



Identificación del Trabajo	
Área:	Análisis de señales, modelados y simulación
Categoría:	Alumno
Regional:	Santa Fe

Simulación numérica de neumáticos - Estudio de las presiones de contacto.

Sabrina MONTAÑO, Federico CAVALIERI, Alberto CARDONA, Pablo ZITELLI, Gabriel CURTOZI

Universidad Tecnológica Nacional, Lavaisse 610, S3004 Santa Fe, Facultad Regional Santa Fe, UTN

E-mail de autores: sabrina-ines@live.com, federico@cimec.com.ar, acardona@intec.unl.edu.ar, pzitelli@fate.com.ar, gcurtosi@fate.com.ar

Este trabajo ha sido realizado bajo la dirección del Dr. Federico Cavalieri, en el marco del proyecto "AMUTIFE0004790TC, Análisis numérico de problemas estructurales dinámicos por medio de una aproximación dinámica no suave". (Fecha de inicio 01/01/2018, fecha de finalización 31/12/2019)

Resumen

En este trabajo se presenta el análisis de un neumático de construcción radial en contacto con una superficie rígida plana mediante el método de los elementos finitos. El objetivo del trabajo se centra en estudiar la distribución de las presiones de contacto en el neumático. Se resuelve el problema utilizando un análisis cinemático, materiales hiperelásticos, viscoelásticos, compuestos y un contacto del tipo rígido-flexible con fricción. Las condiciones de operación consideradas son: una presión de inflado de 30 PSI, una carga vertical de 4000 N y una velocidad de rotación de 80 km/h. Finalmente para validar el modelo numérico generado se realizaron comparaciones de los resultados numéricos con datos experimentales disponibles. Estas ponen en manifiesto que la distribución de las presiones máximas de contacto y la longitud de la huella en ambas improntas son similares, tomando valores de 5,6 kg/cm² y 17 cm respectivamente.

Palabras Claves: Contacto; Neumático; Hiperelásticos; Elementos finitos

1. Introducción

Un neumático, también conocido como cubierta es una pieza toroidal constituida mayormente de caucho, que se coloca en las ruedas de diversos vehículos y máquinas. Su función principal es la de permitir un contacto adecuado por adherencia y fricción con el pavimento, posibilitando el arranque, frenado y la guía del vehículo. Desde un punto de vista estructural, los neumáticos generalmente tienen hilos de acero que los refuerzan. Dependiendo de la orientación de estos hilos, los neumáticos se clasifican en radiales o diagonales. Actualmente, las compañías fabricantes de neumáticos están poniendo un mayor esfuerzo en aumentar la durabilidad del neumático, reducir el nivel de ruidos para evitar efectos de contaminación sonora y generar una mayor adherencia con el pavimento a modo de disminuir la distancia de frenado. Estos factores impulsan la fabricación de neumáticos con restricciones ambientales y de diseño cada vez más exigentes que, a su vez, se complementan con diseños adaptados a un modelo de vehículo específico para mejorar su performance. En este proyecto se trabajó en conjunto con la empresa FATE S.A.I.C.I de Argentina, dedicada a la fabricación de neumáticos para uso de vehículos, camionetas, camiones y maquinaria pesada. Esta empresa cuenta con: equipos de

medición, laboratorios destinados a ensayos de materiales y herramientas de simulación numérica, las cuales permiten evaluar el comportamiento de un neumático bajo distintas condiciones de uso. Dentro de los principales trabajos de investigación realizados por la empresa se destacan: Curtosi, G. (2016), Curtosi, G. (2017).

El proceso de contacto mecánico entre el neumático y la superficie de asfalto es complejo, pues interactúan un número importante de mecanismos microscópicos, estos pueden ser la rugosidad, las fuerzas de adhesión, viscoelasticidad, entre otros, que producen un comportamiento macroscópico complejo que resulta difícil de ser analizado ya sea por medio de ensayos experimentales, ecuaciones analíticas o modelos computacionales. En algunas formulaciones teóricas tales como las que se presentan en los trabajos de Wriggers, P., (2002), Cavalieri, F. y Cardona, A. (2015), Cavalieri, F. y Cardona, A. (2013), Cavalieri, F. y Cardona, A. (2012) y Parisch, H., (1989) los autores estudian el contacto entre dos cuerpos. Desde el punto de vista de la mecánica del caucho se pueden encontrar trabajos relacionados con el desgaste de neumáticos en Barquins (1975) o en la publicación de Persson (2011). La principal complicación de estas metodologías radica en la dificultad asociada a la identificación de las leyes de evolución para las variables necesarias como ser el coeficiente de fricción, la variación de la presión de contacto, entre otros. Experimentos recientes de contacto entre el caucho de un neumático y el pavimento han demostrado que, por ejemplo, el coeficiente de fricción y las presiones de contacto dependen fuertemente de la velocidad de deslizamiento relativa entre los cuerpos, el tamaño de las asperezas y la compleja textura de las interfaces de contacto. Un trabajo que presenta un estudio exhaustivo de contacto con fricción en materiales de caucho puede ser encontrado en Persson (2011), también los trabajos de Ripoll, M. *et al.* (2011) y Montaña, S. y Cavalieri, F. (2017) analizan la variación del coeficiente de fricción respecto a la velocidad, rugosidad, entre otros. La realización de ensayos experimentales resulta de gran utilidad, pero presentan la desventaja de ser caros y demandantes en tiempo. Para facilitar la comprensión del comportamiento de las variables de interés y poder predecir el comportamiento mecánico para distintas condiciones de uso, una opción frecuentemente utilizada es realizar un análisis por el Método de los Elementos Finitos (MEF).

