

La nanotecnología en la arquitectura: el grafeno

Nanotechnology in architecture: graphene

Pedro-Rafael DeLaPeña-Benitez¹, Alfonso García- Santos¹, Marta Castellote-Armero² y Eva Jiménez-Relinque²

¹ Universidad Politécnica de Madrid. (España)
² CSIC. Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8302>

1. INTRODUCCIÓN

Aunque se considera que el origen de la nanotecnología comienza con la especulación que hace R.P. Feynman sobre la posibilidad de trabajar con los materiales, a escala atómica, en su conferencia "There's plenty of room at the bottom", realmente la nanotecnología se ha empleado desde hace mucho tiempo, aunque desconociéndose los procesos que la controlaban. En el caso de la arquitectura, se ha utilizado desde hace siglos para conseguir efectos de colores y reflejos en los vitrales de las catedrales góticas, gracias al empleo de partículas metálicas, que se añadían a la matriz de vidrio mientras ésta estaba en estado líquido.

La nanotecnología se convierte actualmente en una herramienta interdisciplinaria, que permite conocer en profundidad y de una forma consciente y científica, las estructuras de los materiales, su composición y sus interacciones. Tiene como objetivo, tanto la optimización de las propiedades de los materiales como el desarrollo de nuevas propiedades mediante el empleo de nanomateriales. Estos

últimos tienen una de sus dimensiones comprendida dentro de la escala nanométrica (1-100 nm), ya que los fenómenos que ocurren a nivel atómico y molecular son muy distintos del comportamiento del mismo material a nivel macroscópico.

El grafeno es un nanomaterial bidimensional que ofrece una gran oportunidad para desarrollar la nanotecnología dentro de la construcción. Aporta mejoras a los productos tradicionalmente usados y permite crear otros nuevos con propiedades que optimizan su rendimiento.

2. LA NANOTECNOLOGÍA EN LA CONSTRUCCIÓN

La construcción se ha ido desarrollando a lo largo de la historia en función de la tecnología disponible en cada momento y gracias a la aparición de nuevos materiales. La nanotecnología ofrece un nuevo impulso mediante la posibilidad de obtener materiales más baratos y más eficaces. El ahorro de energía con nuevos aislamientos, los recubrimientos multifuncionales, los materiales compuestos, las nuevas estructuras poliméricas y los parámetros de alta eficiencia energética involucran cada vez más a los nanomateriales, permitiendo así optimizar las propiedades de los productos.

La industria de la construcción es uno de los mayores problemas a nivel mundial por el impacto que tiene hacia el medioambiente. Tanto la fabricación de los materiales, como la construcción misma de los

edificios y su mantenimiento, suponen un problema en la sostenibilidad de nuestro planeta, contribuyendo de manera directa a la contaminación, la deforestación, la erosión de los suelos y el agotamiento de los recursos naturales. La obtención de materiales de construcción más resistentes y duraderos contribuirá a reducir el impacto ambiental, ya que la mejora de las propiedades de esos materiales, al elevar su resistencia y su durabilidad, es también un medio para reducir el impacto medioambiental, necesiándose así menos cantidad de material, reduciendo su producción, y aumentando su vida útil.

Los materiales utilizados, hasta ahora, en la investigación nanotecnológica para fines arquitectónicos han sido: los óxidos metálicos y no metálicos, las nanopartículas metálicas, los polímeros y materiales carbonosos, que se han utilizado como relleno o aditivo en morteros, los hormigones, los productos cerámicos, los polímeros, las pinturas, etc. o se han aplicado, directamente, en la mejora de distintos dispositivos electrónicos.

La nanotecnología va a permitir desarrollar propiedades como el aumento de la resistencia a las sollicitaciones y a la corrosión, la auto-limpieza, el control térmico y lumínico, los recubrimientos anti-reflectantes, las superficies bactericidas, la protección anti-grafiti, la monitorización, etc.

