

Análisis de materiales compuestos para la mejora de la durabilidad de neumáticos.

Pinheiro Vidal, Arthur

Trabajo Final de Grado de Ingeniería Mecánica,
Departamento de Resistencia de Materiales Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Vilanova i la Geltrú (UPC)

Resumen

Este trabajo constituye un análisis exhaustivo que tiene como objetivo principal mejorar la durabilidad de los neumáticos. En concreto, enfocándose en los materiales. Un propósito cada vez más buscado debido a los problemas medioambientales actuales, y a una demanda de mercado muy competitivo. Esto implica maximizar el rendimiento del movimiento de rodadura generado por el vehículo, durante la rodadura se pierde gran parte de la energía a través del calor generado, este calor es llamado resistencia a la rodadura. Una de las maneras de solventarlo es mejorando el material de la banda de rodadura. Con un mejor refuerzo en una base de caucho se consigue una gran mejora de la resistencia a la rodadura, substituir el típico refuerzo de negro de carbón por sílice parece ser una gran aproximación a la mejora que buscamos. Para caracterizar un material una de las pruebas más extendidas y con un carácter comparativo es el ensayo de tracción, en este trabajo se ha realizado simulaciones con el objetivo de analizar el comportamiento de sílice como refuerzos. Los resultados que hemos obtenido en las simulaciones de ensayos de tracción no han sido del todo satisfactorias, los valores son menores a los teóricos, pero existe una correlación con el aumento del refuerzo de sílice, lo que indica que podemos dar por valido la comparativa entre las diferentes soluciones. Se observa que existe un aumento del módulo entre ellas y sin generar una zona plástica o una rotura prematura. Esto implica que la hipótesis está bien formulada, los refuerzos de sílice respecto a uno con negro de carbón nos podrán permitir tener un mayor rendimiento trabajando elásticamente, podrá suponer un aumento sustancial de las propiedades mecánicas que buscamos, y en consecuencia una reducción de la resistencia a la rodadura.

1. Introducción

En la actualidad el sector de la automoción y del transporte por carretera supone un pilar fundamental para nuestra economía y para el avance de nuestra sociedad. En concreto, el sector de la automoción en España supuso una participación del 8,6% del PIB total del 2018, asimismo el transporte terrestre supone un 3,9% del PIB del total del mismo año, e indirectamente contribuye a aumentar el valor monetario de otros sectores.¹ Debido a su importancia existe una feroz competición en el sector de la automoción con tal de mejorar el rendimiento de los vehículos actuales, a su vez debido a los problemas actuales de contaminación los gobiernos presionan más la reducción de las emisiones de gases contaminantes y la generación de residuos. El

correcto uso de neumáticos supone un factor determinante en el ahorro de energía, el departamento de Energía de los Estados Unidos estima que aproximadamente 4,2% de la energía total disponible en el combustible almacenado en el tanque se pierde por la resistencia a la rodadura provocada durante el uso del vehículo. En consecuencia, existen varios estudios con tal de mejorar la eficiencia y durabilidad del neumático, varios factores son determinantes para su mejora. A lo largo de este trabajo analizaremos como conseguir esta mejora de la durabilidad con el uso de materiales nuevos. actuales procesadores de textos generalmente disponibles.

2. Análisis del movimiento de rodadura.

Con tal de analizar diferentes soluciones de materiales para mejorar las propiedades mecánicas establecemos una base teórica, esfuerzos sometidos y energía perdida en el neumático a base de aproximaciones basadas en ensayos de laboratorio previamente hechos en diferentes estudios, en él se busca encontrar una respuesta a las propiedades que más interesantes para el material. Posteriormente se procede a analizar.

