

SIMULACIÓN DE ENSAYO DE ENERGÍA DE PENETRACIÓN DE NEUMÁTICOS BASADO EN ELEMENTOS FINITOS

Jorge Kuster, Leandro Francisco Jaureguizar y Tomás Arechaga

Grupo de Investigación de Neumáticos FATE, Blanco Encalada 3003 B1644GPK Victoria - Provincia de Buenos Aires. jkuster@fate.com.ar; ljaureguizar@fate.com.ar; tarechaga@fate.com.ar; <http://www.fate.com.ar>

Palabras Clave: Neumático, Elementos Finitos, Ensayo Destructivo Energía Penetración (*Plunger Energy Test*), Influencia Componentes Neumático.

Resumen. El ensayo de energía de penetración (*Plunger Energy Test*) es requerido por diversos organismos de transporte para estimar la energía que requiere un obstáculo para penetrar al neumático y ocasionar la falla del mismo. En función de las características del neumático se establecen valores mínimos de energía que éste deberá superar para cumplir con la norma correspondiente.

En el presente trabajo se presenta el análisis de tres neumáticos radiales, cuya única diferencia radica en las características de las cinturas de acero. Todos fueron analizados a través de análisis numérico utilizando el método de los elementos finitos mediante el paquete comercial ABAQUS. Se estudió el impacto en los resultados obtenidos de las alternativas de diseño antes de su fabricación y producción.

Con el objetivo de validar los modelos y obtener una metodología que permita determinar el orden de falla y posteriormente la energía de rotura de los distintos componentes estructurales del neumático mediante el uso de herramientas numéricas, se realizaron ensayos experimentales para correlacionar resultados considerando como parámetro comparativo la disipación de energía al momento de falla de los elementos de refuerzo los cuales presentan marcada diferencia de tenacidad y relación de masa (cordón de acero contra cordón de poliéster). Dichas verificaciones constaron de realizar el ensayo de penetración con la carcasa del neumático instrumentada con un acelerómetro para realizar una medición del orden de energía liberada por la rotura de los refuerzos durante el ensayo.

Los resultados experimentales reflejaron picos de energía que indican que la secuencia de falla obtenida en las simulaciones es correcta, pudiendo corroborar que tipo de refuerzo falla primero. La diferencia entre los resultados de energía de rotura y carrera del punzón de las simulaciones y los ensayos realizados fueron inferiores al 20 %.

Como complemento a la validación instrumentada se realizaron pericias sobre los neumáticos ensayados, existiendo correlación con los resultados numéricos obtenidos.

1. INTRODUCCIÓN

El ensayo de energía de penetración (*Plunger Energy Test*) llevado a cabo mediante modelado numérico en el presente trabajo está basado en el instructivo FMVSS-109 de la *Federal Motor Vehicle Safety Standards* de los Estados Unidos (2005). El mismo consta en forzar un indentor semiesférico sobre el centro de la banda de rodadura, cuyo diámetro es 3/4" para el caso de neumáticos de automóvil. Si el dibujo del rodado del neumático a ensayar tuviese un canal central el indentor se colocará en el centro de la costilla inmediata a dicho canal central, siendo este el caso del neumático bajo análisis.

Según el tipo de prestaciones y características del neumático, este deberá cumplir un nivel mínimo de energía de penetración al momento de rotura ó de contacto del neumático con el centro de la llanta (de no producirse la rotura) para cumplir con la norma anteriormente mencionada.

La norma establece la manera en que se calcula la energía de penetración y lo hace de la siguiente manera:

$$W_i = \frac{F.P}{2} \quad (1)$$

donde

W_i [lbs.pulg]: Energía de penetración de la muestra i .

F [lbs]: carga aplicada.

P [pulg]: deflexión ó carrera del indentor.

Siendo la energía de penetración final del ensayo el promedio de 5 muestras:

$$W = \sum_{i=1}^5 \frac{W_i}{5} \quad (2)$$

La velocidad a la cual se realiza el avance del indentor sobre el neumático es de 2" por minuto; éste avance provoca sobre la estructura una deformación de baja velocidad por lo tanto el modelo numérico utilizado no contemplará efectos dinámicos, considerando adecuada una simulación cuasi estática del ensayo. Para realizar el ensayo de energía de penetración FATE cuenta con máquinas de ensayo RJS como la de la Figura 1.



Figura 1: Máquina de ensayo RJS.

2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

El neumático sobre el cual se realizó el modelo de elementos finitos es de la medida LT 245/70R16, siendo este de uso en vehículos de carga livianos por eso las siglas LT al comienzo de su denominación (*Light Truck*). El modelo de elementos finitos fue generado íntegramente con desarrollos propios de software utilizados para el pre-procesamiento; como *solver* y herramienta de post-proceso se utilizó al paquete comercial ABAQUS. La Figura 2 muestra la malla 2D axilsimétrica generada que servirá de base para el modelado 3D (Figura 3), utilizando la técnica de mallado SMG (*Symmetric Model Generation*) de aplicación en ABAQUS (SIMULIA, 2012). En la misma figura puede apreciarse también en detalle la malla aplicada en el rodado y su transición de 5 elementos en el espesor del rodado a 1 elemento sobre el costado, resultando una malla optimizada para los fines del presente trabajo.

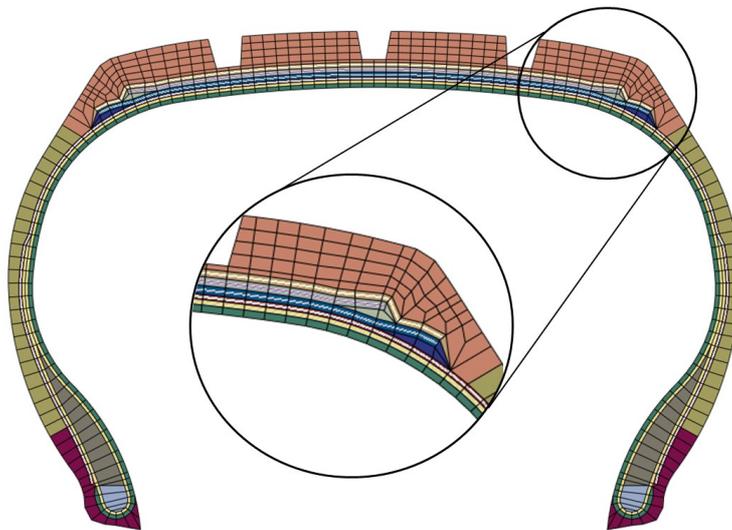


Figura 2: Malla 2D axilsimétrica del modelo de elementos finitos.

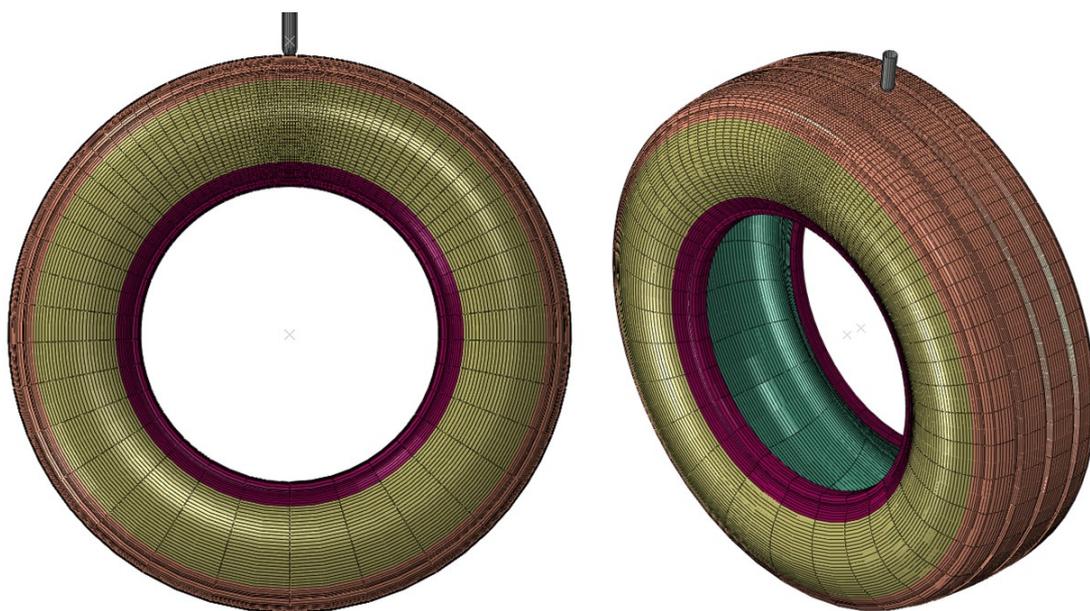


Figura 3: Malla 3D y distribución de elementos.

