

## CÁLCULO DE FUNCIONES CARACTERÍSTICAS DE NEUMÁTICOS BASADO EN MÉTODOS NUMÉRICOS

**Ahmad Eduardo Guennam y Tomás Arechaga**

*Grupo de Investigación de Neumáticos FATE, Blanco Encalada 3003 B1644GPK Victoria - Provincia de Buenos Aires. [aeguennam@fate.com.ar](mailto:aeguennam@fate.com.ar); [tarechaga@fate.com.ar](mailto:tarechaga@fate.com.ar); <http://www.fate.com.ar>*

**Palabras Clave:** Neumático, Elementos Finitos, Fuerza lateral, Rigidez de virado, Manejabilidad.

**Resumen.** La manejabilidad y estabilidad de un automóvil dependen de las características, tanto de los neumáticos como de la estructura intrínseca del vehículo. Todas las interacciones vehículo-camino se realizan a través de los neumáticos, los que permiten generar fuerzas y momentos mediante los cuales se logra el control direccional del vehículo. La dependencia no lineal de las fuerzas y momentos con la carga normal del neumático ejerce una marcada influencia en las características de manejabilidad. Entre los modelos matemáticos utilizados en dinámica de vehículos se distingue el de “Eje efectivo”, el cual encuentra aplicación en análisis de estado estacionario y cuasi estacionario. Al utilizar este tipo de modelos, se arriba a cantidades denominadas sensibilidad a la transferencia de carga, sensibilidad a la carga, rigidez de virado y fuerza lateral normalizada, éstas constituyen las llamadas funciones características.

En este trabajo se presenta el modelado de un neumático real y su análisis numérico con elementos finitos utilizando el paquete comercial ABAQUS. Se estudian las características de manejabilidad conferidas exclusivamente por la estructura y construcción del neumático, sin tener en cuenta su interacción con el vehículo. A partir del modelo numérico se determinan las fuerzas y momentos en función del ángulo de deriva lateral y la carga radial. En base a estos datos se realiza el cálculo de las funciones características, que permiten evaluar el comportamiento del neumático y su influencia sobre la manejabilidad del vehículo.

El trabajo muestra una manera de utilizar métodos numéricos basados en elementos finitos para el análisis de neumáticos y el cálculo de sus funciones características, reflejando, además, la influencia de parámetros geométricos y de la presión de inflado sobre los valores de las mismas. Los resultados obtenidos muestran que al disminuir la curvatura del perfil externo aumentan la fuerza lateral normalizada y la sensibilidad a la carga, mientras que la sensibilidad a la transferencia de carga disminuye. Lo cual representa una mejora en el desempeño. Por otra parte, la disminución de la presión de inflado tiene un impacto global negativo, ya que al disminuir la presión de inflado aumenta notablemente la sensibilidad a la transferencia de carga y a pesar de obtener mayores valores de los coeficientes de rigidez de virado y autoalineación para cargas moderadas, éstos se deterioran abruptamente con el aumento de la carga radial.

## 1. INTRODUCCIÓN

Entre los modelos matemáticos utilizados en dinámica de vehículos se distingue el de “Eje efectivo” (Clark, 1981), el cual encuentra aplicación en análisis de estado estacionario y cuasi estacionario (Pacejka, 2002). El término “Funciones características” surge a partir de un trabajo de Nordeen (1967) quien propuso una manera de procesar los datos relativos a la fuerza lateral para distintos ángulos de deriva lateral y carga radial. El mismo autor aplicó luego el concepto de funciones características al desarrollo y caracterización de neumáticos (Nordeen, 1968).

En el presente trabajo, se definen y calculan las siguientes magnitudes:

- Fuerza Lateral Normalizada (FLN).
- Sensibilidad a la transferencia de carga, de un neumático a otro del mismo eje (STC).
- Sensibilidad a la carga Normal (SC).

También se definen dos coeficientes que caracterizan el comportamiento con el cambio de deriva lateral:

- Coeficiente de rigidez de virado (CRV).
- Coeficiente de autoalineación (CAA).

Las cantidades citadas anteriormente se denominan funciones características y son capaces de representar al neumático en un modelo matemático simple de vehículo. Definen, en forma objetiva, aspectos de manejabilidad del neumático (Di Vérolí et al., 1974).

Para los desarrollos subsiguientes, resulta conveniente introducir la definición de fuerza lateral media del eje. Este concepto se presenta en la subsección 2.1.

## 2. DEFINICIONES

### 2.1. Fuerza lateral media

La fuerza lateral media  $\bar{F}_y$  es función, principalmente, del ángulo de deriva lateral  $\alpha$ , del ángulo de comba  $\gamma$  y de la carga radial  $F_z$ . En las consideraciones subsiguientes se considera que el ángulo de comba es nulo, por lo tanto en este trabajo  $F_y$  será función solamente de  $\alpha$  y de la carga radial  $F_z$ . Por simplicidad de la notación, en los desarrollos que siguen se usará sólo  $F_y$ . Una propiedad de la fuerza lateral es que, para un valor fijo de  $\alpha$ , es función no lineal de  $F_z$ , como muestra la Fig. 9. Esto provoca que, al producirse una transferencia de carga ( $\Delta F_z$ ) de uno de los neumáticos al otro del mismo eje, la fuerza media en dicho eje disminuya. Esta situación se da, por ejemplo, al recorrer una curva. Desarrollando en serie de Taylor la fuerza lateral para un  $\alpha$  dado, alrededor de la carga radial media  $\bar{F}_z$  se obtiene,

$$F_y(\alpha, \bar{F}_z \pm \Delta F_z) = F_y|_{\bar{F}_z} + \left. \frac{\partial F_y}{\partial F_z} \right|_{\bar{F}_z} \cdot (\pm \Delta F_z) + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 F_y}{\partial F_z^2} \right|_{\bar{F}_z} \cdot (\pm \Delta F_z)^2 + \dots \quad (1)$$

Promediando los valores correspondientes a ambas ruedas del mismo eje se obtienen los valores de fuerza lateral media,

$$\bar{F}_y = \frac{1}{2} [F_y|_{\bar{F}_z + \Delta F_z} + F_y|_{\bar{F}_z - \Delta F_z}] = F_y|_{\bar{F}_z} + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 F_y}{\partial F_z^2} \right|_{\bar{F}_z} \cdot (\pm \Delta F_z)^2 \quad (2)$$

## 2.2. Funciones características

Si se dividen ambos miembros de la Ec. 2 por  $\bar{F}_z$  se obtiene la fuerza lateral media normalizada.

$$\frac{\bar{F}_y}{\bar{F}_z} = \frac{F_y}{F_z} \Big|_{\bar{F}_z} + \frac{1}{2\bar{F}_z} \frac{\partial^2 F_y}{\partial F_z^2} \Big|_{\bar{F}_z} \cdot (\pm \Delta F_z)^2 \quad (3)$$

A partir de la Ec. 3 se definen las siguientes cantidades:

*Fuerza lateral normalizada:*

$$FLN(\alpha, \bar{F}_z) = \frac{F_y(\alpha, \bar{F}_z)}{\bar{F}_z} \quad (4)$$

*Sensibilidad a la transferencia de carga:*

$$STC(\alpha, \bar{F}_z) = -\frac{1}{2} \bar{F}_z \frac{\partial^2 F_y}{\partial F_z^2} \Big|_{\bar{F}_z} \quad (5)$$

Utilizando las definiciones 4 y 5 la Ec. 3 se escribe de la siguiente manera:

$$\frac{\bar{F}_y}{\bar{F}_z} = FLN(\alpha, \bar{F}_z) - STC(\alpha, \bar{F}_z) \cdot \left( \frac{\Delta F_z}{\bar{F}_z} \right)^2 \quad (6)$$