3. EL GRAFENO

El grafeno está compuesto exclusivamente por átomos de carbono, que es uno de los elementos más abundantes en la naturaleza y es básico en la química orgánica, formando parte de todos los seres vivos. La capacidad de los átomos de carbono para combinarse con otros átomos, en hibridaciones sp, sp² o sp³, permite formar numerosas estructuras distintas, de una, dos o tres dimensiones. De hecho el carbono presenta numerosos alótropos, siendo los más conocidos hasta hace unos años el carbono amorfo, el grafito y el diamante, que, pese a tener la misma composición de carbono, poseen propiedades muy distintas, que se deben precisamente al tipo de estructura nanométrica que poseen. Mientras el grafito dispone de una estructura laminar de átomos de carbono unidos por fuerzas de van der Waals, el

nanopartículas	productos	funciones	
SiO ₂	cemento	resistencia	compacidad
TiO ₂	hormigón	anti-corrosión	anti-reflectividad
VO ₂	acero	auto-limpieza	control de luz
SiC	madera	ignífuga	control temperatura
Al ₂ O ₃	vidrio	captación solar	anti-grafiti
Fe ₂ O ₃	polímeros	monitorización	antibacteriana
C	cerámicas	transparencia	conductividad
Ag, Cu, Au ...	dispositivos eléct.	toxicidad	detección

Tabla 1: Relación de compuestos habitualmente empleados a escala nanométrica en los materiales de la construcción, afectando a sus propiedades

diamante presenta una estructura compacta de átomos de carbono.

Gracias a las nuevas técnicas de procesado y a los medios de caracterización que se han ido desarrollando, se han descubierto nuevos alótropos del carbono. La última alotropía en aparecer es el grafeno, pese a haberse anunciado su existencia en 1962 por Hanns-Peter Boehm. El problema del grafeno era su estructura laminar de átomos de carbono y con un solo átomo de espesor, lo que ocasionaba problemas de estabilidad a temperatura ambien-

te, ya que cualquier fluctuación térmica lo hacía inestable.

Con el descubrimiento en 2004, por parte de Geim y Novoselov [1], quedó demostrada su viabilidad y que la estabilidad de las láminas se conseguía gracias a las imperfecciones que presentaba. Los defectos de la propia lámina la hacían estable a temperatura y presión normales [2]. Esto abrió la puerta a que otras estructuras, también bidimensionales, fueran posibles (láminas de nitruro de boro, seleniuro de niobio, disulfuro de molibdeno, etc.).

Las propiedades que presenta el grafeno permiten desarrollar dispositivos en casi cualquier área de la ciencia, lo que le convierte en un material único dentro de la nanotecnología. Posee una excelente capacidad para permitir el desplazamiento de campos eléctricos, debido a su estructura de hibridación sp^2 , que forma una red hexagonal de átomos de carbono dejando un cuarto enlace más débil perpendicular al plano, que permite el movimiento de los electrones, llegando a tener una movilidad de carga de $20 \text{ m}^2/\text{Vs}$ [4].

Una lámina de grafeno sin defectos tiene una transparencia del 97,7% y en combinación con su capacidad eléctrica permite desarrollar dispositivos en aplicaciones de fotónica y optoelectrónica (pantallas táctiles, diodos emisores de luz, sensores químicos, células fotovoltaicas orgánicas, LEDs orgánicos, etc.). Sus propiedades mecánicas le permiten tener un módulo de Young, que alcanza el orden de 1 TPa, y resistencias a tracción de hasta 130 GPa. Esto posibilita su combinación con casi cualquier material compuesto para reforzar sus propiedades estructurales [5].

El grafeno, al ser un material bidimensional, posee una gran área específica, $2600 \text{ m}^2/\text{g}$, con una densidad de $0,77 \text{ mg}/\text{m}^2$, lo que le convierte en un aditivo

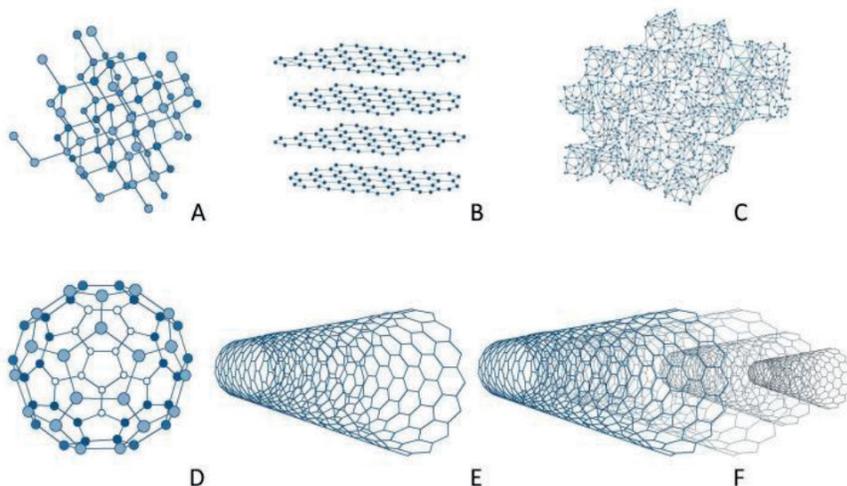


Fig. 1: Alotropías del carbono: A - diamante; B - grafito; C - carbono amorfo; D - fullereno; E - nanotubo de carbono de pared simple; F - nanotubo de carbono de pared múltiple