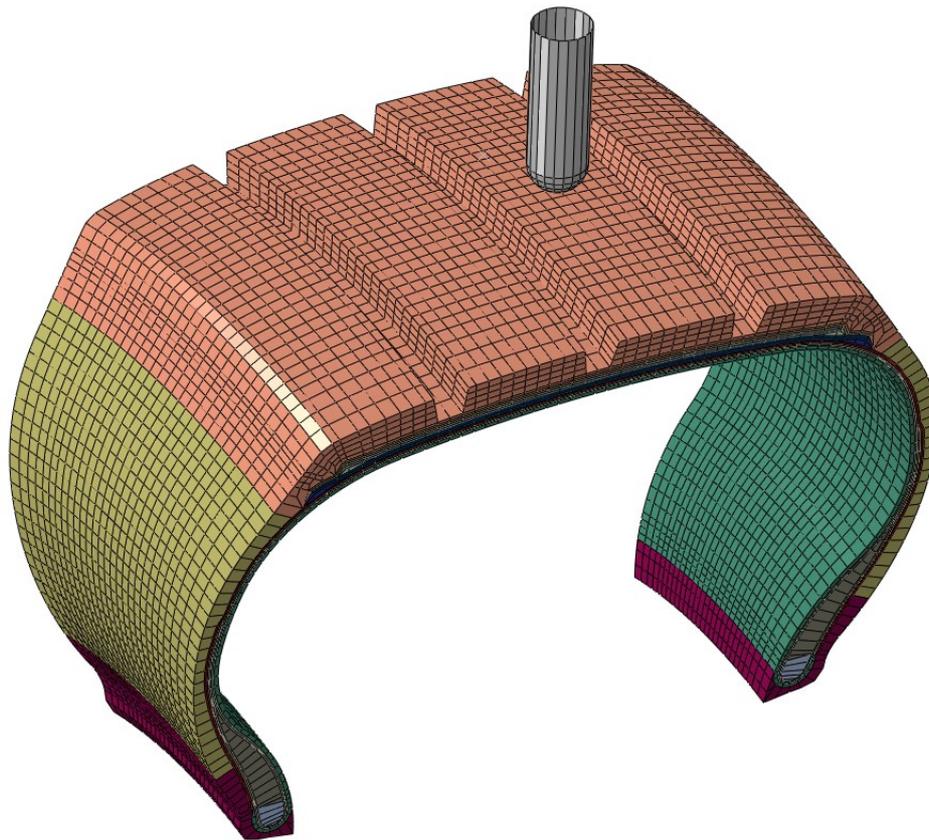


Figura 4: Detalle de la malla en la zona de penetración.

El indenter fue modelado a través de una superficie rígida. Todos los materiales utilizados en el modelo fueron caracterizados a través del modelo hiperelástico de Marlow, teniendo en cuenta la no-linealidad de los mismos. Lo anterior también aplica a los materiales de los refuerzos como pliegos y cinturas de acero del neumático los cuales fueron modelados con elementos del tipo REBAR de ABAQUS (SIMULIA, 2012).

2.1. Condiciones de Borde

La zona de contacto de la pestaña de talón del neumático con la llanta fue modelada restringiendo todos los grados de libertad de los nodos destacados en rojo en la Figura 5. Condición que representa a la rueda montada en la máquina de ensayo RJS.

2.2. Cargas

La máquina de ensayo controla el desplazamiento del indenter, haciéndolo avanzar con una velocidad constante de 2 pulg/min. En el modelo de elementos finitos se impuso un desplazamiento al indenter modelado como una superficie rígida, logrando de ésta manera la penetración sobre el neumático.

La presión de inflado es determinada por la norma de aplicación y para el caso del neumático bajo análisis corresponden 65 PSI.

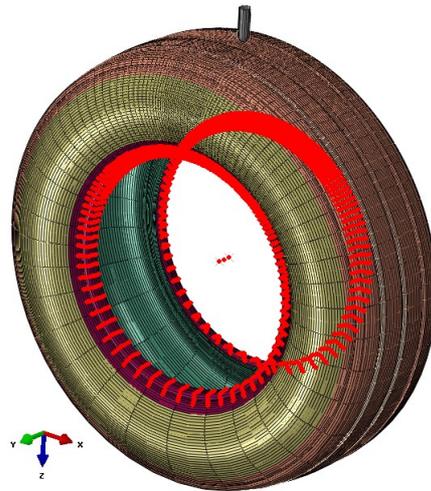


Figura 5: Nodos del modelo con sus grados de libertad restringidos. Arriba la superficie rígida que representa al indente.

2.3. Variantes Modeladas

El objetivo principal de este análisis es el de poder comparar distintos estilos y configuraciones de los refuerzos utilizados en las cinturas de acero y conocer su impacto sobre la energía de penetración. Fueron comparados tres estilos de cinturas de acero que utilizan dos tipos de cordones, los cuales fueron ensayados previamente a tracción en el laboratorio de materiales de FATE. La Figura 6 muestra las curvas obtenidas además de la del cordón de poliéster utilizado como refuerzo en los dos pliegos que posee el neumático bajo estudio. La Tabla 1 indica las variantes en los tres modelos comparados, la Figura 7 los refuerzos modificados en cada variante (cinturas de acero y pliegos).

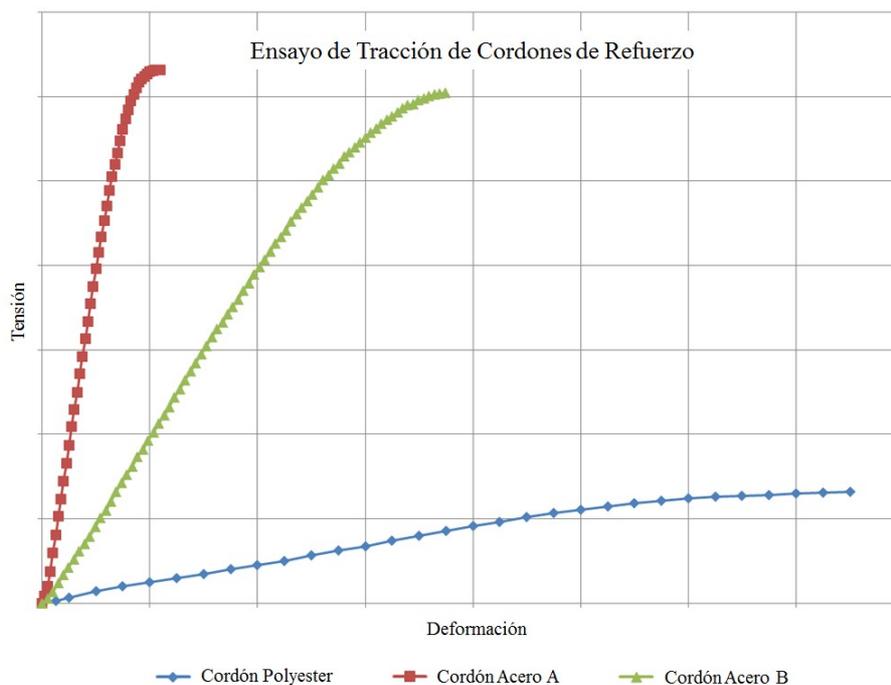


Figura 6: Curvas Tensión-Deformación de los cordones de refuerzo ensayados a tracción.

Modelo	Cinturas de Acero	Pliegos
Estilo 1	Cordón Acero A	Cordón Poliéster
Estilo 2	Cordón Acero A (mayor distancia entre cordones, 10 %)	Cordón Poliéster
Estilo 3	Cordón Acero B	Cordón Poliéster

Tabla 1: Variantes de modelos analizadas

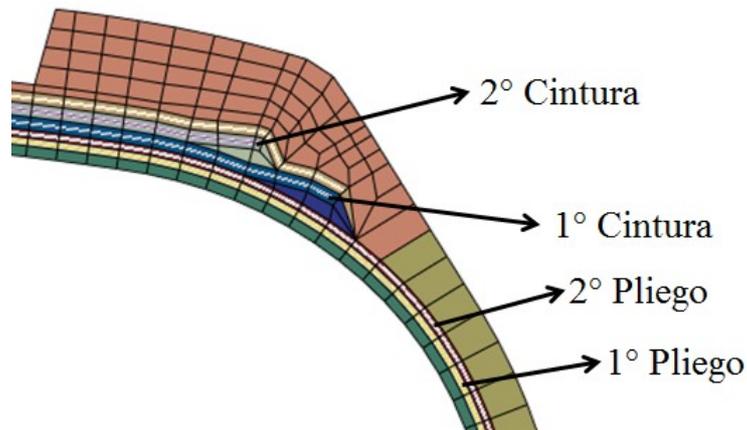


Figura 7: Refuerzos Analizados.