Cuando un vehículo se encuentra en movimiento, sus neumáticos están sujetos a una deformación que genera una disipación de energía en forma de calor. La flexibilidad del neumático absorbe la irregularidad del pavimento generando una superficie de contacto donde se disipa la energía por deformación viscoelástica además de la producida por la fricción, causando finalmente resistencia a la rodadura. La resistencia a la rodadura está definida como la energía que consume un neumático por unidad de distancia recorrida. En un automóvil la energía es suministrada por el combustible, por lo tanto, tiene una relación directa con el consumo del mismo. Si consideramos el amplio espectro de vehículos que hay actualmente en el mercado, podemos decir que reduciendo la resistencia a la rodadura un 30% llevaría a obtener una reducción entre un 3 y 6% del consumo de combustible y emisiones de CO₂ sin modificar el diseño del vehículo. Por lo tanto, para obtener un valor preciso de esta energía de disipación que finalmente produce un aumento en el consumo de combustible, es necesario caracterizar el comportamiento viscoelástico del caucho y el proceso de contacto con el pavimento correctamente.

El objetivo general del trabajo consiste en obtener nuevos neumáticos de alta calidad con una reducción en la cantidad de ensayos experimentales durante la etapa de diseño. Por lo tanto, se pretende que a partir de los resultados que surjan de la investigación de este proyecto, se pueda: I) predecir la distribución de las presiones de contacto. II) analizar las fuerzas por corte.

III) comprender la influencia en un neumático según: el peso del automóvil, su presión de inflado, su velocidad de traslación y su coeficiente de fricción. IV) analizar las tensiones y deformaciones que sufren los hilos de refuerzo del neumático) analizar la influencia del dibujo del rodado sobre las presiones de contacto.

2. Metodología en detalles y etapas del trabajo.

2.1 Procedimiento de análisis del trabajo

Este trabajo se desarrolló en tres etapas consecutivas las que se describen a continuación:

Etapa1-Modelo Constitutivo. El trabajo comienza generando la geometría del neumático, luego se caracterizó el material de las distintas partes del neumático. Se continuó con la discretización del modelo por medio de una malla de elementos finitos y se definió un algoritmo de contacto del tipo flexible - rígido que describe el problema. La descripción cinemática del problema se logró usando tres juntas cinemáticas rígidas.

Etapa 2-Condiciones de borde. Las condiciones de borde se toman del funcionamiento de un vehículo promedio. Se analizó primero la colocación de la llanta, luego el inflado, después la aplicación de una carga radial, que equivale a un cuarto del peso de un vehículo promedio y por último se incorporó la velocidad de rotación y traslación.

Etapa 3-Resultados y comparaciones. Finalmente con los resultados numéricos obtenidos se procedió a validarlos por medio de mediciones experimentales.

2.2 Etapa1- Estructura Geométrica.

Un neumático es un material compuesto cuya matriz se comprende de distintos tipos de polímeros, en los que se encuentran embebidos una serie de refuerzos a través de los que se consiguen las características geométricas y mecánicas deseadas. El neumático analizado es fabricado por la empresa FATE S.A.I.C.I. Se partió de un modelo geométrico 2D y se generaron las distintas operaciones para lograr un modelo 3D completo. El neumático estudiado tiene las siguientes medidas: el ancho es de 185 mm, el diámetro de la llanta es de 15" y su construcción es del tipo radial. La construcción radial significa que el ángulo de los cordones de los refuerzos es de 90° con respecto al diámetro y además incorpora refuerzos específicamente en la banda de rodadura, ver Fig. 1. El neumático está compuesto por las siguientes partes de caucho: I) Rodado II) Hombro III) Banda rodadura IV) Refuerzos V) Talón VI) Aro talón, ver Fig. 1. Cada sección del neumático tiene un tipo de caucho distinto.

