

Nanotubos de carbono, el futuro en los compuestos de caucho

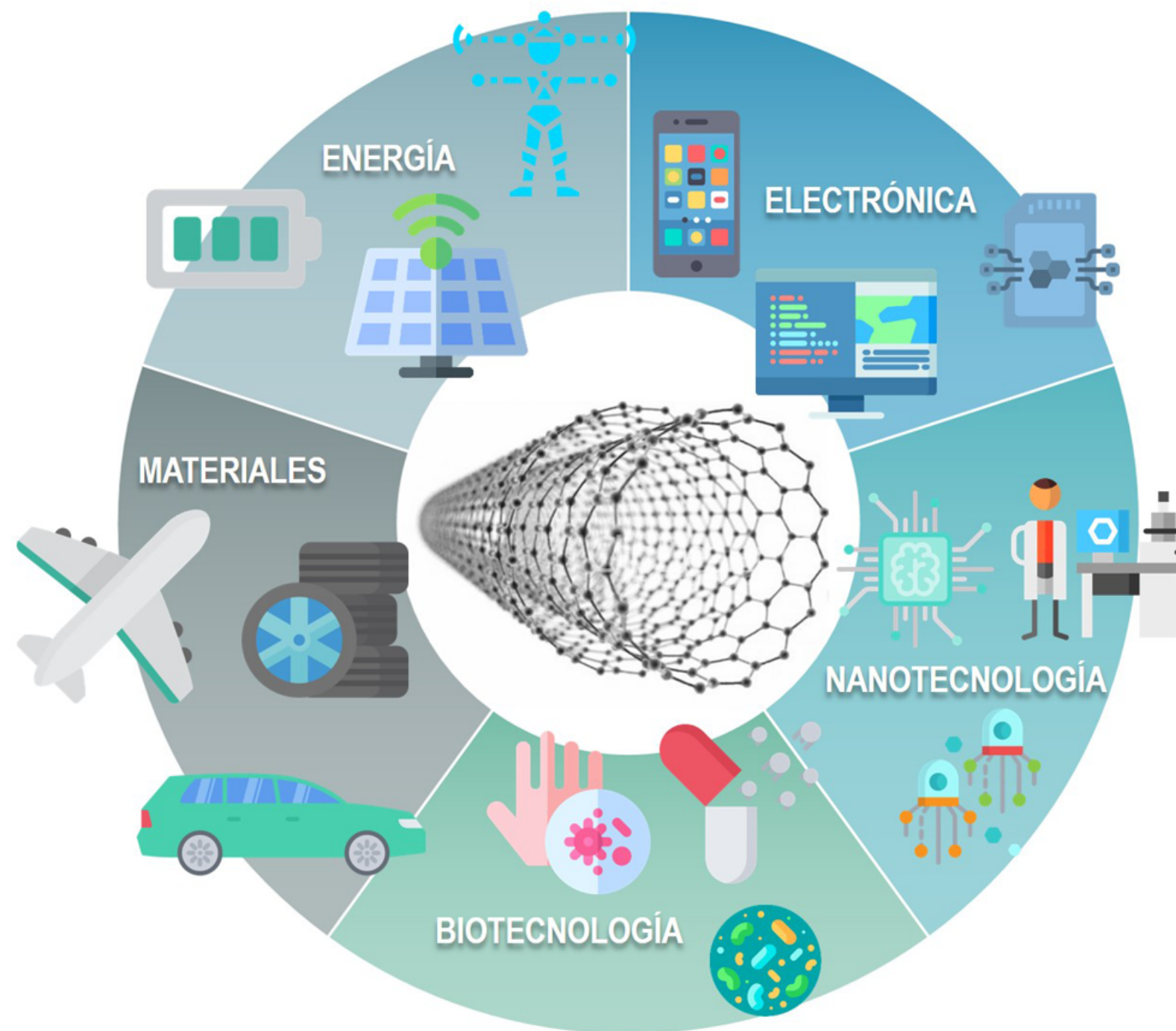
Autores: Pilar Bernal-Ortega*, M. Mar Bernal, Rodrigo Navarro, Juan López Valentín

Grupo de Elastómeros. Departamento de Física de Polímeros, Elastómeros y Aplicaciones Energéticas

Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros (CSIC)

C/ Juan de la Cierva, 3. 28006 Madrid, España

* piberor@ictp.csic.es



Resumen

Los nanotubos de carbono son nanopartículas con propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas excepcionales que tienen aplicaciones reales como cargas reforzantes en los materiales elastoméricos, dando lugar a una nue-

va generación de materiales compuestos. En los compuestos de caucho, el uso de nanotubos de carbono en vez de las cargas tradicionales, como el negro de carbono y la sílice, presenta ventajas importantes ya que con relativamente pequeñas cantidades de estas nanopartículas las características de los com-

puestos de caucho se mejoran significativamente. Además, su superficie se puede fácilmente modificar para facilitar la formación de la red carga-polímero, no sólo para mejorar las conocidas propiedades de los compuestos de caucho sino también para conferirle otras nuevas. Por tanto, el uso de nanotubos de

carbono en los compuestos de caucho abre nuevas oportunidades en las aplicaciones actuales e incluso en otras aún sin explorar.

Palabras clave: nanotubos de carbono, caucho, compuestos, reforzamiento.

Abstract

Carbon nanotubes are nanoparticles with exceptional mechanical, electrical and thermal properties that find real applications as reinforcing fillers in elastomeric materials, leading to a new generation of composite materials. In rubber compounds, the use of carbon nanotubes instead of traditional fillers, such as carbon black or silica, presents important advantages since with relatively low loading of these nanoparticles the performance of rubber composites is greatly enhanced. Furthermore, their surface can be easily modified to facilitate the formation of a filler-polymer network, not only to improve the well-known properties of rubber compounds but also to confer new ones. Hence, the use of carbon nanotubes in rubber compounds opens new opportunities in actual applications and even in unexplored ones.

Keywords: carbon nanotubes, rubber, composites, reinforcement.

Introducción

Los materiales elastoméricos son fundamentales para el desarrollo industrial y tecnológico de nuestra sociedad. En concreto, los elastómeros como el caucho natural y sintético son de indiscutible importancia, a pesar de que su uso no sea perceptible a simple vista. Los cauchos son materiales tan versátiles que encuentran múltiples aplicaciones en diversos ámbitos, desde mangueras a cables eléctricos e incluso materiales deportivos, siendo la más importante en la fabricación de los neumáticos, donde han revolucionado la industria del transporte. En la **Figura 1** se puede observar claramente como la demanda global de neumáticos, en este caso para turismos y vehículos comerciales, presenta un aumento progresivo, confirmado la importancia de los cauchos, en este caso el caucho natural (NR, *natural rubber*) y de los cauchos sintéticos estireno butadieno (SBR, *styrene butadiene rubber*), butadieno (BR, *butadiene rubber*) e isobuteno isopreno (IIR, *isobutyl isoprene rubber*).

