

Modelo de rigidez lateral estático de neumáticos

Raúl Zaradnik^(a)

^aFacultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Centro Universitario, M5502JMA, Mendoza, Argentina, rzaradnik@fing.uncu.edu.ar

Resumen.

En la década de 1960 Chevrolet R&D usó por primera vez un modelo simplista de rueda compuesto de dos discos metálicos con una lámina de caucho entre ellos. Para mantener la simplicidad, el único elemento que variaba era el diámetro de los discos de metal; mientras que la composición, el espesor y el diámetro del caucho se mantuvieron constantes. La simplicidad del modelo sólo permitió estudiar la rigidez lateral y el deslizamiento estático.

Hoy en día es posible simular un neumático como una estructura de material compuesto de matriz polimérica a base de caucho y refuerzo de fibras largas de diversos materiales, que van desde el algodón hasta el acero.

En el presente trabajo se realiza un modelo simplificado de neumático empleando láminas de material compuesto con el objetivo de reproducir numéricamente el ensayo de rigidez lateral estático previo al deslizamiento. Asumiendo conocidas las presiones externas e internas, se determina la evolución de la rigidez lateral para diferentes estados de carga vertical. El estudio de los esfuerzos internos en las diferentes láminas materiales que conforman el modelo de neumático y la determinación del nivel de seguridad a la inestabilidad elástica, forman parte de un trabajo más extenso.

Palabras clave: Material compuesto, composite, modelo de neumáticos, rigidez lateral estática.

1 INTRODUCCIÓN.

El neumático de automóvil cumple con tres objetivos básicos:

- Soporta la carga vertical, mientras amortigua las irregularidades de la carretera,
- Genera las fuerzas longitudinales para la aceleración y el frenado,
- Genera las fuerzas laterales para la conducción en curva

En la [Tabla 1](#) se indican los componentes de un neumático y sus funciones, mientras que en la [Figura 1](#) se aprecia la ubicación de los componentes.

Componente	Funciones
Tela de cuerpo	Resistir la presión del aire Soportar las cargas Aislar las irregularidades del camino
Cinturones estabilizadores	Otorgar estabilidad al neumático Otorgar rigidez a la banda de rodamiento Mejorar la pisada del neumático
Innerliner	Retener el aire comprimido en el neumático
Banda de rodamiento	Proveer tracción Adherencia en superficies secas y mojadas Resistir la fricción
Laterales (pared)	Otorgar flexibilidad al neumático
Pestañas (talones)	Fijar el neumático a la llanta

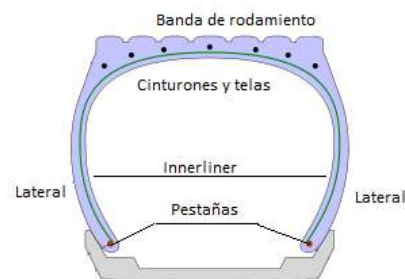


Figura 1: Componentes de un neumático típico

Tabla 1: Componentes básicos de un neumático y sus funciones principales

Una de las funciones más importantes de la rueda es generar las fuerzas laterales necesarias para controlar o cambiar la dirección del vehículo, y resistir fuerzas externas tales como las ráfagas del viento o las creadas por las inclinaciones de la carretera. Según la norma [SAE J670](#), en el centro del área de contacto entre la rueda y la carretera, en el plano horizontal de rodadura y perpendicular a la dirección de la rueda, se crea una fuerza transversal. Cuando un neumático que gira está sometido a una fuerza lateral, su dirección tiende a desviarse hacia un lado y el ángulo que forman el eje longitudinal de la rueda y su dirección se denomina ángulo de deriva ([Figura 2](#)).