De la Ec. 3 se desprende que si no hay transferencia de carga, el producto  $\bar{F}_z \cdot FLN$  da la fuerza lateral en cada neumático del eje cuando no hay transferencia de carga. Al producirse una transferencia de carga radial  $\Delta F_z$  se producirá una disminución de la fuerza lateral media sobre el eje, tal como se deduce de la Ec. 3 bajo la consideración de que la derivada segunda allí presente es siempre negativa. Dicha disminución se expresa a través del factor  $STC(\alpha, \bar{F}_z)$  que depende, en términos generales, de las propiedades del neumático y de otro factor que depende del vehículo y de la aceleración lateral del mismo (Di Vérolí et al., 1974). En este punto se define, además, la cantidad denominada sensibilidad a la carga (SC). Esta función proporciona la variación de la fuerza lateral al variar la carga radial media  $\bar{F}_z$  sobre el eje:

*Sensibilidad a la carga:*

$$SC(\alpha, \bar{F}_z) = \frac{\partial F_y(\alpha, \bar{F}_z)}{\partial \bar{F}_z} \Big|_{\bar{F}_z} \quad (7)$$

Las funciones FLN, STC y SC toman el nombre de funciones características. Las mismas establecen un base descriptiva común para diseñadores de neumáticos por un lado y de vehículos por otro, dando la posibilidad de expresar en forma cuantitativa lo observado por conductores expertos. El fabricante de vehículos puede especificar sus necesidades en términos de límites aceptables de los valores de las funciones características. La sensibilidad a la transferencia de carga STC es un indicador del grado de linealidad de la fuerza lateral con la carga y por lo tanto da una idea de la disminución de la fuerza lateral media del eje. Es conveniente que no sea muy grande, ya que valores elevados producirán considerables variaciones en la carga efectiva del eje al producirse una transferencia de carga del neumático interior al exterior al tomar, por ejemplo, una curva (Di Vérolí et al., 1974). La SC cuantifica la capacidad del neumático para mantener estables sus características de generación de fuerza lateral cuando cambia la carga normal.

### 2.3. Coeficiente de rigidez de virado y de autoalineación

Las maniobras usuales involucran ángulos de deriva lateral en el rango  $-4 \leq \alpha \leq 4$ . Por ello se define el coeficiente de rigidez de virado (CRV) y de autoalineación (CAA) como las pendientes en el origen de dichas señales, normalizadas por la carga radial  $F_z$ .

*Coeficiente de rigidez de virado:*

$$CRV(\bar{F}_z) = \frac{1}{F_z} \left. \frac{\partial F_y}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} \quad (8)$$

*Coeficiente de autoalineación:*

$$CAA(\bar{F}_z) = \frac{1}{F_z} \left. \frac{\partial M_z}{\partial \alpha} \right|_{\alpha=0} \quad (9)$$

Elevados coeficiente de rigidez de virado, indican que las fuerzas laterales generadas son elevadas al cambiar el ángulo de deriva respecto del origen, de igual manera, un alto coeficiente de autoalineación indica mayor velocidad de respuesta al volante.

### 2.4. Sistema de referencia

La revisión bibliográfica señala que a lo largo de la historia, se han empleado diferentes sistemas coordenados para referir las fuerzas y momentos de los neumáticos. En el presente trabajo se utilizan la convención TYDEX (Unrau et al., 1997) y en particular, el sistema de ejes ISO de la rueda TYDEX-C (“Wheel Axis System”), (Gent y Walter, 2005).

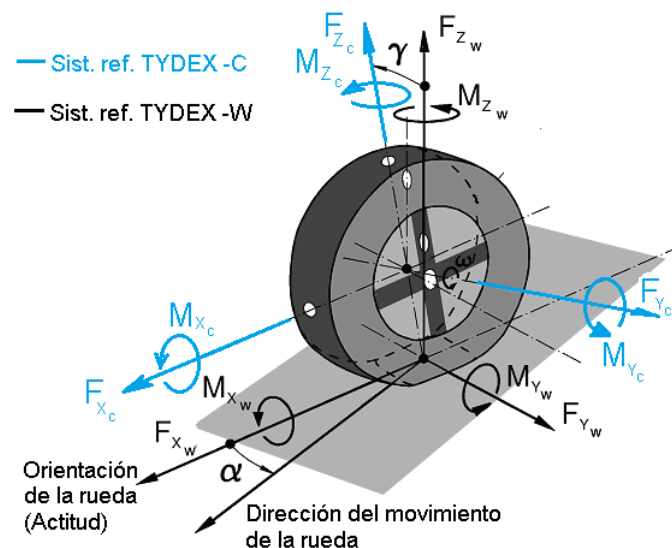


Figura 1: Sistemas de referencia (Unrau et al., 1997).

## 3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

El neumático objeto del presente estudio tiene las medidas **175/65R14**. El modelo de elementos finitos del mismo describe con precisión la geometría de las distintas zonas, cada una de las cuales tiene asignado el material correspondiente. En las zonas que poseen refuerzos,

como ser pliegos de carcasa, cinturas y “cap” se utilizan elementos “REBAR” de ABAQUS (SIMULIA, 2011b). En el centro de la rueda se ubican dos nodos, que no pertenecen a ningún elemento pero que se utilizan para introducir una condición de vinculación cinemática con los nodos correspondientes a la zona de contacto del neumático con la llanta, es decir que el movimiento de cada una de estas dos regiones se liga rígidamente al movimiento del respectivo nodo central. Por otra parte se utiliza una superficie plana rígida que representa el suelo y su movimiento se vincula cinemáticamente a un tercer nodo auxiliar. En la Fig. 2 se muestra un corte de la malla de elementos finitos utilizada, donde se pueden observar las diferentes zonas del neumático.

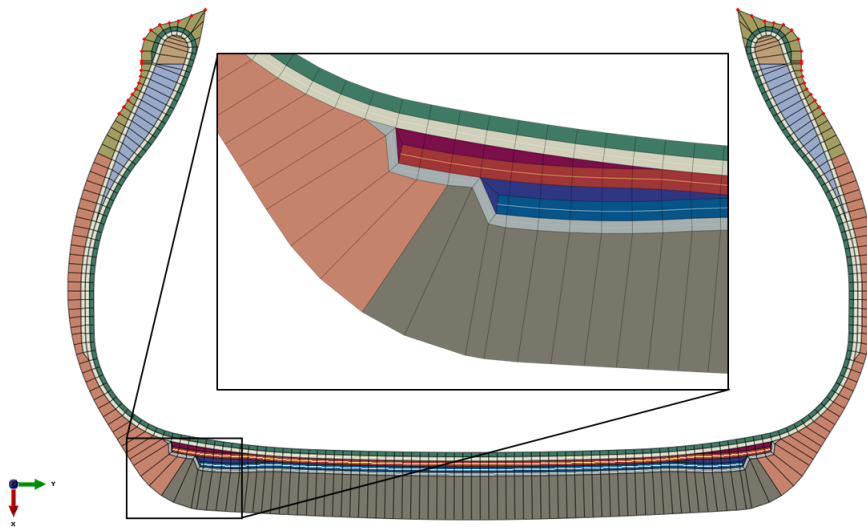


Figura 2: Malla de elementos finitos 2D axial simétrica

La Fig. 2 muestra las diferentes zonas del neumático y en una vista ampliada de la zona de hombros se muestra los refuerzos REBAR embebidos en los elementos sólidos. Los puntos rojos representan los nodos de la zona de la pestaña, esta es la zona que entra en contacto con la llanta. La llanta se modela con un par de nodos, uno por cada lado, y los nodos de cada pestaña se vinculan a través de restricciones cinemáticas con el correspondiente nodo de la llanta. Esto se muestra en la Fig. 3.

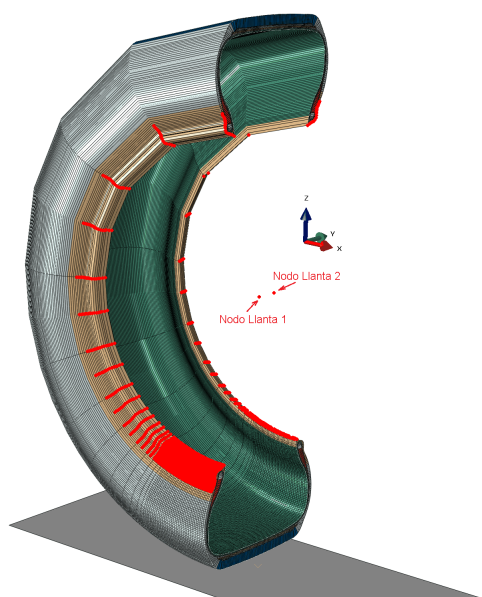


Figura 3: Malla tridimensional de elementos finitos. En la zona de la pisada se utiliza mayor densidad de elementos. Los puntos rojos ubicados sobre el modelo representan los nodos de contacto con la llanta, mientras que los dos centrales representan cada flanco de la misma.

