

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE NEUMÁTICOS - ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL RODADO

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; tarechaga@fate.com.ar; <http://www.fate.com.ar>

Palabras Clave: Neumático, Elementos Finitos, Rodado, Fuerza lateral, Autoalineación.

Resumen. El comportamiento de neumáticos está fuertemente influenciado por el contacto entre éste y el suelo. Más aún, la interacción entre el neumático y el camino está directamente relacionada con el dibujo del rodado. En este trabajo se presenta el análisis de dos neumáticos de construcción radial. Uno de los neumáticos es para uso en camioneta, de medida 245/75R16 y el otro de medida 175/65R14 para automóvil. En ambos casos se analiza, por un lado el modelo liso y por otro lado el modelo con patrón de rodado. El objetivo del trabajo se centra en cuantificar la influencia del dibujo de rodado en las fuerzas laterales y momentos de autoalineación generados, como así también en evaluar el desempeño. El análisis se realiza con el código ABAQUS utilizando dos enfoques. Por una parte se resuelve el problema utilizando un análisis SST (formulación Lagrangeana - Euleriana), por otra parte se realiza un análisis dinámico implícito (descripción Lagrangeana) buscando la respuesta estacionaria luego de superar la etapa transitoria.

Con el objetivo de utilizar modelos acordes a los recursos computacionales disponibles, se presenta un estudio previo con el objetivo de determinar el modelo numérico a ser utilizado. Para esto se comparan resultados estáticos con diferentes mallas y estrategias de modelado. Una vez validados los modelos se realizan los análisis de los neumáticos en condiciones de rodadura.

El trabajo incluye comparaciones que ponen de manifiesto la influencia del rodado sobre las fuerzas y momentos generados como así también sobre los indicadores de desempeño. Finalmente se presenta la comparación entre algunos valores obtenidos por los dos métodos de análisis considerados.

1. INTRODUCCIÓN

En términos generales se puede decir que un patrón o dibujo de rodado de neumático consiste en formar canales longitudinales, y oblicuos en la periferia del mismo. Esto trae aparejados notables cambios, como ser la modificación de las zonas de contacto, variaciones en la rigidez del rodado y cambios en las distribuciones de esfuerzos y deformaciones (Clark, 1981). La única razón técnica de la existencia del dibujo de rodado es mejorar la tracción y manejabilidad ante la presencia de agentes contaminantes como agua, hielo, nieve, barro, etc. (Gent y Walter, 2005). En un camino totalmente libre de estos contaminantes el patrón del dibujo de rodado sería innecesario. El patrón de rodado es una necesidad de ingeniería para la tracción y manejabilidad. Desde luego, el diseño debe ser estéticamente atractivo y cumplir además con los paradigmas del mercado.

En base a lo expresado anteriormente, se puede decir que se producirán cambios en las características de un neumático con dibujo de rodado frente a su contraparte lisa. El número de costillas y la separación entre canales (*grooves*) afectan principalmente las características de evacuación de agua. El ancho de canales, la relación lleno vacío, las dimensiones de las ranuras de los hombros y su orientación impactan sobre la tracción, la manejabilidad y las direcciones de evacuación de agua (Gent y Walter, 2005).

En el presente trabajo se estudian dos neumáticos de construcción radial. Uno es para uso en camioneta y el otro para uso en automóvil. El neumático de camioneta es de medida 245/70R16, mientras que el de automóvil es de medida 175/64R14. Ambos se muestran en la figura 1, donde se puede ver que el patrón de rodado de ambos neumáticos es totalmente diferente.



Figura 1: Neumáticos de camioneta y automóvil analizados.

Las condiciones de operación consideradas se especifican en la Tabla 1:

Tabla 1: Condiciones de operación consideradas para los neumáticos analizados.

Neumático	Carga radial (Kg)	Presión de inflado (PSI)	Velocidad (Km/h)
245/70R16 de camioneta	930.0	42.0	80.0
175/64R14 de automóvil	300.0	30.0	80.0

A partir de los modelos analizados se obtienen resultados correspondientes a fuerzas laterales (FL) y momentos de autoalineación (MAA). A este conjunto de resultados lo llamamos primarios ya que se obtienen en forma directa a partir de las simulaciones numéricas. Un segundo grupo de resultados se obtiene operando sobre los resultados primarios. Éste segundo

grupo es quizás más representativo del desempeño, por lo tanto, en este trabajo se los denomina indicadores de desempeño (ID). Algunos ID intervienen en las ecuaciones dinámicas que describen las trayectorias y características de vehículos, como es el caso del coeficiente de rigidez de virado (CRV) (Guennam y Arechaga, 2012). Los indicadores de desempeño considerados en el presente trabajo son:

- Coeficiente de rigidez de virado (CRV).
- Coeficiente de autoalineación (CAA).
- Rigidez lateral (Ky).
- Rigidez Torsional (KTz).

A modo comparativo se presentan los valores de los ID correspondientes a los respectivos neumáticos lisos.

2. ESTRATEGIA DE MODELADO

El modelado numérico de un neumático con su dibujo de rodado es considerablemente más complejo y computacionalmente más caro que su contraparte de rodado liso. Los modelos considerados en este trabajo se analizan con el programa de elementos finitos ABAQUS (SIMULIA, 2012). La generación de los modelos se realiza con programas desarrollados íntegramente en FATE. Dichos programas utilizan librerías de generación de geometría y malla que se vienen desarrollando en FATE usando el lenguaje FORTRAN desde los años 80 y se continúan manteniendo y actualizando acorde a las necesidades, a la vez que se combinan con nuevas herramientas de programación, especialmente para el desarrollo de su interfaz gráfica. Se utilizan dos mallas separadas, una para la zona de carcasa y otra más refinada para la zona del rodado. Entre ambas mallas se impone una vinculación cinemática. Se plantea la resolución del problema mediante dos enfoques. En primer lugar se utiliza una estrategia denominada SST (*Steady State Transport*) que consiste en una formulación Euleriana-Lagrangeana. Por otra parte se realizan los cálculos con dinámica explícita, enfoque netamente Lagrangeano. Para la generación de la malla del rodado se define una curva que marca la interfaz entre la carcasa y el rodado. El rodado se dibuja en 2D y luego mediante proyecciones se genera la malla 3D correspondiente a la zona de la pisada. Las proyecciones se realizan teniendo en cuenta, tanto las curvas de corona (definidas por el molde) como así también la curva de interfaz o base.

Las mallas utilizadas en el presente trabajo se muestran a continuación. En la figura 3 se muestra el sector utilizado para generar el modelo 3D del neumático 245/70R16 de camioneta mientras que la figura 2 muestra el sector 175/65R14.

Los compuestos de caucho de cada sector de los neumáticos considerados se modelan como hiperelásticos y se utiliza en éste trabajo el modelo de Ogden de orden 3. Para los refuerzos se utiliza el modelo de Marlow. La fricción entre el suelo y el neumático se describe con un modelo que tiene en cuenta la influencia de la presión de contacto y la velocidad de deslizamiento en el coeficiente de rozamiento (Li et al., 2012).

A los fines de imponer la condición de rodadura libre cuando se utiliza el enfoque SST, se utiliza una implementación de la subrutina de usuario UMOTION de ABAQUS. La misma tiene en cuenta, desde luego, la metodología de cálculo utilizada en FATE. Cabe destacar la importancia de introducir en el modelo la combinación precisa de velocidad angular y de traslación,

ya que mínimas cantidades de deslizamiento longitudinal producen variaciones considerables de fuerza lateral y momento.