3. RESULTADOS NUMÉRICOS

La simulación llevada a cabo, además de grandes deformaciones, produce una elevada distorsión de los elementos bajo el indente. Como primer enfoque del problema se avanzó en la simulación hasta el punto en el cual la distorsión de los elementos se consideró elevada, tomando como límite una relación de aspecto de los elementos no superior a 100. Si bien se podría haber abordado el problema definiendo una región de remallado para mejorar la calidad de los elementos con el avance de la solución, no se lo hizo por la imposibilidad del *solver* de utilizar técnicas de remallado en mallas huérfanas (*orphan meshes*), requiriendo la generación de geometría y la utilización de una interfaz Abaqus/CAE al momento de la resolución del problema lo que incrementa, por un lado el tiempo de modelado ya que el modelo se realizó de manera íntegra con herramientas *in-house* parametrizables y personalizadas en función de las necesidades de FATE para obtener la malla del modelo de elementos finitos, y por otro lado reduce el poder de cálculo disponible al momento de la resolución del análisis resultando un proceso de mayor costo computacional que el esquema propuesto.

En función de lo mencionado anteriormente, una vez obtenida la solución hasta el momento de máxima distorsión, se analizaron los esfuerzos normales en los refuerzos correspondientes a las cinturas de acero y pliegos. La zona analizada fue la más comprometida (área de avance del indente) como se muestra en la Figura 8.

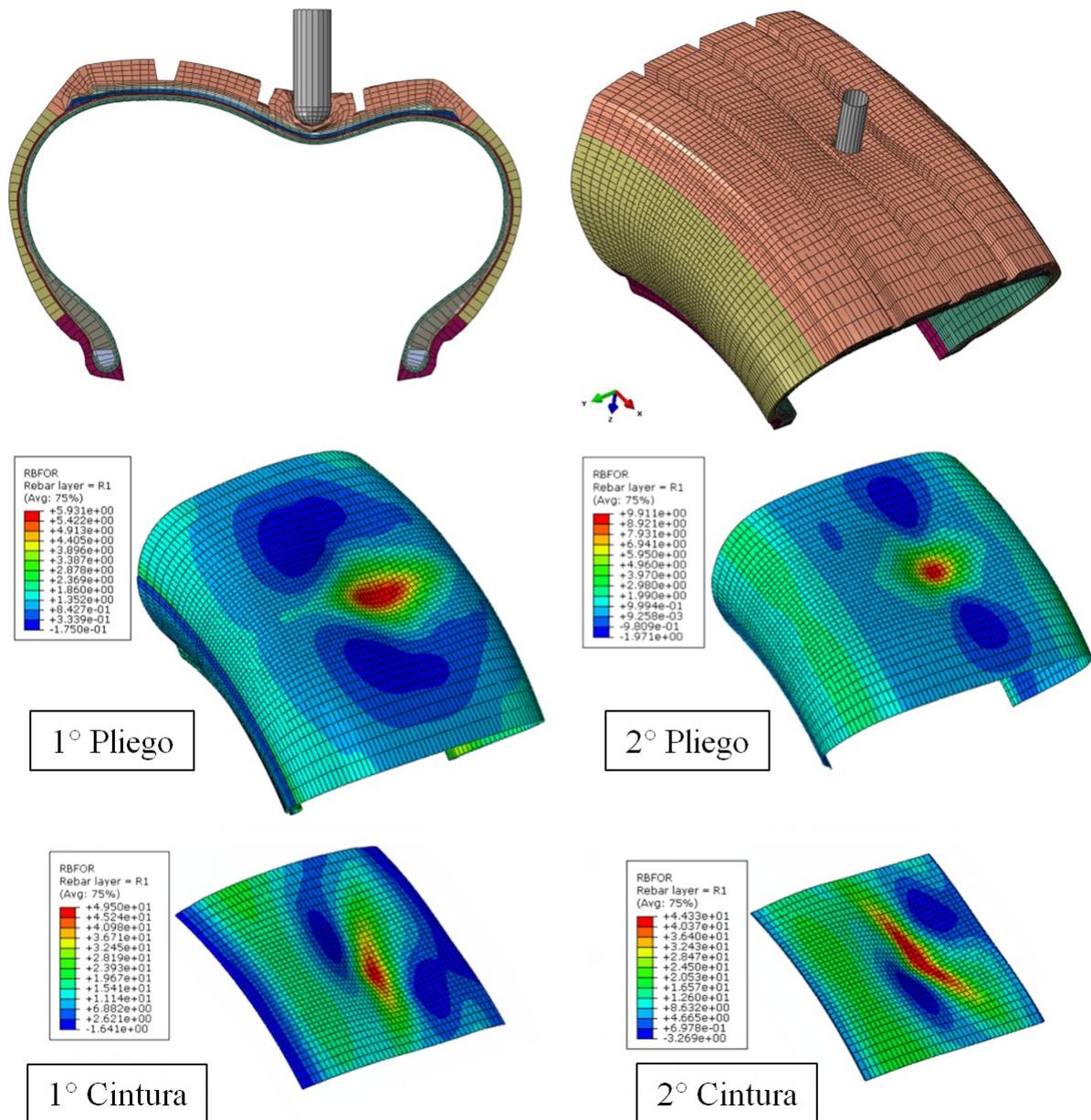


Figura 8: Malla deformada y zonas de mayor compromiso de los refuerzos.

La Figura 9 muestra los resultados obtenidos para la fuerza de penetración en función de carrera del indente, siendo el área bajo la curva la energía de penetración. Puede apreciarse que el impacto de las variantes de cinturas de acero evaluadas hasta la carrera del indente calculada es despreciable, siendo menor al 3 %.

La Tabla 2 resume los esfuerzos normales obtenidos en los refuerzos en la región mas crítica, en ninguno de los casos se llegó a la carga de rotura.

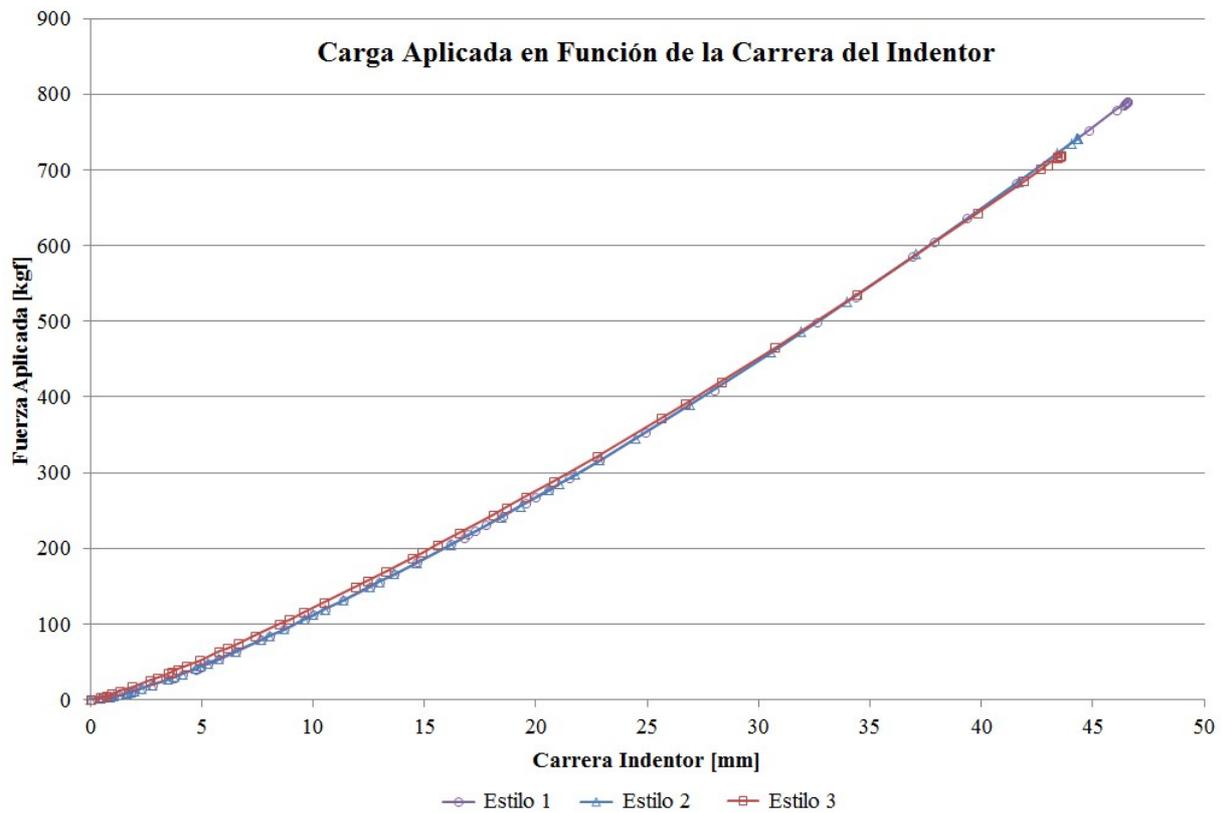


Figura 9: Curvas de carga en función de la carrera de penetración.