Al ponerse en marcha un vehículo convencional el movimiento lineal generado por el motor es transformado en movimiento rotatorio y posteriormente transmitido a través del sistema de transmisión a las ruedas traccionadas. El movimiento transmitido a la rueda es una velocidad angular ω , como todo cuerpo ante un movimiento circular genera un perfil de velocidades lineales, donde el módulo depende de la distancia del centro de rotación, en nuestro caso es el centro de la rueda y en ese punto nuestra velocidad lineal será igual a 0. A la misma vez que la rueda va girando también tiene una velocidad lineal que corresponde al movimiento del vehículo, La conjunción de ambos movimientos es el conocido como **movimiento de rodadura**, es el principal movimiento que analizaremos en los demás apartados.



Fig 1. Movimiento de rodadura.

Es importante cuantificar energéticamente la influencia de los neumáticos sobre el vehículo para ver cómo mejorar su rendimiento e influencia en el medio ambiente. La energía no se crea ni se destruye, se transforma, cuantificar energéticamente implica ver porque no se aprovecha y donde se pierde esta energía. Por ello, este análisis señala donde hay mayor cúmulo de tensiones en el neumático, y donde es la zona más crítica al trabajar.

Se define como energía la capacidad de producir movimiento o generar algún tipo de transformación en el medio donde se observa, y se mide en Joules (J). Hay diversas formas de energía, y externamente en los neumáticos en funcionamiento tenemos:

Energía cinética de rotación provocada durante el movimiento de rodadura, la energía de entrada viene dada por el tren de rodaje, donde la rueda gira solidariamente a los palieres con el contacto con el cubo de la rueda.

Energía cinética de translación debido al contacto del neumático con el asfalto provoca un movimiento de translación de nuestro vehículo, es la energía que deseamos maximizar respecto a la de entrada, consiguiendo reducir las pérdidas de energía.

Energía calorífica debido al fríegue las partículas de los materiales en contacto, donde se excitan, generan una energía cinética a nivel microscópico que produce una energía disipada en forma de calor, puede ser tanto del contacto entre las diferentes partes móviles, y sobre todo del contacto con el asfalto. [2]



Fig 2 Esquema energético.

La energía calorífica mencionada anteriormente en función de la distancia recorrida, se define como la resistencia a la rodadura teniendo como unidad de J/m. Tradicionalmente, esto se ha asociado con una fuerza de fríegue medida en N opuesta a la dirección del movimiento, este concepto se explicará con más detalle en el siguiente apartado.

La mayoría de las pérdidas sucesivas se pueden atribuir a las características del material. Durante la rodadura, el neumático el material se deforma periódicamente. Debido a las propiedades viscoelásticas del compuesto de caucho y que adentraremos posteriormente, en cada ciclo no se puede recuperar toda la energía elástica almacenada, sino que una parte se disipa. Estas las perturbaciones se propagan dentro de la estructura del neumático como ondas en una variedad de formas y

órdenes de modos diferentes, conduciendo a la disipación. La mayor parte de la disipación ocurre en la banda de rodadura, que generalmente está hecha de un compuesto de caucho que consiste en polímeros naturales y / o sintéticos, rellenos de refuerzo y algunos aditivos. Esto se debe al alto factor de pérdida de caucho, lo que permite grandes deformaciones y, por lo tanto, una energía potencial elástica. Basándonos en ensayos hechos por simulaciones como físicamente en 2018 por la *Universidad de Tecnología Química de Pekín* (figura 3), demuestran que la energía calorífica se concentra en la parte central (Punto B) aproximándose más a la banda de rodadura que a las llantas, además, las temperaturas más bajas se encuentran en la zona de la llanta, por el que será la zona menos problemática. [3]

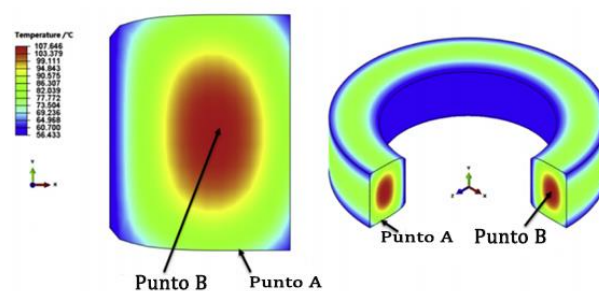


Fig 3 Concentración de temperatura.