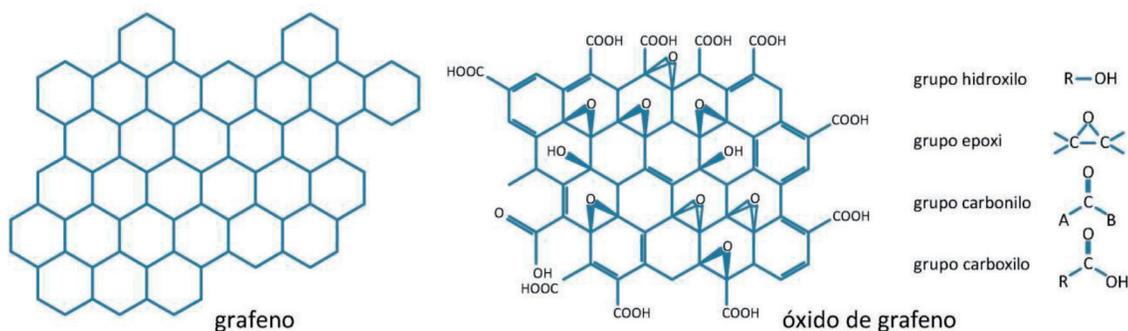


Fig. 2: Estructura hexaédrica del grafeno y estructura del óxido de grafeno según el modelo de Lerf-Klinowski [3]

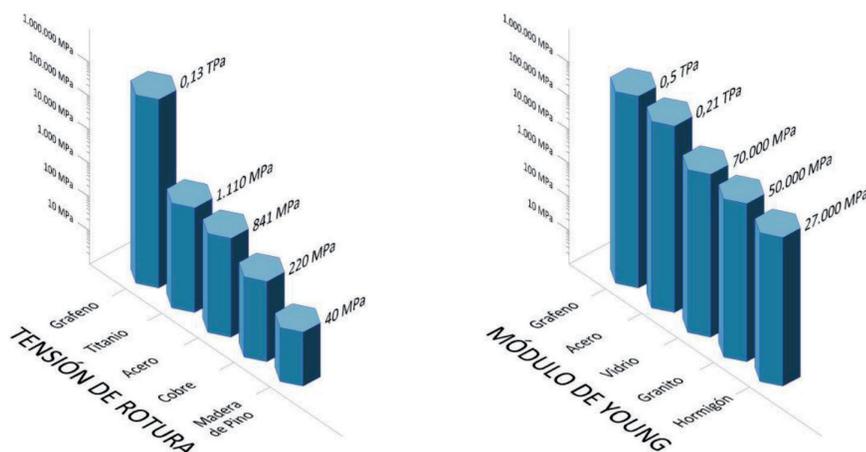


Fig. 3: Propiedades del grafeno comparadas logarímicamente con las de otros materiales empleados en la construcción

ideal en recubrimientos o en productos que necesiten aplicarse en superficies [2]. Tiene otras propiedades físicas, como una flexibilidad de hasta un 10% [6], además de ser impermeable a los gases [7]. Posee, en caso del grafeno puro, una conductividad térmica de $5000 \text{ W}/\text{mK}$, lo que facilita su aplicación en dispositivos electrónicos, por la rapidez con la que disipa el calor [8]. Debido a su estructura laminar se considera que tiene una baja reactividad química, aunque es capaz de reaccionar con los átomos de oxígeno. De hecho, su oxidación permite obtener un compuesto oxidado de grafeno (óxido de grafeno, en inglés conocido por su acrónimo GO,

graphene oxide), que es un elemento muy importante como nanomaterial en numerosas investigaciones (ver Fig. 2) [8].

4. NANOTECNOLOGÍA DEL GRAFENO

Antes de la aparición del grafeno, la nanoalotropía más prometedora del carbono eran los nanotubos de carbono, que no dejan de ser láminas de grafeno enrolladas en forma de cilindro. Con los nanotubos se han realizado numerosas investigaciones, con el fin de determinar sus posibilidades nanotecnológicas, tanto en combinación en morteros de cemento y hormigones, como en refuerzo de polímeros, en materiales cerámicos, como la protección electromagnética, y en sensores de monitorización. El grafeno ha venido a desplazar estas investigaciones, al menos en parte, al mejorar la mayoría de los resultados.

