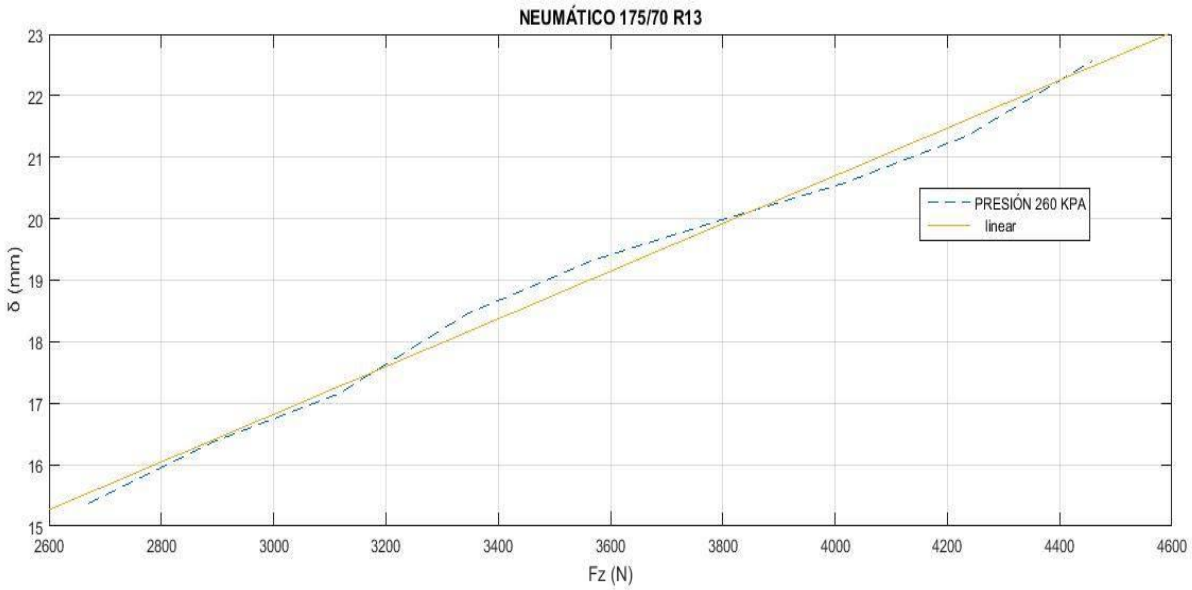


Figura 21: *Relación experimental entre deflexión y la carga aplicada ajustada linealmente. Neumático R13. Presión de inflado de 260 kpa.*

Fuente: *Autores.*

$$\delta_{(140\ kpa)} = 0{,}0062 * Fz + 3{,}4688 \qquad R^2 = 0{,}9924 \qquad \text{[Ecu. 7.1]}$$

$$\delta_{(180\ kpa)} = 0{,}0056 * Fz + 4{,}0961 \qquad R^2 = 0{,}9913 \qquad \text{[Ecu. 7.2]}$$

$$\delta_{(220\ kpa)} = 0{,}0045 * Fz + 4{,}5314 \qquad R^2 = 0{,}9917 \qquad \text{[Ecu. 7.3]}$$

$$\delta_{(240\ kpa)} = 0{,}0045 * Fz + 4{,}0165 \qquad R^2 = 0{,}998 \qquad \text{[Ecu. 7.4]}$$

$$\delta_{(260\ kpa)} = 0{,}0043 * Fz + 3{,}6827 \qquad R^2 = 0{,}9941 \qquad \text{[Ecu. 7.5]}$$

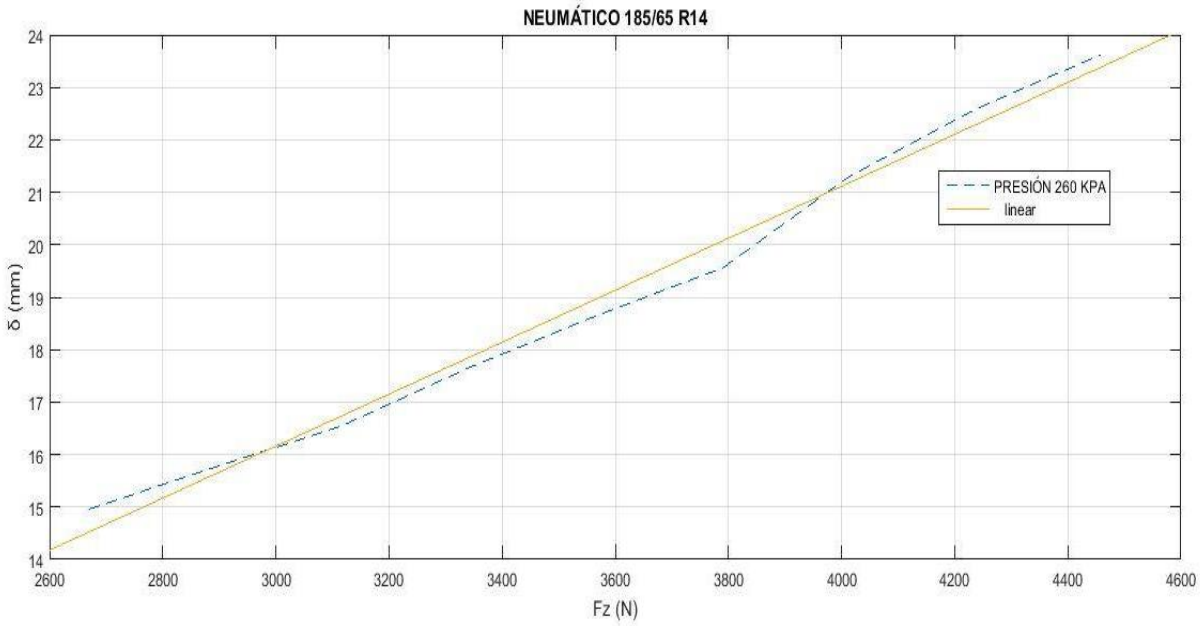


Figura 22: *Relación experimental entre deflexión y la carga aplicada ajustada linealmente. Neumático R14. Presión de inflado de 260 kpa.*

Fuente: *Autores.*

$$\delta_{(140\ kpa)} = 0{,}0052 * Fz + 5{,}1632 \qquad R^2 = 0{,}9934 \qquad \text{[Ecu. 7.6]}$$

$$\delta_{(180\ kpa)} = 0{,}0055 * Fz + 3{,}9083 \qquad R^2 = 0{,}9962 \qquad \text{[Ecu. 7.7]}$$

$$\delta_{(220\ kpa)} = 0{,}0044 * Fz + 4{,}471 \qquad R^2 = 0{,}9984 \qquad \text{[Ecu. 7.8]}$$

$$\delta_{(240\ kpa)} = 0{,}0049 * Fz + 2{,}9197 \qquad R^2 = 0{,}9996 \qquad \text{[Ecu. 7.9]}$$

$$\delta_{(260\ kpa)} = 0{,}0045 * Fz + 2{,}9307 \qquad R^2 = 0{,}9954 \qquad \text{[Ecu. 7.10]}$$

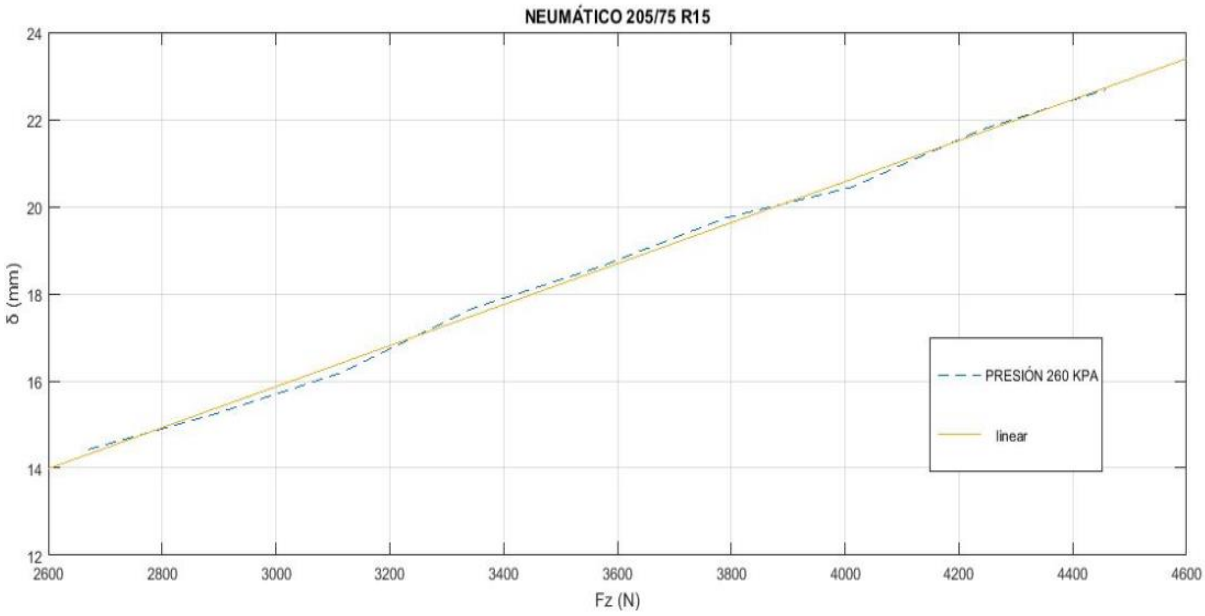


Figura 23: *Relación experimental entre deflexión y la carga aplicada ajustada linealmente. Neumático R15. Presión de inflado de 260 kpa.*