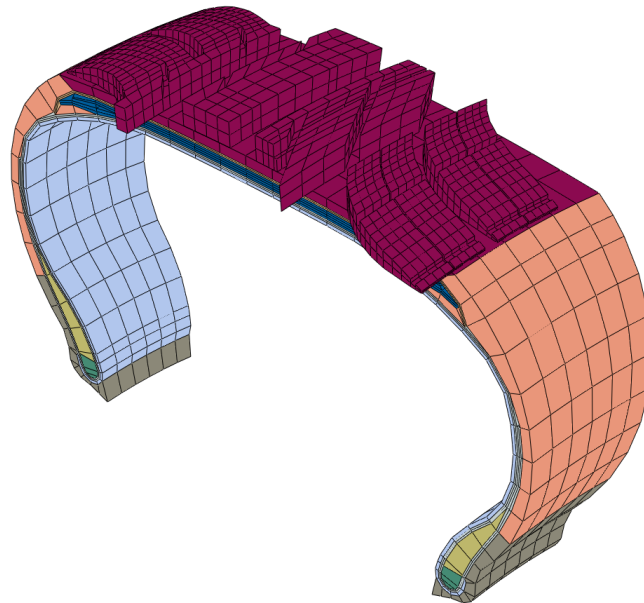


Figura 2: Sector de neumático medida 175/65R14 de automóvil usado para generar el modelo 3D.

Para el caso del neumático de camioneta, debido al mayor tamaño del modelo y mayor complejidad del patrón de rodado, se adopta una descripción simplificada de carcasa. Dicha simplificación conduce a modelos con cantidades adecuadas de grados de libertad reteniendo las características del modelo.

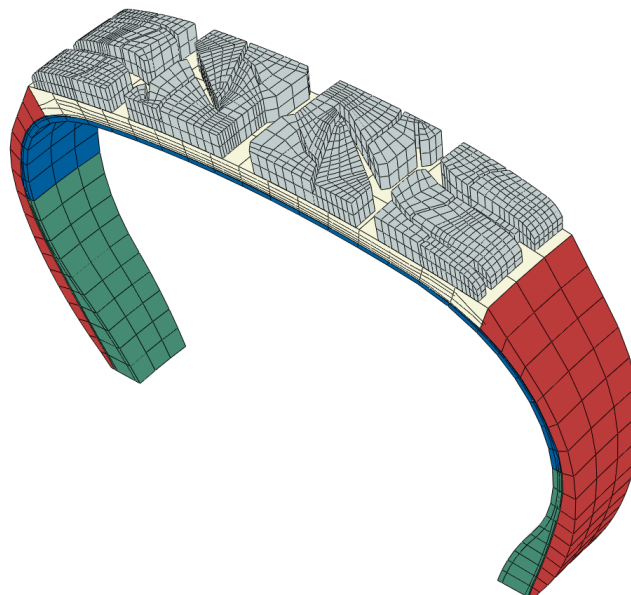


Figura 3: Sector de neumático medida 245/70R16 de camioneta usado para general el modelo 3D.

Comparando las mallas de la carcasa de automóvil y camioneta puede observarse la diferencia en los detalles de cada una. A modo de cuantificar la precisión del uso de la malla simplificada, en la sección 4 se presentan comparaciones con algunos resultados experimentales.

Las mallas 3D se muestran en las figuras 4 y 5.

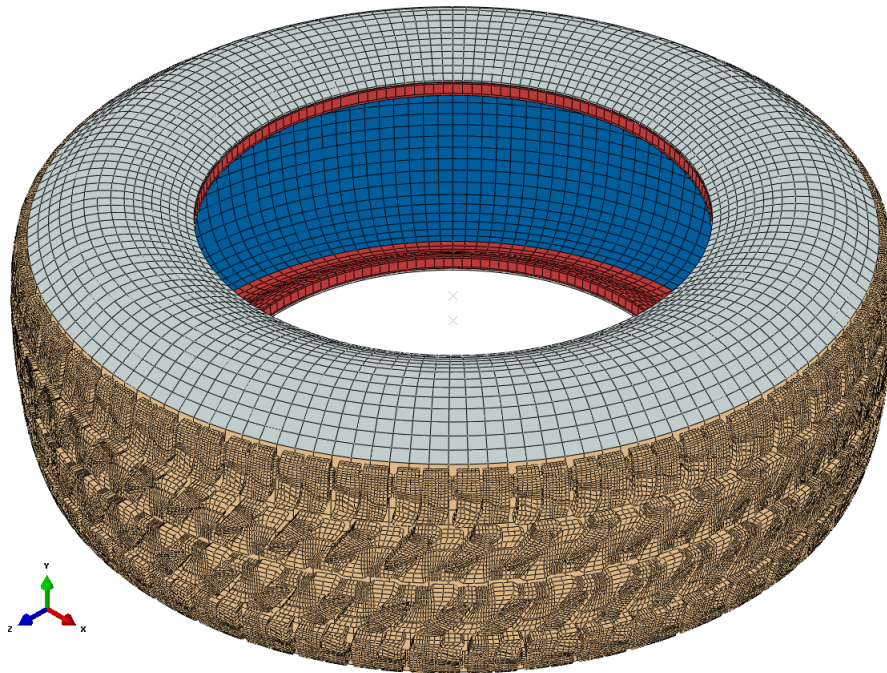


Figura 4: Malla correspondiente al neumático de camioneta 245/70R16.

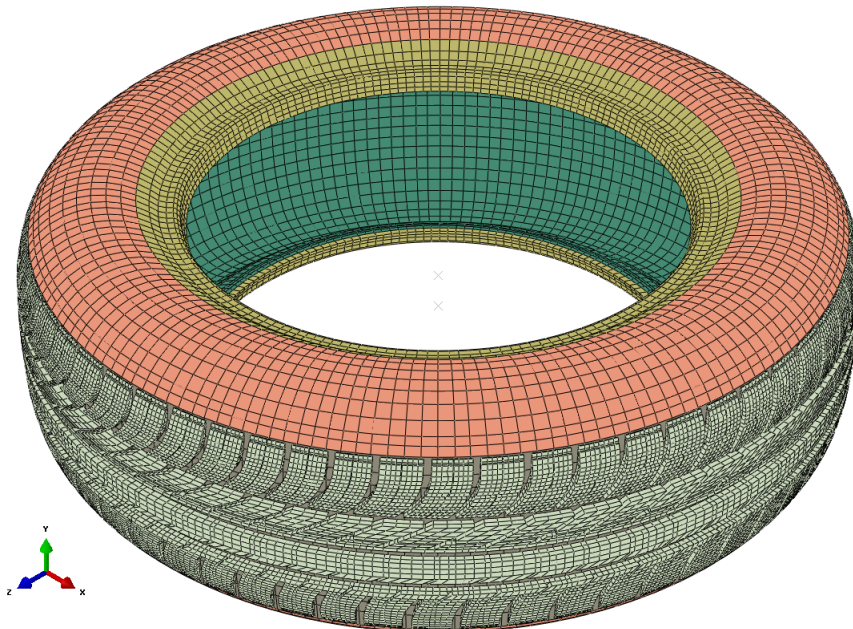


Figura 5: Malla correspondiente al neumático 175/65R14 de automóvil.

3. MECÁNICA DE LA IMPRONTA

Las fuerzas tangenciales se transmiten por fricción. Por lo tanto, los neumáticos sólo son capaces de transferir cargas transversales cuando están cargados radialmente. Los valores de

las fuerzas tangenciales están limitados por el coeficiente de fricción en la dirección correspondiente.

Es ampliamente reconocido que el coeficiente de fricción es función de la presión de contacto, de la velocidad de deslizamiento y de la temperatura. En general, para los materiales utilizados en el rodado de un neumático radial, se observa que el coeficiente de fricción es función decreciente de la presión normal.