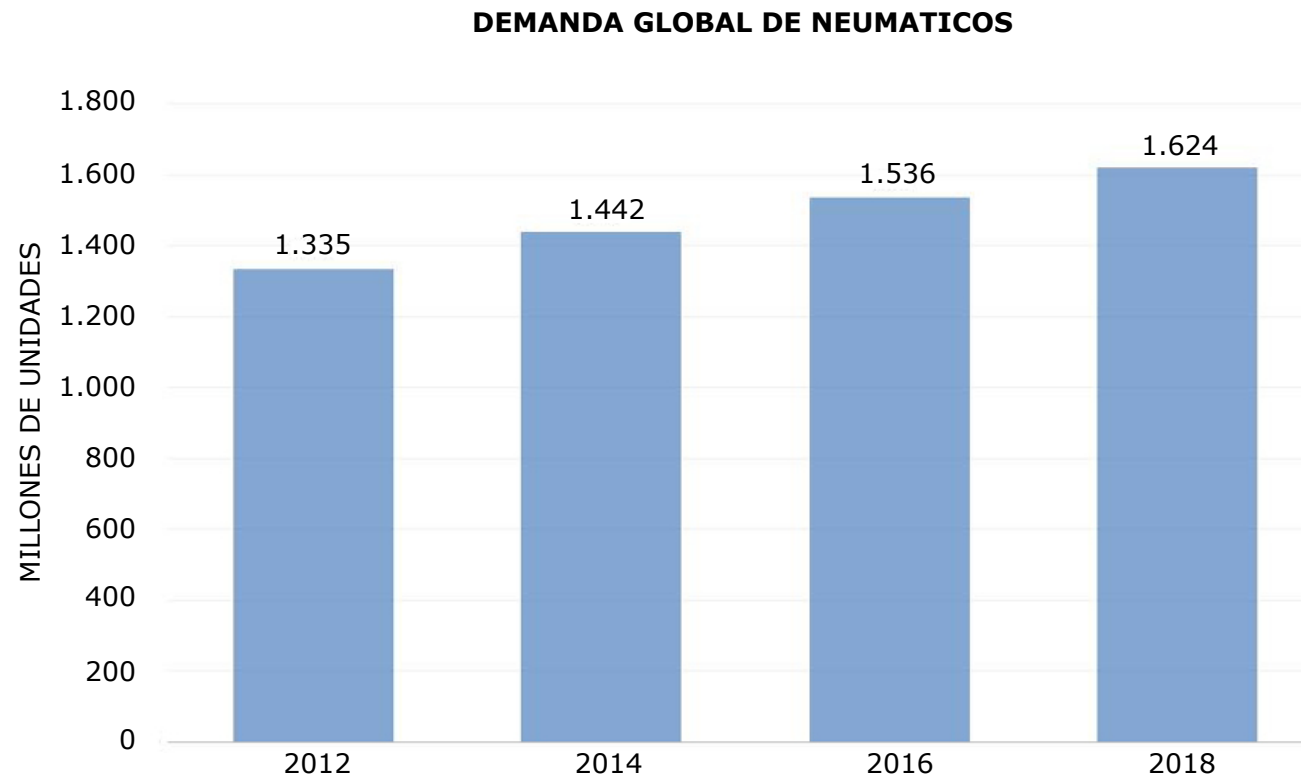


Figura 1. Demanda global de neumáticos para coches y vehículos comerciales ligeros de 2012 a 2018 (en millones de unidades).

En general, los cauchos son materiales elastoméricos, es decir, polímeros amorfos de naturaleza viscoelástica que se caracterizan por su bajo módulo elástico, resistencia al agua, así como a los compuestos alcalinos y ácidos débiles, siendo además buenos aislantes eléctricos. Para conseguir todas estas óptimas propiedades los cauchos deben vulcanizarse, es decir, se deben crear enlaces químicos y físicos entre las moléculas de caucho, que darán lugar a una red tridimensional confiriendo a estos materiales unas características únicas. Sin embargo, no todas las propiedades de los cauchos provienen solo de los entrecruzamientos entre moléculas. En el caso de los compuestos de cauchos sintéticos, al contrario de los compuestos con caucho natural, las propiedades mecánicas son muy pobres

no teniendo prácticamente ningún uso comercial [1-2].

El reforzamiento del caucho es, por tanto, fundamental para conseguir todas las características técnicas requeridas en función del uso final, siendo las más importantes las relacionadas con la fuerza y la durabilidad de estos materiales. Por este motivo, el uso de cargas reforzantes tradicionales, como el negro de carbono, las inorgánicas (sílice, carbonato de calcio, alúmina...) o las de origen natural (celulosa, madera...), juegan un papel importante en la obtención de compuestos de caucho altamente reforzados [2]. El efecto reforzante de estas cargas dentro de la matriz elastomérica se atribuye a dos efectos: i) la formación de una red física debido a las interacciones carga-carga y ii) las fuertes interac-

ciones carga-polímero [3]. En cualquier caso, el tipo de carga reforzante para cada aplicación específica debe seleccionarse en función de los requisitos del uso final del compuesto.

El negro de carbono, o negro de humo, ha sido la carga reforzante más importante en la industria del caucho desde que fue descubierta como carga activa por Mote en 1904. La mayoría de los productos de caucho que se producen contienen negro de carbono, siendo generalmente la cantidad introducida de al menos 50 partes de negro de carbono por cien partes de caucho (50 phr) [4]. El reforzamiento del caucho con negro de humo implica un aumento en el polímero de la resistencia a la abrasión, a rotura y a otros tipos de esfuerzos, además de un aumento de la dureza, del módulo elástico, así como de otras propiedades viscoelásticas. Cabe destacar que el área superficial y la estructura, del negro de carbono juega un papel importante en el reforzamiento del caucho. El grado de interacción de la superficie del negro de carbono con el polímero depende principalmente de la orientación de las capas grafiticas en la superficie de la carga. Por tanto, mayor interacción de la carga con el elastómero se traduce, en la mayoría de los casos, en un aumento de la fuerza y un mayor módulo a bajas deformaciones. En el caso particular de la industria del neumático, la elección del negro de carbono que se utiliza en los diferentes compuestos depende de la función final de los mismos. Por ejemplo, en los compuestos de caucho que se emplean en la banda de rodadura (**Figura 2**), se añade negro de carbono con una elevada área superficial ya que implica una mejora notable en la resistencia a la abrasión. Sin embargo, en los compuestos que forman parte de la carcasa se usan los de baja área superficial, con menor estructura, para conseguir una mejor resistencia a la fatiga, debido a que los agregados de negro de carbono no se orientan en la dirección de estiramiento (**Figura 2**) [2, 4].