Fuente: *Autores.*

$$\delta_{(140\ kpa)} = 0{,}0054 * Fz + 4{,}4838 \qquad R^2 = 0{,}9939 \qquad \text{[Ecu. 7.11]}$$

$$\delta_{(180\ kpa)} = 0{,}0049 * Fz + 4{,}027 \qquad R^2 = 0{,}9987 \qquad \text{[Ecu. 7.12]}$$

$$\delta_{(220\ kpa)} = 0{,}0048 * Fz + 3{,}3686 \qquad R^2 = 0{,}9994 \qquad \text{[Ecu. 7.13]}$$

$$\delta_{(240\ kpa)} = 0{,}005 * Fz + 2{,}1009 \qquad R^2 = 0{,}998 \qquad \text{[Ecu. 7.14]}$$

$$\delta_{(260\ kpa)} = 0{,}0044 * Fz + 2{,}8338 \qquad R^2 = 0{,}9967 \qquad \text{[Ecu. 7.15]}$$

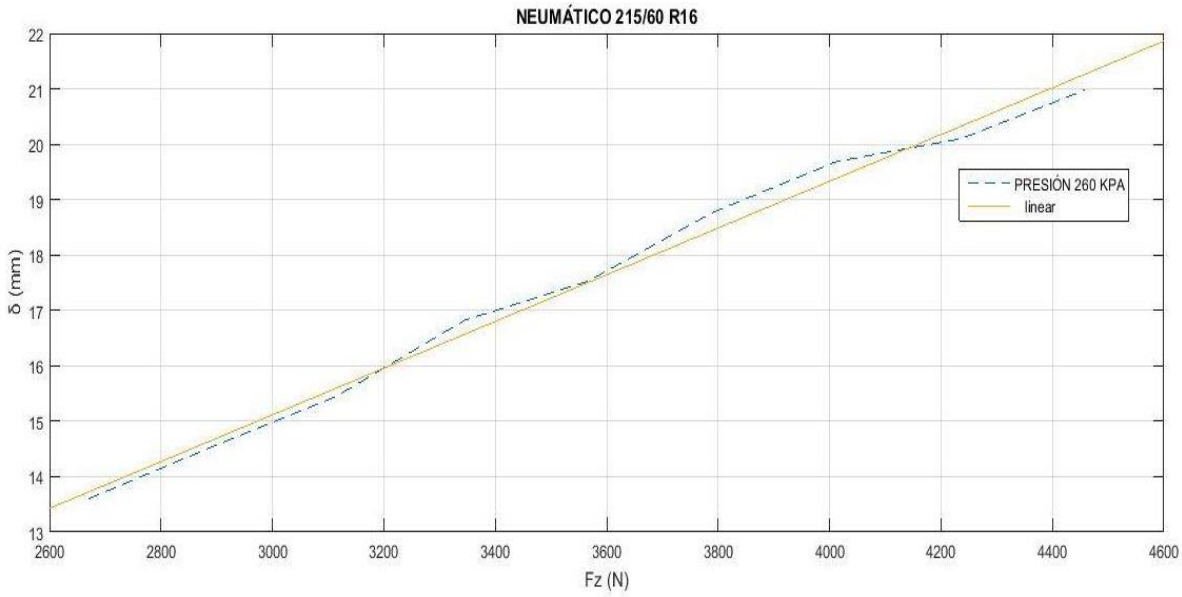


Figura 24: *Relación experimental entre deflexión y la carga aplicada ajustada linealmente. Neumático R16. Presión de inflado de 260 kpa.*

Fuente: *Autores.*

$$\delta_{(140\ kpa)} = 0{,}0052 * Fz + 4{,}1126 \qquad R^2 = 0{,}9965 \qquad \text{[Ecu. 7.16]}$$

$$\delta_{(180\ kpa)} = 0{,}005 * Fz + 3{,}0425 \qquad R^2 = 0{,}9989 \qquad \text{[Ecu. 7.17]}$$

$$\delta_{(220\ kpa)} = 0{,}0049 * Fz + 2{,}9434 \qquad R^2 = 0{,}9978 \qquad \text{[Ecu. 7.18]}$$

$$\delta_{(240\ kpa)} = 0{,}0048 * Fz + 1{,}7137 \qquad R^2 = 0{,}9988 \qquad \text{[Ecu. 7.19]}$$

$$\delta_{(260\ kpa)} = 0{,}0047 * Fz + 0{,}9169 \qquad R^2 = 0{,}9987 \qquad \text{[Ecu. 7.20]}$$

Acorde a los criterios antes mencionados, la expresión que presenta el ajuste lineal adecuado de la relación entre deflexión y carga aplicada con los datos obtenidos de las pruebas experimentales queda expresada como:

$$\delta = a \cdot Fz + b \qquad \text{[Ecu. 7.21]}$$

Donde δ es la deflexión, Fz es la carga aplicada, a y b son coeficientes experimentales del neumático en estudio, esta expresión se la aborda con detalle en el punto referente al desarrollo del modelo matemático de la rigidez radial estática.

7.1.3. Transformación de la variable dependiente

Con la finalidad de conseguir normalidad en la relación de la deflexión ante carga para diferentes presiones de inflado del neumático se propone transformar la variable de respuesta. El objetivo de la transformación de la variable dependiente es decir la deflexión es poder tener unos datos más exactos y que a la hora de realizar la gráfica sea mas linealizado, por el cual el comando "transformaciones Box Cox" nos brinda una tabla de valores que podemos utilizar para dicho ajuste, el cual mediante pruebas reales realizadas con cada uno de estos datos, se observo el valor que más se ajusta a nuestra necesidad y es el número que utilizaremos para nuestro análisis. De esta forma se determina una trasformación de potencia adecuada, para mantener linealidad en la relación.

Transformación Box Cox

Box Cox es utilizado para conseguir una trasformación adecuada de la variable de respuesta o variable dependiente, como sabemos en nuestro estudio la variable de respuesta es la deflexión producida al momento de aplicar carga, por tanto una trasformación de esta variable nos permite un análisis consistente tanto del valor de la pendiente y el valor de la ordenada en el origen, para posteriormente realizar una relación con la presión de inflado del neumático.

Las trasformaciones consideradas en este método se definen por:

$$Y' = (Y + \lambda_2)^{\lambda_1} \qquad \text{[Ecu. 7.22]}$$

en la cual los datos son calculados en una potencia de λ1 después de cambiarlo a una cierta cantidad λ2. Posteriormente, el parámetro de cambio λ2 se fija igual a 0. Esta clase incluyen raíces cuadradas, logaritmos, recíprocos, y otras transformaciones comunes, que dependen sobre una potencia [13]. Los ejemplos incluyen:

Tabla2: *Valores correspondientes a la transformaciones de box cox.*

Fuente: [13]

Potencia	Transformación	Descripción
$\lambda_1 = 2$	$Y' = Y^2$	Cuadrado
$\lambda_1 = 1$	$Y' = Y$	Datos sin Transformar
$\lambda_1 = 0.5$	$Y' = \sqrt{Y}$	Raíz Cuadrada
$\lambda_1 = 0.333$	$Y' = \sqrt[3]{Y}$	Raíz Cúbica
$\lambda_1 = 0$	$Y' = \ln(Y)$	Logaritmo
$\lambda_1 = -0.5$	$Y' = \frac{1}{\sqrt{Y}}$	Raíz Cuadrada Inversa
$\lambda_1 = -1$	$Y' = \frac{1}{Y}$	Reciproco

Así entonces para nuestro estudio consideramos que $Y'm = \delta' = \delta^{0,333}$, es decir la raíz cubica de la variable dependiente.

7.1.4. Ajuste de la transformación en la relación de la deflexión-fuerza vertical para diferentes presiones de inflado del neumático

Este procedimiento nos ayuda a mantener un valor de la pendiente casi constante para los neumáticos en estudio de esta manera el siguiente paso sería analizar la ordenada en el origen en relación con la presión de inflado del neumático, este procedimiento se describe más adelante.

A continuación se muestra al pie de cada figura de la relación las expresiones ajustadas linealmente conjuntamente con el coeficiente de correlación R^2.

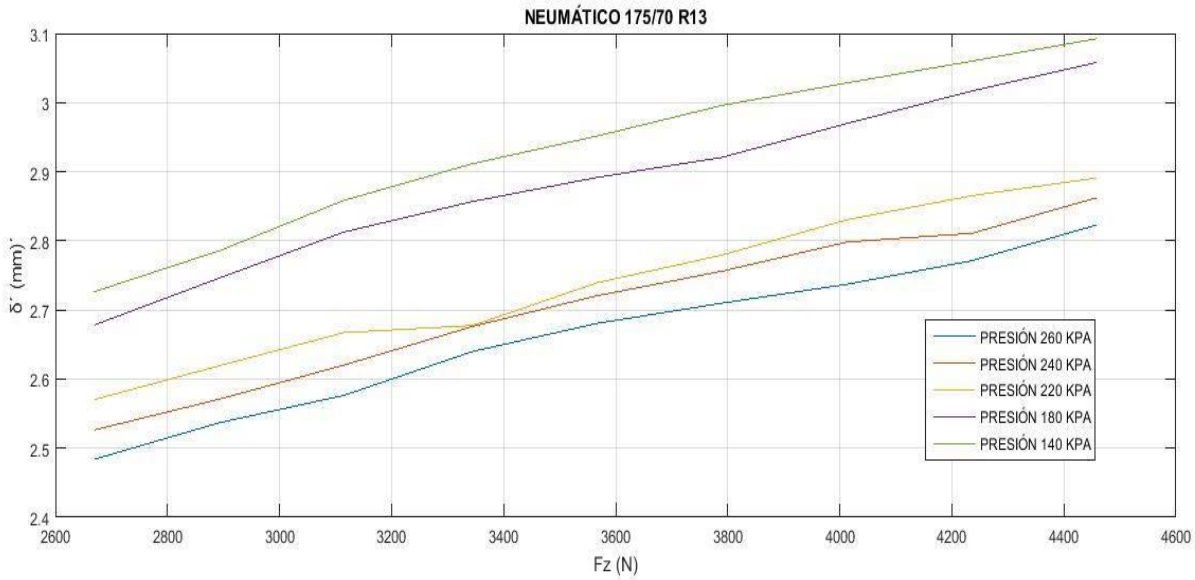


Figura 25: *Transformación en la relación experimental entre deflexión y la carga aplicada. Neumático R13.*