La Fig. 3 muestra la malla tridimensional con un corte radial para mayor claridad. En la misma figura se observa la superficie rígida que representa el suelo.

### 3.1. Cargas Impuestas

Los modelos se analizan con el programa comercial ABAQUS (SIMULIA, 2011b), el cual permite realizar análisis adoptando el enfoque de múltiples etapas de análisis. Es decir, que cada etapa del proceso real simulado se define en la correspondiente etapa de análisis y tanto el estado como las condiciones del modelo al finalizar cada etapa son tomadas como puntos de partida para la etapa siguiente. De esta manera se simula primero la colocación del neumático en la llanta, esto se conoce como cambio de llanta. Luego se realiza el inflado y a partir de allí se pueden definir las etapas de análisis necesarias para representar el comportamiento que se desea modelar y estudiar. En el contexto del presente artículo el interés radica en determinar las fuerzas y momentos generados por el neumático al girar e imponérsele deriva lateral y diferentes cargas radiales.

El modelado del neumático rodando sobre una superficie, en este caso plana, es un tema complejo y extensamente estudiado en la literatura especializada, ver por ejemplo Kennedy y Padovan (1987), Oden et al. (1988) y Qi et al. (2007).

Al estudiar un cuerpo axialsimétrico moviéndose a velocidad de traslación constante respecto de una superficie plana (suelo) y girando a velocidad angular también constante, si se utiliza un sistema de referencia que se mueve con igual velocidad que el suelo pero que no rota, es posible hablar de un estado estacionario. Con la técnica de análisis STEADY STATE TRANSPORT (SIMULIA, 2011b), el programa ABAQUS usa un sistema de referencia que se mueve a la velocidad del suelo pero no rota con el neumático. En este sistema de referencia la rotación de cuerpo rígido se describe de manera espacial o Euleriana y la deformación de manera material o Lagrangeana (SIMULIA, 2011a). Con esta descripción cinemática se convierte el campo de contacto móvil estacionario en una simulación puramente espacial. Esta elección del sistema de referencia permite usar una malla estacionaria y refinar solamente la zona de contacto como se



A todos los nodos del modelo del neumático se imponen las mismas velocidades angulares y de traslación de la expresión 10. Dichas velocidades son necesarias para determinar, entre otras magnitudes, la cinemática de cuerpo rígido de la malla, luego, como resultado se obtendrán las velocidades correspondientes a cada punto material.

Para las simulaciones, se divide el análisis de la siguiente manera:

1. Colocación del neumático en la llanta de servicio (cambio de llanta).
2. Aplicación de la presión de inflado.
3. Paso del modelo axial simétrico 2D al modelo tridimensional.
4. Aplicación de la carga radial.
5. Imponer velocidades de rotación y traslación, esta última con componente en dirección  $x$  (sentido de avance) solamente.
6. Barrido de ángulos de deriva lateral mediante la combinación de velocidad en dirección  $x$  (sentido de avance) e  $y$  (lateral) adecuadas.

En la Fig. 5 se muestran las señales de fuerza radial y barrido de ángulos impuestas durante las simulaciones.

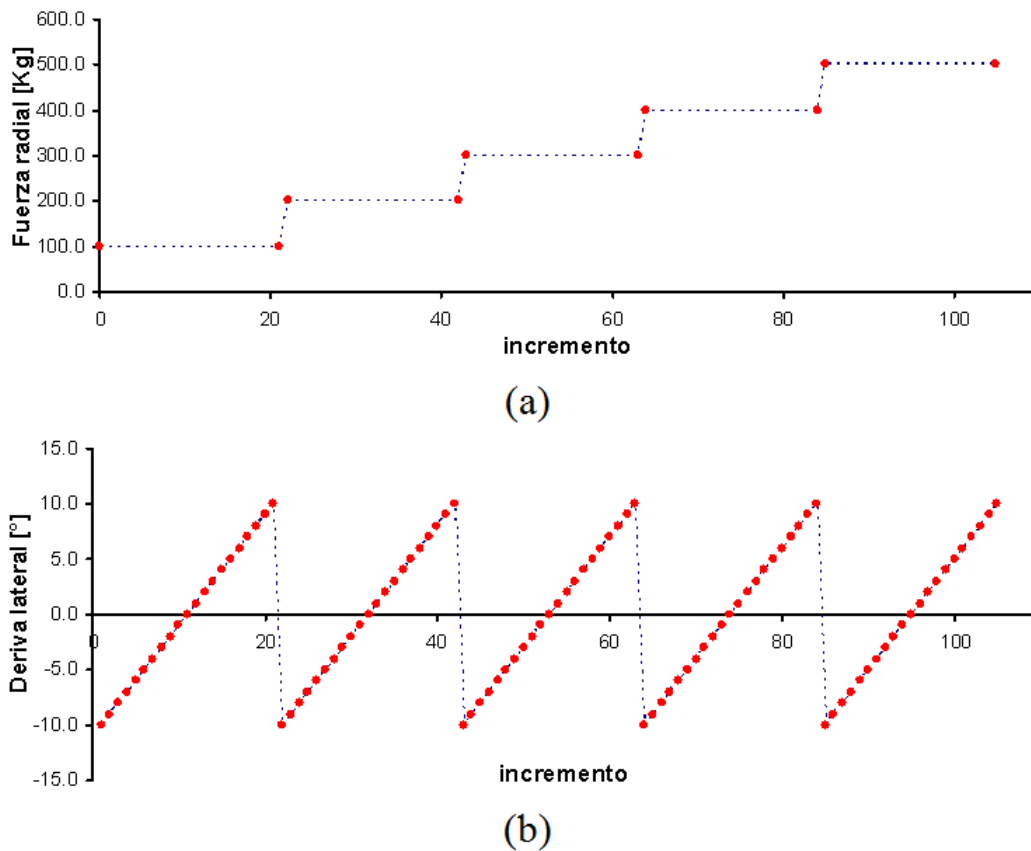


Figura 5: Escalonamiento de carga radial (b) y señal de deriva lateral (a) impuestas durante las simulaciones de virado hacia derecha e izquierda a diferentes cargas.



Luego de realizar el cambio de llanta, los dos nodos (Nodo Llanta 1 y Nodo Llanta 2, ver Fig. 3) que representan el centro de la misma se ubican en la posición (0, 0, 0) y se restringen los 6 g.d.l de los mismos. A partir de las simulaciones se obtienen 3 fuerzas y 3 momentos reactivos en los nodos mencionados. Para los cálculos subsiguientes, interesa considerar las fuerzas y momentos actuantes sobre el neumático, que tienen, naturalmente sentidos opuestos a las reacciones obtenidas en los nodos “Nodo Llanta 1” y “Nodo Llanta 2”. La Fig. 6 muestra la señal de fuerza lateral obtenida a lo largo de todo el análisis, usando las señales mostradas en la Fig. 5.

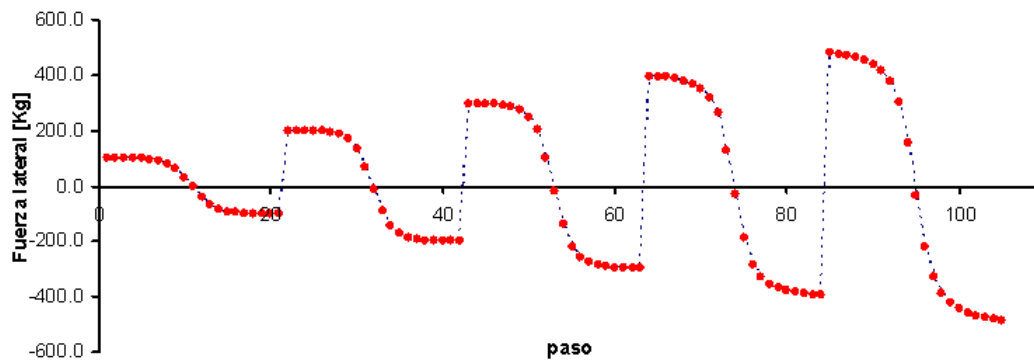


Figura 6: Registro de fuerza lateral generada para los diferentes niveles de carga vertical.