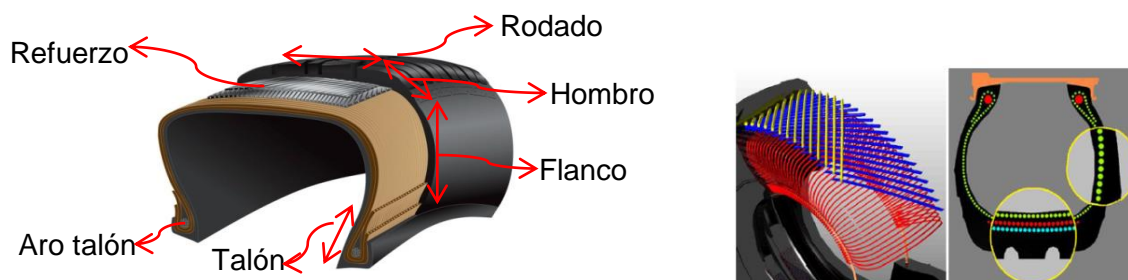


Figura 1. Estructura del neumático radial estudiado.

2.3 Etapa1- Comportamiento del material.

Un neumático está compuesto básicamente por dos tipos de materiales: por un lado los sólidos sin refuerzo, estos son elastómeros tipo caucho con un comportamiento isotrópico, hiperelástico y cuasi-incompresible, y por otro lado están los refuerzos, estos son materiales ortotrópicos. Los refuerzos son fibras continuas de acero o nylon embebido en caucho, las cuales se encuentran orientadas con un ángulo específico. Este ángulo de orientación es muy importante debido a que determina en que sentido la fibra aporta resistencia. Estas fibras se comportan como un material compuesto en el cual la matriz es el elastómero tipo caucho y las fibras de acero o nylon son el refuerzo (Jones, Robert M. 1975). Para caracterizar los elastómeros sólidos, sin refuerzo, el modelo constitutivo que se utiliza en este trabajo es el de Neo-Hooke, (Curtosi, Zitelli, Arechaga, 2016). Según la experiencia propia del grupo de investigación de FATE S.A.I.C.I, arroja muy buenos resultados ya que los valores de tensiones están bien representados en el rango de deformaciones al cual se ven sometidos los neumáticos en condiciones de trabajo. La energía de deformación para un material Neo-Hookeano es la siguiente:

$$W(\mathbf{I}, \mathbf{J}) = C_{10}(\mathbf{I} - 3 - 2 \log \mathbf{J}) + D_1 (\mathbf{J} - 1)^2; \quad C_{10} = \frac{\alpha}{2}; \quad D_1 = \frac{\beta}{2} \quad (1)$$

donde β y α son el primer y segundo parámetro de Lamé respectivamente, \mathbf{I} es el primer invariante de la parte desviadora del tensor de deformación de Cauchy-Green y \mathbf{J} es el determinante del gradiente de deformación. La relación constitutiva entre las tensiones y las deformaciones para un material Neo-Hookeano es la siguiente

$$\sigma = 2 \cdot C_{10} \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad (2)$$

donde λ es la relación de estiramiento. Si derivamos la ecuación (2) respecto a λ y consideramos que cuando la relación de estiramiento es igual a uno, i.e., no existe deformación, vamos a obtener el módulo infinito. Entonces:

$$\frac{d\sigma}{d\lambda} = E_{\infty} = 6C_{10} \quad (3)$$

Podemos ver que la ecuación (3) da una aproximación del módulo de Young para los elastómeros, tipo caucho. Con esta aproximación se trata a los elastómeros como un material elástico, donde el valor del módulo de elasticidad es: $E_{\text{Caucho}} = 6C_{10}$. Esto se cumple para las condiciones de uso promedio de un neumático. En la Fig.2 se puede ver la consistencia entre los modelos calibrados para los elastómeros utilizados y los resultados de ensayos experimentales realizados (Reza Ghoreishy, 2012). El modelo de Neo-Hooke, necesita para su definición solo de la constante C_{10} , que se obtiene del módulo de almacenamiento de baja frecuencia de la Serie de Prony (Rob Carriere, Randolph L. Moses, 1992). En este trabajo la constante C_{10} se obtuvo experimentalmente. Para determinar la constante C_{10} el laboratorio de desarrollo de materiales de FATE S.A.I.C.I tiene la capacidad de realizar ensayos físicos y mecánicos. Algunos de estos permiten calcular el módulo de almacenamiento y el módulo de pérdida de un material viscoelástico, como funciones de la frecuencia de deformación y de esta manera se pueden obtener los coeficientes de Prony (Curtosi, Zitelli, Arechaga, 2016).

El neumático estudiado tiene un total de cuatro refuerzos en su estructura. Cada grupo de fibras que conforman las láminas tienen: un área determinada, un ángulo de orientación y una separación entre fibras específica. Estas propiedades le dan las características mecánicas deseadas al material de refuerzo. Los refuerzos se calculan utilizando reglas de homogeneización (Jones, Robert M. 1975). Se considera que los refuerzos utilizados son láminas unidireccionales, con fibras de acero o Nylon o Poliéster y la matriz está conformada por elastómero tipo caucho.