A su vez una falta de presión en el automóvil generaría una mayor área de contacto con el suelo, y las diferentes partículas se excitarían generando una mayor resistencia a la rodadura como se ve en la figura 4.



Fig 4 Área de contacto neumático.

A su vez un exceso de presión también sería contraproducente, habría una menor área de contacto con el asfalto, no tendríamos el agarre para generar el impulso durante la rodadura y generaría como consecuencia una abrasión anormal.

El neumático está sometido a varias fuerzas a la vez, de forma simplificada la resultante de las fuerzas verticales genera una tensión axial, a su vez el momento motor en el punto A de la figura 5 generará una tensión cortante. En un análisis real otras fuerzas contribuyen al aumento de estas tensiones, pero destacamos estas ya que son las más desfavorables.

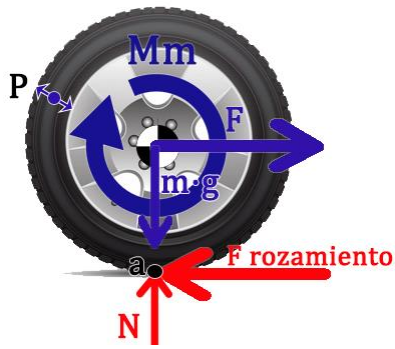


Fig 5 Esquema dinámico simplificado

El estudio de *Journal of Testing and Evaluation* [4], nos confirma la correlación entre las fuerzas verticales y la tensión normal del neumático, en este estudio se hace un análisis sistemático a diferentes presiones y cargas que debe soportar el neumático. En este estudio se usó de análisis elementos finito de un total de 330 elementos y 400 nodos en una malla hexagonal. Como podemos observar en la *figura 6* a una presión correcta en los casos a,b y c, al someter el neumático a una mayor carga obtendremos una mayor distribución de tensiones normales en nuestra banda de rodadura, siguiendo el tramado de la textura.

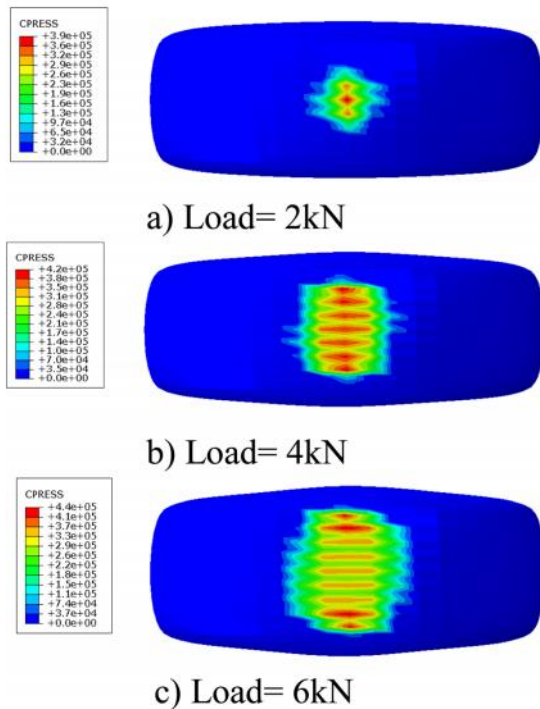


Fig 6 Análisis de tensiones normales por carga.

En lo que respecta las tensiones cortantes, vemos como en el eje del movimiento tenemos unas tensiones simétricas con sentido opuesto, esto es debido al movimiento del caucho de la banda de rodadura donde la parte delantera se adhiere mientras la trasera resbala según la carga sometida. En este trabajo hemos establecido una simplificación de cargas con tal de explicar acorde a un nivel introductorio, sin embargo, en este estudio se tiene en cuenta las propiedades viscoelásticas, las diferentes partes del neumático y los esfuerzos generados por las diferentes tensiones que omitimos en nuestra simplificación.