En la Fig. 7 se ordenan las fuerzas laterales para las diferentes cargas radiales en función del ángulo de deriva lateral.

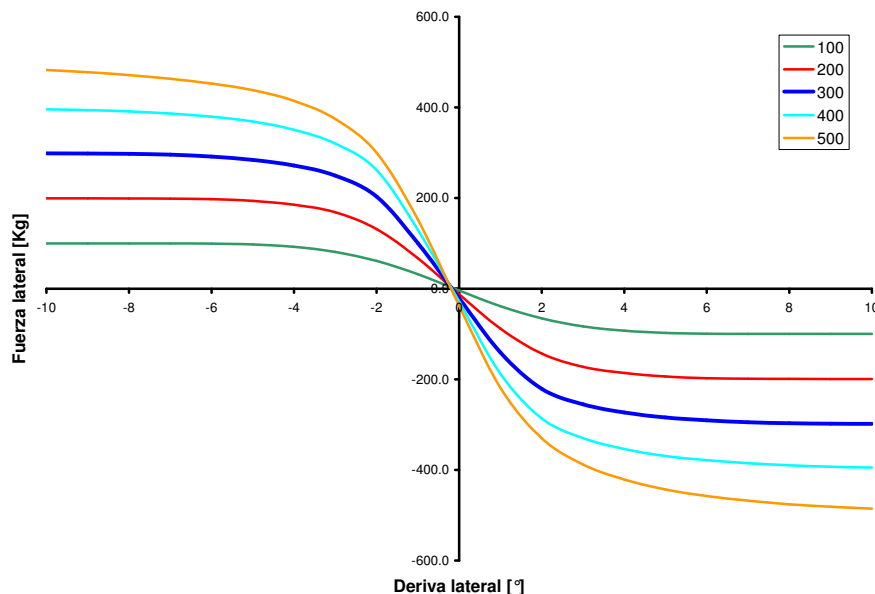


Figura 7: Fuerza lateral en función del ángulo de deriva.

En la Fig. 8 se presentan los momentos  $M_z$  llamados de autoalineación (MAA) para las diferentes cargas radiales  $F_{z_i}$ , en función del ángulo de deriva lateral  $\alpha$ .

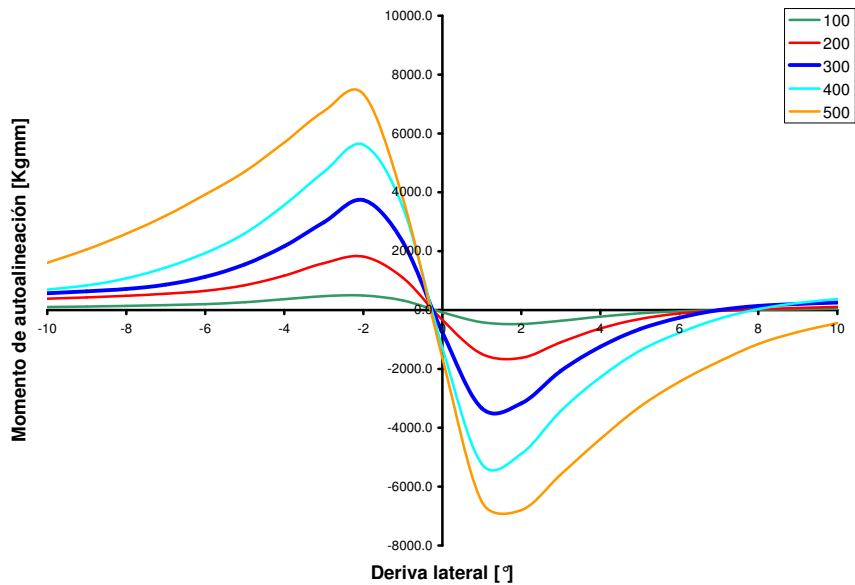


Figura 8: Momento de autoalineación en función del ángulo de deriva.

La variación de la fuerza lateral en función de la carga radial para cada ángulo de deriva lateral se presenta en la Fig. 9.

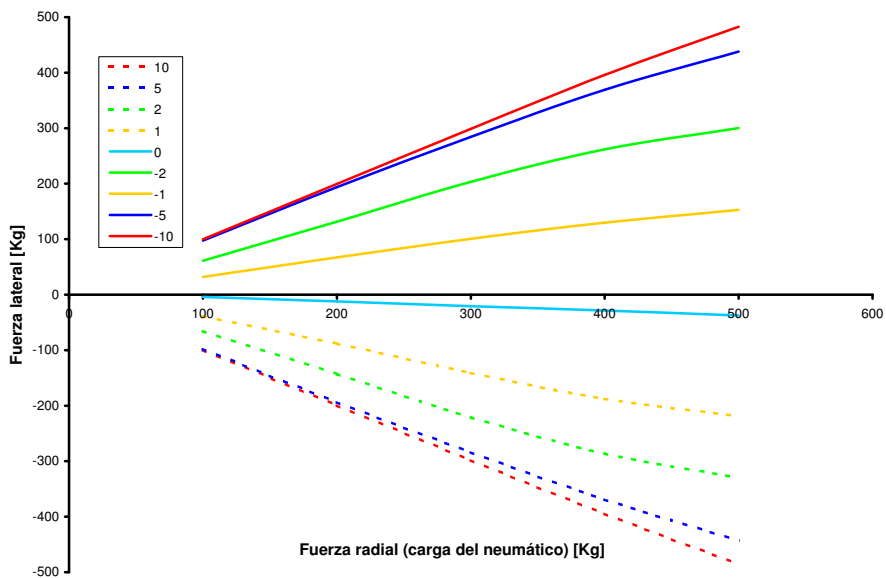


Figura 9: Fuerza lateral en función de la carga radial, generada para cada ángulo de deriva lateral.

En lo sucesivo, se trabajará con valores medios de fuerza lateral de manera tal de obtener un indicador del comportamiento derecha/izquierda.

#### 4. FUNCIONES CARACTERÍSTICAS

A partir de los análisis numéricos del neumático se obtienen valores de fuerza lateral  $F_y$  en función de la carga radial  $F_z$  y del ángulo de deriva  $\alpha$ . En general, las curvas presentan valores no nulos de fuerza lateral para valores nulos de deriva lateral, esto se debe principalmente a lo que se denomina “*ply steer*”. En los cálculos sucesivos los valores de fuerza lateral se obtienen promediando los correspondientes valores absolutos para ángulos positivos negativos, obteniendo así valores intermedios derecha-izquierda del neumático. Para los cálculos de las funciones características se considera una serie de ángulos entre  $0^\circ$  y  $10^\circ$ . Para cada ángulo fijo  $\alpha_i$  se tiene una serie de pares  $(F_z, F_y)$ . La ley que relaciona ambas cantidades es desconocida y se ajusta por un polinomio de tercer grado. Debido a que carga radial nula genera fuerza lateral nula, el coeficiente correspondiente al término constante es nulo en el polinomio de ajuste.

$$F_y(\alpha_i, F_z) = b(\alpha_i)F_z + c(\alpha_i)F_z^2 + d(\alpha_i)F_z^3 \quad (11)$$

En este trabajo el ajuste del polinomio se realiza por mínimos cuadrados.