Para describir las propiedades mecánicas del caucho que integra la matriz de la lámina, se utiliza el módulo de elasticidad aproximado el cual es: $E_m=6C_{10}$. Para una lámina unidireccional, ver Fig.2, los módulos de Young se calculan como (Jones, Robert M. 1975):

$$E_1 = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m ; \quad E_2 = \frac{E_f \cdot E_m}{V_m \cdot E_f + V_f \cdot E_m} ; \quad E_3 = E_2 \quad (4)$$

siendo E_1, E_2, E_3 los módulos de Young, en dirección de la fibra, perpendicular a la fibra y normal a la fibra respectivamente.

Los coeficientes de Poisson se calculan como (Jones, Robert M. 1975):

$$\gamma_{12} = V_m \cdot \gamma_m + V_f \cdot \gamma_f ; \quad \gamma_{13} = \gamma_{12} ; \quad \gamma_{23} = \gamma_m \quad (5)$$

La Tabla 1 resume los valores de los materiales adoptados, estos fueron aportados por la empresa FATE S.A.I.C.I.

Tabla 1 Características de los materiales adoptados para los refuerzos.

E_f : Es el módulo de elasticidad de la fibra.	Poliéster 690 kg/mm ² , Nylon 491 kg/mm ² , Acero 20700 kg/mm ²
E_m : Es el módulo de elasticidad de la matriz.	Se aproxima con la ecuación $E_m = 6C_{10}$
V_f : Es la fracción volumétrica que ocupa la fibra.	0,6
V_m : Es la fracción volumétrica que ocupa la matriz.	0,4
γ_m : Es el coeficiente de Poisson de la matriz	0,45
γ_f : Es el coeficiente de Poisson de la fibra	Acero 0,3. Para el Nylon y el Poliéster 0,4

Los módulos de corte se calculan de la siguiente manera (Jones, Robert M. 1975):

$$G_{12} = \frac{G_m \cdot G_f}{V_m \cdot G_f + V_f \cdot G_m} ; \quad G_{13} = G_{12} ; \quad G_{23} = G_m \quad (6)$$

siendo: G_f el módulo de corte de la fibra, en el caso de acero se usó el valor de 85000 MPa, G_m es el módulo de corte de la matriz, para determinar el módulo de corte de cada uno de los elastómeros se usó la fórmula (Jones, Robert M. 1975):

$$G_{CAUCHO} = \frac{E_{CAUCHO}}{2(1-0,45)} \quad (7)$$

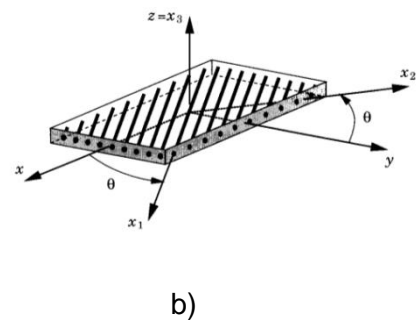
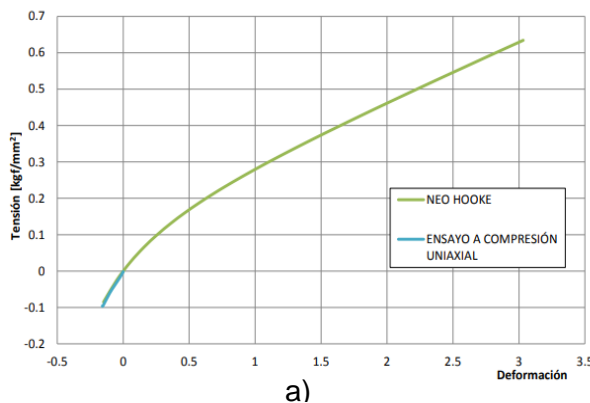


Figura 2: a) Calibración del modelo Neo-Hooke, b) Ejes de referencia de una lámina unidireccional.

2.4 Etapa 1 - Estrategia de modelado

El modelo considerado en este trabajo se analiza con el programa de elementos finitos NX12 – Samcef de Siemens. Se utilizan dos tipos de mallas, una para las zonas de refuerzos y otra para los sólidos que conforman el neumático, entre las mallas del modelo se impone una

conexión de acoplamiento del tipo adherencia coincidente, de manera tal que las mallas trabajen como una sola. Para la generación de las mallas de los sólidos sin refuerzos se parte de las secciones transversales de los mismos. Primero se realiza una malla 2D cuadrangular, sobre la cara transversal del sólido de revolución. Luego se revoluciona la malla 2D y se generan elementos 3D hexaédricos de 8 nodos sobre toda la superficie de revolución. Esta metodología logra que el ángulo de orientación de la fibra se mantenga constante para toda la geometría del neumático, ver Fig. 3.