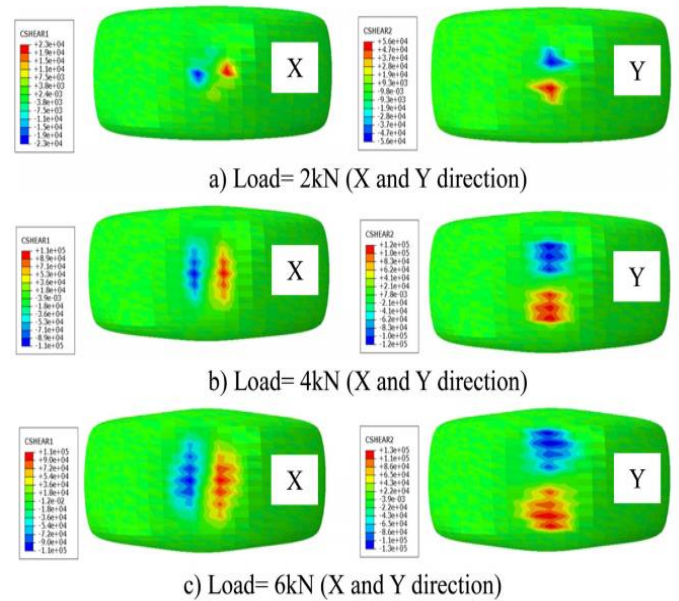


Fig 7 Análisis de tensiones cortantes por carga.

3. Análisis de materiales.

El caucho es un material con grandes características, y puede tener muchas utilidades en el mundo de los materiales. El caucho tiene un bajo módulo de elasticidad y es capaz de soportar una deformación de hasta 1000%. Después de tal deformación, se retrae rápidamente adquiriendo la fuerza y sus dimensiones originales. Es resistente y, sin embargo, presenta amortiguación interna. Caucho se puede procesar en una variedad de formas y se puede adherir a inserciones de metal o a placas de montaje. Se puede combinar para tener propiedades muy variadas. La curva de deflexión de carga se puede alterar cambiando su forma, además el caucho no se corroe y normalmente no requiere lubricación.

El comportamiento de un elastómero como el caucho delante su relación esfuerzo-deformación está compuesta de solo de una zona elástica, y después de dicha zona rompe. Esta curva no presenta un crecimiento lineal y no puede ser medida con la ley de Hooke, lo que conlleva a mencionarlo en puntos concretos de la elongación. Esto es debido al comportamiento viscoelástico que tiene el material, donde el caucho aparte de tener propiedades elásticas tiene propiedades de absorción de energía como las de un líquido viscoso.

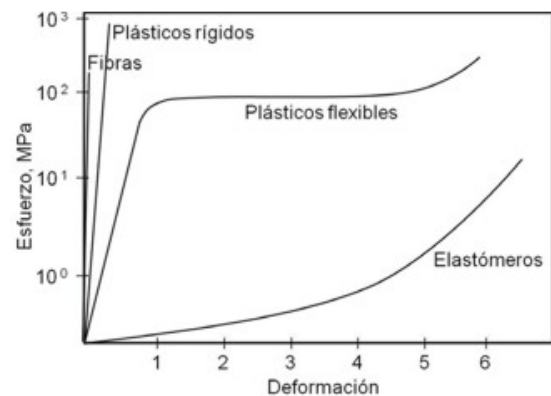


Fig 8 Comportamiento elastómeros.

Estas propiedades permiten que el caucho mantenga una forma constante después de la deformación, mientras que simultáneamente absorbe energía mecánica. La viscosidad (que varía con diferentes elastómeros) aumenta con una temperatura reducida. La elasticidad sigue la ley de Hooke y aumenta con el aumento de la tensión, mientras que la viscosidad sigue la ley de Newton y aumenta con aumento de la tasa de deformación, como resultante la tensión sometida y la elongación presentan un valor sinusoidal.