El patrón de rodado es una fuente de anisotropía en la capa del rodado. Los bloques del rodado pueden comprimirse y flexionarse tanto que la carga normal se transmite sólo por los bordes frontales del bloque. Por lo tanto, la presión normal en dichas áreas aumenta significativamente bajando, en consecuencia, el coeficiente de fricción. Cuando la tensión tangencial en la zona de contacto excede el valor límite, comienza el deslizamiento. Por lo tanto, la zona de contacto se descompone en una zona de adhesión y otra de deslizamiento.

4. PASOS PREVIOS

Antes de abordar el análisis de las fuerzas laterales y momento de autoalineación, es conveniente realizar pruebas que permitan evaluar los modelos y la estrategia de cálculo adoptada. Para esto se realizan comparaciones con los resultados experimentales disponibles actualmente, los que incluyen:

- Carga deflexión.
- Distribución de presiones de contacto en la impronta.
- Mediciones de Ply Steer en las máquinas de uniformidad.

4.1. Relación carga deflexión

En la figura 6 se muestran los resultados correspondientes a la prueba física y los resultados numéricos con carcasa detallada y simplificada.

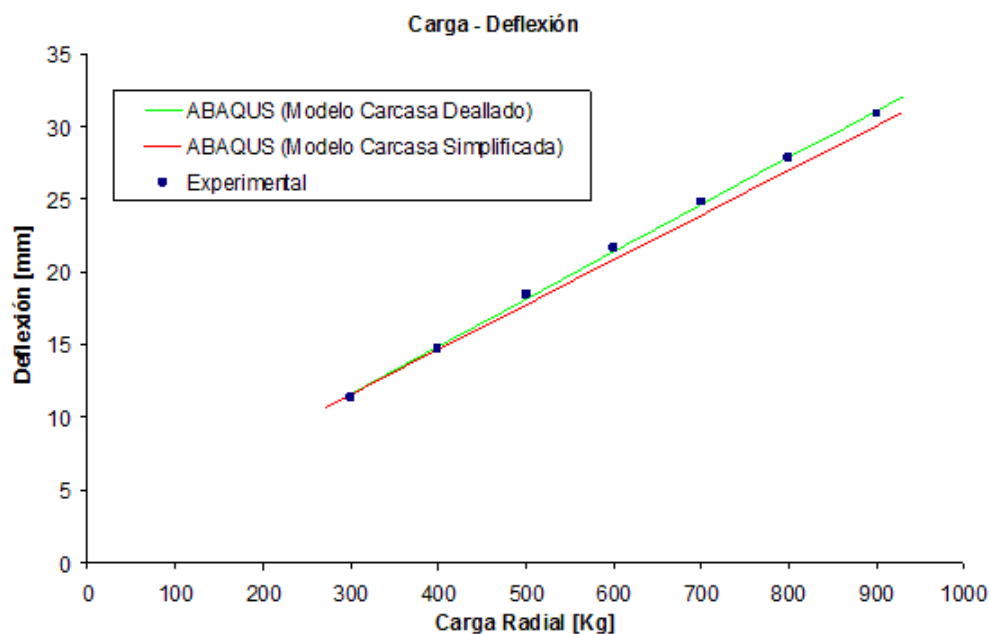


Figura 6: Relación carga-deflexión obtenida en forma experimental y numérica con modelo detallado y simplificado

4.2. Distribución de presiones de contacto en la impronta estática

Teniendo en cuenta que en este caso el interés está centrado en la influencia del rodado y que las comparaciones de resultados numéricos con experimentales disponibles son satisfactorias, es posible suponer que con el modelo simplificado de carcasa se pueden obtener

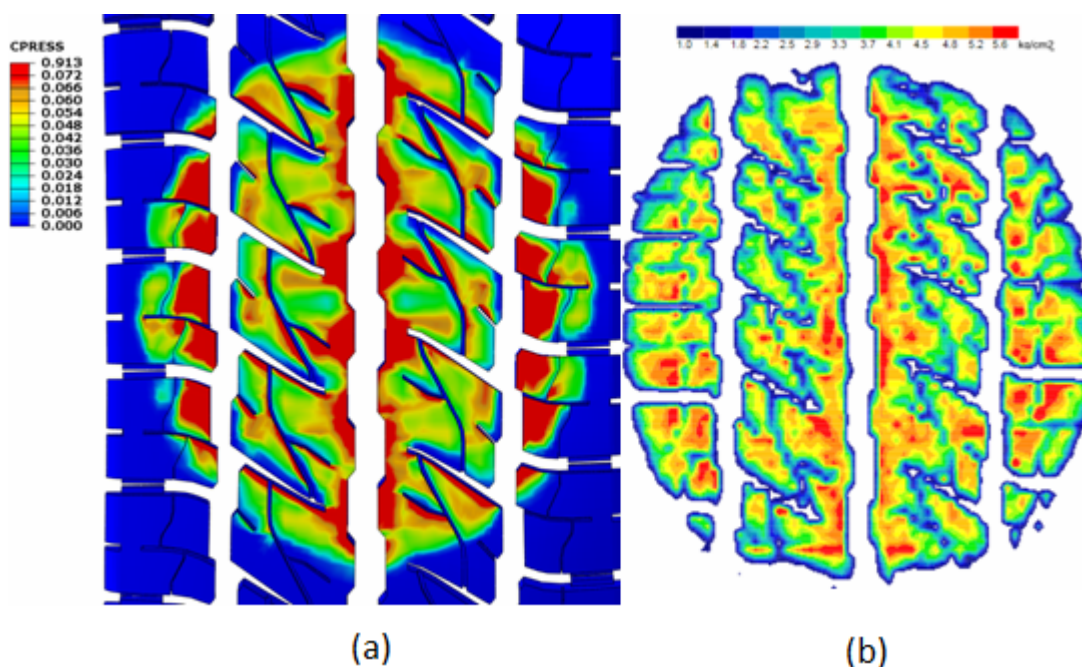


Figura 7: Impronta numérica con modelo de carcasa simplificada (a) y experimental (b).

4.3. Mediciones de *Ply Steer* en máquina de uniformidad

La Tabla 2 muestra una comparación entre las mediciones en máquina de uniformidad y resultados numéricos correspondientes al neumático de camioneta liso y con dibujo de rodado.

Tabla 2: Ply steer

Neumático	Ensayo	Modelo EF
Lisa	14.5	18.0
Patrón RR	10.0	11.0

5. ANÁLISIS ESTACIONARIO SST

En esta sección se describen los modelos de los neumáticos estudiados en este trabajo utilizando la estrategia SST del programa ABAQUS. Se estudia el comportamiento a diferentes valores de deriva lateral de los neumáticos lisos y con el correspondiente dibujo de rodado. También se considera un conjunto de análisis que tiene en cuenta la inversión en el orden del apilamiento de las cinturas¹. Se consideran ángulos de deriva lateral desde -3° a $+3^\circ$. Por

¹Las cinturas o absorbedores son, en el caso de los neumáticos considerados en este trabajo, compuestos de goma y cordones metálicos. Los neumáticos tienen dos cinturas con los cordones orientados $+/- 24^\circ$ respecto de la dirección circunferencial. El orden de apilamiento se refiere al orden en que se orientan las capas, es decir, primero un absorbedor a $+24^\circ$ y el otro a -24° o viceversa.

lo que es posible estudiar el comportamiento en gran parte de la zona de operación normal correspondientes a deriva lateral moderada.