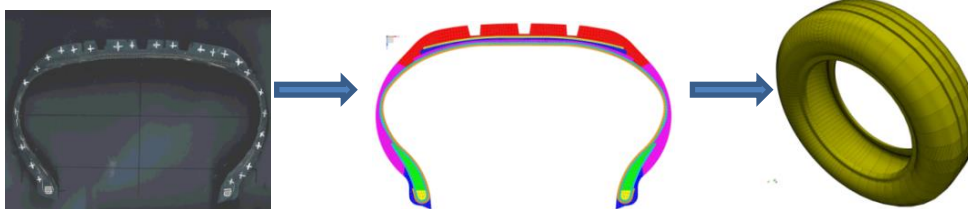


Figura 3: Etapas del Modelado.

Los materiales compuestos se encuentran en la superficie inferior del sólido al que refuerzan. Estas láminas son malladas con elementos del tipo membrana cuadrangulares. Estas son generadas después de las mallas tridimensionales. Se le asigna a cada una de las láminas los espesores y materiales ortotrópicos correspondientes y también se le da la orientación a la fibra. Sobre la discretización de la malla se concluye que el refinamiento más importante es el que se hace en la zona donde el neumático está, en contacto con el asfalto, mientras que en la región donde el neumático no está en contacto con el suelo, la variación del tamaño de los elementos no influye en los valores obtenidos, por lo cual se pueden colocar menos elementos en esa región. En el espesor del rodado y de los refuerzos se colocaron cuatro y dos elementos respectivamente, ya que los mismos se ven sometidos a esfuerzos de flexión, ver Fig.4.

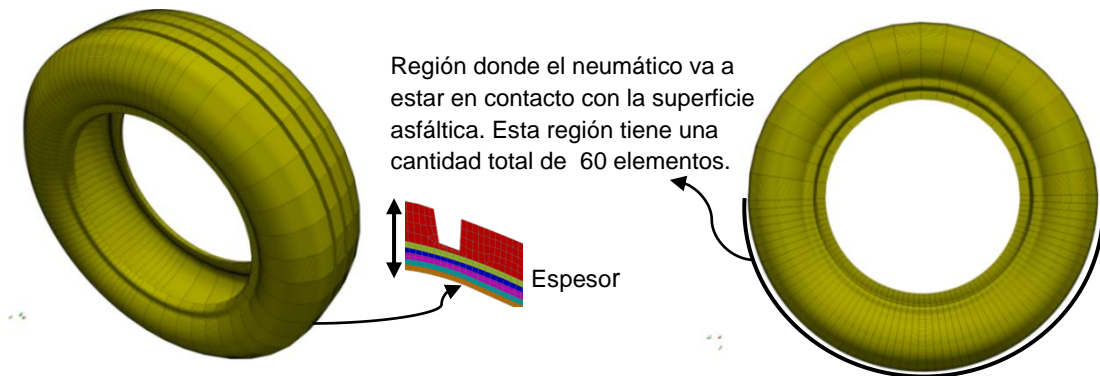


Figura 4: Discretización del neumático estudiado.

La malla tiene: 150640 nodos, 35840 elementos cuadrangulares, 133286 elementos hexaédricos, y el espesor de los elementos es de 2 mm

2.5 Etapa 1- Mecanismos.

El modelado del neumático rodando sobre una superficie donde actúan efectos microscópicos como ser la rugosidad, las fuerzas de adhesión, Viscoelasticidad, las partículas exteriores, entre otros que producen un comportamiento macroscópico complejo que resulta difícil de ser analizado, ya sea por medio de ensayos experimentales, ecuaciones analíticas o modelos

computacionales. Por lo tanto, en este trabajo vamos a comenzar estudiando el neumático rodando sobre una superficie lisa.

Para facilitar la convergencia del problema y tener un mayor control sobre las variables a medir se decidió que luego de que se genere el contacto entre el neumático y el plano, el neumático se mantenga fijo y el plano gire a una velocidad angular constante. Para lograr este movimiento se utilizan tres juntas cinemáticas las cuales se incorporan al modelo del neumático, ver Fig. 5.

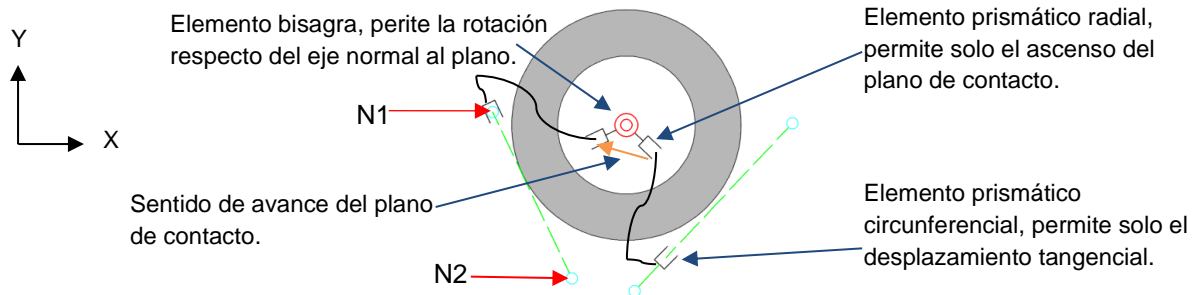


Figura 5: Posición de las juntas cinemáticas rígidas en el neumático.