La sílice es, dentro de las cargas inorgánicas, la más usada debido a su elevada capacidad de reforzamiento del caucho. Las sílices altamente activas se usaban en los años 40 para complementar al negro de carbono. Sin

embargo, durante mucho tiempo esta carga inorgánica cayó en desuso debido a razones tecnológicas. Esto es debido a que, a pesar de poseer un área superficial y una estructura similar a la del negro de carbono, la interacción polímero-sílice es menor debido a su alta polaridad lo que le confiere una mayor tendencia a formar aglomerados. El resultado es una difícil procesabilidad del material que, junto con la baja conductividad eléctrica de la sílice y su coste como materia prima, frenaron la evolución de esta carga en la industria del caucho. No fue hasta principios de la década de los 90, cuando Michelin introdujo las cargas de sílice en combinación con un silano como agente de acoplamiento. Por tanto, el proceso de silanización de la sílice (**Figura 3**) revolucionó las propiedades reforzantes de esta carga en los materiales de caucho sin consecuencias negativas en las propiedades mecánicas de estos elastómeros. Además, en algunos casos, cuando la sílice se combina con este agente de acoplamiento posee características superiores a las del negro de carbono ya que confiere un efecto reforzante más fuerte con un menor contenido de carga en el caucho, sin afectar negativamente las propiedades mecánicas. Además, los enlaces químicos entre la sílice y el caucho dan lugar a una red sílice-caucho más estable y, por tanto, durante deformaciones cíclicas da lugar a un menor grado de rotura y la reformación de la red sílice-elastómero.

En los últimos años, se ha observado que existe un tercer factor que influye en el grado de refuerzo de las cargas y que depende fuertemente de la forma y dimensión de las partículas. Menor tamaño de partícula, entre 10 - 100 nm, implica una mayor área superficial lo que significa un aumento de los puntos de contacto entre las cargas y el polímero y, por tanto, incrementando la interacción carga-polímero [1]. Esto conduce a una gran ventaja de las nanopartículas respecto a las microcargas, la posibilidad de obtener propiedades similares e incluso mejores con una cantidad de carga en el caucho muy inferior. Por ejemplo, las cantidades de negro de carbono y sílice en los neumáticos para obtener las propiedades reforzantes deseadas llegan

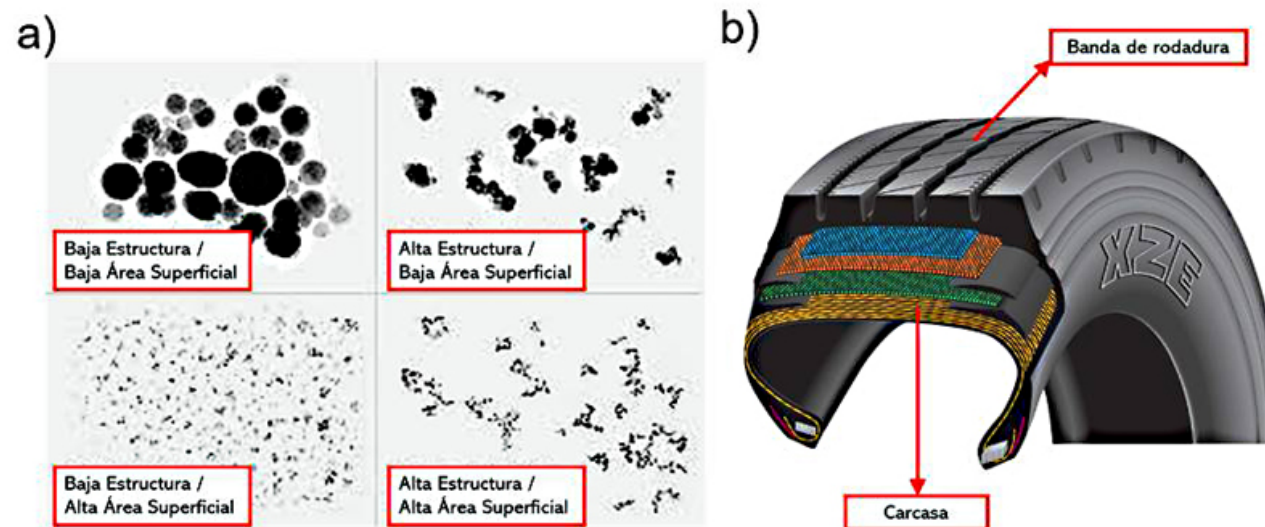


Figura 2. a) Morfología de las diferentes estructuras/áreas superficiales del negro de carbono. b) Sección de un neumático.

a valores del 80 - 90 % en peso, mientras que con algunas nanopartículas se pueden conseguir con sólo 10 - 20 % o incluso menos. Esto mejora de una manera muy significativa la procesabilidad de los compuestos de caucho, lo que se traduce en un ahorro de energía y costes.

Nanotubos de Carbono

En 1991, durante el estudio de la síntesis de fullerenos mediante el método de descarga de arco en fase vapor, *Ijima* identificó la estructura de los nanotubos de carbono (CNT, del inglés *Carbon Nanotubes*) en el extremo ne-

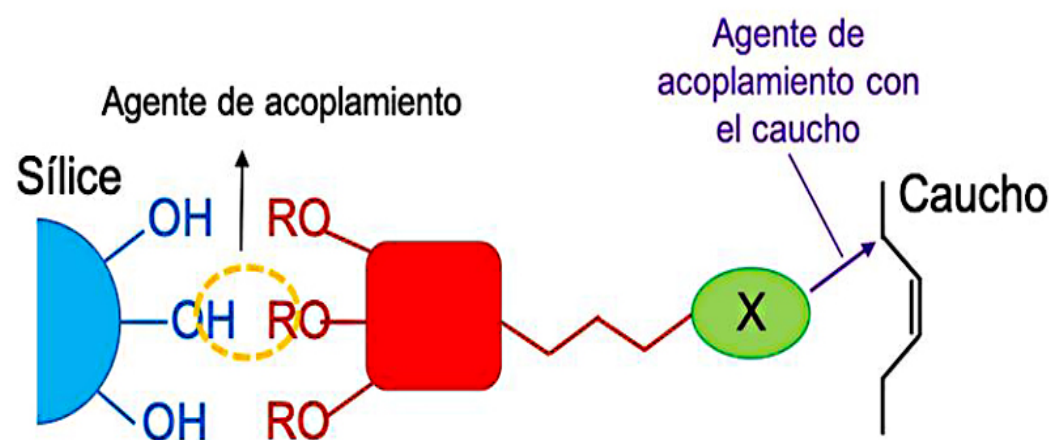


Figura 3. Reforzamiento del caucho mediante silanización de la sílice.

gativo del electrodo. Desde entonces, el descubrimiento de estas nuevas estructuras ha generado un gran interés, tanto a nivel científico como industrial, que se ha visto reflejado en muchos estudios centrados en la síntesis, estructura, propiedades y aplicaciones de estas partículas [5-7]. Esto queda reflejado en el gran incremento de publicaciones científicas desde su descubrimiento hasta la actualidad (**Figura 4**).