Fuente: *Autores.*

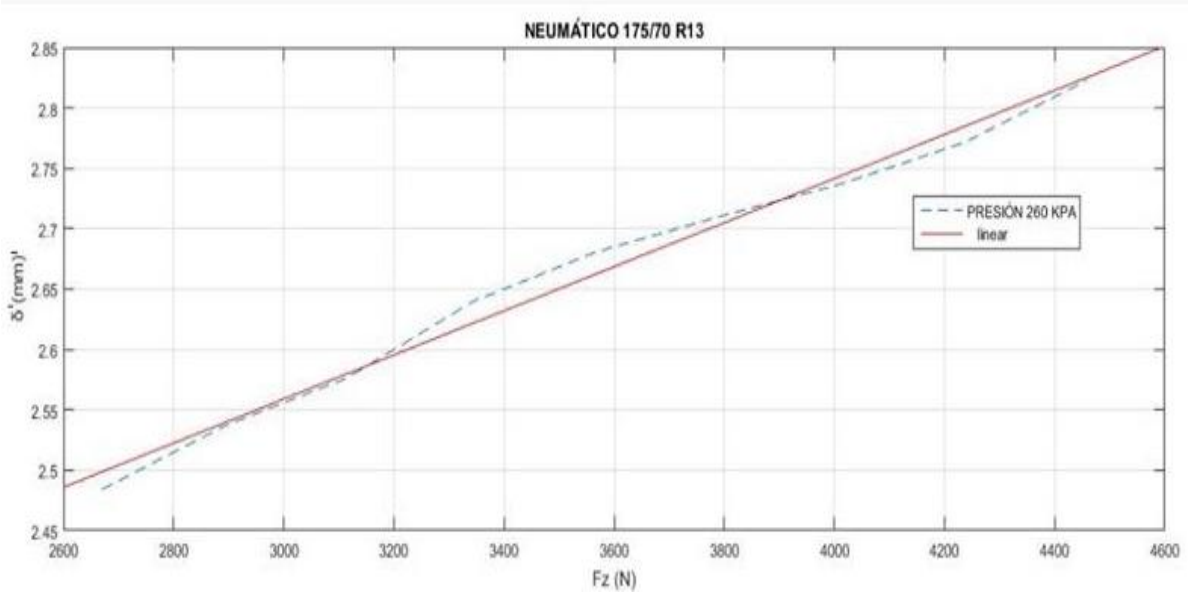


Figura 26: *Ajuste lineal de la transformación en la relación experimental entre deflexión y la carga aplicada. Neumático R13. Presión de inflado 260 kpa.*

Fuente: *Autores.*

$$\delta'_{(140\ kpa)} = 0{,}0002 * Fz + 2{,}154 \qquad R^2 = 0{,}9254 \qquad \text{[Ecu. 7.23]}$$

$$\delta'_{(180\ kpa)} = 0{,}0002 * Fz + 2{,}1317 \qquad R^2 = 0{,}9632 \qquad \text{[Ecu. 7.24]}$$

$$\delta'_{(220\ kpa)} = 0{,}0002 * Fz + 2{,}075 \qquad R^2 = 0{,}9633 \qquad \text{[Ecu. 7.25]}$$

$$\delta'_{(240\ kpa)} = 0{,}0002 * Fz + 2{,}0452 \qquad R^2 = 0{,}9495 \qquad \text{[Ecu. 7.26]}$$

$$\delta'_{(260\ kpa)} = 0{,}0002 * Fz + 1{,}9955 \qquad R^2 = 0{,}9631 \qquad \text{[Ecu. 7.27]}$$

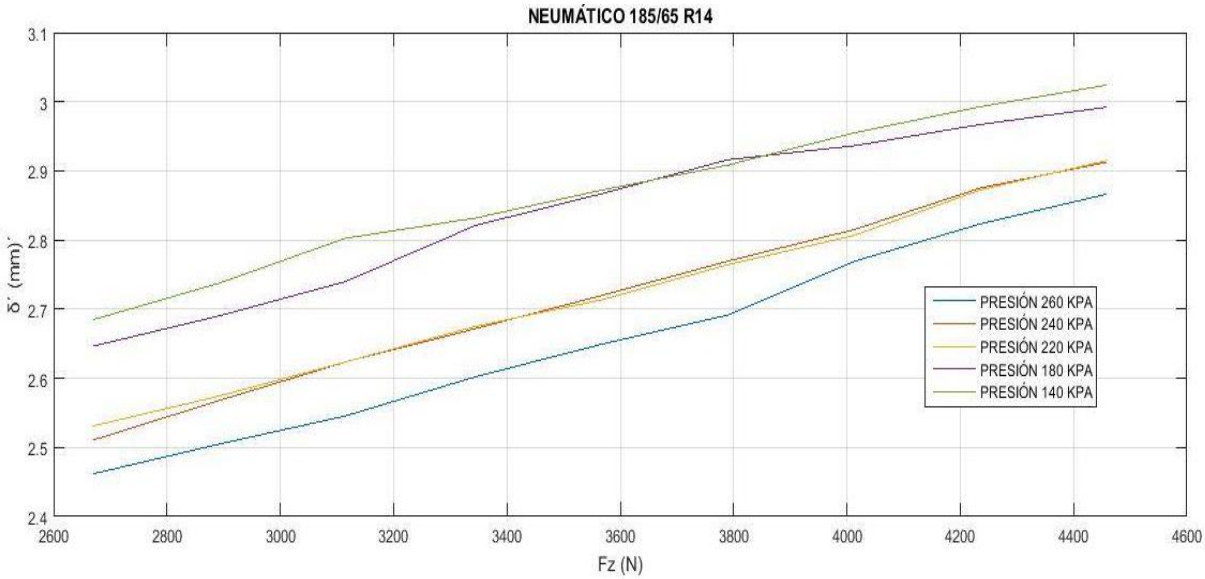


Figura 27: *Transformación en la relación experimental entre deflexión y la carga aplicada. Neumático R14.*

Fuente: *Autores.*

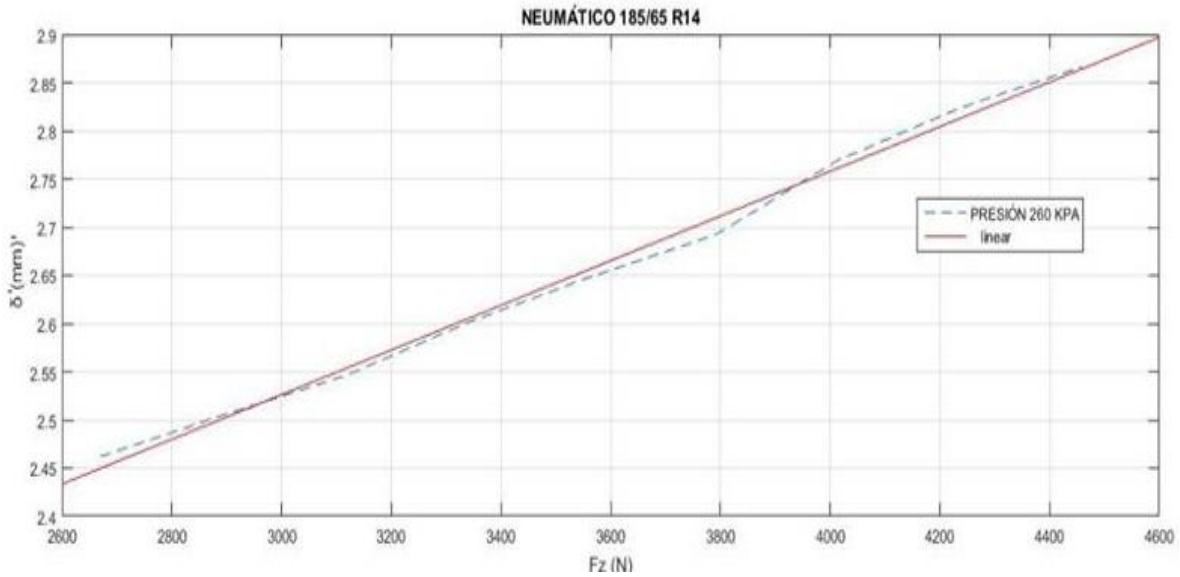


Figura 28: *Ajuste lineal de la transformación en la relación experimental entre deflexión y la carga aplicada. Neumático R14. Presión de inflado 260 kpa.*

Fuente: *Autores.*

$$\delta'_{(140\ kpa)} = 0{,}0002 * Fz + 1{,}9503 \qquad R^2 = 0{,}9827 \qquad \text{[Ecu. 7.28]}$$

$$\delta'_{(180\ kpa)} = 0{,}0003 * Fz + 1{,}8731 \qquad R^2 = 0{,}9948 \qquad \text{[Ecu. 7.29]}$$

$$\delta'_{(220\ kpa)} = 0{,}0002 * Fz + 1{,}8683 \qquad R^2 = 0{,}9935 \qquad \text{[Ecu. 7.30]}$$

$$\delta'_{(240\ kpa)} = 0{,}0003 * Fz + 1{,}769 \qquad R^2 = 0{,}996 \qquad \text{[Ecu. 7.31]}$$

$$\delta'_{(260\ kpa)} = 0{,}0002 * Fz + 1{,}762 \qquad R^2 = 0{,}9929 \qquad \text{[Ecu. 7.32]}$$