Por una parte se utilizan dos articulaciones rígidas prismáticas. Este elemento permite una conexión entre dos nodos N1 y N2. Al imponer que el segundo nodo N2 se deslice en una línea recta unida al primer nodo N1 no hay rotación relativa entre los dos nodos. La línea deslizante que une los dos nodos es infinitamente rígida. Este elemento tiene un solo grado de libertad que es el desplazamiento y es en dirección del nodo N1 al N2. Para controlar el desplazamiento se utilizan elementos indicadores de distancia, los cuales proporcionan explícitamente la distancia entre los nodos N1 y N2 como un grado de libertad del sistema. El tercer elemento que se usa es del tipo bisagra, el cual es un par cinemático que conecta dos nodos coincidentes N1 y N2, los cuales rotan entre sí alrededor de un eje común con dirección fija en relación con los nodos. Sirve para prescribir el ángulo de rotación, el cual nos da la velocidad de rotación necesitada. Este elemento tiene un solo gado de libertad y es la rotación. Estos elementos se disponen de la siguiente manera: una junta prismática se coloca en sentido tangencial al neumático, permitiendo solo el desplazamiento tangencial del plano. La otra junta prismática se coloca en sentido radial al neumático y permite el movimiento ascendente del plano de contacto. El mecanismo tipo bisagra se coloca en el centro de rotación del neumático.

2.6 Etapa 1 - Contacto mecánico con fricción.

En condiciones de uso, el neumático está sujeto a grandes deformaciones producto de las elevadas cargas que tiene que soportar y el material que lo conforma. Las deformaciones de la superficie de asfalto son insignificantes, por lo tanto la suposición de una superficie rígida es aceptable. Por esta razón, el tipo de contacto adoptado para el análisis es el del tipo Rígido-Flexible. A diferencia de muchas combinaciones de superficies, donde el comportamiento de fricción depende principalmente de la naturaleza de las superficies de contacto, la fricción del caucho tiene una gran dependencia de las características del material utilizado. Desde el punto de vista de la descripción cinemática de los cuerpos en contacto, en este trabajo se utiliza una técnica ampliamente difundida que es la aproximación denominada nodo-segmento, donde al nodo de un cuerpo, denominado esclavo, se le asocia una zona de un segmento o superficie de otro cuerpo, denominado maestro. (Parisich, H., 1989). Para la definición del contacto Rígido-

Flexible, se toma un nodo perteneciente a la superficie rígida plana, a este nodo lo llamaremos "Nodo Maestro". En este caso el nodo maestro va a ser uno de los nodos que define la junta prismática que permite el movimiento tangencial del plano de contacto. Se define además un grupo de nodos perteneciente al neumático, a este grupo de nodos lo llamaremos "Nodos Esclavos". Este grupo de nodos va a quedar determinado por la región del neumático que va a estar en contacto con el asfalto. En nuestro caso es la región inferior del neumático, ver Fig. 4.

2.7 Etapa 2 - Condiciones de borde del problema.

Las cargas impuestas en el modelo se tomaron del funcionamiento de un vehículo estándar, el cual pesa aproximadamente 16000 N y se consideró una velocidad de funcionamiento promedio de 80 km/h. Para realizar el análisis de este modelo numérico se optó por un enfoque de múltiples etapas de análisis. En otras palabras las condiciones del modelo al finalizar cada etapa son tomadas como puntos de partida para la siguiente.

Se simula primero la colocación del neumático en la llanta. Esto se hace colocando un desplazamiento impuesto a ambos lados del neumático de un valor de 6.35 mm. La región donde se aplica es sobre el talón del neumático que es el sector donde apoya la llanta. El valor utilizado se obtuvo experimentalmente. Luego se realiza el inflado con una presión interior de 30 PSI, este valor se toma como un valor recomendado por los fabricantes para un uso eficiente del mismo. Una vez inflado el neumático y adquirida cierta resistencia se aplica una carga radial de 4000 N, esta carga equivale a un cuarto del peso total de un vehículo promedio. La carga se aplica progresivamente, esto se logra elevando el plano de contacto del neumático hasta obtener una reacción equivalente de 4000 N. Luego se hace girar el plano de contacto 45° en un tiempo de 0.106 s, esto nos da una velocidad constante de 80 km/h. Se utiliza un coeficiente de fricción constante entre el neumático y el suelo de 0.8. Este coeficiente de fricción se obtuvo de ensayos experimentales previos a este trabajo (Montaño S., Cavalieri F., 2017).