	Carrera [mm]	1° Pliego [kgf]	2° Pliego [kgf]	1° Cintura [kgf]	2° Cintura [kgf]
Estilo 1	47.0	6.10	9.68	24.96	23.00
Estilo 2	44.8	5.87	9.30	26.22	24.11
Estilo 3	44.0	5.93	9.91	49.50	44.23

Tabla 2: Esfuerzo de tracción en pliegos y cinturas de acero

Dado que ninguno de los refuerzos llegó a romperse al momento de la detención de la solución y la energía de penetración hasta esa instancia superaba levemente el 50 % de la requerida por norma para superar el ensayo, se realizó un análisis de la evolución de los esfuerzos de tracción en los cordones de refuerzo en función de la carrera del indentor observando una marcada tendencia lineal extrapolable, basándose en el hecho de que las curvas tensión-deformación de los refuerzos modelados pierden su linealidad en el último tramo antes de producirse la falla (Figura 6). En la Figura 10 se muestran los resultados obtenidos para todos los estilos de cinturas de acero bajo estudio.

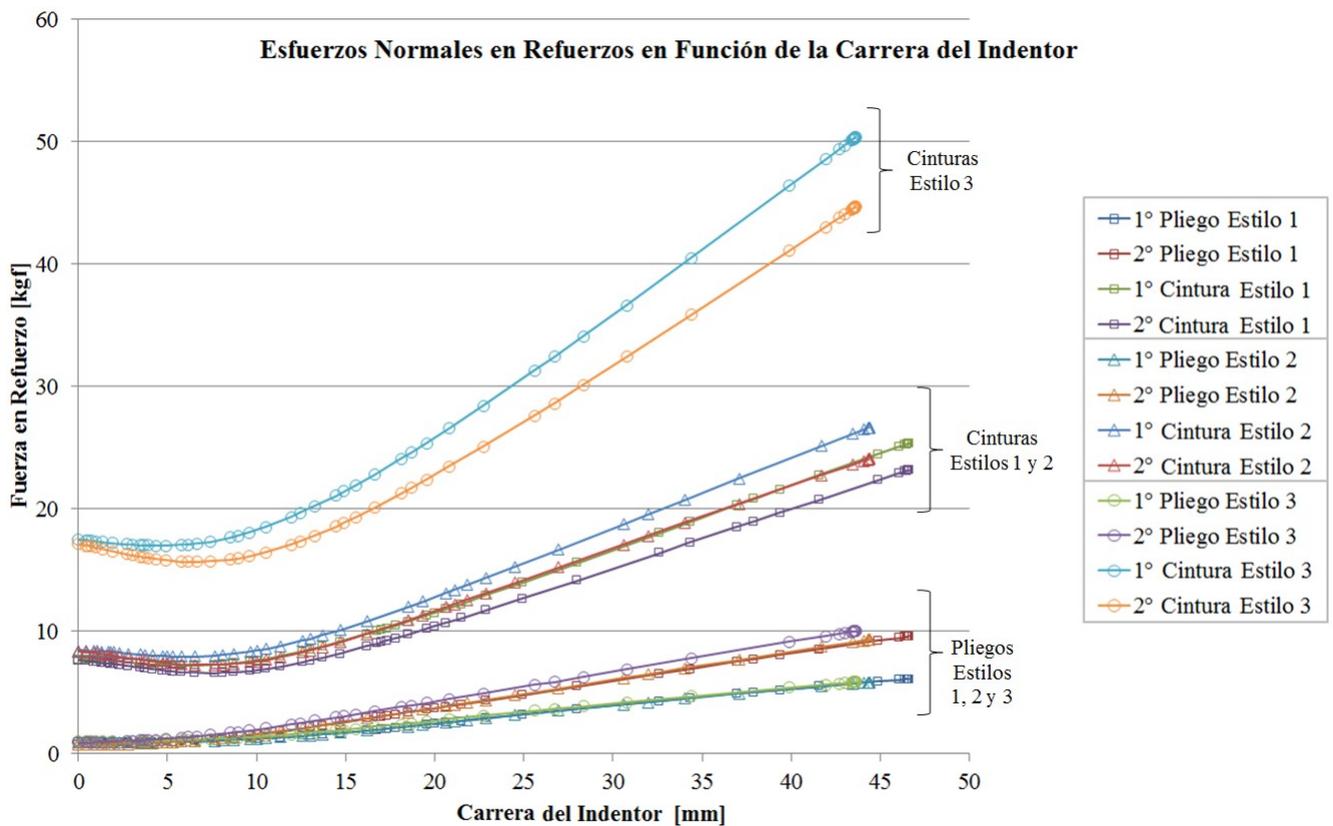


Figura 10: Evolución de los esfuerzos normales en refuerzos en función de la carrera del indector.

Del gráfico de arriba se observa que:

- La leve disminución que se manifiesta al principio (hasta los 10 mm de carrera del indector) en los refuerzos de las cinturas de acero se produce hasta el instante en el cual la curvatura de las cinturas cambia de signo al ser penetrada por el indector, para luego comenzar a aumentar de manera sostenida.
- Tomando los últimos 11 puntos de los resultados expuestos y aproximando dichos puntos a través de una recta se obtienen coeficientes de correlación iguales a 1 (0.9990 en el peor de los casos) por lo que se observa una clara tendencia lineal de la manera en que se cargan los refuerzos luego de determinado instante.

Considerando la tendencia lineal observada (Figura 10) y la hipótesis antes mencionada, se extrapolan los resultados obtenidos con el objetivo de conocer cual refuerzo es el crítico, es decir, cual será el primero en fallar. La Figura 11 muestra la extrapolación propuesta y en rojo los límites de resistencia de los cordones de refuerzo de pliegos y de los estilos de cinturas evaluadas.

Esfuerzos Normales en Refuerzos en Función de la Carrera del Indentor Extrapolados

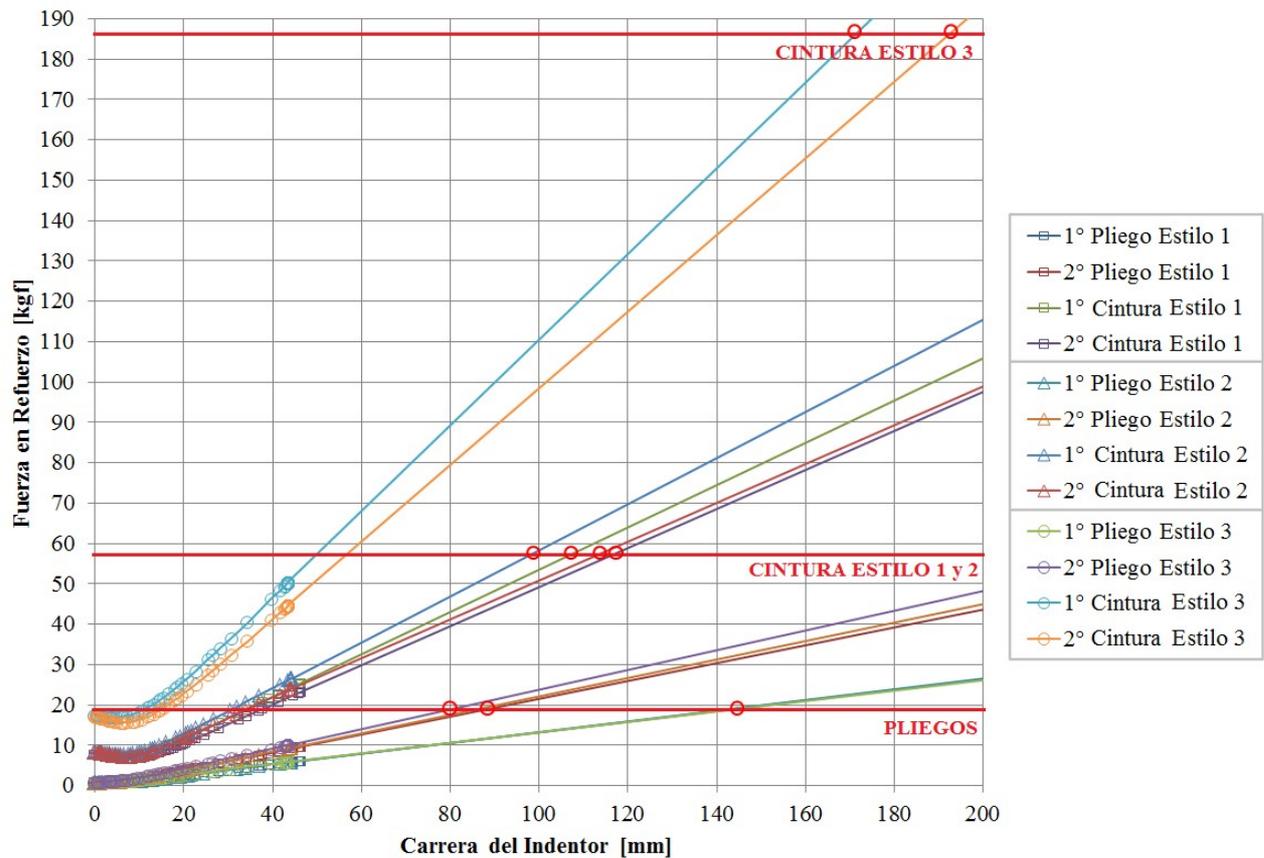


Figura 11: Extrapolación de resultados y límites de rotura de los refuerzos.