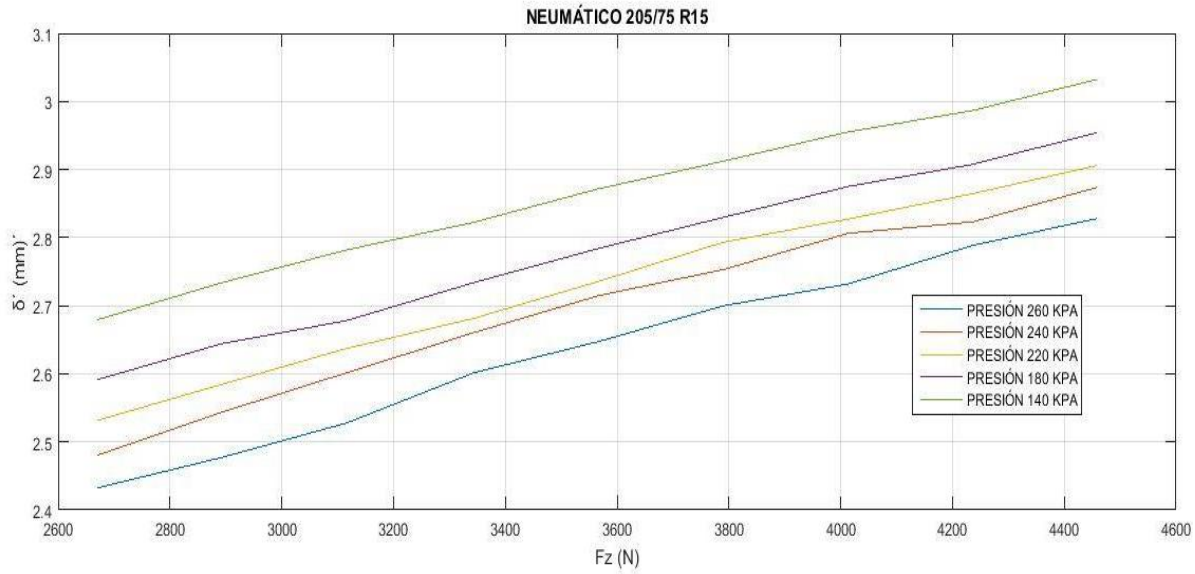


Figura 29: *Transformación en la relación experimental entre deflexión y la carga aplicada. Neumático R15.*

Fuente: *Autores.*

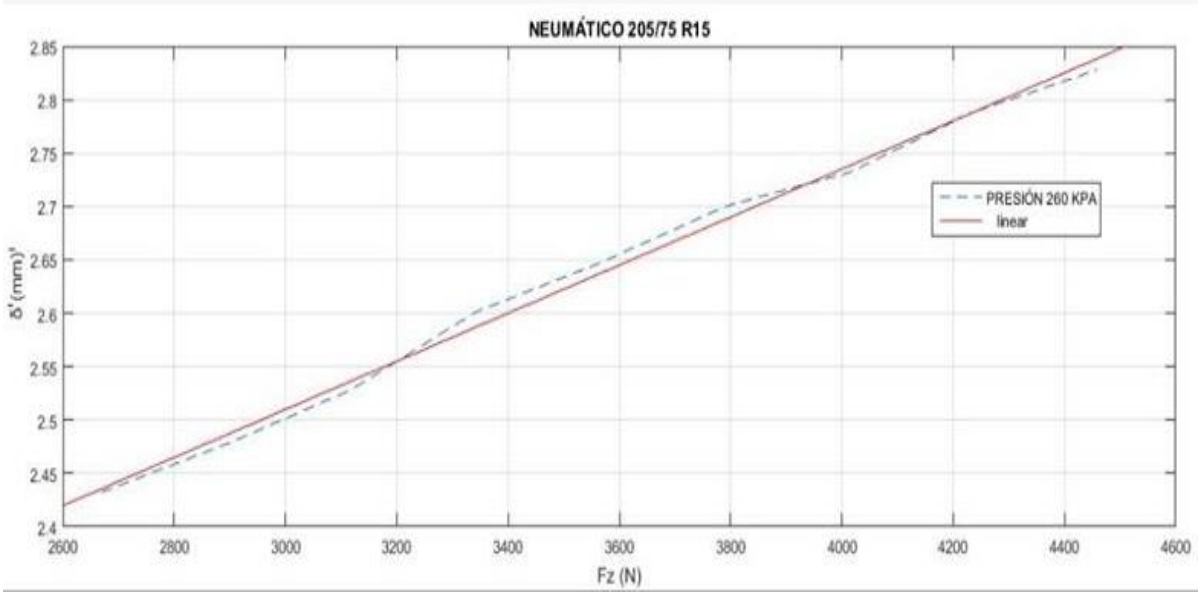


Figura 30: *Ajuste lineal de la transformación en la relación experimental entre deflexión y la carga aplicada. Neumático R15. Presión de inflado 260 kpa.*

Fuente: *Autores.*

$$\delta'_{(140\ kpa)} = 0{,}0003 * Fz + 1{,}9094 \qquad R^2 = 0{,}9807 \qquad \text{[Ecu. 7.33]}$$

$$\delta'_{(180\ kpa)} = ,0002 * Fz + 1{,}8624 \qquad R^2 = 0{,}9924 \qquad \text{[Ecu. 7.34]}$$

$$\delta'_{(220\ kpa)} = 0{,}0002 * Fz + 1{,}804 \qquad R^2 = 0{,}9975 \qquad \text{[Ecu. 7.35]}$$

$$\delta'_{(240\ kpa)} = 0{,}0003 * Fz + 1{,}7089 \qquad R^2 = 0{,}9936 \qquad \text{[Ecu. 7.36]}$$

$$\delta'_{(260\ kpa)} = 0{,}0002 * Fz + 1{,}7321 \qquad R^2 = 0{,}9973 \qquad \text{[Ecu. 7.37]}$$

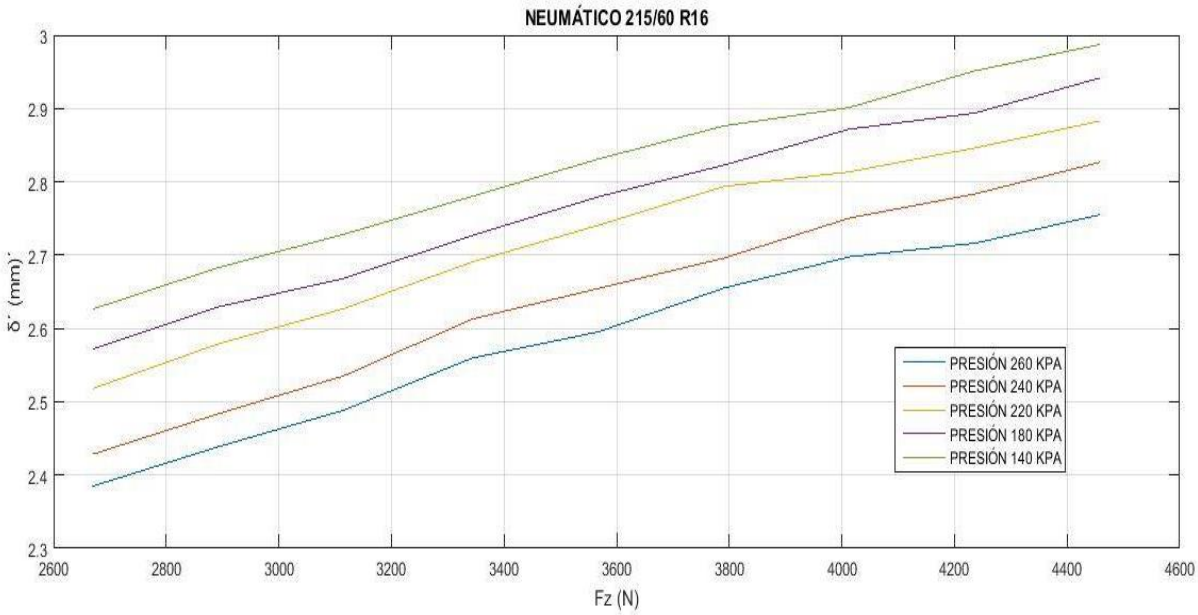


Figura 31: *Transformación en la relación experimental entre deflexión y la carga aplicada. Neumático R16.*

Fuente: *Autores.*

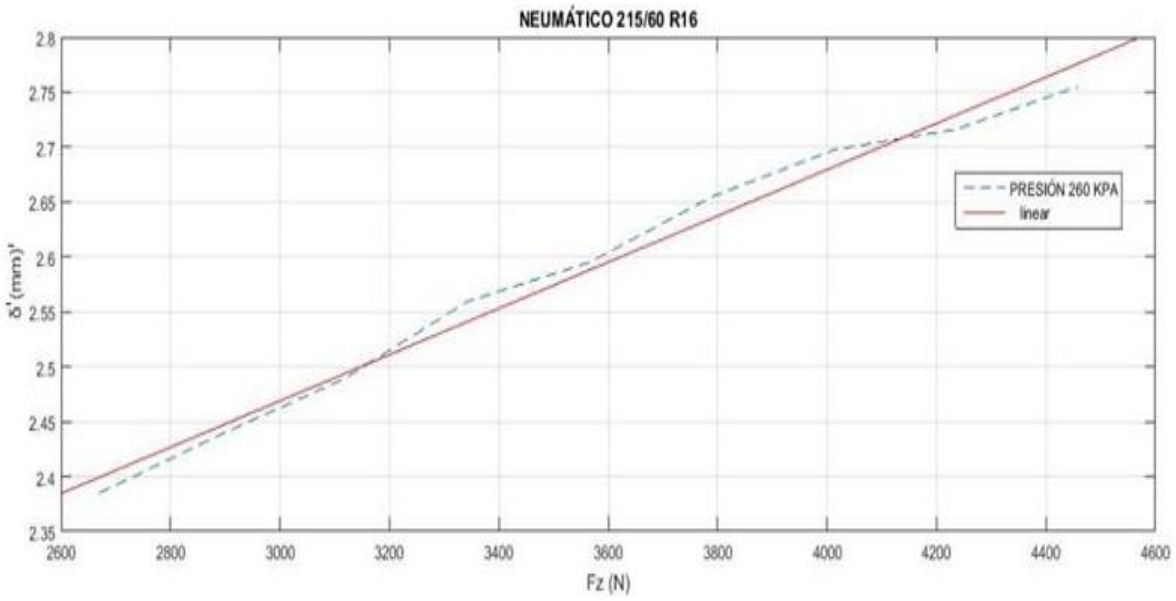


Figura32: *Ajuste lineal de la transformación en la relación experimental entre deflexión y la carga aplicada. Neumático R16. Presión de inflado 260 kpa.*

Fuente: *Autores*

$$\delta'_{(140\ kpa)} = 0{,}0003 * Fz + 1{,}8668 \qquad R^2 = 0{,}9906 \qquad \text{[Ecu. 7.38]}$$

$$\delta'_{(180\ kpa)} = 0{,}0003\text{x} * Fz + 1{,}7972 \qquad R^2 = 0{,}9916 \qquad \text{[Ecu. 7.39]}$$

$$\delta'_{(220\ kpa)} = 0{,}0003 * Fz + 1{,}7629 \qquad R^2 = 0{,}9965 \qquad \text{[Ecu. 7.40]}$$

$$\delta'_{(240\ kpa)} = 0{,}0003 * Fz + 1{,}6588 \qquad R^2 = 0{,}9956 \qquad \text{[Ecu. 7.41]}$$

$$\delta'_{(260\ kpa)} = 0{,}0003 * Fz + 1{,}5712 \qquad R^2 = 0{,}9953 \qquad \text{[Ecu. 7.42]}$$

7.1.5. Ajuste en la relación de la ordenada en el origen con la presión de inflado del neumático.

Esta relación es de fundamental importancia en el planteamiento del modelo de la rigidez radial estática del neumático, el análisis se realiza individualmente para cada tipo de neumático con la finalidad de encontrar un ajuste adecuado, y a su vez este valor será reemplazado en la ecuación 7.21 expuesta anteriormente.