Los CNT son alótropos de carbono con una estructura única que consiste en átomos de carbono unidos covalentemente formando cilindros de diferentes diámetros. Su estructura es equivalente a si se enrollara sobre sí misma una lámina de grafeno. Dependiendo del número de cilindros se pueden clasificar en dos tipos principalmente: nanotubos de carbono de pared simple (SWCNT, del inglés *Single Wall Carbon Nanotubes*) formados por una única lámina de grafeno; y nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT, *Multi Wall Carbon Nanotubes*) que consisten en varios cilindros concéntricos que se mantienen unidos por fuerzas de van der Waals (**Figura 5**) [5-7].

Los SWCNT asimismo pueden clasificarse dependiendo de la geometría de los enlaces de carbono alrededor de la circunferencia del tubo. Siendo n y m el número de vectores a lo largo de las dos direcciones de la lámina cristalina de grafeno, los nanotubos se clasifican en nanotubos con estructura de zigzag cuando $m=0$, nanotubos con estructura de silla cuando $n=m$ y en todas las demás posibilidades se denominan nanotubos quirales. Dependiendo de estos vectores, los nanotubos de pared simple muestran diferencias en sus propiedades ópticas, eléctricas y mecánicas [5-7].

De entre los MWCNT, destaca el caso de los nanotubos de pared doble (DWCNT, "*Double Wall Carbon Nanotubes*"), ya que poseen propiedades similares a los SWCNT debido a su morfología, pero con una mayor resistencia a productos químicos. Los nanotubos de carbono de pared múltiple son los más empleados e investigados debido a su alta estabilidad y su facilidad de preparación en masa en com-

paración a los nanotubos de pared simple. La obtención de estos últimos sigue siendo un reto abierto debido a la dificultad de controlar la estructura de un único tubo y a su elevado precio.

Existen diferentes métodos para la obtención de nanotubos de carbono, como por ejemplo métodos electroquímicos o de descomposición catalítica, pero los tres métodos principales de preparación son la deposición catalítica en fase vapor (CVD), la ablación láser y la descarga de arco. El CVD es el procedimiento más empleado ya que se obtiene un mayor rendimiento y es el más económico. La ablación láser es usada principalmente para la obtención de nanotubos de pared simple, pero es un proceso de elevado coste.

En el método CVD dos gases, un gas que contenga carbono (acetileno, etileno o metano) y un gas procesador (NH_3 , N_2 o H_2), pasan a través de una cámara en donde el gas que contiene carbono se "rompe" y el carbono molecular se deposita en la forma de CNT. Los nanotubos se depositan en los extremos de las partículas metálicas del catalizador empleado (Ni, Co, Fe o una combinación de los dos) que actúan como sustrato. Se puede emplear un catalizador adicional (MgO o Al_2O_3) para incrementar el área superficial de las partículas. En el procedimiento de **ablación láser**, un láser pulsado es utilizado para vaporizar grafito. Cuando esto ocurre, el carbono vaporizado condensa y los CNT son recolectados en una parte del reactor en la cual la temperatura es menor. El método de **descarga de arco** es muy similar a la ablación láser. Consiste en el consumo de un ánodo de grafito, causado por un arco con una corriente de 100 amperios. Los CNT son depositados en el cátodo debido a las altas temperaturas empleadas [5-7].

Sus excepcionales propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas, su elevada relación de aspecto, baja densidad y gran flexibilidad hacen de los nanotubos de carbono un material muy atractivo en diferentes campos de aplicación. Los CNT se usan en una gran variedad de aplicaciones como baterías recargables, sensores, piezas de automóviles y barcos,

equipamiento deportivo, filtros de agua, etc (**Figura 6**). En todas estas aplicaciones, los CNT se aplican en forma de película donde las partículas se encuentran desordenadas, ya que actualmente una de las grandes limitaciones de estas partículas es la dificultad de la fabricación de dispositivos en los que los CNT se encuentren de forma alineada y orde-

nada. La alineación y ordenación de los CNT es un tema que despierta un gran interés ya que las propiedades mecánicas, térmicas, y eléctricas de estas macro estructuras de CNT son muy inferiores a las de los CNT individuales [7-9].

La introducción de los nanotubos de carbono en matrices poliméricas para mejorar las pro-

piedades mecánicas, eléctricas y térmicas de las mismas, es una de sus aplicaciones más prometedoras. Especialmente, sus excelentes propiedades mecánicas hacen de los CNT un candidato ideal para sustituir o complementar a las cargas convencionales usadas como refuerzo en estos materiales. Estas extraordinarias propiedades mecánicas que presentan