3. Etapa 3 - Resultados numéricos

Distribución de las presiones de contacto en la impronta estática: Para validar el modelo generado se realizaron comparaciones de resultados numéricos con experimentales disponibles de la impronta estática del neumático. Se muestra a continuación en la Fig. 6 una comparación entre las distribuciones de presiones de contacto en la impronta correspondiente a un ensayo experimental y una simulación numérica. Como se puede observar en la Fig.6, las presiones de contacto tienen una distribución similar. En general se observa en ambas improntas que el incremento de presión se da en la región de los hombros del neumático, esto es así debido a que la misma absorbe los esfuerzos transmitidos por los costados de los canales al aplastarse. Las presiones de contacto en la región de los hombros para ambas improntas alcanzan un valor máximo de 5,6 kg/cm². También se realizó la medición de la longitud de la impronta que para ambos casos resultó ser de 17 cm. Con estas comparaciones satisfactorias es posible suponer que el modelo de elementos finitos generado está validado.

Distribución de las presiones de contacto en la impronta cinemática: se muestra a continuación en la Fig.6 la distribución de presiones de contacto cuando el neumático se encuentra girando y trasladándose a velocidad constante. El primer aspecto importante que se puede observar es la falta de simetría en las presiones de contacto, esto es debido posiblemente a la falta de simetría perfecta de los refuerzos o en la forma en que el programa interpreta el

ángulo de orientación del material de las membranas de refuerzo. En general se observa que el incremento de presión se da en los bordes de ataque de los bloques. Por otra parte se observó que el área de contacto disminuye cuando la presión de inflado comienza a elevarse, algo razonable ya que la rigidez radial es mayor y por lo tanto la deformación del neumático es menor. La máxima presión de contacto se mantiene aproximadamente constante alcanzadas las condiciones de uso evaluadas. Cuando el neumático comienza a girar podemos observar tres zonas en la impronta de contacto. La primera es la entrada de la impronta, en esta región el neumático comienza a tomar contacto con el suelo, las deformaciones se producen a compresión. La segunda región es la de máxima deformación, en esta región tenemos esfuerzos de tracción elevados. Finalmente la tercera es la salida de la impronta. En esta región el neumático se encuentra en su última etapa de contacto con el suelo al igual que en la entrada de la impronta, se vuelven a producir deformaciones a compresión.

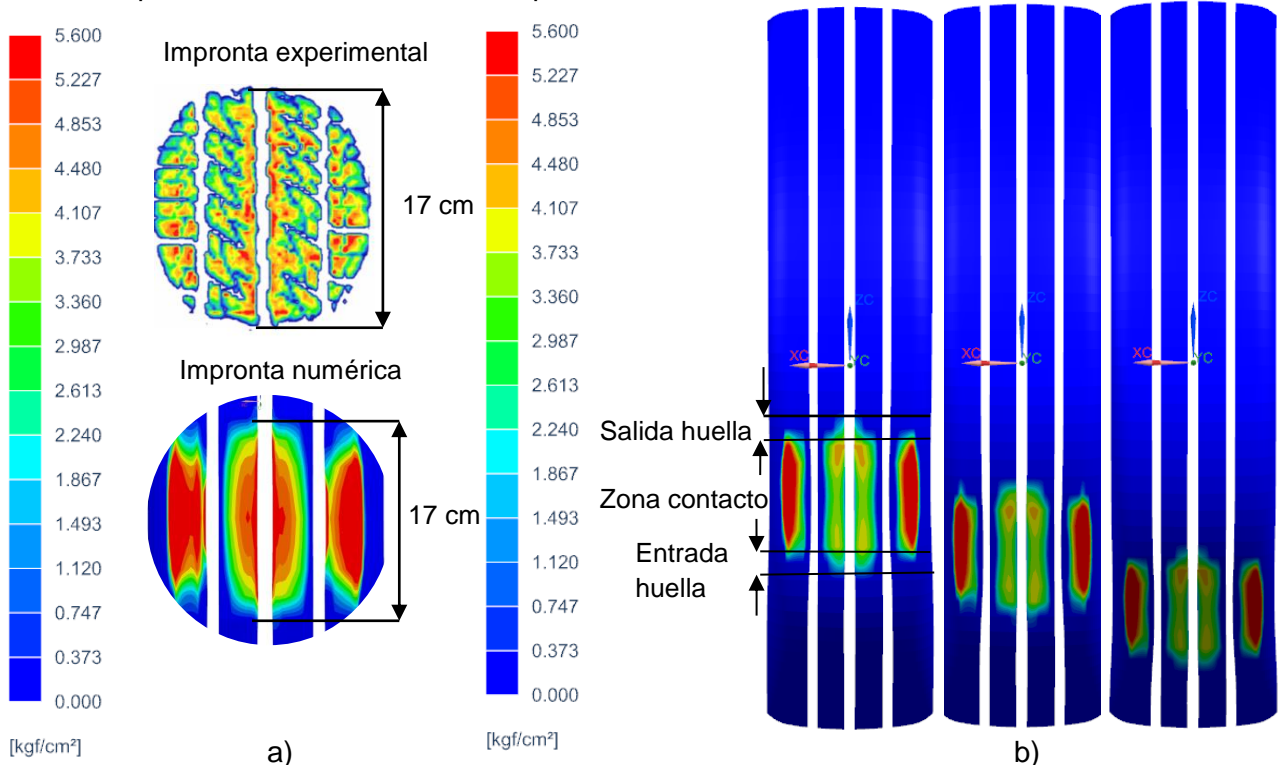


Figura 6: a) Comparación impronta experimental y numérica. b) Evolución impronta cinemática.