5.1. Neumático de automóvil

Los resultados primarios correspondientes al neumático de automóvil se muestran en las figuras 8 y 9.

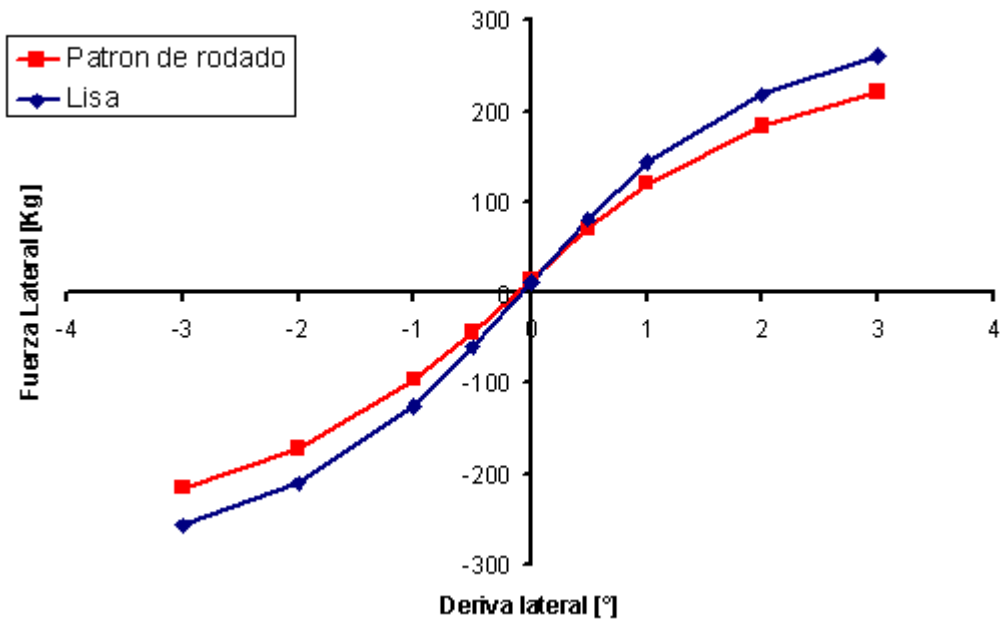


Figura 8: Fuerza lateral en neumático de automóvil liso y con dibujo.

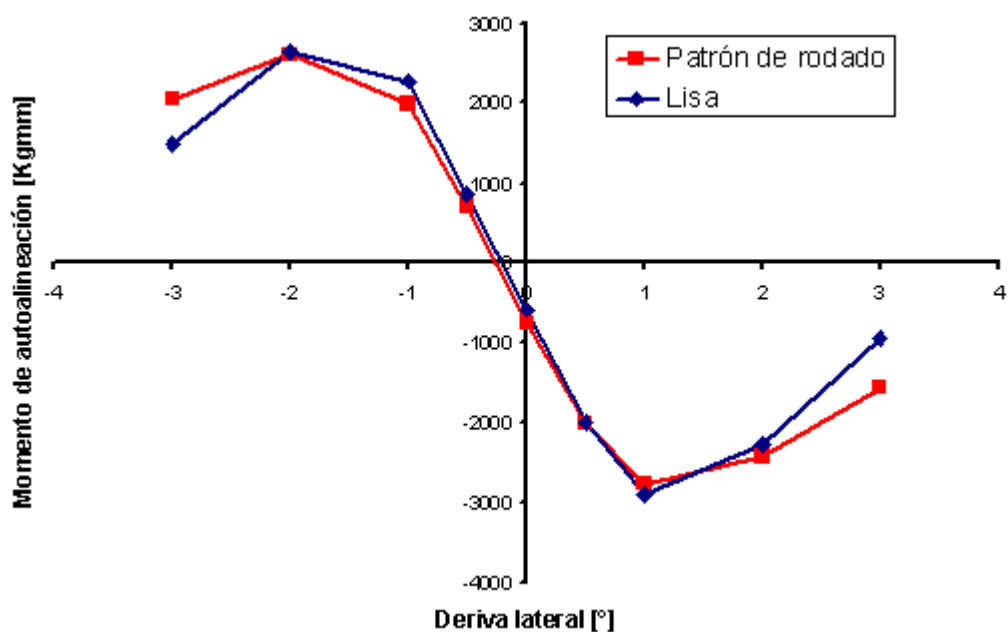


Figura 9: Momento de autoalineación en neumático de automóvil liso y con dibujo.

A partir de los resultados primarios se obtienen los ID resumidos en la Tabla 3.

Tabla 3: Resultados correspondientes al neumático 175/65R14 para uso en automóvil

Modelo	CRV	CAA	Ky	KTz
Lisa	0.467	9.530	8.8	4447.0
Patrón de rodado	0.385	9.063	8.7	4160.5
Diferencia [%]	-17.6	-4.9	-0.4	-6.4

El signo negativo indica disminución respecto del neumático liso.

5.1.1. Presiones de contacto en la impronta dinámica

Se muestra a continuación una comparación entre las distribuciones de presiones de contacto en la impronta correspondientes al neumático liso y con dibujo, para dos condiciones de deriva lateral, $+0,5^\circ$ y $+2,0^\circ$.

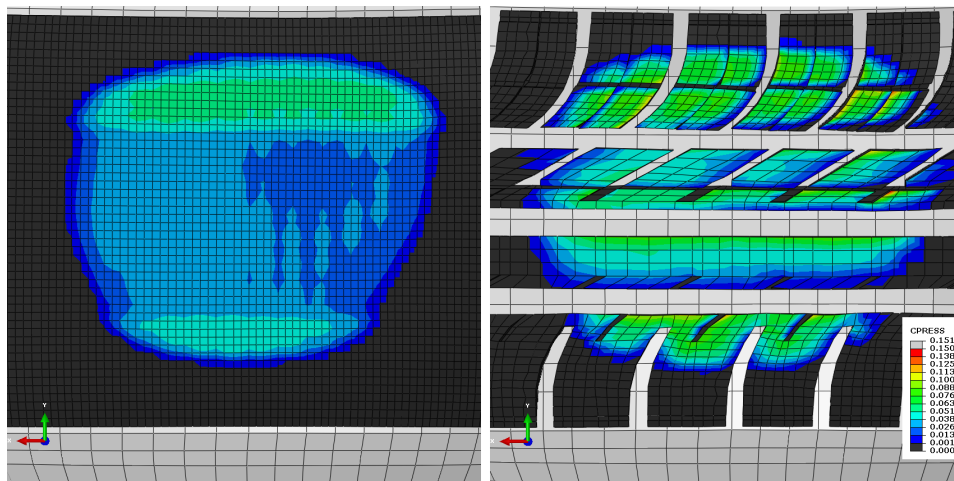


Figura 10: Presiones de contacto en neumático de automóvil liso y con dibujo, deriva $+0,5^\circ$.