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS

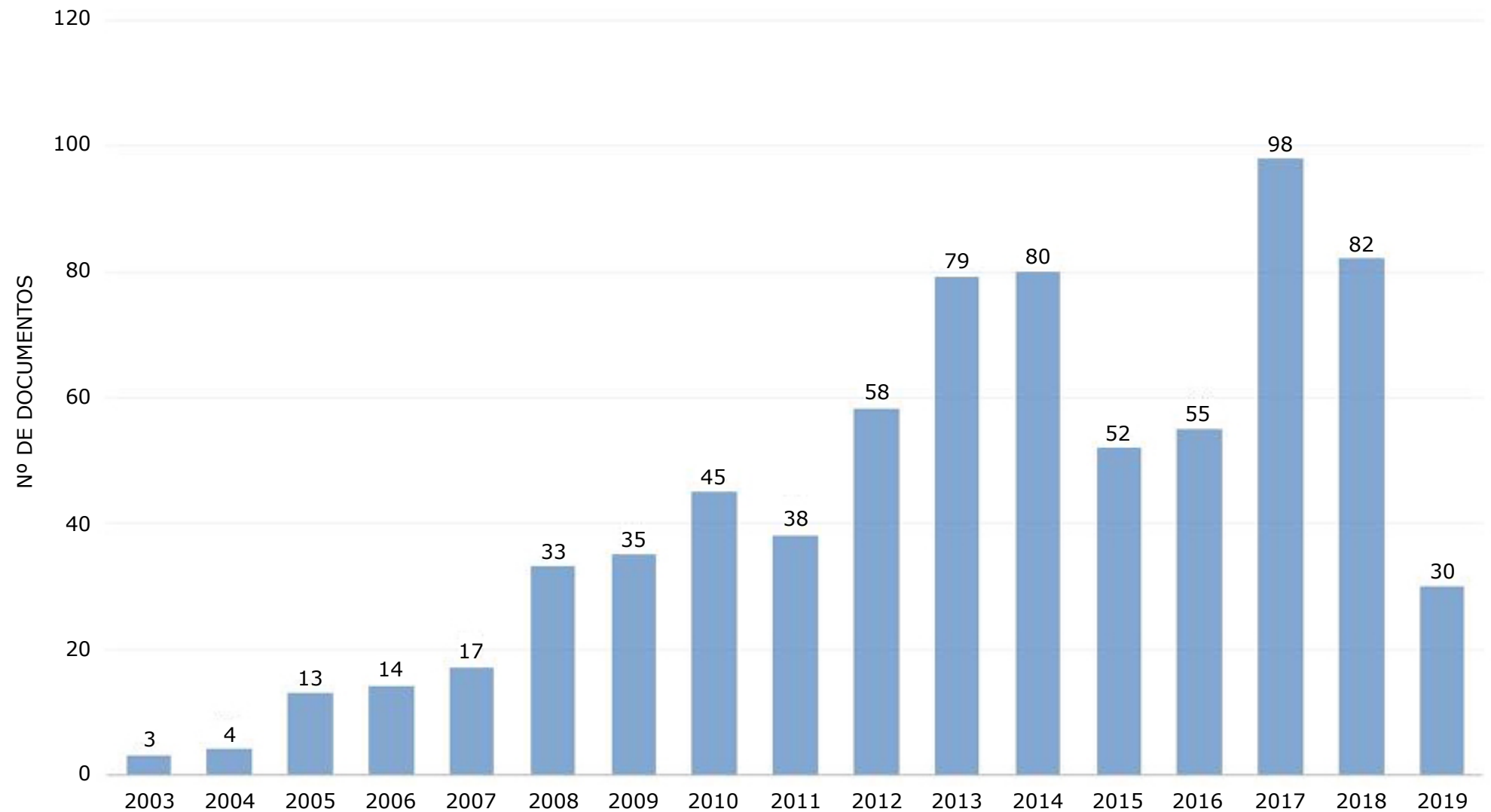


Figura 4. Número de publicaciones científicas sobre CNT desde 2003 hasta la actualidad.

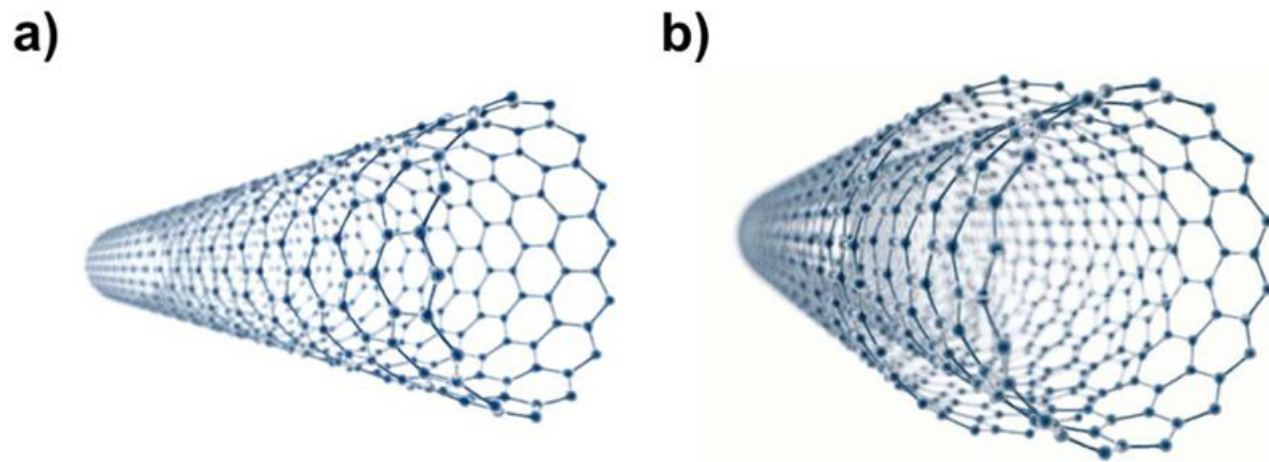


Figura 5. Ilustración de la estructura de a) SWCNT y b) MWCNT.

los nanotubos están principalmente debidas a las fuerzas inherentes de la estructura molecular de los CNT, es decir, las fuertes uniones entre capas carbono-carbono (enteramente uniones sp^2) donde están presentes uniones σ e uniones π . Sin embargo, uno de los mayores problemas que presentan estas nanopartículas es su dificultad de dispersión, ya que debido a fuerzas de van der Waals y su elevada relación de aspecto, los CNT tienden a aglomerarse, como se observa en la **Figura 7**, en las imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM) de MWCNT. En la primera imagen podemos ver la estructura de los tubos, y en la segunda se observa como estos tienden a unirse unos a otros, formando aglomerados. Por este motivo, es muy habitual que los nanotubos se modifiquen químicamente antes de añadirse a una matriz polimérica [5,10].

Compuestos de caucho basados en nanotubos de carbono. Propiedades

Como se ha comentado previamente, en el campo de los elastómeros con el fin de alcanzar los requisitos de la aplicación final del compuesto, se incorporan diferentes cargas a la matriz. Estas cargas pueden utilizarse para mejorar el procesado, reforzar la matriz o in-

cluso para abaratar los costes de producción. Los elastómeros se han reforzado durante muchos años con cargas como negro de carbono o sílice. El principal problema de estas cargas, es que, para alcanzar las propiedades reforzantes deseadas, es necesario añadir grandes cantidades de las mismas, generando así un aumento de peso del producto final. Por este motivo, en la actualidad han ganado un gran interés las denominadas nanopartículas, como por ejemplo el grafeno, nanoarcillas o las nanofibras de carbono, debido a su reducido tamaño y su correspondiente aumento en el área superficial. El objetivo de usar estas nanopartículas es crear nuevos materiales con propiedades superiores. En comparación con las cargas convencionales, las nanocargas reforzantes presentan una serie de ventajas:

- Los nanomateriales proporcionan un efecto reforzante más eficiente porque una fracción muy pequeña de estas partículas causa una mejora significativa en las propiedades de la matriz, llevando a la obtención de compuestos de bajo peso, más económicos y más fáciles de procesar.
- La transferencia de las propiedades de la carga a la matriz es más eficiente debido