El caucho por sí solo es un enredo de macromoléculas de cadenas de hidrocarburos, en consecuencia, por sí solo fluye y no retiene su forma. Para su utilidad se tiene que conseguir enlaces entrecruzados en su estructura que garanticen su forma, con tal de lograrlo existe un proceso llamado vulcanización, calentándolo juntamente con sulfuro.

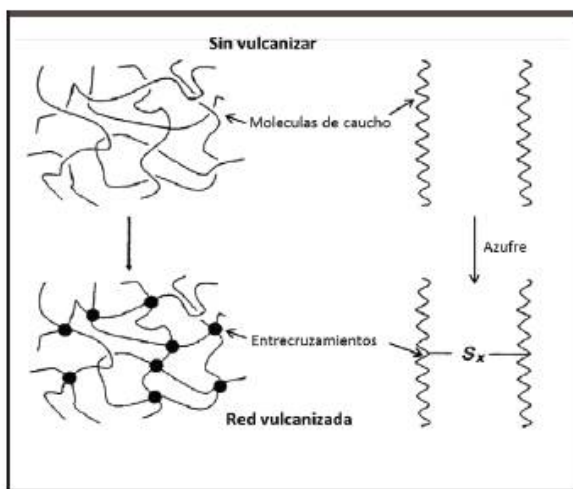


Fig 9 Proceso de vulcanización

La longitud de los enlaces entrecruzados también afecta a las propiedades físicas, unos enlaces más largos aumentan propiedades como la resistencia a la tracción, resistencia a la rotura y fatiga, unos enlaces cortos por el contrario aumentan las propiedades térmicas, estabilizadores oxidativos y mejora la resistencia a compresión. El azufre, los peróxidos, las resinas y los óxidos metálicos se usan típicamente como agentes vulcanizantes. El uso de azufre solo conduce a una reacción lenta, por lo que se agregan aceleradores para aumentar la velocidad de curado, afectando a la tasa de vulcanización, la estructura de enlaces cruzados y las propiedades finales.

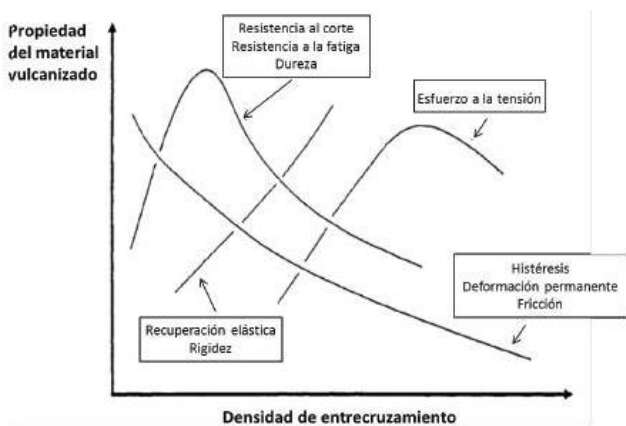


Fig 10 Propiedades según entrecruzamiento.

Una vez tenemos nuestra base de caucho, como elastómero no consigue un aumento de tensión por cristalización, por lo que necesitara para aumentar su capacidad con un refuerzo.

El más usado en la industria del neumático es el negro de carbón, sus propiedades principales son superficiales y estructurales, es el que dota del color negro del neumático. Un tamaño de partícula más pequeño de los refuerzos repartido en una mayor área de la matriz da un efecto mayor de refuerzo. Aumentado el área de superficie aumenta la tensión, la dureza, la resistencia a la abrasión, la resistencia al desgarro, la conductividad eléctrica y la vida a fatiga. Estos efectos con negro de carbón aumentan considerablemente, pero los valores máximos se producen en diferentes niveles. Para la mejora de la estructura durante la fabricación se somete los diferentes agregados a altas temperaturas hasta llevar a la fusión de partículas.