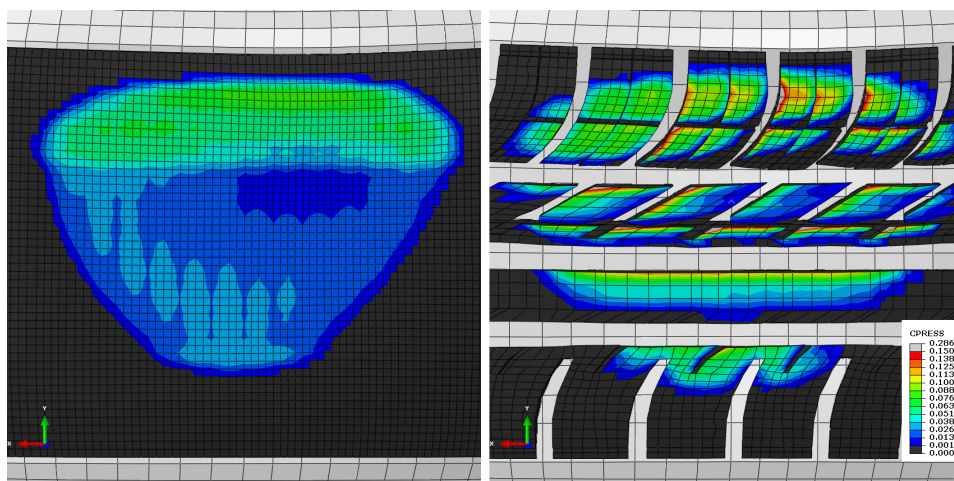


Figura 11: Presiones de contacto en neumático de automóvil liso y con dibujo, deriva $+2,0^\circ$.

Como se puede observar en las figuras 10 y 11, las presiones de contacto aumentan considerablemente en relación al rodado liso. En general se observa que el incremento de presión se da en los bordes de ataque de los bloques (la dirección del movimiento es hacia la dirección positiva del eje X).

5.2. Neumático de camioneta

Se estudian, el neumático liso, con dibujo de rodado y a su vez en cada caso se analiza el impacto del apilamiento de absorbedores o cinturas metálicas.

5.2.1. Influencia del dibujo de rodado

En la figura 12 se presentan los resultados comparativos de fuerza lateral correspondientes al neumático de camioneta liso y con patrón de dibujo de rodado.

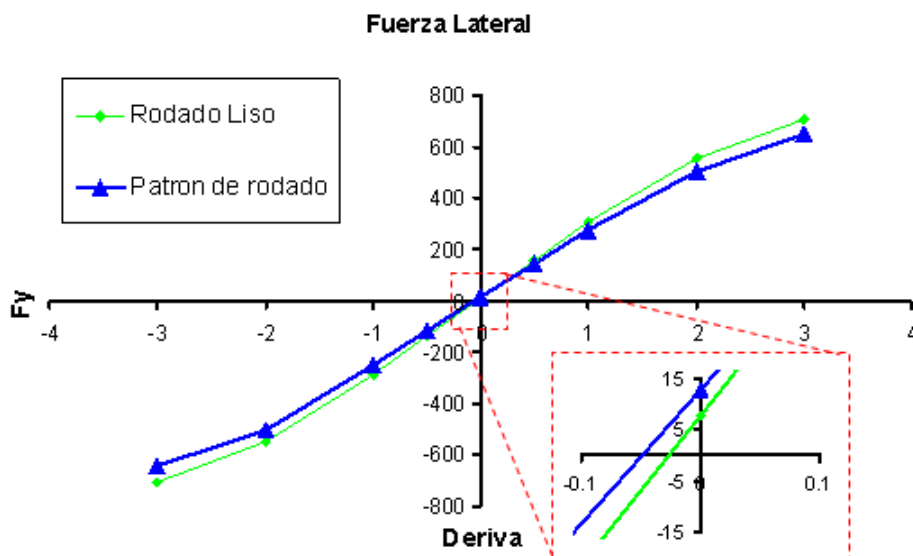


Figura 12: Fuerza lateral en neumático de camioneta. Comparación de valores correspondientes al neumático liso y con dibujo de rodado.

Como se observa en la figura 12, la pendiente de la curva en la zona central disminuye como consecuencia del patrón de rodado. También se observa que el valor de *ply steer* para el neumático con dibujo de rodado aumenta un 50 % respecto del neumático liso.

Los resultados correspondientes al momento de autoalineación se muestran en la figura 13

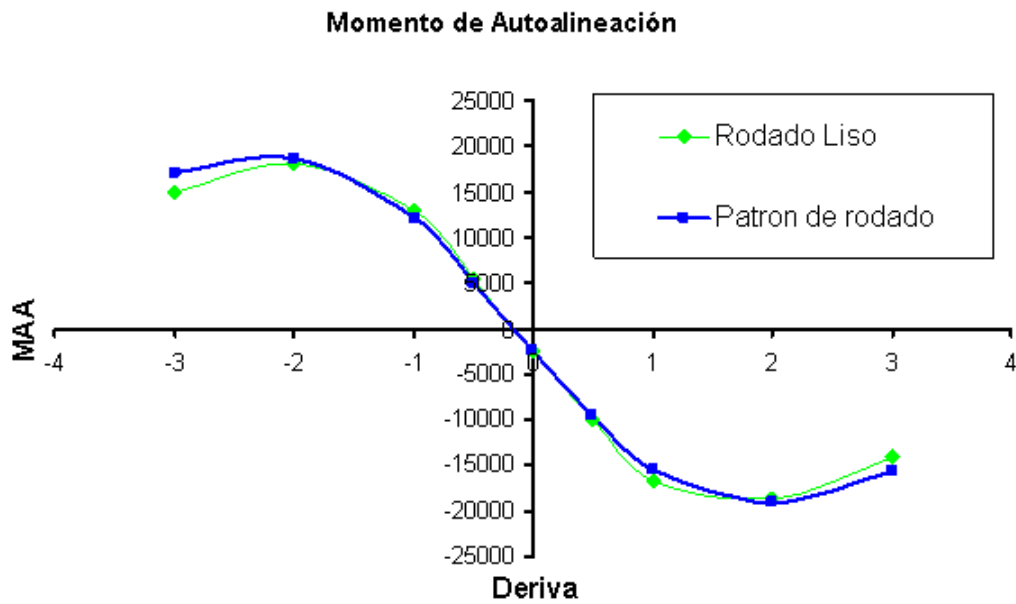


Figura 13: Momento de autolalineación en neumático de camioneta. Comparación de valores correspondientes al neumático liso y con dibujo de rodado.

La figura 13 muestra una disminución de la pendiente del MAA en la zona de derivas moderadas (entre $-1,5^\circ$ y $+1,5^\circ$) para el neumático con dibujo de rodado. Por otra parte se observa un considerable aumento del valor absoluto de MAA a elevados valores de deriva lateral respecto del neumático liso.

5.2.2. Influencia del apilamiento de absorbedores

La fuerza lateral correspondiente al neumático liso se muestra en la figura 14, donde se incluyen también los resultados correspondientes al orden inverso de apilamiento de absorbedores.

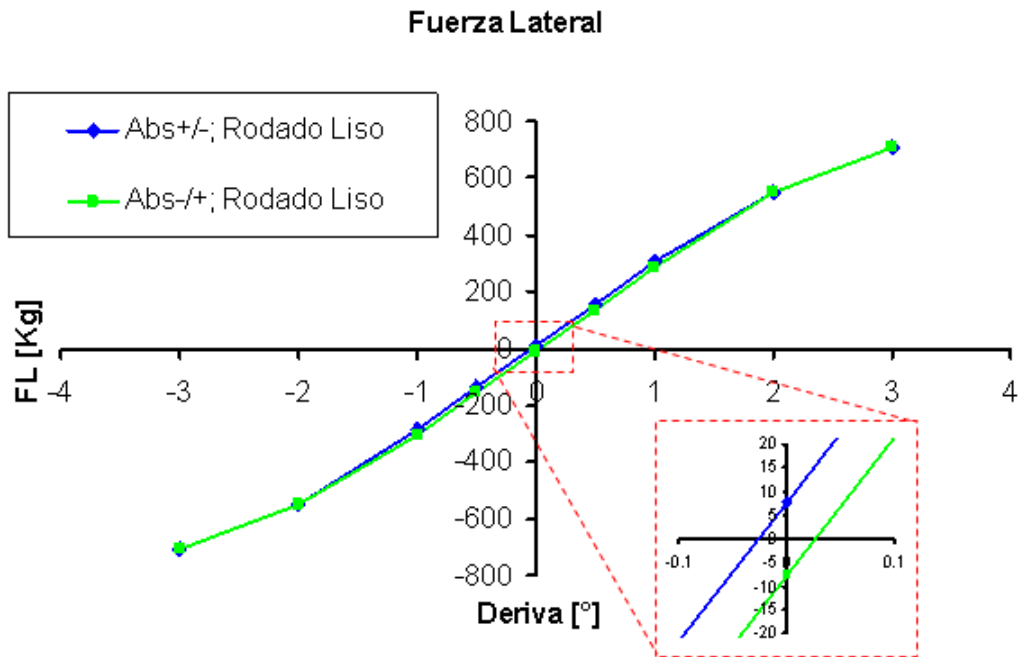


Figura 14: Fuerza lateral en neumático de camioneta liso. Impacto del orden de apilamiento de absorbedores.