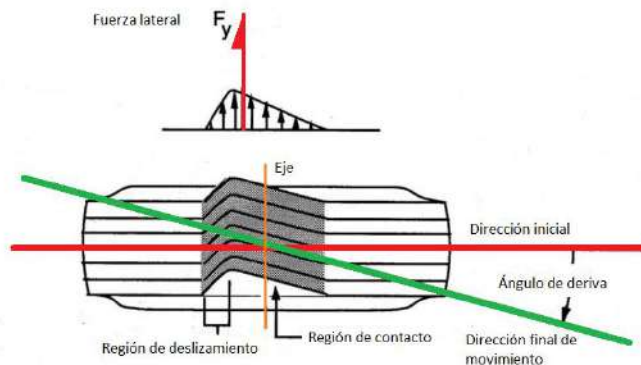


Figura 2: Esquema simplificado de la fuerza lateral sobre una rueda

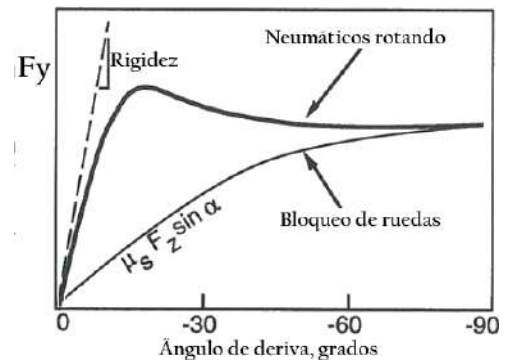


Figura 3: Zonas en la relación entre la fuerza lateral y el ángulo de deriva

El comportamiento de una rueda se caracteriza en régimen estacionario. La [Figura 3](#) muestra esquemáticamente la relación entre la fuerza lateral y el ángulo de deriva. La rigidez de deriva es una propiedad importante en el comportamiento del vehículo a nivel de estabilidad y conducción en curva. Gráficamente, la rigidez de deriva es la pendiente inicial de la curva mostrada en la [Figura 3](#) y depende del tamaño y tipo del neumático. Para un neumático concreto, la rigidez de deriva depende de la presión de inflado y la carga vertical que soporta; y se determina a partir de ensayos de laboratorio. Diversos estudios experimentales han permitido expresar la relación entre la fuerza lateral y el ángulo de deriva por medio de una ecuación del tipo:

$$F_y = D \sin\{C \arctg[\beta(1 - E) + E \arctg(\beta)]\} \quad (1)$$

$$\beta = B(\alpha + S_h) \quad (2)$$

que es una de las llamadas fórmulas mágicas de Pacejka ([Pacejka, 2005](#)). El producto BCD representa la rigidez a la deriva. Uno de los principales problemas radica en que las experiencias son pocas y normalmente dirigidas hacia los neumáticos de competición.

Un neumático constituye un sistema no-lineal complejo. Uno de los primeros modelos fue el usado por Chevrolet R&D en la década de 1960 ([Milliken & Milliken, 1995](#)). Más recientemente, se han estudiado los neumáticos empleando modelos de resortes ubicados como cerdas de cepillos y modelos de vigas continuas ([Lacombe, 2000](#)).

El presente trabajo propone determinar la rigidez lateral de un neumático típico, tanto cruzado como radial, y vincular el valor de la rigidez con la carga lateral crítica para varias presiones de inflado. De esta forma, se podrá determinar esta última para cada ángulo de deriva usando la ecuación (1). Para lograr ese objetivo, en el presente trabajo se adoptan los datos geométricos que corresponden a un neumático del tipo “185/70 X 14 - 84V” (X es R para el radial y D para cruzado o diagonal), que admite cargas de hasta 500 kgf a una velocidad máxima de 84 km/h; y se emplea un modelo de elementos finitos compuesto por 96 elementos de placa de ocho nodos con 5 grados de libertad por nodo, formulado bajo las hipótesis de Mindlin ([Halpin, J. 1992](#)) y ajustado a las facilidades de los programas SCGD ([Zaradnik, et al.; 2013](#)) y PLASZ ([Zaradnik, et al; 2011](#)). Las fuerzas verticales y las horizontales se aplican al neumático a través de una llanta metálica considerada en el modelo como conformada en acero (material homogéneo e isótropo). El neumático propiamente dicho se modela como material compuesto de ocho (8) láminas y se estudia bajo diversas presiones de inflado. La [Figura 4](#) muestra el modelo típico del estudio.

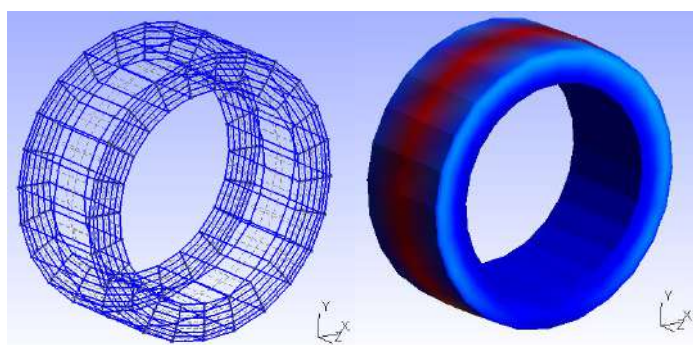


Figura 4: Modelo elemental de rueda empleado en el trabajo

2 DATOS BÁSICOS DE LOS MATERIALES

En el trabajo se emplea un juego de datos que permiten asegurar el comportamiento elástico no lineal del modelo y están resumidos en las tablas [2](#) y [3](#).