4. Refuerzo de Sílice con alta dispersión.

Rubber Technology Centre of Indian Institute of Technology [10] en su artículo estudia el comportamiento de un compuesto con base de caucho SMR 20 según se va añadiendo sílice, en este se analiza con 0,30,38 y 45 phr de sílice. El sílice actúa como refuerzo, en este caso se trata de nanopartículas agregadas a la mezcla con tal de tener una mayor dispersión, en otros estudios el problema que había era la baja capacidad de procesado y un deterioramiento del comportamiento mecánico. En el caso S0 el refuerzo es con negro de carbón en vez de sílice, en las demás composiciones también se añade un poco de silano como segundo refuerzo a la mezcla. También destacar que se añade en todas las soluciones sin excepción 1,8 phr de sulfuro para la vulcanización.

Ingredientes (phr)	S0	S30	S38	S45
SMR 20	100	100	100	100
ZnO	4	4	4	4
Ácido esteárico	2	2	2	2
Sílice	-	30	38	45
X-50S	-	6	7,6	9
N330	3	-	-	-
Aceite (Bajo PCA)	6	6	6	6
GPPD	1	1	1	1
DPPD	1	1	1	1
MC Cera	2	2	2	2
CBS	1,5	1,5	1,5	1,5
Sulfuro	1,8	1,8	1,8	1,8

Tabla 1 Tabla ingredientes

En los resultados de ensayos de tracción vemos que hay una enorme diferencia entre un refuerzo de negro de carbón y de sílice, todas sus propiedades se ven mejoradas sustancialmente con un refuerzo de sílice respecto a negro de carbón, en varias propiedades tener un refuerzo de más de 38phr parece que se vuelve contraproducente, así que podría ser la mejor solución ante un desarrollo de un neumático, y la que replicaremos el ensayo mediante simulaciones.

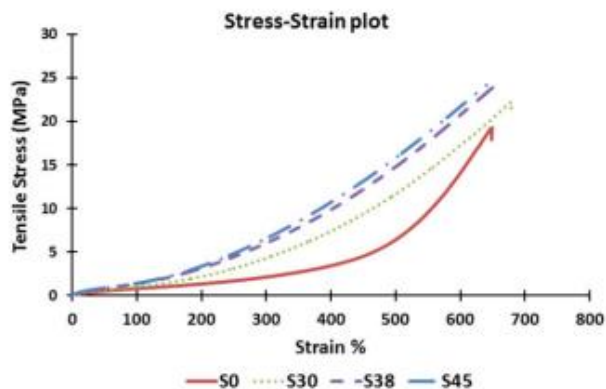


Fig 11 Resultados ensayo de tracción.

5. Condiciones de simulación de ensayo

Para el análisis de las diferentes composiciones de materiales con base caucho, simulamos un ensayo de tracción, que viene definida por la norma *ISO 37:2013*.

En ella se estipula dos tipos diferentes de probetas, las de anillo y las de halterio, en nuestro caso utilizaremos diferentes probetas de halterio normalizadas para el ensayo de tracción debido que nos dan un resultado más preciso según la misma normativa, en concreto de tipo 1 y de tipo 2. Según la normativa, la velocidad de la mordaza superior será constante y de 8,33 mm/s.

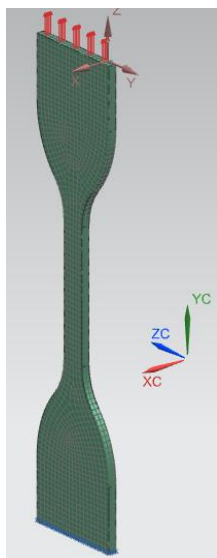


Fig 12 Simulación ensayo probeta tipo1.

Esta simulación esta hecha con el programa *Siemens NX*, esto es debido a su fácil implementación, y por utilizar el solver *Nastran* que nos permite extraer datos a *Femap* para su postprocesado. La simulación usa un mallado hexagonal con 20 nodos, nos proporciona una buena sensibilidad a la vez que el mallado se adapta a nuestra pieza. Para la configuración del material hemos tenido que coger propiedades de la base de caucho vulcanizado extraído de la base de datos *MatWeb*.