Puede observarse que los primeros refuerzos en llegar a su carga de rotura son los 2º pliegos en todas las alternativas simuladas. Según la extrapolación realizada basada en los resultados numéricos obtenidos, la carga de rotura de los 2º pliegos se alcanza cuando el indentor ha recorrido unos 83,5 mm promedio.

Luego de producirse la primera falla, la extrapolación propuesta deja de ser válida ya que no se puede garantizar que la manera en que se cargan los refuerzos mantenga la misma tendencia observada.

Las variantes de cinturas de acero analizadas no producen impacto significativo en el comportamiento de la estructura de manera de modificar la energía de penetración del neumático si se considera como punto de medición de energía la falla de alguno de los refuerzos.

En las siguientes secciones se valida el modelo numérico y se confirma que las hipótesis asumidas garantizan resultados dentro del margen de error esperado.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. Validación del Modelo de Elementos Finitos

A los fines de validar el modelo de elementos finitos, en la Figura 12 se muestran los resultados numéricos junto con puntos de energía de penetración experimentales obtenidos sobre un neumático con cinturas *Estilo 1* (Tabla 1). A su vez también se grafica un polinomio de 2° orden que ajusta correctamente los resultados numéricos, demostrando también que su extrapolación se correlaciona con resultados experimentales de carreras de penetración superiores (cuasi el doble) a las que se pudieron obtener mediante el modelo de elementos finitos sin remallado.

Para el caso bajo análisis el polinomio de 2° orden utilizado para el ajuste toma la siguiente forma:

$$W[\text{lb}\cdot\text{pulg}] = 0,8603.c^2 - 6,3708.c + 15,785 \quad (3)$$

donde

c: carrera del indentor [mm].

El error cometido en los ensayos experimentales al posicionar el indentor en aparente contacto con la cubierta (c = 0 mm) se estima en $\pm 0,5$ mm.

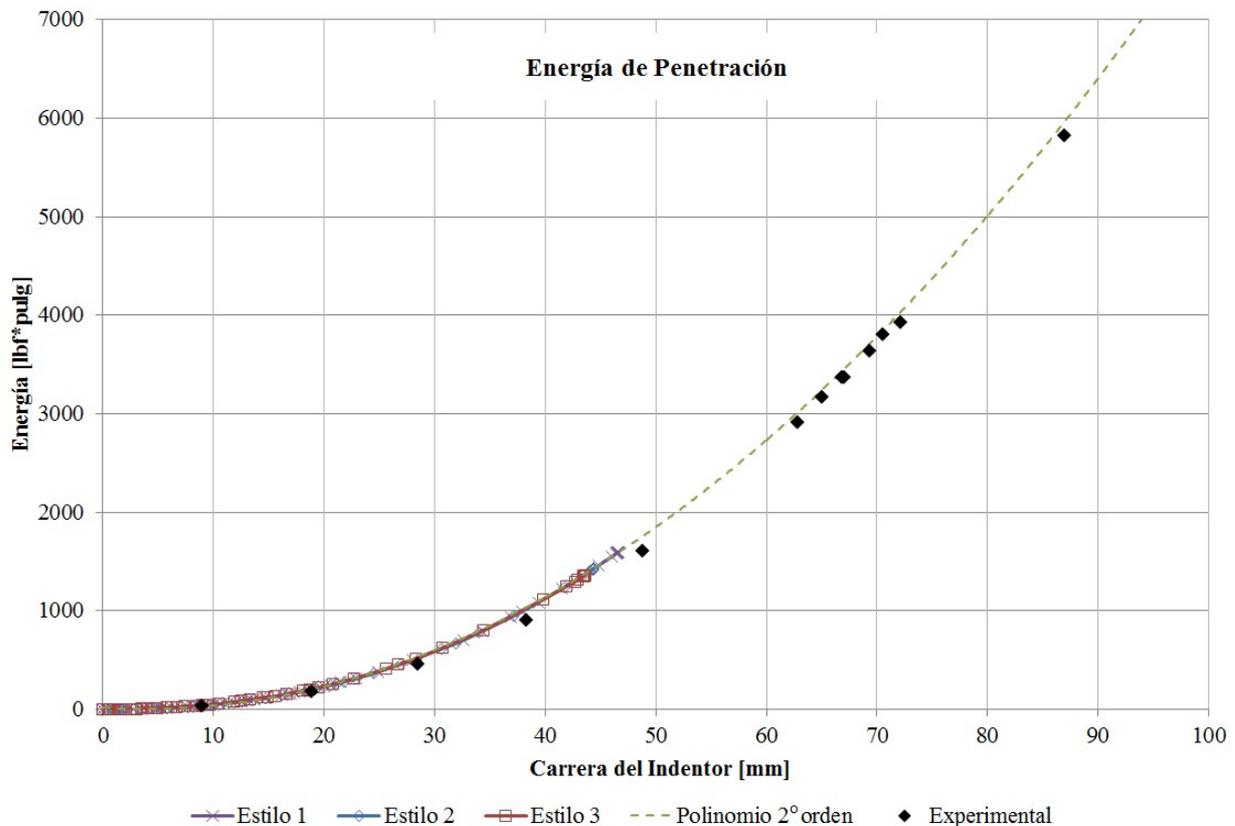


Figura 12: Resultados numéricos y experimentales de Energía de Penetración (*Plunger Energy Test*).

Considerando al polinomio de orden 2 de la Ec. 3 como función válida para la extrapolación

de resultados de energía de penetración del neumático bajo análisis, el mayor error cometido respecto de los ensayos es menor al 10 %.

4.2. Ensayo de Energía de Penetración Instrumentado

Ante la necesidad de validar la secuencia de rotura obtenida mediante el modelo numérico que determinaba que el primer refuerzo en romper era el 2° pliego y luego las cinturas de acero (Figura 11), se instrumentaron neumáticos con cinturas *Estilo 1* con un acelerómetro colocado en el hombro del rodado tal como se observa en la Figura 13.



(a) Acelerómetro en Hombro

(b) Ensayo en progreso, $c \approx 65$ mm

Figura 13: Ensayo de Energía de Penetración Instrumentado

A través de la instrumentación del ensayo se buscó cuantificar los distintos niveles de liberación de energía durante la rotura de los diversos refuerzos que posee el neumático. Algunos de los resultados obtenidos se muestran en la Figura 14.

Puede observarse un patrón repetido en donde se manifiestan primeros picos de vibración de menor energía antes de que ocurra la penetración total del neumático dando por culminado el ensayo de energía de penetración (la máquina de ensayo se detiene sola en ese instante en modo automático), asignándole en función de los resultados numéricos obtenidos y que la relación de masa de cinturas de acero frente a la de los pliegos de poliéster es un 85 % superior, esa primera energía liberada a la rotura del pliego de poliéster y la segunda de mayor magnitud a las cinturas de acero. La posición en la cual se produce la primera rotura es, en promedio, a los 68 mm de carrera del indentor, valor que comparado con el estimado por el modelo de elementos finitos de 83,5 mm representa un error del 18,6 %. Considerando que la extrapolación de resultados fue realizada hasta casi el doble del valor obtenido mediante simulación y las hipótesis de linealidad de los materiales de refuerzo hasta su carga de rotura, se considera que el error es aceptable.

Los primeros picos observados en la Figura 14 son generados por la máquina de ensayo RJS durante la maniobra inicial, no correspondiendo a un fenómeno ocurrido en la estructura del neumático.