La expresión resultante del ajuste de cada neumático en estudio, está expuesta al pie de cada figura.

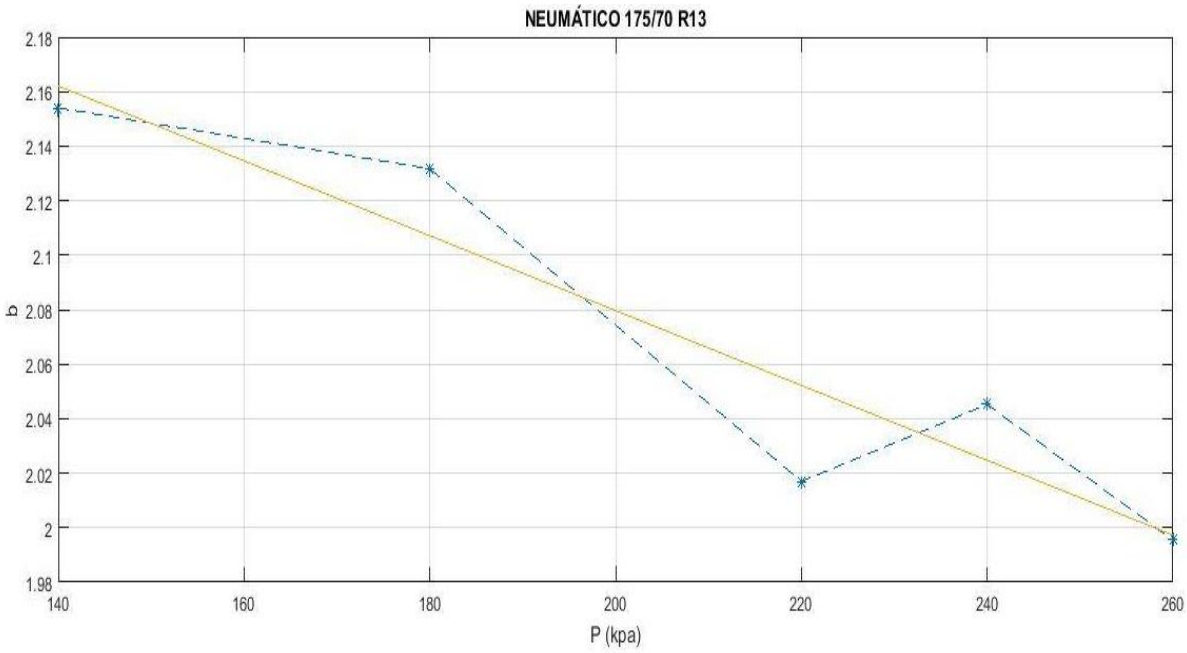


Figura33: *Relación experimental entre la ordenada en el origen y la presión de inflado del neumático ajustada linealmente. Neumático R13.*

Fuente: *Autores*

$$b = -0{,}0014 * P + 2{,}3543 \qquad R^2 = 0{,}8825 \qquad \text{[Ecu. 7.43]}$$

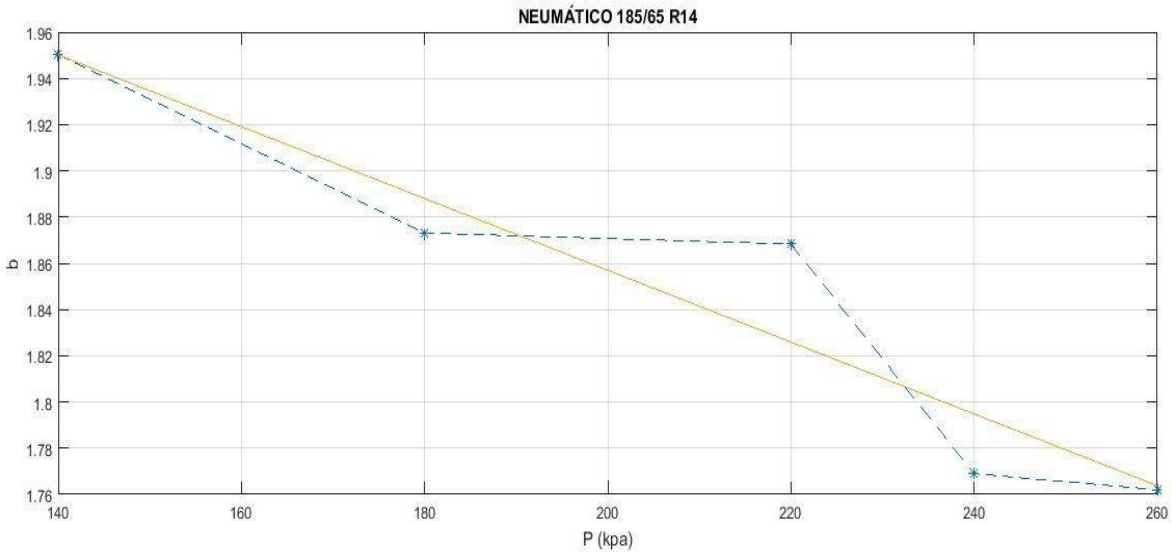


Figura34: *Relación experimental entre la ordenada en el origen y la presión de inflado del neumático ajustada linealmente. Neumático R14.*

Fuente: *Autores*

$$b = -0{,}0016 * P + 2{,}1676 \qquad R^2 = 0{,}8927 \qquad \text{[Ecu. 7.44]}$$

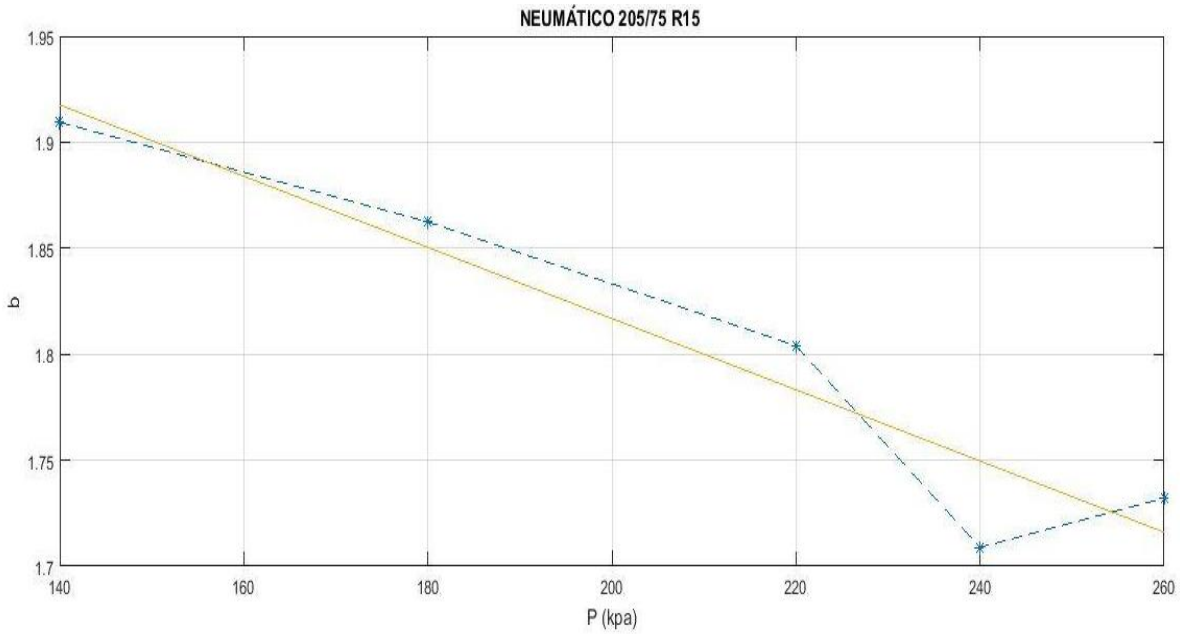


Figura35: *Relación experimental entre la ordenada en el origen y la presión de inflado del neumático ajustada linealmente. Neumático R15.*