6. Resultados

El alargamiento a rotura encaja con los datos extraídos, como contrapartida tenemos la tensión máxima y el módulo de Young nos ha variado en función de la densidad implementada a partir de la base de datos de *MatWeb*, el coeficiente de poisson y la sensibilidad de la probeta.

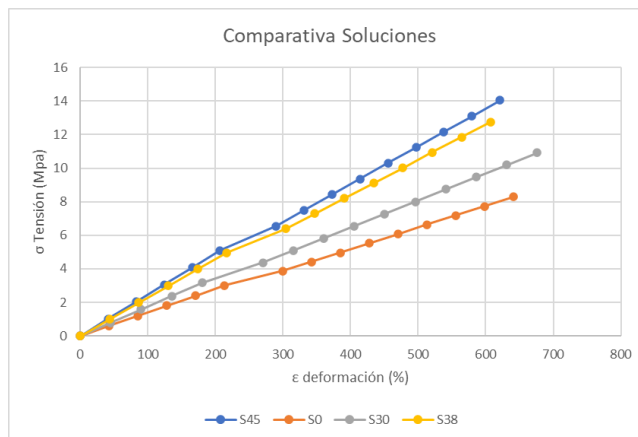


Fig 13 Resultados simulación.

Observando la comparativa entre diferentes soluciones vemos que existe un aumento de propiedades mecánicas según se va aumentando la proporción de sílice. A pesar de que los resultados no sean favorables respecto a los valores en que se basa este estudio, la relación entre el aumento de sílice de los valores obtenidos respecto a los valores del estudio del que se basa presentan la misma proporción.

7. Conclusiones

Un neumático durante su uso común está sometido a varios esfuerzos a la vez, estos condicionan una pérdida de energía muy grande en forma de calor, llamado resistencia a la rodadura. Una de las maneras de solventarlo es mejorando el material de la banda de rodadura. Con un mejor refuerzo en una base de caucho se consigue una gran mejora de la resistencia a la rodadura, substituir el típico refuerzo de negro de carbón por sílice parece ser una gran aproximación a esa mejora que ansiamos. Esto conllevará, mejor rendimiento del vehículo, menor contaminación y un producto más atractivo comercialmente.

Para caracterizar un material una de las pruebas más extendidas y con un carácter comparativo es el ensayo de tracción, en este trabajo se ha realizado unas simulaciones con el objetivo de analizar el comportamiento de sílice como refuerzo, en los resultados que hemos obtenido en las simulaciones de ensayos de tracción no han sido del todo satisfactorias, solo podemos dar por valido la comparativa entre las diferentes soluciones, vemos que existe un aumento del módulo de elástico entre ellas y sin generar una zona plástica o una rotura prematura, lo que nos podrá permitir tener un mayor rendimiento trabajando elásticamente. Esto concuerda con varios de los estudios vistos anteriormente, un aumento de sílice aporta una

mejora considerable de sus propiedades mecánicas, viendo la *figura 13* podemos ver que entre S38 y S45 no existe tanta diferenciación entre los resultados, por este motivo concluimos que una mayor proporción de sílice con un phr mayor a 45 podría ser contraproducente, y que por ello habría que buscar otra solución para mejorar las propiedades mecánicas que buscamos.

inicialmente este trabajo fue concebido con la intención de hacer pruebas físicas, debido a la pandemia del COVID-19 mientras se desarrollaba el proyecto se tuvo que optar en solo trabajar con simulaciones. Como se ha indicado anteriormente los resultados a pesar de no ser los que queríamos siguen el mismo orden y magnitud de los que deseamos, eso indica que la metodología y proceso de las simulaciones son correctas, el principal problema se trata en la falta de parámetros de configuración del material, que ha obligado a extrapolar con datos de caucho natural sacados de Matweb. Muestra de ello son los resultados de S0, que son los que menos error relativo tienen, y si añadiéramos más refuerzos los resultados estarían aún más.