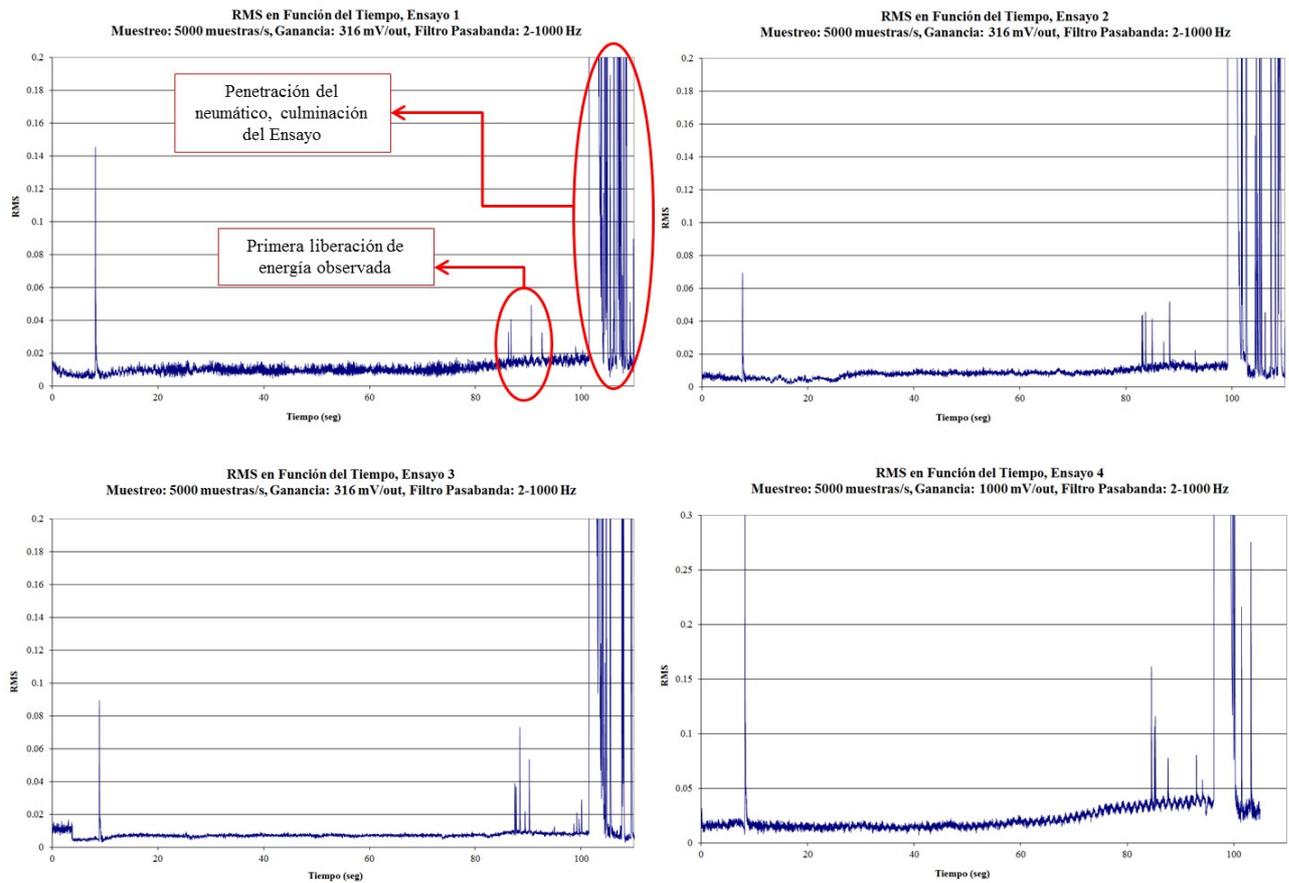


Figura 14: Salida del Acelerómetro Durante Ensayos Instrumentados

El instrumental utilizado durante los ensayos fue el siguiente:

- Acelerómetro: *Brüel & Kjær, Type 4382* Uniaxial.
- Amplificador: *Brüel & Kjær, Type 2635*.
Ganancia: 316 mV/g.
Filtro: Pasabanda 2-1000 Hz.
- Placa de Adquisición: *National Instruments USB-6211*.
Software: National Instruments LabVIEW SignalExpress.

Para calcular el valor RMS de la señal obtenida del acelerómetro se agruparon los puntos en muestras de 100, lo que en combinación con la tasa de muestreo adoptada arrojó un valor RMS cada 20 ms. Con la combinación de parámetros detallados anteriormente se logró filtrar el *ruido* introducido por el sistema hidráulico de la máquina de ensayos RJS. Los ensayos fueron realizados en ausencia de perturbaciones externas.

4.3. Inspección Interna de los Neumáticos Sometidos a Ensayos Instrumentados

Para validar el comportamiento manifestado dentro del neumático por el modelo de elementos finitos y los ensayos instrumentados, se realizaron cortes del mismo en las zonas en las cuales se realizaron las mediciones instrumentadas. La Figura 15 muestra uno de los sectores del neumático sobre el cual se realizó el peritaje del estado de sus refuerzos al culminar el ensayo. Los sectores inspeccionados corresponden a ensayos truncados realizados solamente hasta los primeros picos de energía detectados por el acelerómetro (Figura 15), una vez detectados estos picos se avanzó en promedio 2 mm mas en la carrera del indenteor y luego se detuvo el avance del mismo. Con esta acción lo que se buscó fue romper solamente los refuerzos pertenecientes a los pliegos de poliéster según indicaban los resultados obtenidos hasta ese entonces.

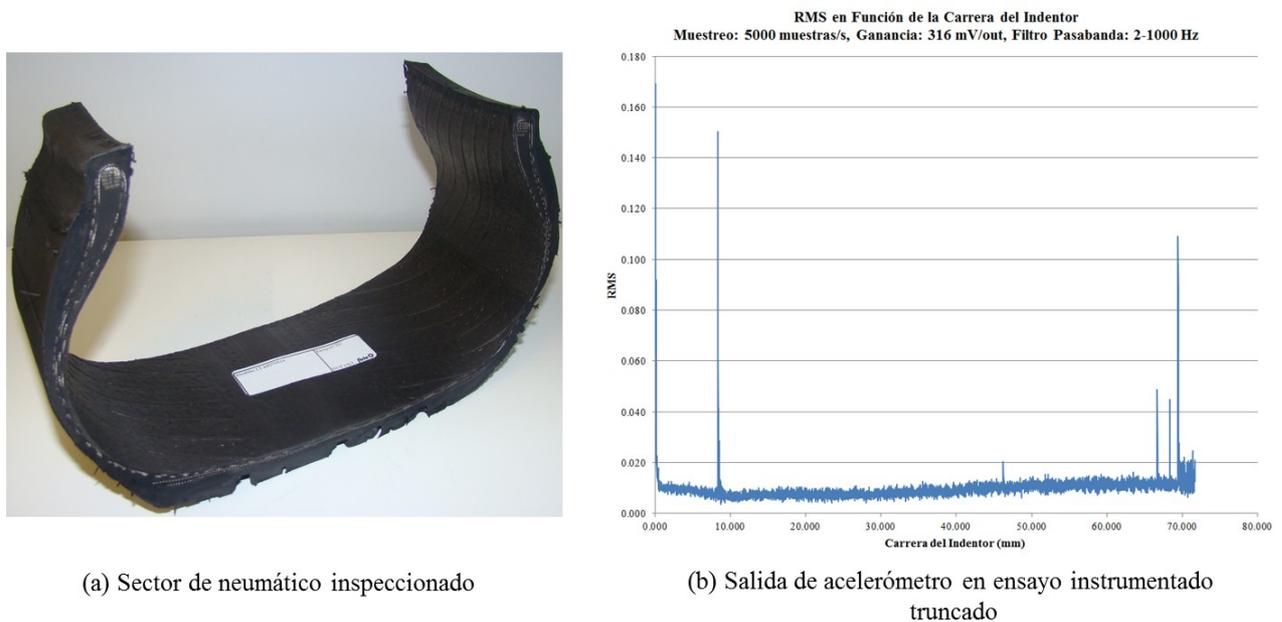


Figura 15: Ensayo Instrumentado Truncado

Durante la inspección se pudo corroborar que ambas cinturas de acero se encontraban en perfectas condiciones. En la Figura 16 se puede observar el sector del neumático luego de la inspección.

La Figura 17 muestra el trabajo realizado sobre el 2° pliego, refuerzo que según resultados de simulación debería haber sufrido daño hasta el instante en el que se avanzó en el ensayo truncado realizado. La metodología a través de la cual se logró verificar el estado de los cordones de poliéster fue accediendo al 2° pliego mediante el pelado con torno de mano neumático de las capas anteriores a éste. A pesar de realizarse ésta acción con sumo cuidado resulta un método invasivo que puede generar roturas de filamentos de los cordones de poliéster, lo que se puede manifestar en aparentes roturas de los hilos. Se pudo apreciar una diferencia entre roturas ocasionadas durante el decapado del neumático y las potenciales roturas ocasionadas durante el ensayo siendo éstas últimas puntuales, definidas y sin pelusa proveniente del trabajo mecánico del torno, mientras que las primeras se extendían a lo largo de varios milímetros no tratándose de una discontinuidad marcada del cordón de poliéster.