Fuente: *Autores*

$$b = -0{,}0017 * P + 2{,}1527 \qquad R^2 = 0{,}9109 \qquad \text{[Ecu. 7.45]}$$

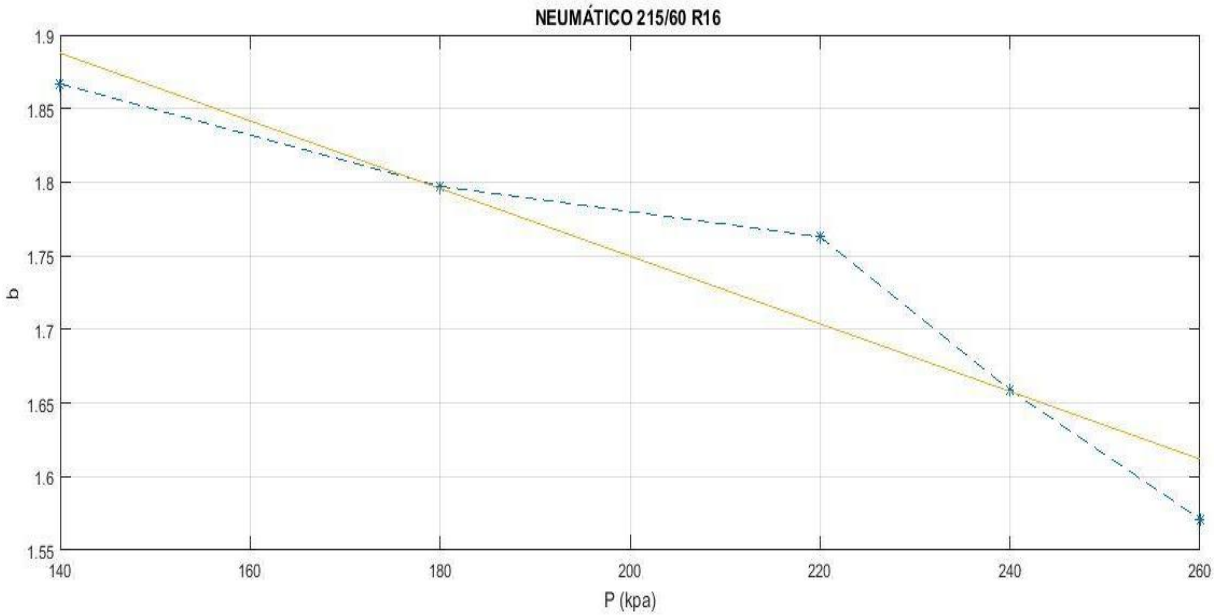


Figura 36: *Relación experimental entre la coordenada en el origen y la presión de inflado del neumático ajustada linealmente. Neumático R16.*

Fuente: *Autores*

$$b = -0{,}0023 * P + 2{,}2094 \qquad R^2 = 0{,}8977 \qquad \text{[Ecu. 7.46]}$$

Un ajuste lineal es el seleccionado para representar la relación entre la ordenada en el origen y la presión de inflado del neumático para los distintos neumáticos en estudio, los valores de coeficiente de determinación nos indican que este tipo de ajuste es apropiado. De las ecuaciones 7.43, 7.44, 7.45 y 7,46 obtenemos una única ecuación, sacando un promedio entre valores de la pendiente y ordenada en el origen de la relación mencionada anteriormente, la expresión resultante es la siguiente:

$$b = -0{,}001675 * P + 2{,}208375 \qquad \text{[Ecu. 7.47]}$$

Esta expresión es la utilizada para representar el valor de la ordenada en el origen b y que incorpora la presión de inflado P del neumático para la función 6.21, de esta manera procedemos al planteamiento del modelo matemático de la rigidez radial estática del neumático.

7.2. SEGUNDO APARTADO: Geometría del neumático

La Geometría del neumático es primordial para el estudio de la rigidez radial estática, pues de acuerdo al ancho de sección, la relación de aspecto y radio podemos establecer un procedimiento para la obtención de la deflexión.

En la siguiente gráfica podemos observar todos los parámetros establecidos, los cuales están representados con sus designaciones y lo que significa cada uno de ellos.

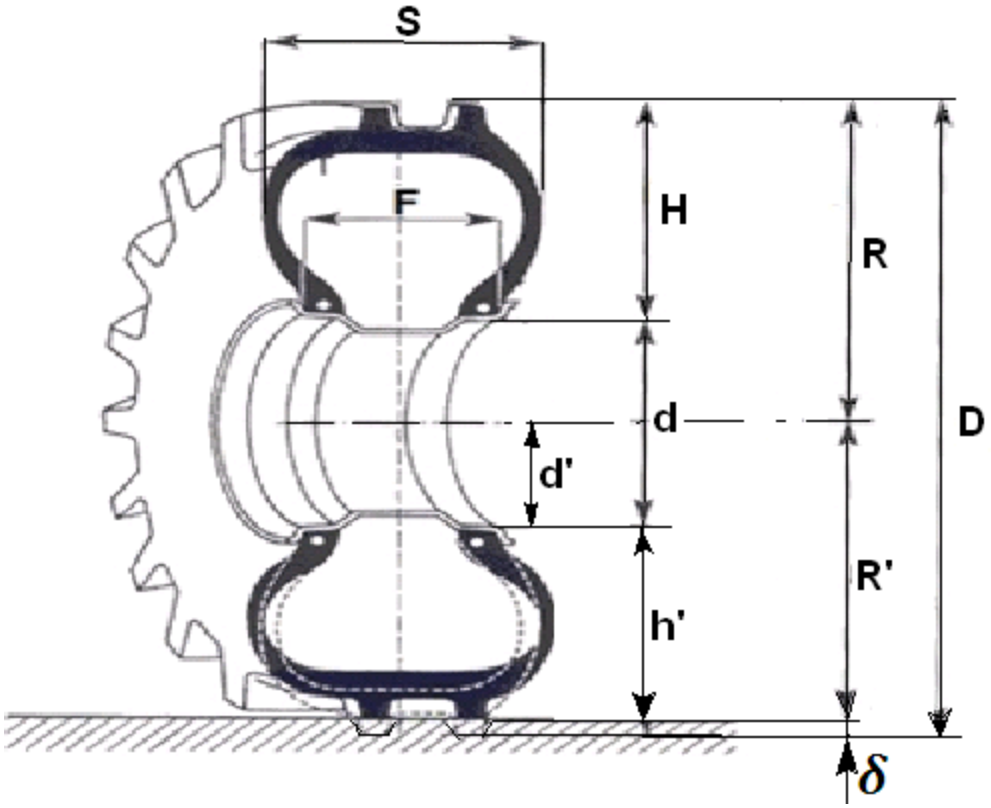


Figura 37: *Sección dimensional del neumático con la incorporación de la deflexión y deformación del conjunto llanta neumático.*

Fuente: [4]

- S = Anchura nominal del neumático
- H= Altura de sección del neumático
- h' = Deformación del neumático
- D = Diámetro exterior del neumático
- d = Diámetro de la llanta
- d' = Radio de la llanta
- R = Radio conjunto llanta-neumático
- R' = Deformación conjunto llanta-neumático
- δ = Deflexión

Para la obtención de la deflexión se establece una expresión matemática, como se menciono con anterioridad a partir de las designaciones que se encuentran en la figura 35, se establece lo siguiente:

Altura de sección del neumático

A partir de los datos de la geometría del neumático (215/60 r16), podemos encontrar la altura de sección del mismo, pues la relación de aspecto se divide para 100 y se multiplica por el ancho de sección, el resultado está establecido en mm.

$$H = \frac{Ra}{100} * S \qquad \text{[Ecu. 7.48]}$$

es necesario este paso para posteriormente poder encontrar la deflexión del neumático.

Deformación conjunto llanta-neumático

Se debe comprender que el conjunto llanta-neumático al encontrarse bajo una fuerza vertical, de la parte central del aro hacia la parte superior; es decir $\left(H + d^{'}\right)$ no existe variación en cuanto a su forma y mantiene una única medida. Pero de la parte central del aro hacia la parte inferior donde el neumático mantiene contacto con el piso; es decir $\left(h^{'} + d^{'}\right)$ existe variación en cuanto a su forma y mantiene otra medida. De esta manera es indispensable poder medir la deformación conjunto llanta neumático R′ para nuestro análisis.

$$\mathbf{R'} = \mathbf{d'} + \mathbf{h'} \qquad \text{[Ecu. 7.49]}$$

Deflexión

Para este análisis la altura de sección del neumático se resta a la deformación conjunto llanta-neumático y encontramos la deflexión.

$$\boldsymbol{\delta = H + d' - R'} \qquad \text{[Ecu. 7.50]}$$

Al analizar esta expresión matemática observamos que el alto de sección H más el radio de la llanta d' está en condiciones iniciales, es decir no han sufrido cambios en su estructura o medida. De tal manera que al restar al conjunto llanta-neumático R′que sí a sufrido cambios en su estructura y medida podemos observar la variación que existe y obtener la deflexión del neumático.

8. PLANTEAMIENTO DEL MODELO MATEMÁTICO PARA LA OBTENCIÓN DE LA RIGIDEZ RADIAL ESTÁTICA DEL NEUMÁTICO

Del estudio experimental realizado anteriormente se estable que la deflexión va relacionada con la carga aplicada y que esta tiene una pendiente propia a cada presión de inflado del neumático y el tipo de neumático en estudio.

Con lo deducido en cuanto al estudio de la geometría del neumático en relación a la deflexión, encontramos la expresión matemática adecuada, que es un punto vital de la investigación.

8.1. Expresiones resultantes de la deflexión y carga

Tal como se observó anteriormente para realizar un análisis donde la pendiente no incorpore una función, se transformaron los datos de deflexión manteniendo, de esta forma el valor de pendiente casi constante, de esta manera el análisis de la ordenada en el origen incorpora la presión de inflado del neumático en una función lineal que satisface la relación existente, reemplazando el valor de la transformación de los valores de deflexión y la función del análisis de la ordenada en el origen se tendría la siguiente función:

$$\delta' = a \cdot Fz + (-0{,}001675 * P \ + \ 2{,}208375\ ) \qquad \text{[Ecu. 8.1]}$$

Donde δ' los valores de deflexión transformados mediante el método de box cox, a representa un valor que permanece casi constante y será establecida para cada presión de inflado y el tipo de neumático, de manera que la carga se encuentre entorno 5 % como margen de error, los valores comprendidos de **a** se presentan en el anexo B de acuerdo al tipo de llanta o rin.