Con tal de solventar este problema sería adecuado hacer ensayos reales y generar una base de datos propia, una base de datos precisa conjuntamente con herramientas de simulación podría ahorrar dinero en materia prima y predecir resultados fiables.

Otra ventaja de hacer ensayos físicos sería el de poder ensayar con diferentes temperaturas, debido la importancia que tiene la temperatura en un neumático, utilizando una cámara climática podemos controlar la temperatura de nuestras probetas proporcionando un buen ensayo.

8. Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutora Marta Musté Rodríguez, quien con sus conocimientos y apoyo me guió a través de cada una de las etapas de este trabajo para alcanzar los resultados que buscaba.

En un principio este trabajo iba a ser desarrollado utilizando el laboratorio de la empresa donde trabajo, Germans Boada. Igualmente quisiera agradecer ofrecerme todos los recursos y herramientas, e flexibilizarse atendiendo mis estudios. Además, durante el planteamiento de los ensayos en laboratorio contacté con la empresa Hexpol para el desarrollo de probetas de ensayo, a pesar de no poderlo llevar a cabo me ofrecieron información valiosa, así que también quisiera agradecer el apoyo de Hexpol, que no hubiese podido llegar a estos resultados de no haber sido por su incondicional ayuda.

Por último, quiero agradecer a todos mis compañeros de la universidad, profesores, a mi pareja y a mi familia, por apoyarme aun cuando mis ánimos decaían. En especial, quiero hacer mención de mi familia, que siempre estuvieron ahí para darme palabras de apoyo y un abrazo reconfortante para renovar energías.

Referencias

[1] Bandivadekar, A., K. Bodek, L. Cheah, C. Evans, T. Groode, J. Heywood, E. Kasseris, M. Kromer and M. Weiss. 2008, On The Road in 2035: Reducing Transportation's Petroleum Consumption and GHG Emissions. MIT Laboratory for Energy and the Environment, Report No. LFEE 2008-05 RP, Cambridge, Massachusetts.

[2] J. M. Laza, L. Pérez, L. Ruiz, OCW, Estado elástico, Propiedades de los polímeros en estado sólido, 2014.

[3] F.Lia, F.Liub, J. Liua, Y.Gaoa, Y.Lub, J.Chena, H.Yangb, L.Zhanga, State Key Laboratory of Organic-Inorganic Composites, Beijing University of Chemical Technology, Beijing, Thermo-mechanical coupling analysis of transient temperature and rolling resistance for solid rubber tire: Numerical simulation and experimental verification, Agosto 25, 2018.

[4] P. Cao, C. Zhou, F. Jin, D. Feng, X. Fan, "Tire-Pavement Contact Stress with 3D Finite-Element Model: Part 1: Semi-Steel Radial Tires on Light Vehicles," Journal of Testing and Evaluation, Marzo 2016.

[5] Zhou, Haichao, et al. "Effect of friction model and tire maneuvering on tire-pavement contact stress." Advances in Materials Science and Engineering, 2015.

[6] Ronald J. Schaefer, American Society for Testing and Materials, Mechanical properties of rubber.

[7] M.F.Sheridan, R.T. Vanderbilt Company, The structure of rubber.

[8] D.W.Chasar, Robert W, Noveon,Inc, Basic Rubber Compounding.

[9] J.Jin, J.W. M. Noordermeer, W.K. Dierkes, A.Blume, Elastomer Technology and Engineering, Department of Mechanics of Solids, Surfaces and Systems (MS3), Hankooktire co, The Effect of Silanization Temperature and Time on the Marching Modulus of Silica-Filled Tire Tread Compounds, Enero 15 2020.

[10] S.Bhattacharyya, V.Lodha, S.Dasgupta, R.Mukhopadhyay, A.Guha, P.Sarkar, T.Saha, Anil K. Bhowmick, Rubber Technology Centre, Indian Institute of Technology, Kharagpur, India, Influence of highly dispersible silica filler on the physical properties, tearing energy, and abrasion resistance of tire tread compound, Enero 6 2019.