##### 4.1. Estimación de las funciones características

A los efectos de analizar las propiedades del neumático al realizar virajes, interesa tomar una carga fija y estudiar los valores de las funciones características al variar el ángulo de deriva  $\alpha$ . Utilizando la Ec. 11, las definiciones 4, 5 y 7 y efectuando las derivadas correspondientes, se arriba a las siguientes expresiones:

*Fuerza lateral normalizada:*

$$FLN(\alpha_i, \bar{F}_z) = b(\alpha_i) + c(\alpha_i)\bar{F}_z + d(\alpha_i)\bar{F}_z^2 \quad (12)$$

*Sensibilidad a la transferencia de carga:*

$$STC(\alpha_i, \bar{F}_z) = -c(\alpha_i)\bar{F}_z - 3,0d(\alpha_i)\bar{F}_z^2 \quad (13)$$

*Sensibilidad a la carga:*

$$SC(\alpha_i, \bar{F}_z) = b(\alpha_i) + 1,8c(\alpha_i)\bar{F}_z + 2,45d(\alpha_i)\bar{F}_z^2 \quad (14)$$

Una vez determinados los valores de los coeficientes  $b(\alpha)$ ,  $c(\alpha)$  y  $d(\alpha)$  se pueden obtener las gráficas de las funciones características que se presentan mas adelante en la sección 5 de ejemplos de aplicación.

El coeficientes de rigidez de virado (CRV) y el de autoalineación (CAA) se obtienen mediante derivación numérica centrada de segundo orden de la fuerza lateral y momento de autoalineación respectivamente para deriva lateral nula.

#### 5. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Se presentan a continuación dos ejemplos en los que se muestra la influencia de la geometría y de la presión de inflado en las características de los neumáticos. Tanto la FLN como la SC y la STC se calcularon para 300 Kg de fuerza radial. Sin embargo, la metodología presentada y las expresiones desarrolladas anteriormente permiten calcularlas para cualquier valor de interés dentro del rango de trabajo.

### 5.1. Influencia de la geometría

En este caso se consideran dos neumáticos de iguales dimensiones pero con diferente geometría de su perfil externo. Las principales características para describir la geometría del perfil externo se muestran esquemáticamente en la Fig. 10.

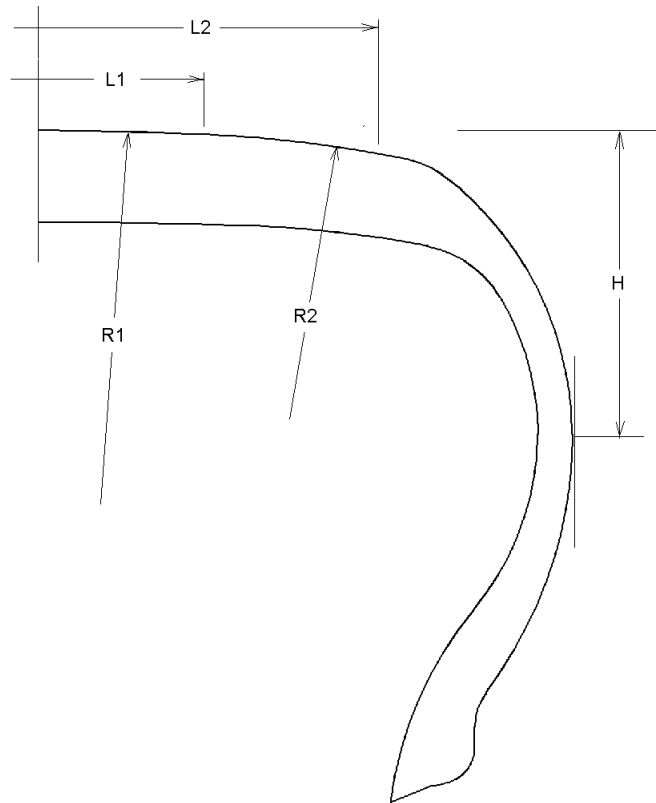


Figura 10: Esquema con las principales características para describir la geometría.

La Tabla 1 presenta las dimensiones indicadas en la Fig. 10 para los dos perfiles considerados,

	Neumático A	Neumático B
L1	31.0	29.0
L2	54.0	64.5
R1	525.0	665.0
R2	105.0	226.0
H	58.0	53.0

Tabla 1: Características geométricas de los perfiles externos de los neumáticos analizados (dimensiones en mm).

La Fig. 11 muestra, superpuestos, los dos perfiles analizados.

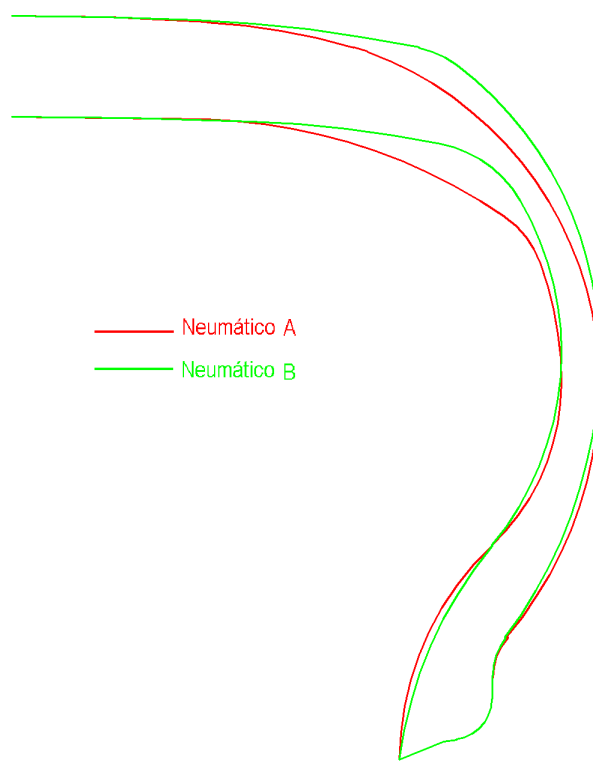


Figura 11: Perfiles superpuestos de los neumáticos analizados.

A continuación se presentan los valores de las funciones características para los dos neumáticos analizados. En ambos casos la presión de inflado es de 30 Psi.

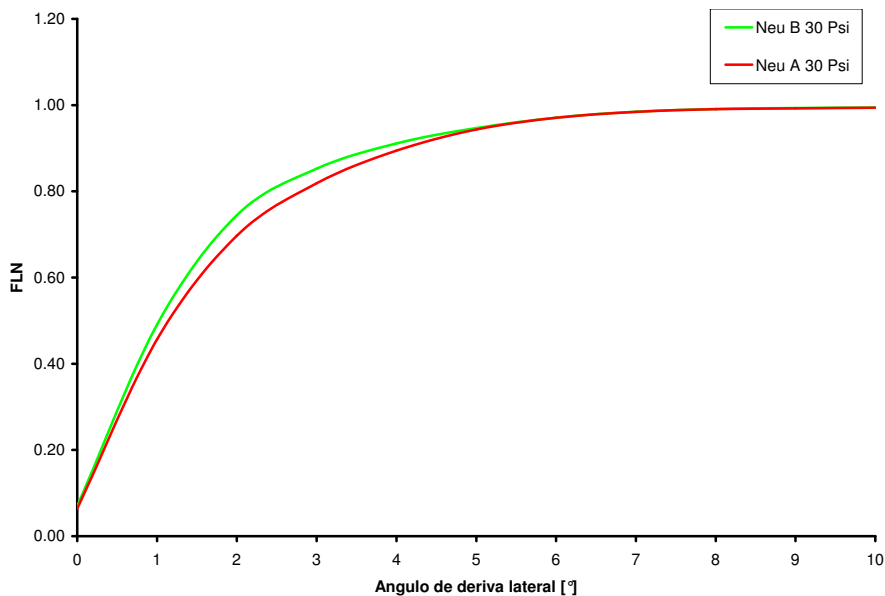


Figura 12: Fuerza lateral normalizada en función del ángulo - Comparación entre los neumáticos A y B.

Como se puede observar en la Fig. 12, el neumático B desarrolla mayor fuerza lateral que el A hasta los 5° de deriva lateral, a partir de este punto, los valores prácticamente coinciden.