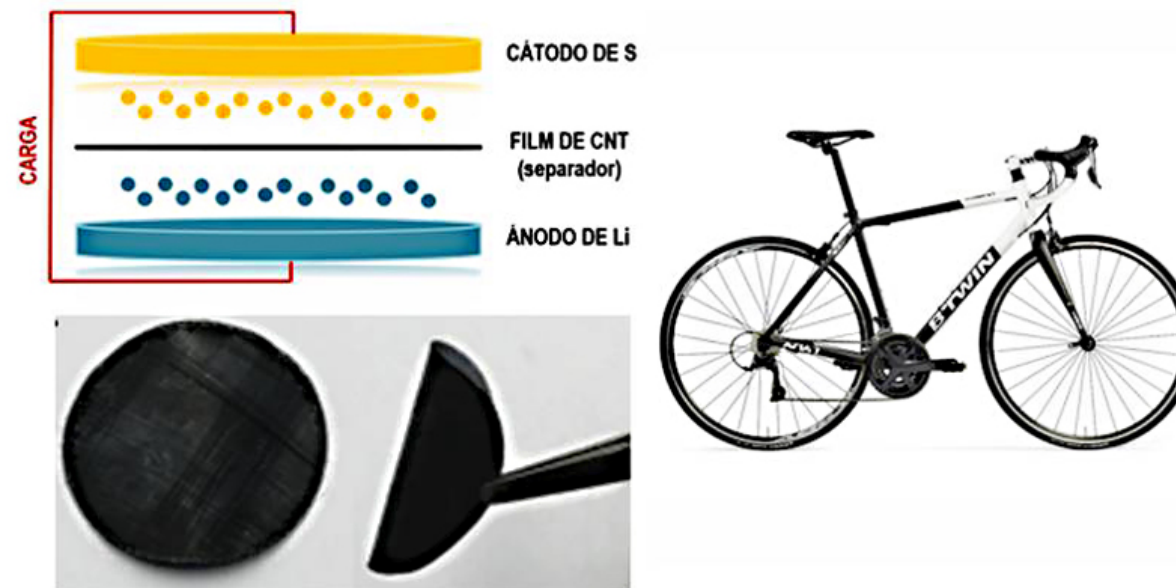


Figura 6. Aplicaciones de los nanotubos de carbono.

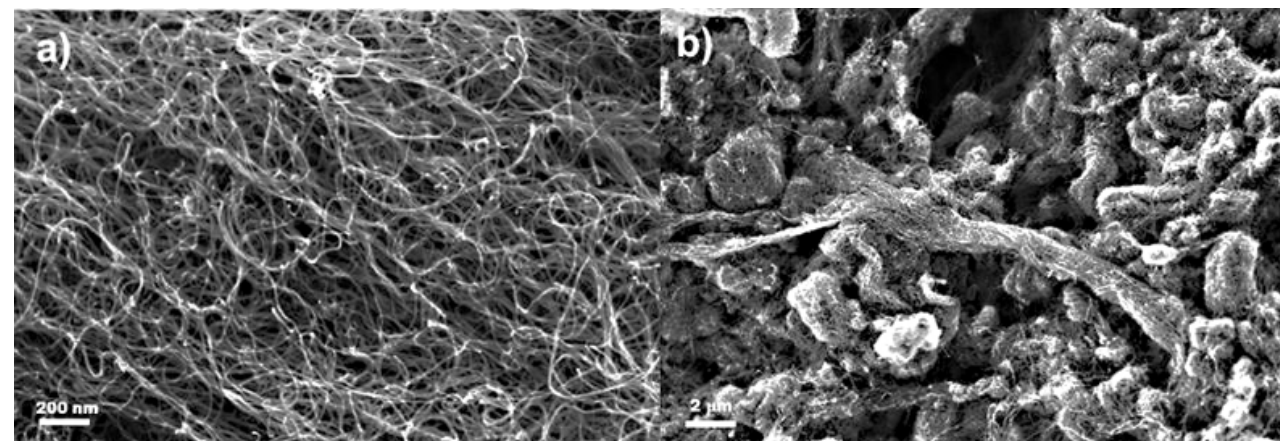


Figura 7. Imágenes SEM de a) estructura de los CNT y b) aglomerados de CNT.

a su mayor área superficial, generando mejores interacciones con la matriz.

De entre estas nanocargas destacan especialmente los CNT. Sus excelentes propiedades mecánicas combinadas con su baja densidad, hacen de los nanotubos de carbono una carga

ideal en el campo de los compuestos de caucho, especialmente en aplicaciones donde se requieren excelentes propiedades mecánicas y bajo peso, como el desarrollo de neumáticos. La incorporación de nanotubos de carbono en una matriz polimérica tiene un gran impacto en las propiedades de la misma. Se

producen grandes cambios en propiedades como el esfuerzo a tracción, la elongación a rotura, las propiedades eléctricas, la dureza o las propiedades dinámicas del material [1,11].

Propiedades mecánicas

El refuerzo de materiales elastoméricos por adición de cargas minerales representa uno de los aspectos más importantes en el campo de la ciencia y la tecnología del caucho. Habitualmente, para obtener un gran reforzamiento con las cargas convencionales, es necesario que estén presentes en la matriz en una elevada concentración. El reforzamiento de las matrices elastoméricas por adición de cargas es causado por diferentes contribuciones: el efecto hidrodinámico que se tiene de la introducción de partículas rígidas en una matriz blanda, la anisometría de las partículas y de los agregados y por el denominado "caucho ocluido", que son fracciones de caucho que quedan atrapadas entre agregados de partículas de carga y por la red de carga que se forma cuando se añade una gran cantidad de partículas a la matriz. Las cargas convencionales como el negro de carbono o la sílice, cuando son introducidas en matrices elastoméricas causan un incremento del módulo, causado por todos estos efectos. Debido al elevado módulo que presentan los nanotubos de carbono, se espera que tengan un efecto reforzante mucho mayor que las cargas convencionales. Se han reportado mejoras significativas en las propiedades mecánicas de matrices elastoméricas por adición de CNT [12-17]. En la **Tabla 1** se muestran las propiedades mecánicas de diferentes compuestos de caucho SBR (caucho empleado para la fabricación de neumáticos) cargados con CNT y con cargas convencionales (CB y Si). En los resultados mostrados se observa como con solo 10 partes por cien de caucho (pcc) de nanotubos, se alcanzan valores similares en el módulo al 100% y al 300% de esfuerzo que los alcanzados empleando 55 pcc de negro de carbono y 80 pcc de sílice. En el caso del esfuerzo a rotura se observa de igual modo como aumenta con la adición de nanotubos, aunque no se llegan a alcanzar los

Tabla 1. Propiedades mecánicas de compuestos de caucho SBR.				
Propiedades mecánicas de SBR y de compuestos de SBR				
Concentración de carga (pcc*)	Módulo al 100% (MPa)	Módulo al 300% (MPa)	Esfuerzo a rotura (MPa)	Deformación máxima (%)
0	0.736	1.354	2.052	420.520
5 CNT	2.411	5.265	5.723	335.149
10 CNT	3.826	8.198	8.474	308.494
55 CB	4.136	-	12.831	276.507
80 Si	2.512	12.679	16.359	308.490
*pcc= partes por cien de caucho				

valores obtenidos con las cargas convencionales, quizá por la pobre interacción entre los CNT y la matriz. En el caso de la deformación máxima alcanzada puede observarse como los compuestos cargados con CNT alcanzan valores superiores.