4.1. GRAFENO EN DISPOSITIVOS ELÉCTRICOS

Las investigaciones sobre dispositivos eléctricos han visto en el grafeno un nanomaterial con unas altas prestaciones por sus increíbles propiedades, pero fundamentalmente por su alto potencial eléctrico, lo que ha llevado a numerosos desarrollos de productos electrónicos y ello incluso en los dispositivos existentes dentro del mundo de la construcción (sistemas domóticos, detectores, iluminación, paneles solares, etc.).

La posibilidad que ofrece el grafeno de crear pantallas táctiles flexibles, sobre prácticamente cualquier sustrato, va a favorecer la creación de nuevos diseños de envolventes arquitectónicas, actuando de una forma directa sobre el aspecto exterior de los edificios y los ambientes buscados en los interiores. Permitiendo incluso su control y modificación por parte de los usuarios.

Pero también esta nueva piel se puede convertir en un macrodetector sensible a los cambios de temperatura, de humedad, de luz y de polución atmosférica que rodea al edificio. Transformando los estímulos exteriores en señales eléctricas, regulando así el paso de luz o actuando sobre los sistemas de climatización y control del aire exterior de forma autónoma [10-12].

4.2. GRAFENO EN CEMENTOS Y HORMIGONES

El grafeno, como la mayoría de las nanopartículas, se ha combinado con numerosos materiales, con el fin de determinar qué propiedades cambiaban. Gracias a su

compatibilidad en distintas matrices se ha combinado con morteros de cemento, hormigones, materiales cerámicos, polímeros, etc. para aumentar la resistencia de sus estructuras.

Durante la hidratación de la pasta de cemento se genera calor, debido a las reacciones exotérmicas que se producen. Una mala disipación de este calor provoca un gradiente entre el interior de la masa y su superficie, lo que genera tensiones internas y puede llegar a provocar un craqueo térmico en el hormigón. La adición de láminas de grafeno permite mejorar la conductividad térmica, gracias a la difusividad térmica de estas láminas, lo que se traduce en una homogeneización del proceso de hidratación de la pasta.

Para la investigación del comportamiento mecánico del mortero de cemento y los hormigones, la experimentación ha seguido principalmente la vía de su estudio con GO (óxido de grafeno), mezclándolo en la matriz del mortero de cemento. La experimentación ha demostrado que las láminas de GO se convierten en una barrera para la propagación de las grietas, lo que mejora las propiedades mecánicas. Se consigue, para un refuerzo del 0,05% en peso de GO en la matriz cementicia, aumentar la resistencia a la compresión en un 15-33% y la resistencia a la flexión en un 41-59% respectivamente.

El GO, al ser un producto hidrofílico, necesita mayor cantidad de agua en la

mezcla del mortero de cemento. Aún así consigue reducir el número final de poros del producto fraguado, lo que se traduce en un producto más compacto y resistente al paso del agua, mejorando la protección de las armaduras a la corrosión.

El aumento de la resistencia de los hormigones permite reducir los niveles de contaminación, al necesitarse menos material para resistir las mismas solicitaciones. Además, el grafeno se puede convertir en un detector ideal de las tensiones internas que sufren las estructuras de hormigón, al disminuir su conductividad eléctrica con la presencia de fisuras internas. Siendo de gran utilidad para evaluar edificios tras una catástrofe, como un terremoto, ya que permitirá determinar su estabilidad y su capacidad portante, sin hacer ensayos destructivos [13-16].

4.3. GRAFENO EN POLÍMEROS

La tecnología de los polímeros ha ido mejorando, entre otros factores, por la facilidad que ofrecen de poder mezclarse con otros elementos. El grafeno no ha sido ajeno a esta vía de investigación, combiándose con numerosos polímeros.