La [Tabla 2](#) resume los datos elásticos de los materiales empleados y la [Tabla 3](#) resumen los datos de resistencia. El acero de las llantas se ha considerado homogéneo e isótropo, mientras que para el cuerpo del neumático propiamente dicho, se ha considerado una laminación para diferenciar las propiedades estructurales de los diversos componentes acotados en la [Tabla 1](#).

3 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS

3.1. Estudio de la rigidez elástica lateral y vertical

Las figuras [5](#) y [6](#) resumen los resultados de los análisis para el modelo elástico y las curvas representan rigideces secantes. La evolución de la deformación lateral con el aumento de la carga lateral impuesta se aprecia en la [Figura 7](#) que corresponde sólo a un punto del gráfico de la [Figura 6](#).

Además, las figuras [8](#) y [9](#) representan las rigideces verticales según el tipo de neumático.

Comparando la [Figura 6](#) con la [Figura 7](#), se aprecia la importante diferencia en las rigideces laterales con el modelo de neumático, resultando un neumático radial más rígido que un neumático cruzado. En ambos casos, la rigidez lateral es una función directa de la presión de inflado.

Sin embargo, comparando las rigideces verticales (figuras [8](#) y [9](#)), se aprecia que un neumático radial más flexible que uno cruzado.

El límite superior de la carga lateral está dado por el producto de la carga normal y la rugosidad del pavimento. Normalmente el valor del coeficiente de rozamiento estático es función del tipo y estado del pavimento, adoptando un valor extremo de “0,7” para pavimento de hormigón seco ([Lacombe, 2000](#)). Por su parte, la carga normal es una fracción del peso del vehículo y está limitada a un máximo definido para cada neumático y que suele indicarse en su lateral.

Sólo para tener en cuenta, un estudio de laboratorio sobre neumáticos de motocicleta del tipo Avon Azaro Sport II 170/60 ZR17 ([Foale, 2006](#)) reporta valores de rigidez lateral cercanos a 8 kgf/mm para presiones de inflado de 2.9 bar (40 lbf/pulg²) y bajo una carga vertical de 355 kgf. El neumático citado es 15 mm más fino y 83 mm más alto que el modelo analizado, por lo cual es de esperar mayor flexibilidad.

Material	Espesor	Módulo de elasticidad E_{11}	Módulo de elasticidad E_{22}	Módulo de corte G_{12}	Módulo de corte G_{13}	Módulo de corte G_{23}	Coeficiente de Poisson	Densidad	Angulo del laminado ($^{\circ}$)
	mm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa		kg/m ³	$^{\circ}$
Innerliner	1	7	7	2.8	2.8	2.8	0.25	950	0
Telas de cuerpo	5	70000	70000	8.4	8.4	8.4	0.30	950	+/- 45 ó 0
Cinturones estabilizadores	5								+/- 45 ó +/-20
Banda de rodamiento	10								0
Laterales y talones	3								+/- 45 ó 0
Acero	5	206000	206000	82400	82400	82400	0.30	8750	0

Tabla 2: Datos elásticos de los materiales

Material	Tensión de fluencia uniaxial σ_{11}	Tensión de fluencia uniaxial σ_{22}	Tensión de fluencia uniaxial σ_{33}	Tensión de fluencia bajo corte τ_{12}	Tensión de fluencia bajo corte τ_{13}	Tensión de fluencia bajo corte τ_{23}	Endurecimiento a_{11}
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	MPa
Innerliner	25	25	25	18.8	18.8	18.8	7
Telas de cuerpo a talones	25	25	25	18.8	18.8	18.8	70000
Acero	400000	400000	400000	300000	300000	300000	206000

Tabla 3: Datos de resistencia de los materiales para el modelo elástico

4 CONCLUSIONES

Empleando el método de los elementos finitos, se ha modelado y estudiado el comportamiento a cargas laterales estáticas controladas de neumáticos bajo dos diferentes presiones de inflado y sometidos a cargas verticales acotadas.

En los resultados se aprecia una gran diferencia en las rigideces laterales en relación al tipo o modelo de neumático, cruzado o radial, resultando superior la rigidez para neumáticos radiales. Además, se comprueba que la rigidez lateral es una función directa de la presión de inflado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Foale, Tony: "Motorcycle Handling and Chassis Design: the art and science", 2^o Edición, Editor Tony Foale Design (CD), ISBN-10: 8493328634, ISBN-13: 978-8493328634, 2006.
- Halpin, John: "Primer On Composite Materials Analysis", Second Edition Revised, Technomic Publishing Co. Inc., 1992, 0-8776-2754-1.
- Lacombe, James: "Tire model for simulations of vehicle motion on high and low friction road surfaces", U.S. Army Engineer Research and Development Center (ERDC), Hanover, NH, 32^o Conferencia sobre "Winter Simulation" (pp 1025-1034), Society for Computer Simulation International, San Diego, California, USA, 2000, ISBN: 0-7803-6582-8.
- Milliken, Williams y Milliken, Douglas: "Race Car Vehicle Dynamics", Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, PA, USA, ISBN 1-56091-526-9, 1995
- Pacejka, Hans: "Tire and Vehicle Dynamics", 2^o Edición revisada, ISBN-10: 0768017025, ISBN-13: 978-0768017021, Editado por SAE International, 2005.
- SAE J670-2008 (r) Vehicle Dynamics Terminology.