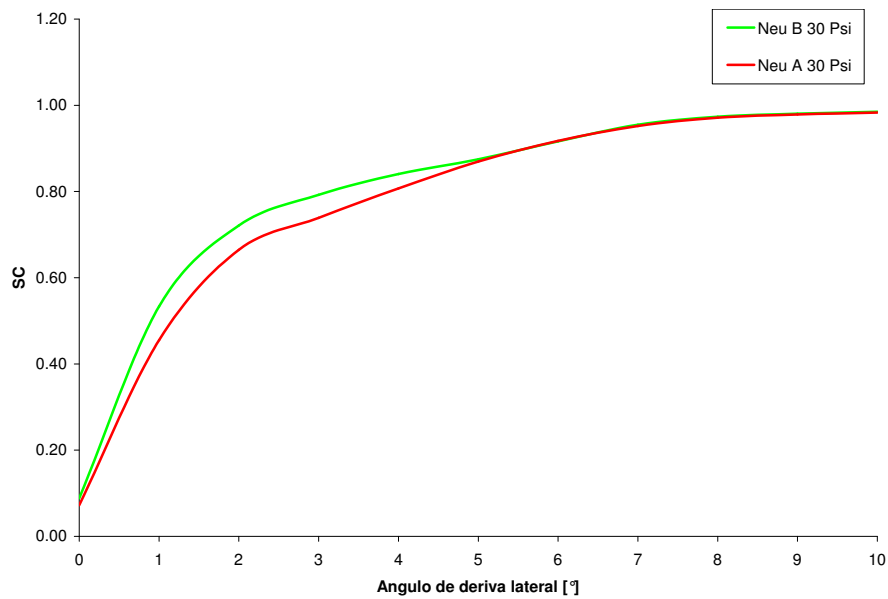


Figura 13: Sensibilidad a la carga en función del ángulo  $\alpha$  - Comparación entre los neumáticos A y B.

En la Fig. 13 se observa también que la SC es menor para el neumático A. Como es de esperar, al igual que para la FLN, esto se manifiesta hasta los  $5^\circ$  de deriva lateral.

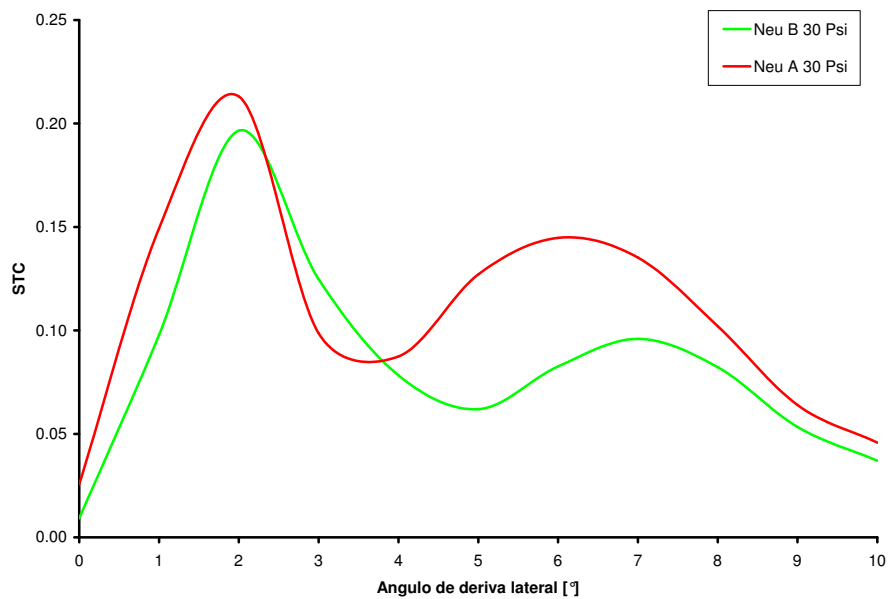


Figura 14: Sensibilidad a la transferencia de carga en función del ángulo  $\alpha$  - Comparación entre los neumáticos A y B.

En la Fig. 14 se puede observar que la sensibilidad a la transferencia de carga es mayor para el neumático A hasta la zona de los  $2,5^\circ$  de deriva lateral. A partir de allí y hasta los  $3,8^\circ$ , la STC es mayor para el neumático B. Luego, a partir de este punto, los valores correspondientes al neumático A aumentan considerablemente respecto del B.

A continuación se muestra la dependencia de los coeficientes de rigidez de virado (CRV) y de autoalineación (CAA),

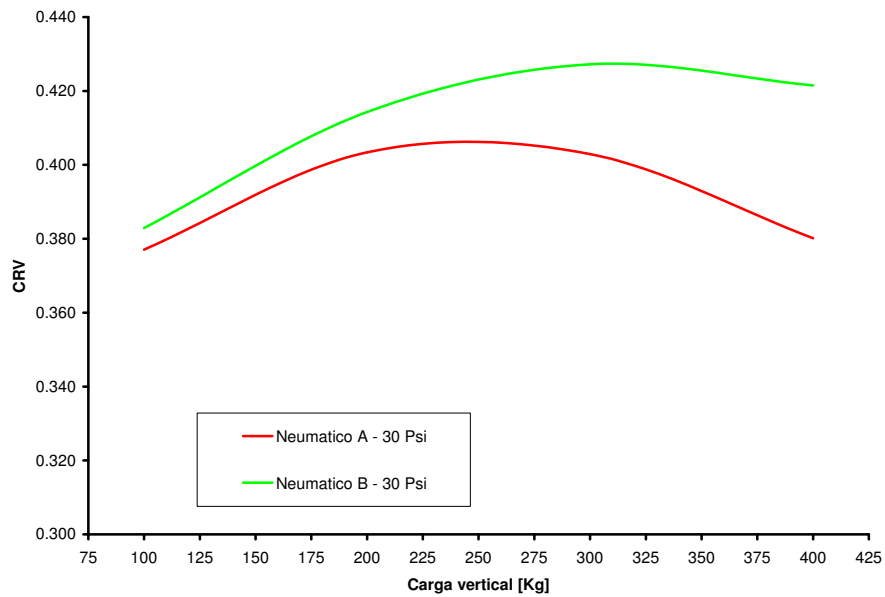


Figura 15: Coeficiente de rigidez de virado en función de la carga vertical  $F_z$ . Comparación entre el neumático A y B.

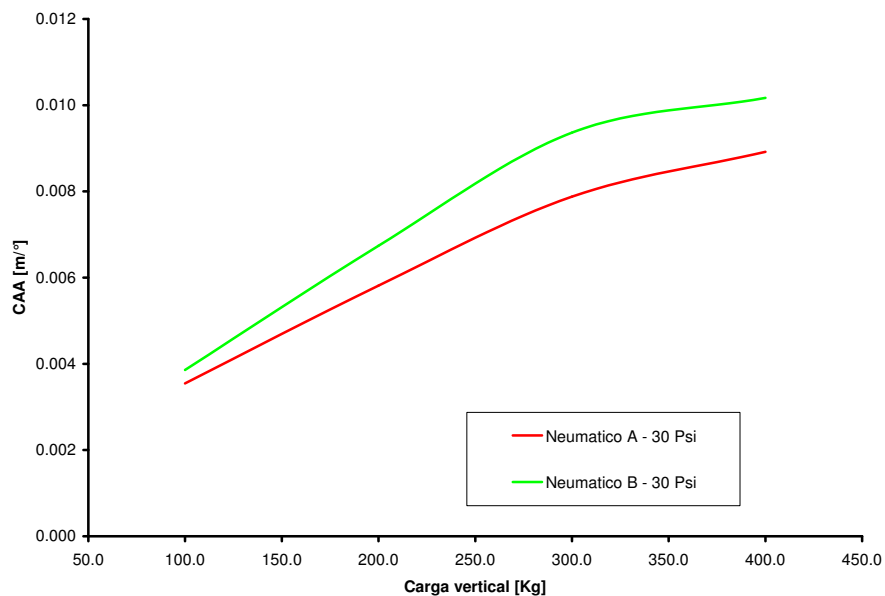


Figura 16: Coeficiente de autoalineación en función de la carga vertical  $F_z$ . Comparación entre el neumático A y B.