El poliuretano es un material utilizado como aislamiento térmico en diversas soluciones constructivas, pero presenta una degradación acelerada frente a los rayos ultravioletas, el agua y el oxígeno. Estos factores le afectan modificando su brillo, amarilleamiento del color, formando am-

polímeros	aplicaciones en la construcción	propiedades investigaciones con grafeno
Epoxi	refuerzo, adhesivos, reparador, revestimientos superficiales	mecánicas, fotocatalíticas, térmicas, electromagnéticas
HDPE polietileno de alta densidad	conducciones, revestimiento cableado, membrana impermeabilizante, aislante térmico	eléctricas, mecánicas, térmicas, reológicas, cristalización
LDPE polietileno de baja densidad	solados	mecánicas, de barrera, térmicas, magnéticas
PAA ácido poliacrílico	dispersante y/o aglutinante en pinturas	ópticas, mecánicas, térmicas, detección
PAN poliacrilonitrilo	material textil, fabricación de fibras de carbono	eléctricas, térmicas, depuración
PANI polianilina	hilos conductores de electricidad	electroquímicas, eléctricas
PC policarbonato	material transparente	eléctricas, físicas, térmicas
PEDOT polietilendioxitiofeno	pantallas solares, pantallas táctiles, LEDs orgánicos	transparencia, eléctricas, mecánicas
PET tereftalato de polietileno	material textil	eléctricas, térmicas, mecánicas
PMMA polimetacrilato de metilo	material transparente	mecánicas, térmicas, eléctricas
PP polipropileno	conducciones, mecanismos eléctricos, fibras de refuerzo	mecánicas, eléctricas, térmicas, cristalización
PS poliestireno	material aislamiento, material embalaje, material aligerante	eléctricas, térmicas, físicas, mecánicas, electromagnéticas
PU poliuretano	aislamiento de conducciones, paneles, espumas	mecánicas, eléctricas, térmicas, físicas
PVA acetato de polivinilo	adhesivo	mecánicas, transparencia, barrera
PVC policloruro de vinilo	membranas impermeabilizantes, conducciones, recubrimiento cableado, mecanismos eléctricos, carpinterías	térmicas, mecánicas, tribológicas

Tabla 2: Polímeros usados en la arquitectura: aplicaciones e investigaciones en diversos usos

pollas, grietas, etc. La aplicación de grafeno sobre su superficie, al actuar como un apantallamiento físico ante estos factores, evita el deterioro al absorber la luz incidente, además de proporcionar hidrofobicidad a la superficie.

El epoxi es un polímero que se usa habitualmente por sus altas prestaciones mecánicas. Es la matriz de polímero termoendurecible más comúnmente utilizada (tanto en construcción como en la industria aeroespacial y el sector de la automoción). Las propiedades mecánicas que posee pueden mejorarse con la incorporación de grafeno en pequeños porcentajes, ya que con ello se impide la progresión de las grietas dentro de la matriz. Estudios realizados recientemente han demostrado mejoras en la tenacidad ante la fractura hasta en un 131%.

El polimetacrilato de metilo se emplea por su resistencia mecánica y por su excepcional capacidad de transmisión de la luz en claraboyas y lucernarios, además de en otras soluciones. Se ha conseguido mejorar su comportamiento mecánico y su conductividad térmica con la adición de grafeno gracias a su buena dispersión en la matriz y a su fuerte interacción entre las láminas de refuerzo y el polímero.

Son muchos los polímeros empleados en la construcción que se han reforzado con el grafeno para determinar qué propiedades se mejoraban. Entre ellas el polipropileno empleado en la formación de conducciones y mecanismos eléctricos; el poliácilonitrilo empleado en tejidos para exteriores, como carpas, o en las fibras de carbono que se usan como refuerzo de otros materiales; el poliestireno empleado por sus propiedades de baja conductividad térmica; el ácido poliacrílico utilizado como aditivo en pinturas; o el acetato de polivinilo empleado en adhesivos y morteros de cemento cola [17-20].

4.4. GRAFENO COMO REFUERZO EN MATERIALES CERÁMICOS

Como con los polímeros, el grafeno se ha experimentado en combinación con los materiales cerámicos. Estos materiales, por su estructura, poseen poca tenacidad, por lo que la combinación con refuerzos de grafeno ofrece la posibilidad de mejorar esta condición, además de aportar otras propiedades, como la conductividad eléctrica y la térmica.

El nitruro de silicio, empleado en herramientas de corte y maquinaria de excavación en la construcción, proporciona una alta resistencia al desgaste. Al reforzarse con grafeno permite aumentar su tenacidad y su resistencia a la rotura.

En la alúmina, empleada en la fabricación de ladrillos refractarios, también se han obtenido buenos resultados con respecto a su tenacidad y su resistencia a flexión, al reforzarla con pequeñas cantidades de grafeno.