Para detectar la rotura de los hilos de poliéster una vez que éstos fueron aislados uno a uno en el entorno de la zona afectada por el ensayo, se impuso una extensión a los mismos

haciéndose manifiesta la falla por la elongación excesiva de la goma en la cual el cordón de refuerzo se encontraba confinado, aún después de su separación del neumático. En las Figuras 18 a 21 se muestran los detalles de la extensión apreciada visualmente para detectar la falla de los refuerzos del 2° pliego.



Figura 16: Sector de Cubierta Luego de la Inspección de las Cinturas de Acero

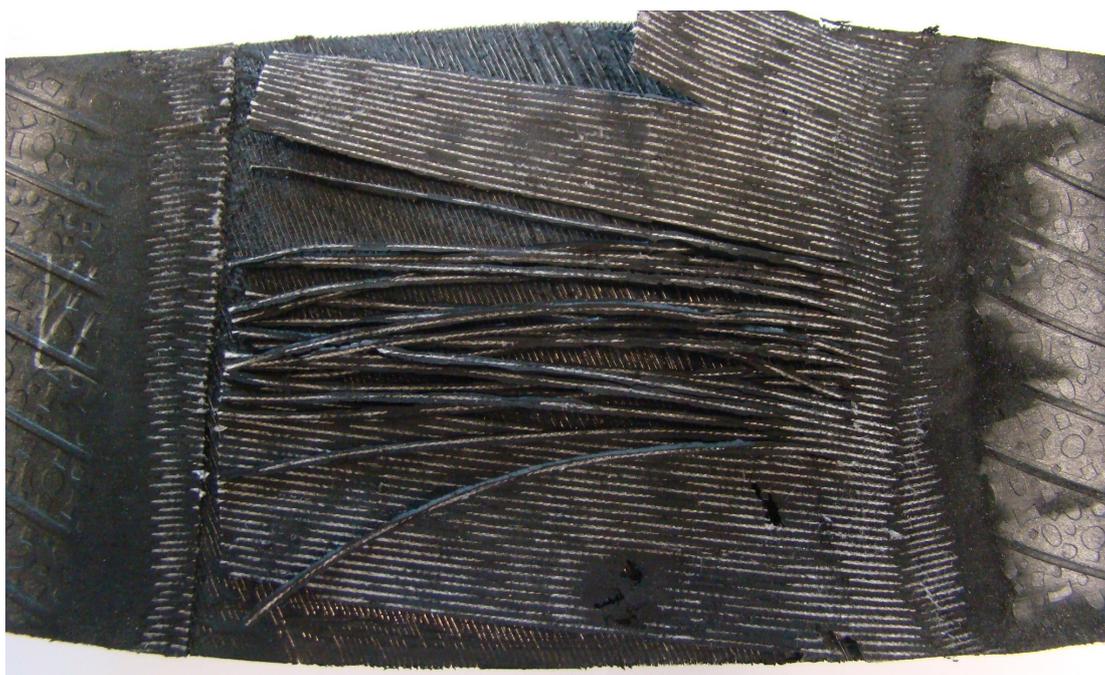


Figura 17: Inspección del 2° Pliego

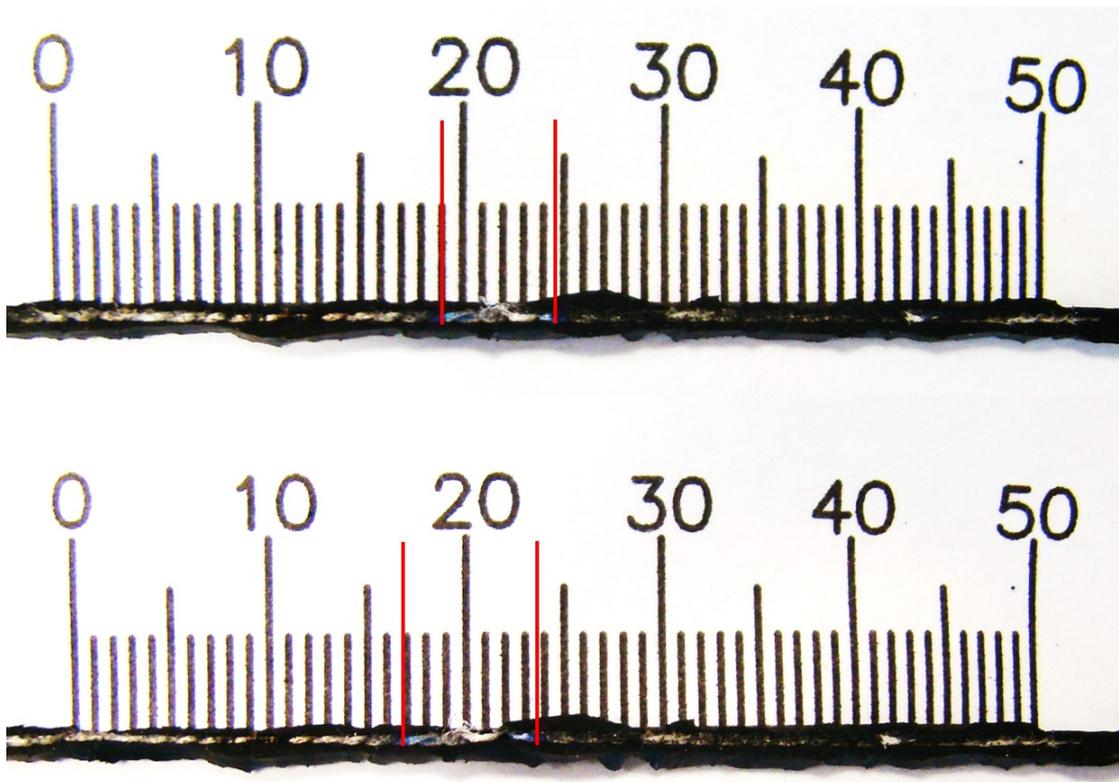


Figura 18: Detalle de los Refuerzos de Poliéster que Presentaron Aparente Falla

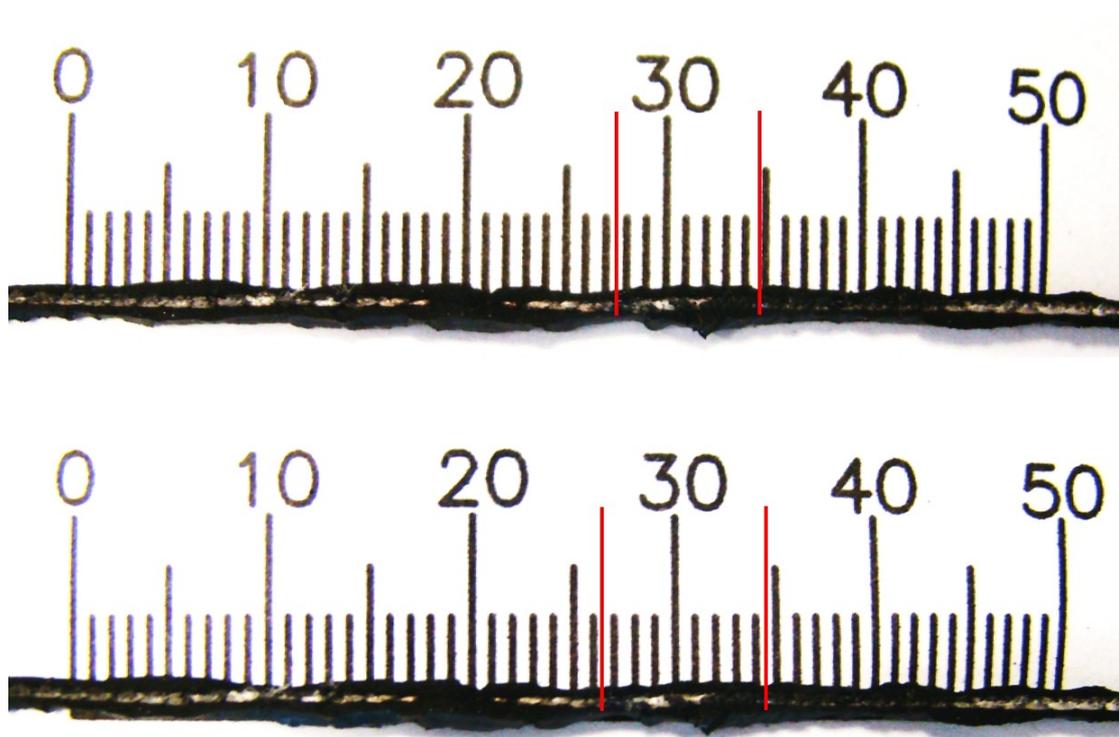


Figura 19: Detalle de los Refuerzos de Poliéster que Presentaron Aparente Falla

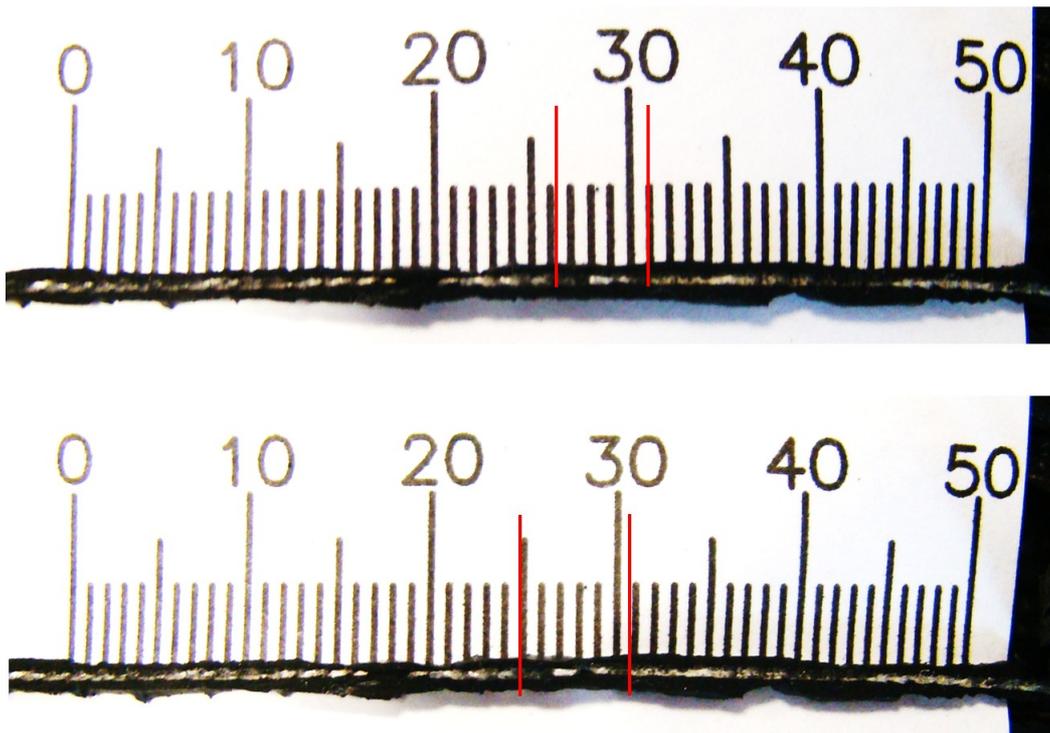


Figura 20: Detalle de los Refuerzos de Poliéster que Presentaron Aparente Falla

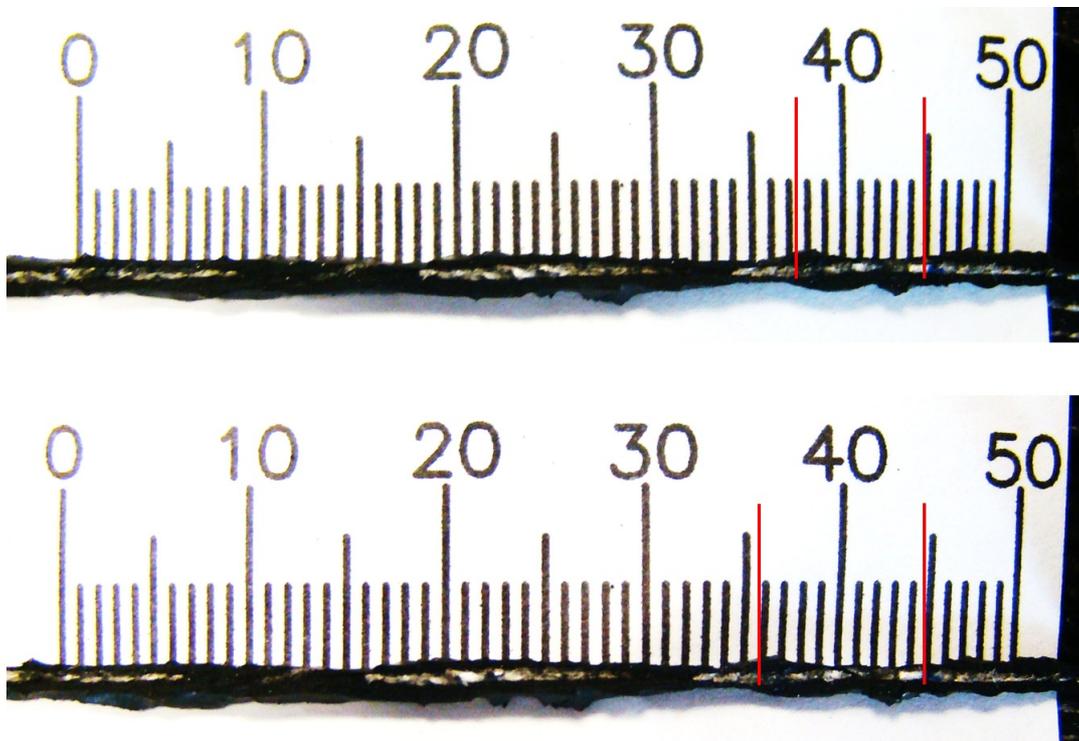


Figura 21: Detalle de los Refuerzos de Poliéster que Presentaron Aparente Falla

5. CONCLUSIONES

A través del modelo numérico empleado en el presente trabajo se logró conocer el comportamiento de los refuerzos internos de un neumático durante el ensayo de energía de penetración (*Plunger Energy Test*), sin la necesidad de emplear métodos de resolución más costosos como lo es un esquema de remallado de geometría para compensar la merma en calidad de los elementos a medida que avanza su distorsión.

El valor de energía de penetración obtenido en el ensayo normalizado según el instructivo FMVSS-109 de la *Federal Motor Vehicle Safety Standards* de los Estados Unidos (2005) depende del estilo de cinturas de acero (entre otros) que se adopte ya que la máquina de pruebas RJS da por culminado el ensayo cuando ocurre la rotura de las cinturas, estableciendo así el valor de energía de penetración del neumático. Como se pudo observar en los resultados obtenidos, antes de que las cinturas de acero lleguen a su última carga se produce la rotura del 2° pliego, lo cual determina la falla del neumático debido a que uno de sus refuerzos internos ya no está en condiciones de cumplir su función. En consecuencia se puede decir que el ensayo de energía de penetración para un neumático de las características del analizado no determina la energía que este