En la figura 15 se muestra el momento de autoalineación correspondiente al neumático de camioneta liso. Al igual que para el caso de la fuerza lateral, se incluyen en la figura los resultados correspondientes al orden inverso de apilamiento de cinturas.

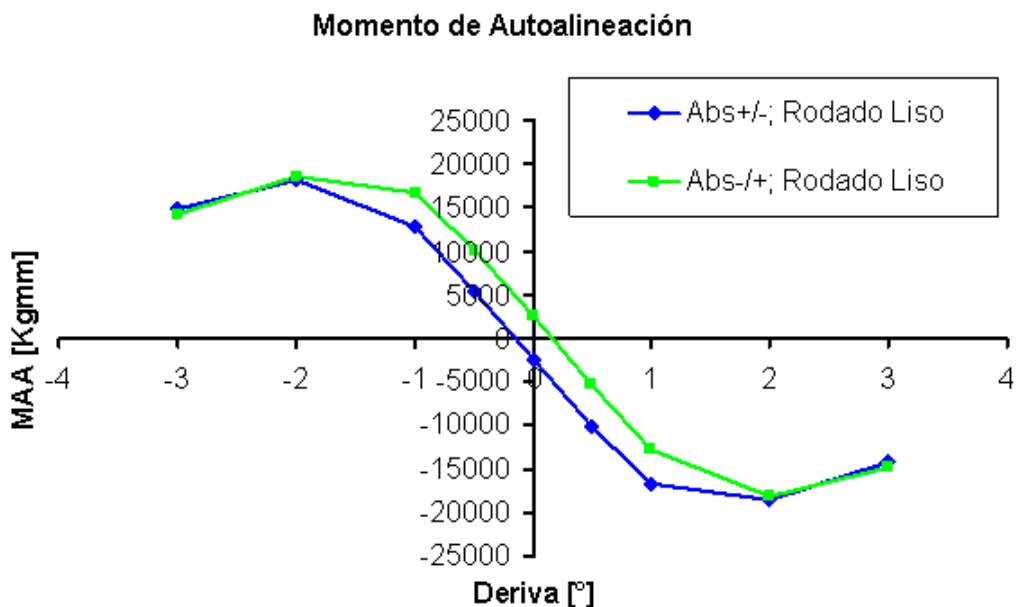


Figura 15: Momento de autoalineación en neumático de camioneta liso. Impacto del orden de apilamiento de absorbedores.

Las figuras 14 y 15 muestran claramente la influencia del apilamiento de las cinturas. La

primera muestra como el *ply steer* cambia de sentido, a pesar que la pendiente de la curva no cambia apreciablemente. El momento de autoalineación, por otra parte sufre un corrimiento vertical muy marcado.

A continuación se muestran la influencia del apilamiento de cinturas en el neumático de camioneta con patrón de rodado. La comparación de los valores de fuerza lateral se muestra en la figura 16.

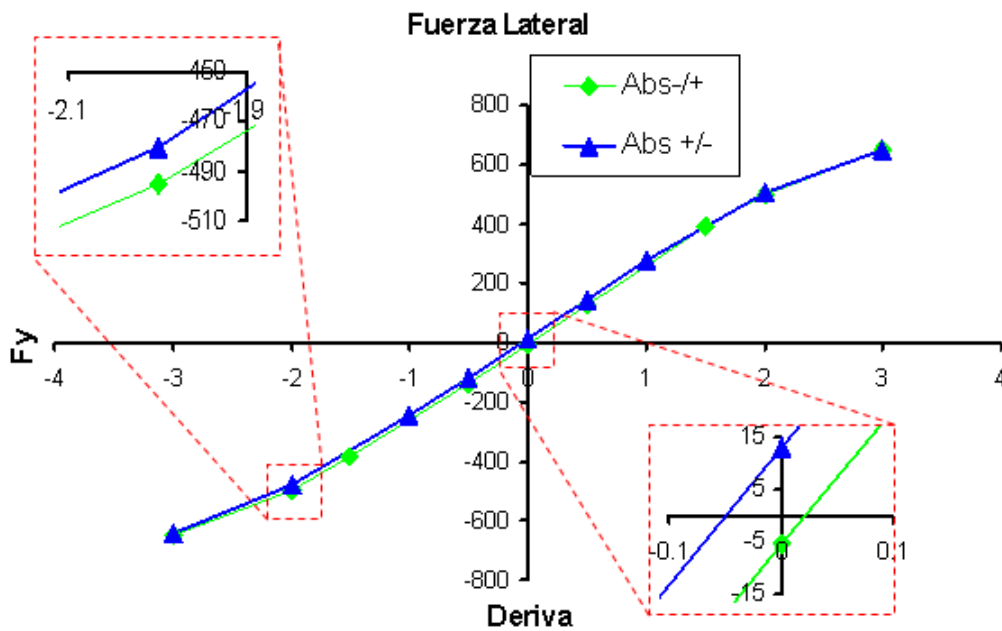


Figura 16: Fuerza lateral en neumático de camioneta con dibujo de rodado. Impacto del orden de apilamiento de absorbedores.

En la figura 17 se muestra la comparación entre los momentos de autoalineación correspondiente al neumático de camioneta con dibujo de rodado, obtenidos al cambiar el orden de apilamiento de absorbedores o cinturas.

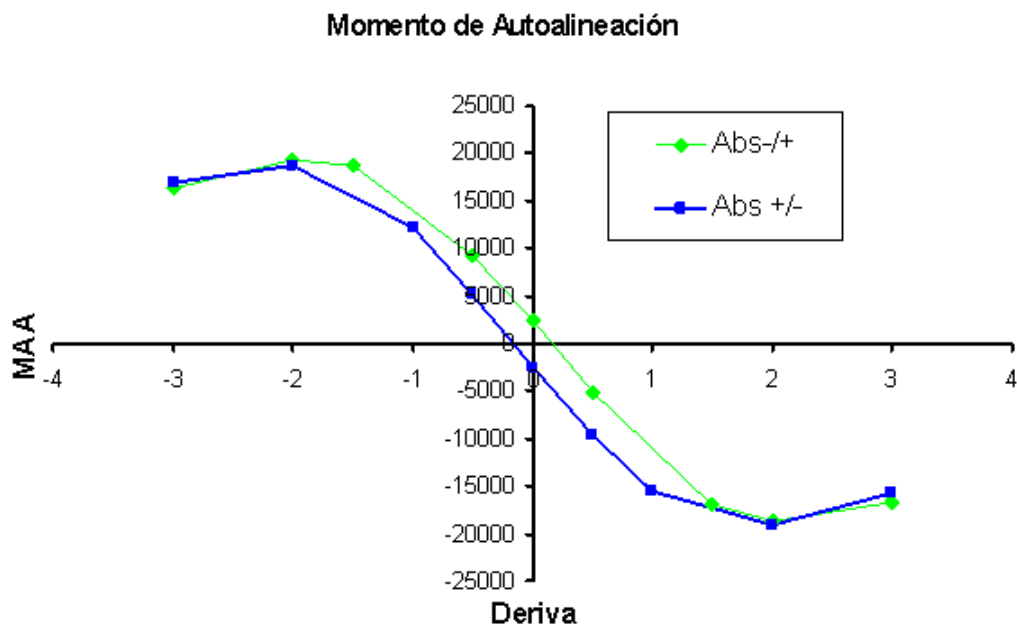


Figura 17: Momento de autoalineación en neumático de camioneta con dibujo de rodado. Impacto del orden de apilamiento de absorbedores.