4. Discusión.

Respecto a la solución: en este trabajo se logró, al dejar fijo el neumático y rotar el plano de contacto, reducir un 30 % los tiempos de simulación con mallas más refinadas que los modelos actuales disponibles. Observando con alta resolución la superficie del asfalto, se puede concluir que la hipótesis de una superficie completamente plana no es correcta y por lo tanto es una simplificación fuerte, por lo que en la próxima instancia de este trabajo se incorporará la rugosidad del asfalto. Respecto a los resultados: i) el área de contacto disminuye cuando la presión aumenta ii) a mayor presión de inflado la rigidez radial es mayor y la deformación es menor. iii) la presión máxima se produce en la zona de los hombros, esto es así ya que estos absorben los esfuerzos transmitidos por los costados al aplastarse.

5. Conclusiones.

Respecto al modelo: i) El modelo funciona de manera eficiente. ii) la propuesta de dejar fijo el neumático y rotar el plano de contacto resultó favorable para la convergencia del problema y se reducen grados de libertad. iii) El modelo propuesto resuelve el problema cinemático en un tiempo de 3 hs 43 minutos, para una malla que tiene 4 elementos en su espesor y 60 elementos en el parche de contacto. iv) las presiones máximas y las dimensiones de la impronta de contacto numérica y experimental son similares. v) el modelo propuesto resulta práctico, ya que cambiando las variables del mecanismo programado se pueden obtener diferentes variables sin realizar cambios significativo en el modelo de MEF.

Alcanzados los objetivos de este trabajo se podrá en un futuro obtener modelos más desarrollados que permitan: i) disminuir las distancia de frenado de modo de garantizar la seguridad a los pasajeros de un vehículo, ii) aumentar la vida útil del neumático, como un beneficio medioambiental y iii) mejorar el desempeño en manejabilidad.

Reconocimientos

Este trabajo tuvo un aporte muy importante del Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CIMEC), de la empresa FATE S.A.I.C.I, y de la Universidad Tecnológica Nacional, se agradece su aporte.

Referencias

- Jones, Robert M. (1975). Capitol 3. End Mechanics of composite materials.
- Rob Carriere and Randolph L. Moses, "High Resolution Radar Target Modeling Using a Modified Prony Estimator," IEEE Trans. Antennas Propogat., vol.40, pp. 13–18, January 1992.
- Reza Ghoreishy, Mir H., Determination of the Parameters of the Prony Series in Hyper-viscoelastic Material Models Using the finite element method. *Materials y Design*, 35:791-797, 2012
- Parisch, H., 1989. "A consistent tangent stiffness matrix for three-dimensional non-linear contact analysis". *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 28, pp. 1803–1812.
- Wriggers, P., 2002. *Computational Contact Mechanics*. John Wiley and Sons, New York.
- Cavalieri, F., y Cardona, A., 2015. "Numerical solutions for frictional contact problems based on a mortar algorithm with an augmented lagrangian technique". *Multibody System Dynamics*, pp. 1–23.
- Cavalieri, F. J., y Cardona, A., 2012. "An augmented Lagrangian method to solve 3D contact problems.". *Latin American Applied Research*, 42(201), pp. 281–289.
- Cavalieri, F. J., y Cardona, A., 2013. "Three-dimensional numerical solution for wear prediction using a mortar contact algorithm". *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 96(8), pp. 467–486.
- Persson, B.N.J Rubber Friction and tire dynamics. *Journal of physics condensed Matter* 23 2011
- Barquins, M, and Courtel, R. Rubber Friction anda the rheology of viscoelastic contact. 1975,133
- Sabrina I. Montaña, Federico Cavalieri, Alberto Cardona, Pablo Zitelli, Modelo Numérico de Contacto con Fricción Aplicado a un Ensayo de Tribología para Compuestos de Goma. *Mecánica computacional*, Vol. XXXV págs. 2575.
- Ripol, M. R, Podgornik, b. and Vizintin, J Finite element analysis of Textured surfaces under reciprocating sliding. 2011 952-959
- Curtosi Gabriel N., Zitelli Pablo N y ArechagaTomas(2016). Calculo de la resistencia a la rodadura de neumáticos mediante el método de elementos finitos. *Mecánica Computacional* Vol. XXXIV, págs. 917-933.
- Curtosi Gabriel N., Zitelli Pablo N y ArechagaTomas(2017).Viscoelastic material calibration procedure for rolling resistance calculation. In Thirty-sixth annual meeting of the tire society 2017.