De la ecuación (4.5) se tiene que la división de la carga para la deflexión producida, nos da un valor de rigidez radial del neumático en condición estática, conocer la carga que soporta el neumático en condiciones estáticas favorece la aplicación de esta fórmula, por ende si de la expresión 8.1 se despeja, la fuerza vertical o carga aplicada es:

$$Fz = \frac{\delta' - (-0{,}001675 * P + 2{,}208375\ )}{a} \qquad \text{[Ecu. 8.2]}$$

Donde Fz es la carga aplicada, δ' es la transformación de la deflexión del neumático, P es la presión de inflado y a es un coeficiente experimental que dependerá de la presión de inflado del neumático.

Reemplazo

De acuerdo al estudio experimental realizado se pudo obtener una expresión matemática 7.50 que satisface las características geométricas dimensionales del neumático en relación a la deflexión, reemplazando en la expresión 8.2 del estudio de las variables (carga, presión) ante deflexión y geometría del neumático también ante deflexión, podemos establecer la siguiente expresión matemática:

$$Fz = \frac{\left(H+d'-R'\right)^{0,333}-(-0,001675*P+2,208375\ )}{a} \qquad \text{[Ecu. 8.3]}$$

Donde Fz es la carga aplicada, $(H+d')$es la deformación conjunto llanta neumático y R' es la deformación conjunto llanta neumático, P es la presión de inflado y a es un coeficiente experimental.

De acuerdo al estudio realizado y en base a la expresión 4.5, podemos establecer la expresión matemática para el cálculo de la rigidez radial estática del neumático, dicha expresión queda determinada de la siguiente manera:

$$\boldsymbol{Kz = \frac{\frac{\left(H+d'-R'\right)^{0,333}-(-0,001675*P+2,208375\ )}{a}}{(H+d'-R')}} \qquad \text{[Ecu. 8.4]}$$

De esta manera obtenemos una expresión matemática que satisface las necesidades del proyecto donde abarca las variables de estudio (carga aplicada, presión de inflado, deflexión y geometría del neumático)

9. VALIDACIÓN DEL MODELO DE LA RIGIDEZ RADIAL ESTÁTICA

Para una mejor interpretación del modelo matemático propuesto mediante los ajustes de los datos obtenidos en las pruebas experimentales, se procede a la validación del

modelo matemático de rigidez radial estática, partiendo por las fases descritas a continuación:

FASE 1: **Obtención de la carga que soporta el conjunto llanta neumático en el vehículo**

Se coloca vehículo de prueba a la balanza, de esta manera se obtiene la masa del vehículo centrada en el eje delantero y posterior, al dividir para dos este valor nos da el valor de la masa que soporta el conjunto neumático llanta, en este paso el valor real de masa obtenido debe ser multiplicado por la gravedad (9,81) para obtener unidades de fuerza (N), el detalle de este procedimiento se puede observar en el anexo A, para los vehículos de prueba 1 y 2.

Vehículo de prueba 1

Tabla 3: *Pesaje del vehículo de prueba 1.*

Fuente: *Autores*

PESAJE VEHÍCULO MAZDA BT 50 4X2 2015		
EJES	MASA (kg)	PESO (N)
Delantero en vacío	715	7014,15
Posterior en vacío	640	6278,4
TOTAL	1355	13292,55

De la tabla 3 se entiende la carga que soporta el conjunto llanta neumático delantero y posterior es valor de carga de cada eje dividido para dos.

- Peso que soporta el conjunto llanta neumático delantero **3507,07 N.**

- Peso que soporta el conjunto llanta neumático posterior **3139,2 N.**

Vehículo de prueba 2

Tabla 4: *Pesaje del vehículo de prueba 2.*

Fuente: *Autores*

PESAJE VEHÍCULO SUZUKI FORZA 1999		
EJES	MASA (kg)	PESO (N)
Delantero en vacío	410	4022,1
Posterior en vacío	275	2697,75
TOTAL	685	6719,95

De igual forma la tabla 4 se entiende la carga que soporta el conjunto llanta neumático delantero y posterior es valor de carga de cada eje dividido para dos.

- Peso que soporta el conjunto llanta neumático delantero **2011,05 N.**
- Peso que soporta el conjunto llanta neumático posterior **1348,87 N.**

FASE 2: **Aplicación del modelo propuesto para el tipo de neumático en estudio.**

Con el propósito de comparar la carga que soporta en el conjunto llanta-neumático, se procede a ingresar los valores que requiere el modelo planteado, la presión de inflado deber estar comprendida a las presiones que se establecieron para la prueba experimental y cercana a las presiones de inflados recomendados por el fabricante, el procedimiento es el siguiente:

- Colocamos el valor de la deformación producida en el conjunto llanta neumático R', valor desde el eje central del conjunto llanta neumático hasta el piso.

Tabla 5: *Deformaciones conjunto llanta neumático.*

Fuente: *Autores*

Deformación producida vehículo 1 (260 kpa)		**Deformación producida vehículo 2 (220 kpa)**	
Conjunto llanta neumático	Deformación (mm)	Conjunto llanta neumático	Deformación (mm)
Delantero (mm)	314,1	Delantero (mm)	274,7
Posterior (mm)	315,9	Posterior (mm)	277,2

- Ingresamos la presión de inflado del neumático en la expresión.
- Ingresamos los valores correspondientes a las características que definen las dimensiones del neumático (Designación Geométrica).

Tabla 6: *Designación de los neumáticos utilizados.*

Fuente: *Autores*

Designación geométrica neumático vehículo 1	**Designación geométrica neumático vehículo 2**
215 / 60 R 16	175 / 70 R 13

- Colocamos el valor de **a** según el tipo de llanta o rin a analizar expuesta en el anexo B.

Tabla 7: *Valor de* ***a*** *según tipo de rin y la presión de inflado del neumático.*

Fuente: *Autores*

Tipo de rin a la presión de inflado del neumático	**a**
R16 a 260 kpa	0,00023
R13 a 220 kpa	0,000252

- Obtención de valores de carga con el modelo propuesto 8.3 y comparación con el valor real de carga.

Tabla 8: *Resultados de carga vehículo 1.*

Fuente: *Autores*

Conjunto llanta neumático	**Modelo matemático de carga (N)**	**Real (N)**
Delantero	3696,42	3507,07
Posterior	3305,48	3139,2

Tabla 9: *Resultados de carga vehículo 2.*

Fuente: *Autores*

Conjunto llanta neumático	**Modelo matemático de carga (N)**	**Real (N)**
Delantero	1997,69	2011,05
Posterior	1354	1348,87

Nota: El rango de error de la carga esta entono al 5% si se compara con los valores de carga tomados de las pruebas experimentales.

Una vez obtenida la carga que soporta el conjunto llanta neumático se procede al obtener el valor de rigidez radial estática mediante la expresión resultante 8.4, los valores de la rigidez radial estática del neumático se presentan a continuación.

Tabla 10: *Resultados de Rigidez radia estática para vehículo 1.*

Fuente: *Autores*

Conjunto llanta neumático	**Modelo matemático para rigidez radia estática (N/mm)**
Delantero	204,22
Posterior	202,79

Tabla 11: *Resultados de Rigidez radia estática para vehículo 2.*

Fuente: *Autores*

Conjunto llanta neumático	**Modelo matemático para rigidez radia estática (N/mm)**
Delantero	154,85
Posterior	130,19

CONCLUSIONES

- La principales variables para obtener una expresión general que de un valor de rigidez radial estática son: la presión de inflado del neumático, la carga aplicada sobre el conjunto llanta neumático, la geometría del neumático y la deflexión producida.
- Evidentemente la presión de inflado es un parámetro fundamental y de mayor influencia en el estudio de las propiedades del neumático, debido a que a mayor o menor presión de inflado, la misma provocará resultados de esfuerzos diferentes cuando esté en contacto con la calzada.
- En la expresión resultante para obtener la carga aplicada se establece un valor de *a* para cada presión de inflado del neumático y la del tipo de rin en estudio, este valor es diferente ya que al variar la presión de inflado del neumático la pendiente de la expresión de carga cambia.
- Debido a que cada neumático posee diferentes propiedades de los materiales de fabricación, es lógico suponer que la deflexión a producir podría cambiar dependiendo la marca de éste, de tal manera el valor de la carga resúltante obtenida por la expresión podría ser afectada.
- El cambio del comportamiento de la curva de la relación entre rigidez radial y presión de inflado, se debe al tipo de neumático en estudio y de las propiedades de los materiales de fabricación, sin embrago la tendencia para cualquier tipo de neumático sigue siendo creciente, por su parte Rhyne en trabajo demostró empíricamente con numerosos tamaños y tipos de neumáticos que la rigidez del neumático es una función lineal de la presión de inflado.

RECOMENDACIONES

- Para el estudio del conjunto llanta neumático es necesario un banco de prueba donde se pueda variar las variables carga, ángulo de caída, movimiento y de esta manera proporcione valores de deflexión y carga reales para un estudio más exacto.
- Es necesario el estudio individual de un tipo de neumático que corresponda a un tipo de marca en específico a diferentes rines, con la finalidad de obtener un valor de la pendiente de cada presión de inflado del neumático para esta marca.

BIBLIOGRAFÍA

[1] «Inflation Pressures for Plus-Size Fitments,» 09 2009. [En línea]. Available: http://www.dawsengineering.com/linked_files/inflationpressuresforplussizefitments-daws.pdf. [Último acceso: 21 02 2016].

[2] «Verification of the Simulation Model with actual Experimentation for Vertical Stiffness passenger car tires under a static load.,» 22 11 2015. [En línea]. Available: http://www.ijsrp.org/research-paper-0116/ijsrp-p4921.pdf. [Último acceso: 24 03 2016].

[3] «Circula Seguro,» [En línea]. Available: http://www.circulaseguro.com/que-es-el-neumatico/. [Último acceso: 24 03 2016].

[4] «Ingemecánica,» [En línea]. Available: http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn72.html. [Último acceso: 02 04 2016].