Como muestran las Fig. 15 y 16, tanto el CRV como el CAA presentan una dependencia análoga con la variación de geometría considerada en este trabajo. En ambos casos, los valores correspondientes al neumático B son mayores a los correspondientes al neumático A. Por otra parte, el valor máximo del CRV para el neumático A se da a los 250 Kg de fuerza radial, mientras que para el neumático B alcanza el máximo valor a los 300 Kg y a partir de allí se mantiene prácticamente constante con la carga.

## 5.2. Influencia de la presión de inflado

A continuación se presentan resultados que muestran la influencia de la presión de inflado sobre las características del neumático. Se presentan los valores de las funciones características correspondientes al neumático A para 20, 30 y 40 Psi de presión de inflado.

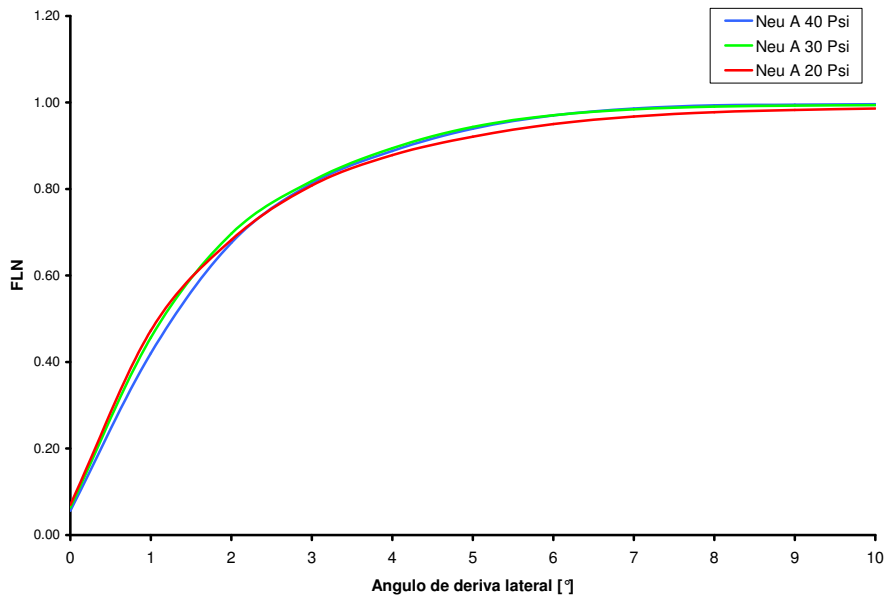


Figura 17: Fuerza lateral normalizada para diferentes valores de presión de inflado.

En la Fig. 17 se puede observar que la FLN disminuye con la presión en el rango de deriva lateral  $0 \leq \alpha \leq 1,5$ . De hecho es mayor para el neumático subinflado en dicho rango. Esto se corresponde con los resultados del CRV que se muestran más adelante en la Fig. 20 donde el neumático subinflado presenta mayor CRV hasta los 325 Kg. A partir de  $\alpha = 1,5$  el neumático subinflado es el que menor fuerza lateral desarrolla, mientras que los otros dos desarrollan prácticamente la misma.

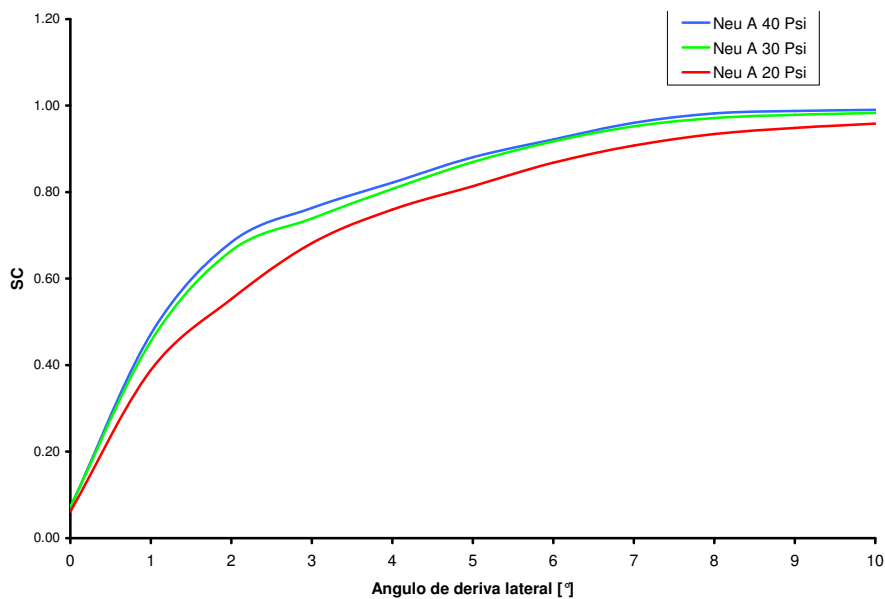


Figura 18: Sensibilidad a la carga para diferentes valores de presión de inflado.



En la Fig. 18 se puede observar que la SC es muy similar para los neumáticos inflados con 30 y 40 Psi, siendo para éste último levemente mayor. Por el contrario, al comparar la SC para 30 y 20 Psi, la disminución en la característica correspondiente a 20 Psi es considerablemente mayor.

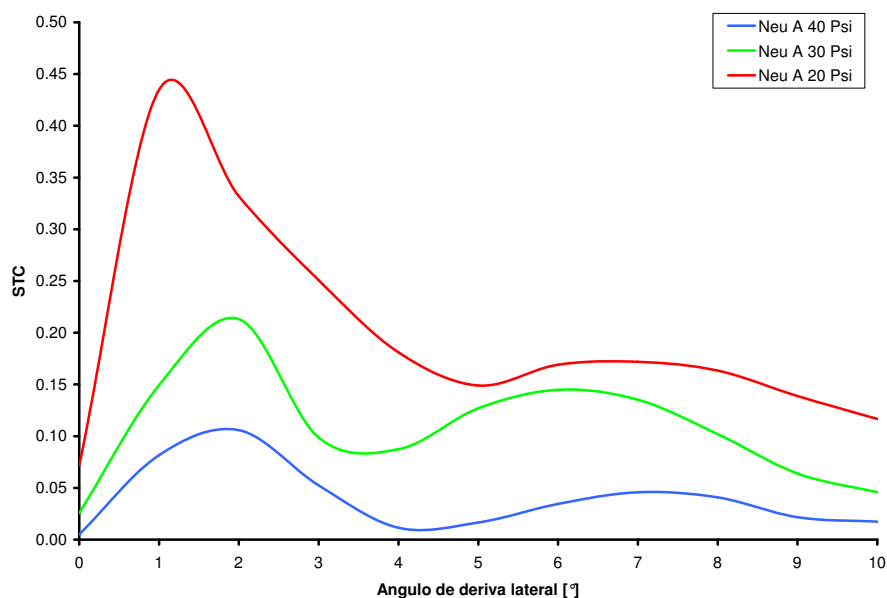


Figura 19: Sensibilidad a la transferencia de carga para diferentes valores de presión de inflado.

La figura 19 muestra que la sensibilidad a la transferencia de carga aumenta considerablemente con la disminución de la presión. Se observan incrementos de hasta un 100 % en la STC para 20 Psi respecto del valor correspondiente a 30 Psi.

Al comparar, en las Figuras 17, 18 y 19, las características obtenidas con iguales proporciones de subinflado y sobreinflado, se puede observar que el comportamiento del neumático subinflado se aparta mucho más del comportamiento del neumático inflado con la presión normal.