Al igual que para el caso del neumático liso, las figuras 16 y 17 muestran claramente la influencia del apilamiento de las cinturas. En este caso, la influencia es un poco más marcada, ya que además de la asimetría introducida por los absorbedores interviene la correspondiente al patrón del dibujo de rodado y el acoplamiento entre ambas. En el caso de neumático con dibujo, se observan mayores cambios en los valores máximos y mínimos (Se dan aproximadamente a $\pm 2^\circ$ de deriva lateral).

5.3. Comparación de los indicadores de desempeño considerados

A partir de los resultados primarios obtenidos para los neumáticos de camioneta liso y con patrón de dibujo de rodado se calculan los indicadores que se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4: Resultados correspondientes al neumático 245/70R16 para uso en camioneta

Modelo	CRV	CAA	Ky	KTz
Liso	0.316	16.55	15.83	17510.6
Patrón de rodado	0.281	15.83	15.79	16621.9
Diferencia [%]	-11.08	-4.37	-0.25	-5.08

En la última fila de la Tabla 4 se indican las variaciones porcentuales de los indicadores del neumático con dibujo de rodado respecto del liso. Ésto pone de manifiesto la influencia del patrón de rodado sobre el desempeño.

5.3.1. Presiones de contacto en la impronta dinámica

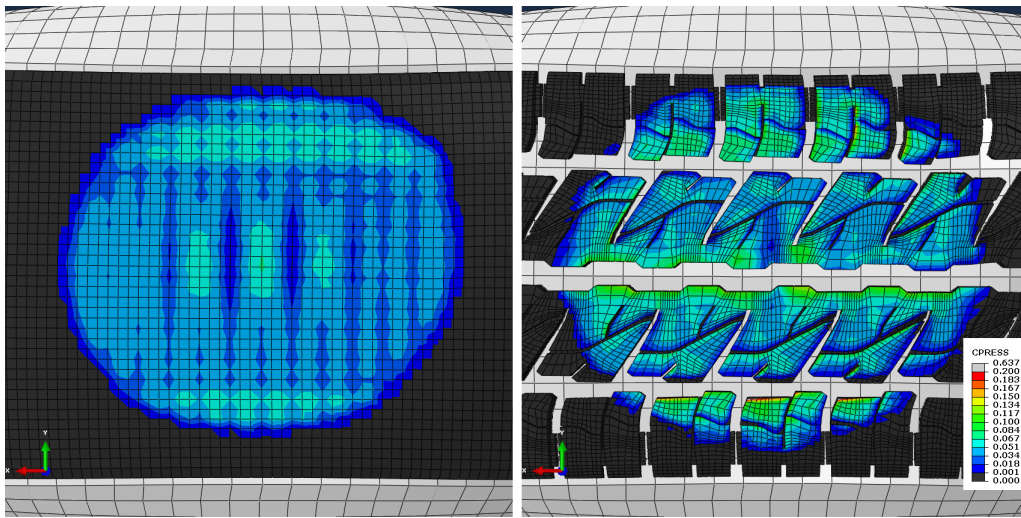


Figura 18: Presiones de contacto en neumático de camioneta liso y con dibujo, deriva $+0,5^\circ$.

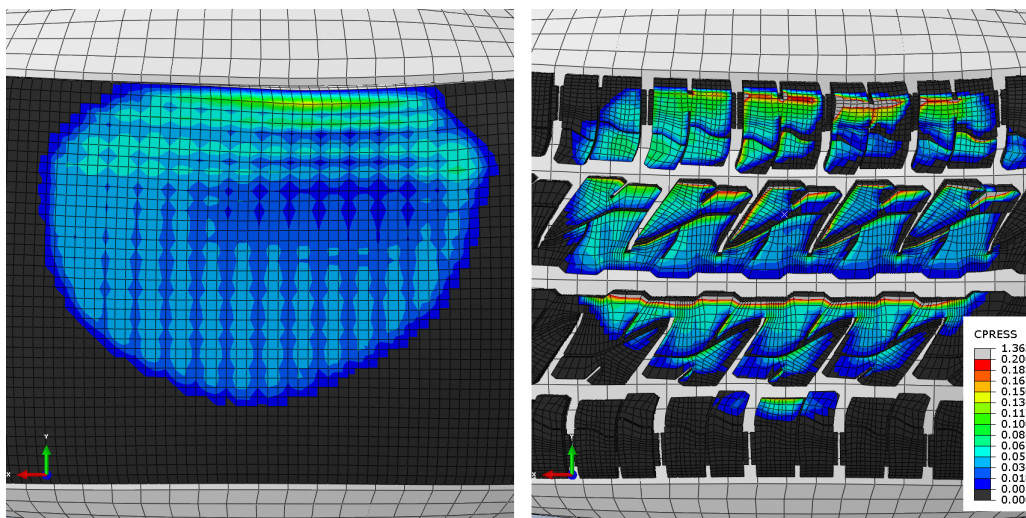


Figura 19: Presiones de contacto en neumático de camioneta liso y con dibujo, deriva $+3,0^\circ$.

6. ANÁLISIS DINÁMICO EXPLÍCITO

El modelo correspondiente al neumático de camioneta se analiza también con un esquema de dinámica explícita de ABAQUS. Partiendo de la condición estática del neumático apoyado y cargado con la fuerza radial nominal, en este caso 930 Kg, se impone gradualmente la condición de rodadura. Cabe destacar que se adopta la opción de mover la superficie plana que representa el suelo mientras que la posición de los nodos correspondientes al eje de rotación permanece fija, permitiéndoles sólo la rotación en dirección del eje y . Salvo por la curvatura del tambor, esta configuración representa en el modelo la utilizada en la rueda de pruebas instrumentada (RPI) del Centro de Ensayos de FATE. Las figuras 20 y 21 muestran una comparación entre las señales de fuerza lateral y momento de autoalineación de los modelos de neumático de camioneta con dibujo y orden opuesto de apilamiento de absorbedores. En color azul se indican

las señales correspondientes al apilamiento de absorbedores (+/-), mientras que el apilamiento (-/+) se muestra en color verde. Estos resultados nos permiten obtener no sólo la diferencia en el momento de autoalineación, sino también el tiempo de respuesta ante una variación en la deriva.