¹ Los parámetros corresponden a los neumáticos cruzados o radiales respectivamente.

Zaradnik, R., López, D. *et al.*: “Caracterización de elementos estructurales de material compuesto”. Proyecto bianual 2009-2011 (06/B223), SECTYP UNCuyo, Mendoza, Argentina.

Zaradnik, R., López, D. *et al.*: “Estudio e implementación de modelos por elementos finitos de materiales compuestos con grandes deformaciones para el análisis de interacción fluido-estructura”. Proyecto bianual 2011-2013 (06/B286), SECTYP UNCuyo, Mendoza, Argentina.

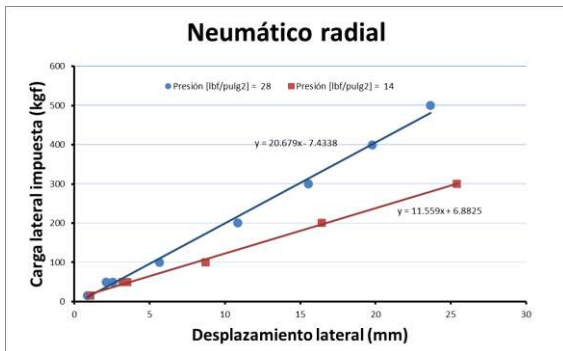


Figura 5: Rigidez lateral de neumáticos radiales

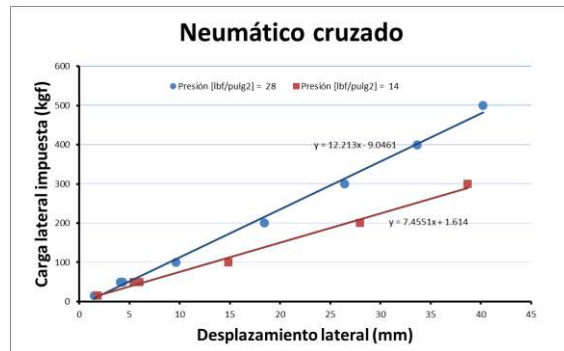


Figura 6: Rigidez lateral de neumáticos cruzados



Figura 7: Evolución de la deformación lateral para el caso de estudio de neumático cruzado bajo carga vertical y horizontal de 500 kgf y 28 lbf/pulg² de presión de inflado

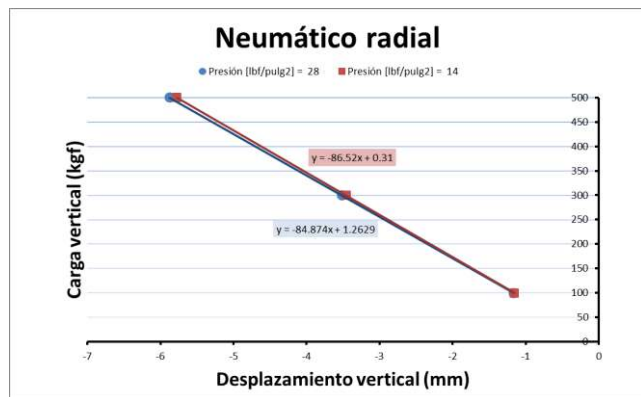


Figura 8: Rigidez vertical de neumáticos radiales

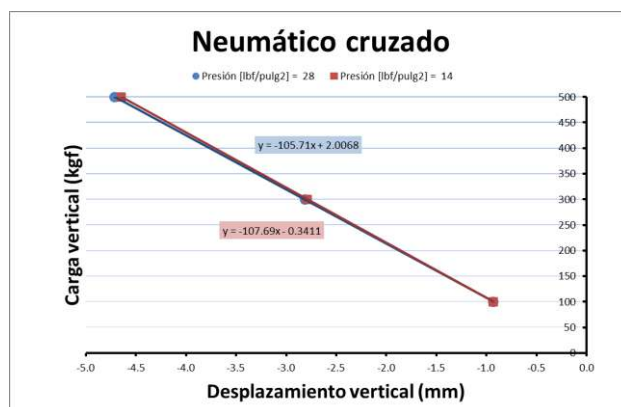


Figura 9: Rigidez vertical de neumáticos cruzados