Las mejoras en las propiedades mecánicas de los compuestos se observan también mediante la medida de las propiedades dinámicas de los mismos con incrementos de los módulos de pérdida y de almacenamiento [12-17].

Propiedades eléctricas

Además de mejorar las propiedades mecánicas de los cauchos, estos también tienen un impacto en las propiedades eléctricas de los mismos. La mayoría de los elastómeros son materiales aislantes. Con la adición de cargas de carbono, como por ejemplo el negro de humo, grafeno o nanotubos de carbono, que son eléctricamente conductoras, la matriz experimenta un aumento en conductividad. Del mismo modo que con las propiedades mecánicas, la conductividad eléctrica está fuertemente influenciada por la cantidad de partículas, su morfología y su dispersión en la matriz. En muchas de las aplicaciones como por ejemplo los neumáticos, la conductividad eléctrica es necesaria para disipar cargas electrostáticas. Existe una fracción volumétrica crítica, denominada límite de percolación

a partir de la cual las partículas conductoras forman una red de carga interconectada (**Figura 8**) [18-21].

En el caso de los CNT, esta red de carga se forma a concentraciones muy bajas de carga añadida en comparación al negro de carbono. Esto se debe a la mayor relación de aspecto de los CNT, lo que incrementa la probabilidad de contacto entre partículas. Este comportamiento ha sido reflejado en la literatura por diversos autores. La alta conductividad eléctrica que proporcionan los CNT a bajas concentraciones de carga es una de los mayores atractivos de estas partículas, ya que esto contribuye a las excelentes propiedades mecánicas que imparten a la matriz elastomérica. Por ejemplo, en el caso del negro de carbono, las elevadas concentraciones de carga necesarias para proporcionar el mismo nivel de conductividad, a menudo tienen como consecuencia un incremento en la viscosidad del compuesto lo que dificulta el procesado de los mismos y puede asociarse con una reducción en las propiedades mecánicas [18-21].

Modificación de CNT

A pesar de las prometedoras propiedades de los CNT, estos materiales presentan algunas limitaciones en aplicaciones de alto rendimiento de productos de caucho, por su dificultad de dispersión en las matrices elastoméri-

cas. Como se ha comentado anteriormente, su tendencia a aglomerarse reduce las mejoras esperadas en las propiedades de los compuestos. Asimismo, los CNT tienen una reactividad química baja debido a las fuertes uniones covalentes C-C y su estructura de tubo, como consecuencia es difícil lograr una buena interacción con la matriz. En este sentido, los nanotubos de carbono pueden modificarse químicamente para mejorar tanto su dispersión como su interacción con la matriz. [5,10]

Generalmente las modificaciones químicas que se realizan a los CNT son aquellas con uniones covalentes de diferentes grupos. Estos grupos se insertan en los defectos presentes en las paredes de los tubos. Las modificaciones químicas más comunes que se realizan a los CNT para introducirlos posteriormente en cauchos son la oxidación y la silanización [5,10,22].

El principal objetivo del método de **oxidación** es la introducción de grupos carboxílicos, carbonilos e hidroxilos en la superficie de los nanotubos. Este método es usado frecuentemente como el primer paso de una serie de modificaciones. La principal limitación de la oxidación es que este proceso puede dañar la estructura de las partículas, por ese motivo es importante alcanzar un equilibrio entre la densidad de grupos funcionales in-

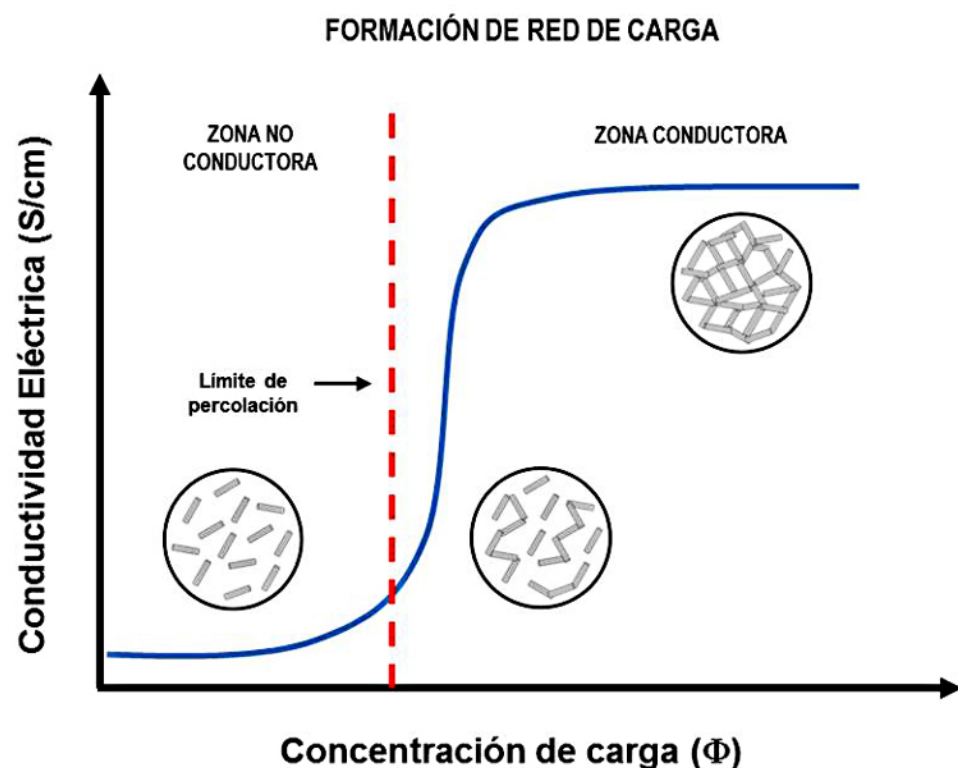


Figura 8.
Formación de la red de carga.

troducidos y el daño causado. En la literatura se han reportado diferentes métodos para realizar este tipo de funcionalización, oxidación mediante el uso de ácidos inorgánicos (ácido nítrico (HNO_3) y ácido sulfúrico (H_2SO_4) o una combinación de ambos), el uso de permanganato de potasio (KMnO_4), ozono (O_3), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), etc. De entre estos métodos, el uso de ácidos inorgánicos es el más empleado y con el que se obtiene un mayor rendimiento, en términos de porcentaje de grupos funcionales añadidos a los CNT [5,10,22].