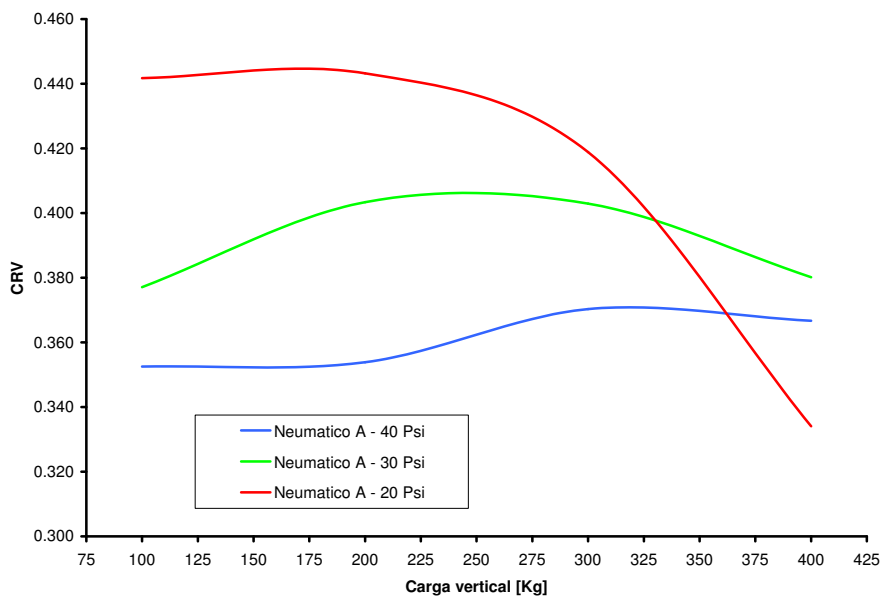


Figura 20: Coeficiente de rigidez de virado en función de la carga vertical.

En la Fig. 20 se observa que el coeficiente de rigidez de virado, hasta los 325 Kg de carga radial, aumenta al disminuir la presión de inflado. También se observan notables cambios en las distintas respuestas. Para 30 Psi, el CRV tiene su máximo cerca de los 250 Kg en cambio para 40 Psi el CRV se mantiene prácticamente constante hasta los 200 Kg y a partir de allí aumenta para quedar casi constante a partir de los 300 Kg. También se observa que para 20 Psi, a partir de los 325 Kg el CRV disminuye abruptamente al aumentar la carga radial.

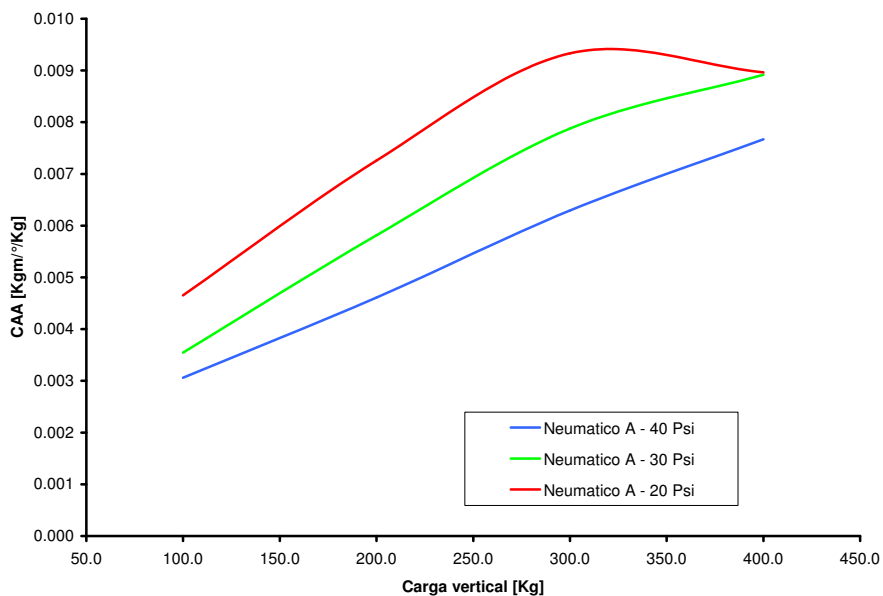


Figura 21: Coeficiente de autoalineación en función de la carga vertical.

El coeficiente de rigidez de autoalineación presenta una dependencia inversamente proporcional al incremento de presión en todo el rango de carga radial, esto se puede observar en la Fig. 21. También se observa la caída brusca de esta característica a partir de los 320 Kg para el neumático inflado con 20 Psi de presión.

## 6. CONCLUSIONES

Los modelos numéricos empleados en este trabajo permiten obtener las funciones características correspondientes a los neumáticos analizados.

Al analizar los resultados correspondientes a variaciones geométricas entre los neumáticos A y B se observa que la forma del perfil afecta considerablemente los valores de las funciones características. La fuerza lateral normalizada del neumático B aumenta un 8 % respecto del neumático A. Un comportamiento análogo se observa en la sensibilidad a la carga. Las diferencias en la sensibilidad a la transferencia de carga dependen del rango de deriva lateral considerado, hasta los  $2,5^\circ$ , la STC es mayor para el neumático A, a partir de allí y hasta los  $3,8^\circ$ , es mayor para el neumático B y a partir de este punto los valores correspondientes al neumático A aumentan considerablemente respecto del B. Los coeficientes de rigidez de virado y de autoalineación presentan una dependencia análoga con la variación de geometría considerada en este trabajo. En ambos casos, los valores correspondientes al neumático B son mayores a los correspondientes al neumático A. Para el CRV se observa un incremento del 7,5 % a la carga de 300 Kg para el neumático B respecto del A, Este coeficiente es importante para conocer las variaciones de fuerza lateral con la deriva.

Al considerar la influencia de la presión de inflado en las características del neumático A se observa que el neumático con menor presión experimenta mayores fuerzas laterales hasta los  $2,0^\circ$  de deriva lateral aproximadamente y en ese mismo rango el de 40 Psi desarrolla menores fuerzas laterales. A partir de allí la mayor fuerza lateral se observa para 30 Psi de presión de inflado. A partir de los  $2,0^\circ$  la fuerza lateral normalizada del neumático inflado con 20 Psi es inferior a la correspondiente a 30 y 40 Psi. La sensibilidad a la carga aumenta con la presión en todo el rango de derivas laterales consideradas. La sensibilidad a la transferencia de carga aumenta notablemente con la disminución de la presión. La dependencia del coeficiente de rigidez de virado con la presión de inflado depende del valor de carga radial. Hasta los 325 Kg de fuerza radial, el CRV aumenta al disminuir la presión, a partir de allí disminuye abruptamente y el neumático inflado con 30 Psi presenta mayor CRV. El coeficiente de autoalineación aumenta con la disminución de la presión en todo el rango de carga vertical pero se nota una marcada caída en el mismo a elevadas cargas radiales.

## REFERENCIAS

- Clark S. *Mechanics of Pneumatic Tires*. U.S Department of Transportation and National Highway Safety Administration, 1981.
- Di Véroli J., Galli E., y Raggi R. Cálculo de funciones características a partir de datos experimentales. *Informe interno de FATE*, 90, 1974.
- Gent A. y Walter J. The pneumatic tire. *National Highway Traffic Safety Administration. Washington DC*, 2005.
- Kennedy R. y Padovan J. Finite element analysis of a steady-state rotating tire subjected to point load or ground contact. *Tire Science and Technology*, 15:243–260, 1987.
- Nordeen D.L. Analysis of tire lateral forces and interpretation of experimental tire data. *SAE 670173. Automotive Engineering Congress. Detroit, Michigan*, 1967.
- Nordeen D.L. Application of tire characterizing functions to tire development. *SAE 680409. Mid-year Meeting. Detroit, Michigan*, 1968.
- Oden J.T., Lin T.L., y Bass J.M. A finite element analysis of the general rolling contact problem for a viscoelastic rubber cylinder. *Tire Science and Technology*, 16:18–43, 1988.
- Pacejka H. *Tyre and Vehicle Dynamics*. Society of Automotive Engineers Inc., 2002.

- Qi J., Herron J.R., Sansalone K.H., Mars W.V., Du Z.Z., Snyman M., y Surendranath H. Validation of a steady-state transport analysis for rolling treaded tires. *Tire Science and Technology*, 35:183–208, 2007.
- SIMULIA. *ABAQUS Theory manual*. Dassault Systemes, 2011a.
- SIMULIA. *ABAQUS User's manual*. Dassault Systemes, 2011b.
- Unrau H., Zamow J., y Porsche F. *TYDEX-Format. Description and Reference Manual*. 1997.