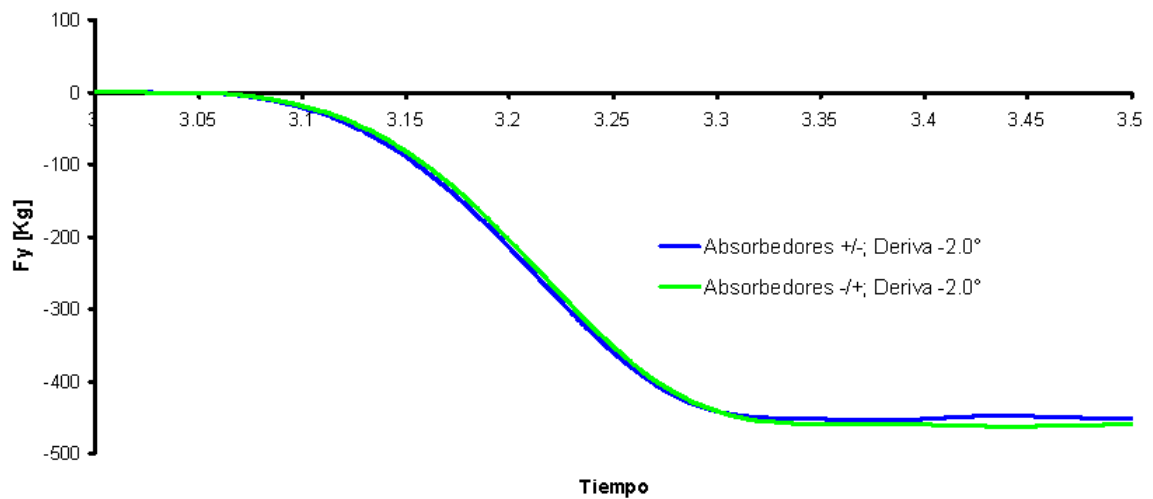


Figura 20: Fuerza lateral en neumático de camioneta con dibujo de rodado. Impacto del orden de apilamiento de absorbedores.

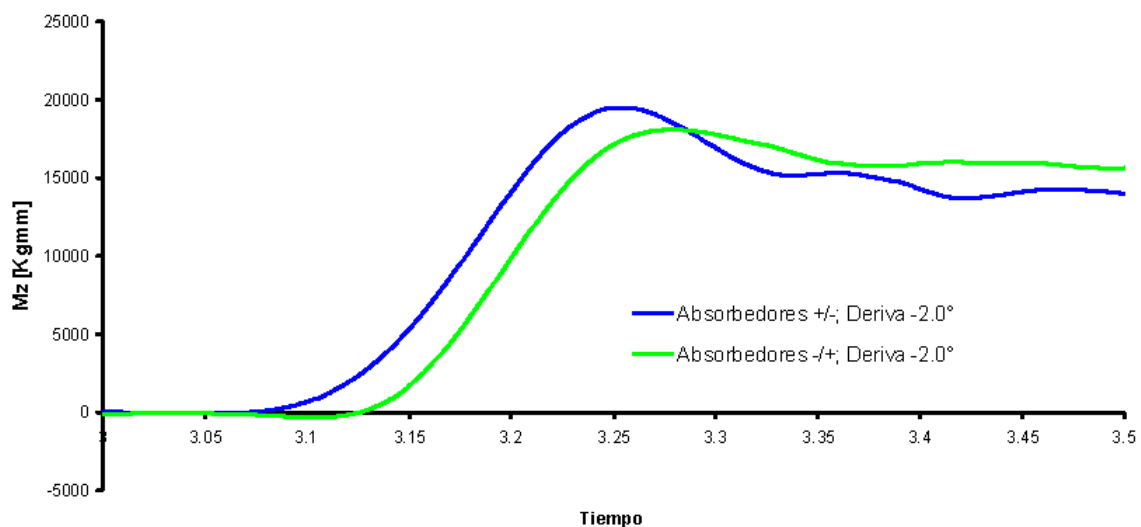


Figura 21: Momento de autoalineación en neumático de camioneta con dibujo de rodado. Impacto del orden de apilamiento de absorbedores.

Los resultados obtenidos con dinámica explícita muestran que una vez superado en período transitorio se obtienen similares tendencias que con el enfoque estacionario SST. Sin embargo se

observan diferencias en los valores numéricos. Por otra parte los tiempos de cálculo necesarios para hacer análisis dinámicos aumentan considerablemente respecto del análisis SST.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se estudia con herramientas numéricas la influencia del dibujo de rodado sobre el comportamiento de neumáticos radiales. Por una parte se presenta el estudio de un neumático de automóvil y, por otra parte el correspondiente a uno de camioneta. En ambos casos se utilizan mallas lo suficientemente detalladas en la zona del rodado. Cabe destacar que, para el neumático de camioneta se utilizó una malla simplificada para modelar la zona de la carcasa, con el objetivo de reducir el tamaño del modelo, ya que en este caso el modelo tiende a tener muchos más grados de libertad que el correspondiente al neumático de automóvil.

A partir de las simulaciones numéricas a diferentes condiciones de operación, se determinan los valores de fuerza lateral y momentos de autoalineación generados. A partir de estos datos se calculan los denominados indicadores de desempeño. En este trabajo se consideran como indicadores al coeficiente de rigidez de virado (CRV), coeficiente de autoalineación (CAA), rigidez lateral (K_y) y torsional (KT_z).

El análisis de los resultados refleja el impacto del dibujo de rodado sobre los indicadores considerados, y también sobre los resultados primarios. Para el caso del neumático de automóvil con dibujo de rodado, el CRV disminuye un 17 % respecto del liso; para el caso de camioneta la disminución es del 11 %. Igual tendencia se observa con el CAA, pero los valores de cambio son menores, 4,8 % para el neumático de automóvil y 4,3 % para el de camioneta. La rigidez torsional también se ve afectada en similares proporciones mientras que la rigidez lateral prácticamente no se modifica.

Paralelamente, los resultados obtenidos con dinámica explícita reflejan las mismas características y tendencias que los obtenidos con SST. No obstante se observan discrepancias en los valores numéricos calculados con ambos enfoques. En virtud de la complejidad del problema que aquí se trata, este hecho no causa mayor sorpresa, sin embargo resulta interesante determinar qué factores podrían estar causando éstas diferencias y evaluar su relevancia. Se considera sumamente importante explorar este campo con mayor detalle para estudiar hasta que punto estas diferencias podrían ser disminuidas, como así también definir alcances y rangos de validez de uno y otro enfoque. Se citan a continuación los factores que se juzgan más relevantes:

- Formulación del contacto. Debido a las diferencias entre las opciones que soportan ABAQUS/Standard (SST) y ABAQUS /Explicit.
- Sensibilidad al tamaño de malla.
- Sensibilidad al incremento de tiempo.
- Presencia de fenómenos de naturaleza no estacionaria que introduzcan variaciones en el comportamiento.

Las comparaciones realizadas en éste trabajo, de los indicadores de desempeño correspondientes a neumáticos lisos y con dibujos de rodado, revelan la notable influencia que ejerce el patrón de rodado. Por otra parte se marca la importancia de evaluar el comportamiento del neumático estudiado en un rango de trabajo correspondiente a diferentes valores de deriva y fuerzas radiales representativo y considerar los indicadores derivados de los resultados primarios.

REFERENCIAS

- Clark S. *Mechanics of Pneumatic Tires*. U.S Department of Transportation and National Highway Safety Administration, 1981.
- Gent A. y Walter J. The pneumatic tire. *National Highway Traffic Safety Administration. Washington DC*, 2005.
- Guennam A. y Arechaga T. Calculo de funciones características basado en métodos numéricos. *MECOM 2012 - Salta, Argentina.*, 22:395–403, 2012.
- Li Z., Li Z.R., y Xia Y.M. An implicit to explicit fea solving of tire fm with detailed tread blocks. *Tire Science and Technology*, 40:83–107, 2012.
- SIMULIA. *ABAQUS User's manual*. Dassault Systemes, 2012.