[5] «Foroaircooled,» [En línea]. Available: http://www.foroaircooled.com/t270p15-el-post-de-los-neumaticos-que-modelo-medida-calza-vuestro-vw. [Último acceso: 02 04 2016].

[6] A. Rocero, «Auto10.,» 30 09 2014. [En línea]. Available: http://www.auto10.com/reportajes/cuantos-tipos-de-neumaticos-para-coche-existen/5412. [Último acceso: 02 04 2016].

[7] D. Algaba, «SlideShare,» 28 03 2013. [En línea]. Available: http://es.slideshare.net/dialmi/ruedas-y-neumaticos-17826208. [Último acceso: 02 04 2016].

[8] C. V. A. V. D. L. Francisco Aparicio Izquierdo, «Teoria de los vehiculos automoviles,» Madrid, 1995.

[9] P. M. Krmela J., «Determination of Radial Stiffness of Tire from Experiments On the Static Test Device Called Static Adhesor.,» *Metallurgical Journal,* pp. 81-84, 2012.

[10] B. L. Taylor RK, «Methods for measuring vertical tire stiffness,» 2001. [En línea]. Available: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.575.4004&rep=rep1&type=pdf. [Último acceso: 21 05 2016].

[11] «Temas para la educación,» 12 02 2011. [En línea]. Available: https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd7857.pdf. [Último acceso: 28 05 2016].

[12] S. Larsen, «Tire Presure Gauges,» 11 2005. [En línea]. Available: http://www.stevelarsen.net/pdfs/Tire%20Pressure%20Test/Tire%20Pressure%20Gauges.pdf. [Último acceso: 28 05 2016].

[13] «STATGRAPHICS,» 14 09 2006. [En línea]. Available: http://www.statgraphics.net/wp-content/uploads/2011/12/tutoriales/Transformaciones%20de%20Box-Cox.pdf. [Último acceso: 08 06 2016].

ANEXO A

PESAJE DEL VEHÍCULO 1

El vehículo 1 corresponde a una camioneta Mazda 4x2 modelo 2015, el pesaje se realizó por separado la parte delantera y la posterior tal como se muestra a continuación.

Figura A. 1: *Pesaje del vehículo 1en el eje delantero.*

Fuente: *Autores*

Figura A. 2: *Pesaje del vehículo 1 en el eje posterior.*

Fuente: *Autores*

PESAJE DEL VEHÍCULO 2

El vehículo 1 corresponde a una auto Suzuki Forza modelo 1999, el pesaje se realizó por de igual forma separado la parte delantera y la posterior como se muestra en las siguientes figuras.

Figura A. 1: *Pesaje del vehículo 2 en el eje delantero.*

Fuente: *Autores*

Figura A. 2: *Pesaje del vehículo 2 en el eje posterior.*

Fuente: *Autores*

ANEXO B

VALORES DE a OBTENIDOS QUE SATISFACE LA EXPRESIÓN DE CARGA

Tabla B.1: *Valores de* ***a.***

Fuente: *Autores*

Designación del neumático	a				
	140 kpa	**180 kpa**	**220 kpa**	**240 kpa**	**260 kpa**
R13	0,0002668	0,0002745	0,000252	0,000252	0,0002505
R14	0,000475	0,000491	0,0004973	0,000498	0,0004897
R15	0,000251	0,000245	0,00025	0,00025	0,00024
R16	0,000235	0,000245	0,000245	0,00023	0,00023

ANEXO C

Tabla C.1: *Valores de deflexión y deformación para el neumático R16.*

Fuente: *Autores*

NEUMÁTICO 215/60 R16 99H												
MASA		Carga (N)	Presion 260 KPa		Presion 240 KPa		Presion 220 KPa		Presion 180 KPa		Presion 140 KPa	
lbs	kg		Defl. (mm)	Defor (mm)	Defl. (mm)	Defor (mm)	Defl. (mm)	Defor (mm)	Defl. (mm)	Defor (mm)	Defl. (mm)	Defor (mm)
600	272,73	2669,83	13,6	318,60	14,36	317,84	16,01	316,19	17,06	315,14	18,17	314,03
650	295,45	2892,32	14,54	317,66	15,36	316,84	17,2	315,00	18,23	313,97	19,37	312,83
700	318,18	3114,80	15,45	316,75	16,34	315,86	18,18	314,02	19,05	313,15	20,37	311,83
750	340,91	3344,32	16,82	315,38	17,89	314,31	19,54	312,66	20,34	311,86	21,56	310,64
800	363,64	3567,27	17,53	314,67	18,76	313,44	20,65	311,55	21,54	310,66	22,76	309,44
850	386,36	3790,23	18,77	313,43	19,65	312,55	21,87	310,33	22,56	309,64	23,87	308,33
900	409,09	4013,18	19,69	312,51	20,87	311,33	22,34	309,86	23,76	308,44	24,5	307,70
950	431,82	4236,14	20,1	312,10	21,63	310,57	23,13	309,07	24,31	307,89	25,79	306,41
1000	454,55	4459,09	20,98	311,22	22,66	309,54	24,04	308,16	25,54	306,66	26,75	305,45

Tabla C.2: *Valores de deflexión y deformación para el neumático R15.*

Fuente: *Autores*

NEUMÁTICO 205/75 R15 97S												
MASA		Carga (N)	Presion 260 KPa		Presion 240 KPa		Presion 220 KPa		Presion 180 KPa		Presion 140 KPa	
lbs	kg		Defl. (mm)	Defor (mm)	Defl. (mm)	Defor (mm)	Defl. (mm)	Defor (mm)	Defl. (mm)	Defor (mm)	Defl. (mm)	Rigidez (N/mm)
600	272,73	2669,83	14,43	329,82	15,3	328,95	16,27	327,98	17,45	326,80	19,29	324,96
650	295,45	2892,32	15,24	329,01	16,5	327,75	17,31	326,94	18,54	325,71	20,49	323,76
700	318,18	3114,80	16,19	328,06	17,65	326,60	18,39	325,86	19,26	324,99	21,59	322,66
750	340,91	3344,32	17,66	326,59	18,89	325,36	19,34	324,91	20,5	323,75	22,56	321,69
800	363,64	3567,27	18,61	325,64	20,07	324,18	20,54	323,71	21,65	322,60	23,76	320,49
850	386,36	3790,23	19,74	324,51	20,93	323,32	21,86	322,39	22,73	321,52	24,78	319,47
900	409,09	4013,18	20,45	323,80	22,17	322,08	22,67	321,58	23,84	320,41	25,89	318,36
950	431,82	4236,14	21,75	322,50	22,57	321,68	23,58	320,67	24,66	319,59	26,73	317,52
1000	454,55	4459,09	22,69	321,56	23,81	320,44	24,62	319,63	25,87	318,38	27,98	316,27

Tabla C.3: *Valores de deflexión y deformación para el neumático R14.*

Fuente: *Autores*

NEUMÁTICO 185/65 R14												
MASA		Carga (N)	Presion 260 KPa		Presion 240 KPa		Presion 220 KPa		Presion 180 KPa		Presion 140 KPa	
lbs	kg		Defl. (mm)	Defor (mm)	Defl. (mm)	Defor (mm)	Defl. (mm)	Defor (mm)	Defl. (mm)	Defor (mm)	Defl. (mm)	Defor (mm)
600	272,73	2669,83	14,96	283,09	15,67	282,38	16,51	281,54	18,14	279,91	19,31	278,74
650	295,45	2892,32	15,76	282,29	16,78	281,27	17,36	280,69	19,08	278,97	20,48	277,57
700	318,18	3114,80	16,54	281,51	17,91	280,14	18,36	279,69	20,18	277,87	21,98	276,07
750	340,91	3344,32	17,67	280,38	18,93	279,12	19,45	278,60	22,07	275,98	22,68	275,37
800	363,64	3567,27	18,65	279,40	19,98	278,07	20,29	277,76	23,19	274,86	23,67	274,38
850	386,36	3790,23	19,56	278,49	21,11	276,94	21,44	276,61	24,43	273,62	24,58	273,47
900	409,09	4013,18	21,3	276,75	22,18	275,87	22,43	275,62	24,95	273,10	25,79	272,26
950	431,82	4236,14	22,58	275,47	23,65	274,40	24,03	274,02	25,76	272,29	26,8	271,25
1000	454,55	4459,09	23,63	274,42	24,59	273,46	25,1	272,95	26,43	271,62	27,65	270,40

Tabla C.4: *Valores de deflexión y deformación para el neumático R13.*

Fuente: *Autores*

NEUMÁTICO 175/70 R13												
MASA		Carga (N)	Presion 260 KPa		Presion 240 KPa		Presion 220 KPa		Presion 180 KPa		Presion 140 KPa	
lbs	kg		Defl. (mm)	Defor (mm)	Defl. (mm)	Defor (mm)	Defl. (mm)	Defor (mm)	Defl. (mm)	Defor (mm)	Defl. (mm)	Defor (mm)
600	272,73	2669,83	15,37	272,23	16,17	271,43	17,03	270,57	19,27	268,33	20,33	267,27
650	295,45	2892,32	16,37	271,23	17,04	270,56	18,02	269,58	20,77	266,83	21,68	265,92
700	318,18	3114,80	17,15	270,45	18,04	269,56	19,03	268,57	22,32	265,28	23,43	264,17
750	340,91	3344,32	18,45	269,15	19,22	268,38	19,25	268,35	23,39	264,21	24,76	262,84
800	363,64	3567,27	19,32	268,28	20,2	267,40	20,62	266,98	24,26	263,34	25,8	261,80
850	386,36	3790,23	19,96	267,64	21	266,60	21,54	266,06	25	262,60	26,98	260,62
900	409,09	4013,18	20,57	267,03	21,98	265,62	22,75	264,85	26,28	261,32	27,87	259,73
950	431,82	4236,14	21,35	266,25	22,28	265,32	23,6	264,00	27,55	260,05	28,75	258,85
1000	454,55	4459,09	22,57	265,03	23,53	264,07	24,24	263,36	28,7	258,90	29,68	257,92