absorbe antes de producirse su falla, sino la energía para el colapso total del mismo ya que la rotura de refuerzos como los pliegos de poliéster no son detectadas como parámetro para finalizar el ensayo. La energía de penetración considerando la falla del neumático (2° pliego fuera de servicio en el caso bajo estudio) representa aproximadamente un 65 % de la energía de penetración determinada por norma.

En función de los resultados expuestos queda determinado un nuevo método complementario al ensayo de energía de penetración que consiste en instrumentar el mismo con un acelerómetro uniaxial colocado en el hombro de la cubierta (Figura 13) para poder así conocer el momento en el cual se produce la falla de los refuerzos internos, antes del colapso total del neumático.

A través de las validaciones experimentales llevadas a cabo se pudo constatar que las hipótesis asumidas fueron adecuadas, llegando a una correlación entre resultados numéricos y experimentales. La extrapolación realizada sobre los resultados numéricos es válida sólo hasta el instante en el cual falla el primer refuerzo (estrictamente antes, al perder linealidad su curva tensión-deformación).

Se considera al modelo numérico implementado apto para realizar análisis comparativos de impacto sobre la energía de penetración de falla (distinta a la de ensayo) de diversas variantes de diseño, resultando en el caso de estudio el 2° pliego de poliéster el refuerzo crítico. En los casos en que se requiera conocer el valor de energía de penetración de ensayo a través de simulación numérica se considera adecuado llevar adelante un modelo en el cual se llegue a la condición de rotura de por lo menos una de las cinturas de acero, lo cual se lograría a través de un modelo que contemple remallado y un adecuado modelo de material de los refuerzos que represente la rotura de los mismos al llegar a su carga última.

REFERENCIAS

Broch J.T. *Mechanical Vibration and Shock Measurement*. Brüel & Kjær, 1984.

Clark S. *Mechanics of Pneumatic Tires*. U.S Department of Transportation and National Highway Safety Administration, 1981.

NHTSA. *Laboratory Test Procedure for FMVSS No. 109*. Office of Vehicle Safety Compliance, 2005.

SIMULIA. *ABAQUS User's manual*. Dassault Systèmes, 2012.

Tseng N.T., Pelle R.G., Chang J.P., y Warholic T.C. Finite element simulation of destructive tire testing. *Tire Science and Technology, TSTCA*, 19:2–22, 1991.