La **silanización** de nanotubos de carbono, es uno de los métodos más descritos en el campo de la ciencia y tecnología del caucho. Como se ha mencionado anteriormente los agentes de acoplamiento de silano tienen una estructura bi-funcional con dos grupos reactivos diferentes, siendo uno de estos grupos reactivo con la matriz y el otro con la superficie de la carga. Habitualmente, la silanización de CNT se realiza posteriormente a un proceso de oxidación, de este modo el silano se puede unir a los grupos hidroxilo y carboxilo introducidos previamente en la superficie.

Este método ha sido ampliamente utilizado en la industria del caucho para la modificación de la sílice. [23-25]

Observaciones finales

Los nanotubos de carbono son una de las nanocargas de carbono más prometedoras para su aplicación en el campo de la ciencia y la tecnología del caucho. Las excelentes propiedades mecánicas y eléctricas que imparten a las matrices elastoméricas a bajas concentraciones de carga añadida, hacen de este nanomaterial un candidato ideal para sustituir o complementar a las cargas convencionales empleadas actualmente en la industria, como por ejemplo en aplicaciones de alto rendimiento como la fabricación de neumáticos. Sin embargo, a pesar de las grandes expectativas generadas por los nanotubos de carbono, estos presentan una serie de inconvenientes que se están investigando para poder alcanzar todo su potencial. Entre estos inconvenientes se encuentran su dificultad de dispersión y la baja interacción que presentan con las matrices elastoméricas.

Bibliografía

1. Thomas, S., Maria, H.J., "Progress in Rubber Nanocomposites" Elsevier Ltd. **2017**.
2. White, J.R., De, S. K., "Rubber Technologist's Handbook" Rapra Technology, **2001**.
3. Vilgis, T.A., Heinrich, G., Klüppel, M., "Reinforcement of Polymer Nano-Composites. Theory, Experiments and Applications" Cambridge University Press, **2009**.
4. Whelan, A., Lee, K.S., "Developments in Rubber Technology - 1", Applied Science Publishers Ltd, **1979**.
5. Ponnamma D, Kumar K, Sadasivuni, Grohens Y., Guo Q., Thomas S., "Carbon nanotube based elastomer composites-an approach towards multifunctional materials" Journal of Materials Chemistry, **2014**.
6. Bokobza L., "Multiwall carbon nanotube elastomeric composites: A review", Polymer, Elsevier Ltd, **2007**.
7. Thomas, S., Ranimol, S., "Rubber Nanocomposites Preparation, Properties and Applications" John Wiley & Sons (Asia) Pte. Ltd. **2010**.
8. Ponnamma D., Konnanilkunnathil T., Mariam A., Thomas S., "Curing enhancement and network effects in multi-walled carbon nanotube-filled vulcanized natural rubber: evidence for solvent sensing", Society of Chemical Industry, **2017**.
9. Ata S., "Features and application of carbon nanotube and rubber composites", International Polymer Science and Technology, **2017**.
10. Singh P., Campidelli S., Giordani S., Bonifazi D., Bianco A., Patro M., "Organic functionalisation and characterisation of single-walled carbon nanotubes", Chemical Society Reviews, **2009**.
11. Bokobza L, El Bounia N.E., "Reinforcement effects of multiwall carbon nanotubes in elastomeric matrices: comparison with other types of fillers", Composite Interfaces, **2008**.
12. Bokobza L, "Natural Rubber Nanocomposites: A Review", Nanomaterials, **2018**.
13. Ismail R., Ibrahim A., Ab.Hamid H., Mahmood M.R., Adnan A., "Performance of Carbon Nanotubes (CNT): Based Natural Rubber Composites: A Review", Springer Science and Bussines Media, **2015**.
14. Kolodziej M., Bokobza L., Bruneel J.L., "Investigations on natural rubber filled with multiwall carbon nanotubes", Composite Interfaces, **2007**.
15. Pedroni L.G., Soto-Oviedo M.A., Rosolen J.M., Felisberti M.I., Nogueira A.F., "Conductivity and Mechanical Properties of composites Based on MWCNTs and Styrene-Butadiene-Styrene Block Copolymers", Wiley InterScience, **2009**.
16. Bokobza L, "Multiwall carbon nanotube-filled natural rubber: Electrical and mechanical properties", Express Polymer Letters, **2011**.
17. Das a., Stöckelhuber k.W., Jurk R., Saphiannikova M., Fritzsche J., Lorenz H., Klüppel M., Heinrich G., "Modified and unmodified multiwalled carbon nanotubes in high performance solution-styrene-butadiene and butadiene rubber blends", Polymer, **2008**.
18. Bokobza L., "Mechanical, electrical and spectroscopic investigations of carbon nanotube-reinforced elastomers", Vibrational Spectroscopy, **2009**.
19. Xu J., Li S., Ta X., "Preparation, morphology and properties of natural rubber/carbon black/multi-walled carbon nanotubes conductive composites", Journal Materia Science: Mater Electron, **2016**.
20. George N., Bipinbal P.K., Bhadrán B., Mathiazhagan A., Joseph R., "Segregated network formation of multiwalled carbon nanotubes in natural rubber through surfactant assisted latex compounding: A novel technique for multifunctional properties", Polymer, **2017**.
21. Matchawet S., Kaesaman A., Bomlai P., Nakason C., "Effects of Multi-Walled Carbon Nanotubes and Conductive Carbon Black on Electrical, Dielectric, and Mechanical Properties of Epoxidized Natural Rubber Composites", Polymer Composites, 2017.
22. Avilés F., Cauch-rodíguez J.V., Toro-Estay P., Yazdani-Pedram M., Aguilar-Bolados H., "Improving Carbon Nanotube/Polymer Interactions in Nanocomposites", Carbon Nanotube-Reinforced Polymers, Elsevier Inc., **2018**.
23. Nakaramontri Y., Kummerlöwe C., Nakason C., Vennemann N., "The effect of Surface Functionalization of Carbon Nanotubes on Properties of Natural Rubber/Carbon Nanotube Composites", Polymer Composites, **2014**.
24. Avilés F., Cauch-rodíguez J.V., Rodríguez-González J.A., May-Pat A., "Oxidation and Silanization of MWCNTs for MWCNT/vinyl ester composites", Express Polymer Letters, **2010**.
25. Li M., Tu W., Chen X., Wang H., Chen J., "NR/SBR composites reinforced with organically MWCNTs: simultaneous improvement of tensile strength and elongation and enhanced thermal stability", Journal Polymer Engineering, **2016**.