La conductividad eléctrica del grafeno y su transparencia permiten que se use en recubrimientos de vidrio, lo que ofrece la posibilidad de obtener dispositivos que regulen la temperatura y el paso de luz, mejorando así las condiciones interiores de un edificio [21-23].

posee un alto poder antibacteriano. En combinación con el TiO_2 , resulta ser 7,5 veces más activo frente a algunos tipos de bacteria. Esto puede desarrollar acabados antibacterianos en superficies sensibles, como pueden ser las de los quirófanos, clínicas y hospitales.

También se están desarrollando superficies basadas en el grafeno con el propósito de aumentar su hidrofobicidad y generar sustratos auto-limpiables, mejorar la protección contra la corrosión de superficies metálicas, crear superficies



Fig.4: Experimentación realizada en pinturas dopadas con grafeno en el IETcc

4.5. GRAFENO EN RECUBRIMIENTOS

La nanotecnología ofrece nuevas oportunidades a los revestimientos que se utilizan en la construcción, aportando propiedades significativamente mejoradas o creando nuevos revestimientos multifuncionales.

Los recubrimientos con propiedades fotocatalíticas que actúan gracias al óxido de titanio (TiO_2), habitualmente usado como principio activo en reacciones de este tipo, se ven reforzados al combinarse con grafeno. Esto incrementa la actividad catalítica ante los contaminantes, facilitando el transporte de carga y aumentando el rango de excitación, ya que el TiO_2 sólo actúa con la luz ultravioleta, mientras que el grafeno actúa en un rango espectral muy amplio. De esta manera el grafeno, en combinación con el TiO_2 , consigue mejorar la purificación del aire circundante.

Experimentos realizados con láminas de GO demostraron que este compuesto

con mayor resistencia al fuego, pinturas con mayor vida útil, etc.

Dentro de los recubrimientos, entran a formar parte de la actividad del grafeno aquellos que, como los tejidos textiles y el papel, se emplean en soluciones arquitectónicas. El grafeno, gracias a su conductividad eléctrica y su transparencia, permite desarrollar pieles con estos materiales, actuando como un transistor eléctrico que, ante un efecto externo, permite mandar un impulso eléctrico, transformándolo en información de lo que ocurre fuera. Se convierten así las superficies en un elemento inteligente que interacciona con su entorno [24-30].

5. CONCLUSIÓN

El presente artículo hace hincapié en las posibilidades de un material como el grafeno, que ha supuesto una revolución en muchas áreas de investigación. Este desarrollo científico va a permitir obtener productos nuevos mucho más eficientes y

sostenibles, aunque muchos de ellos requerirán de una evaluación más profunda sobre el impacto que pueden llegar a causar en el medioambiente y en la salud de los organismos vivos, incluso en pequeñas cantidades. El grafeno, por su composición de carbono en exclusiva, ha estado siempre presente en la naturaleza en forma nanométrica, tanto en los residuos de carbón y grafito naturales, como en cualquier combustión de madera, por lo que su toxicidad es relativamente baja.

Las distintas investigaciones expuestas ofrecen un amplio marco de trabajo para el desarrollo del grafeno dentro de la construcción. Sus propiedades le convierten en un material con amplias posibilidades, que se van descubriendo con la investigación científica que se desarrolla cada día. Hay que pensar que han pasado pocos años desde que se sintetizó por primera vez, en 2004, y que aún los métodos para su obtención son complejos y caros. Sin embargo, el futuro de este material y de sus variantes, va a estar marcado por esa continua investigación, que poco a poco está logrando métodos nuevos de obtención, mucho más baratos y escalables a nivel industrial.

El futuro de muchas soluciones constructivas va a estar marcado por la nanotecnología y el grafeno va a terminar formando parte de muchas de ellas.

PARA SABER MÁS

[1] Novoselov KS, Geim AK, Morozov SV, et al. "Electric field effect in atomically thin carbon films". *Science*, oct 2004, vol. 306, nº 5696, p. 666-669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>

[2] Geim AK, Novoselov KS. "The rise of graphene". *Nature materials*, 2007, vol. 6, nº 3, p. 183-191. <http://dx.doi.org/10.1038/nmat1849>

[3] Lerf A, He H, Forster M, et al. "Structure of graphite oxide revisited". *The Journal of Physical Chemistry B*, 1998, vol. 102, nº 23, p. 4477-4482. <http://dx.doi.org/10.1021/jp9731821>

[4] Bolotin KI, Sikes KJ, Jiang Z, et al. "Ultra-high electron mobility in suspended graphene". *Solid State Communications*, jun 2008, vol. 146, nº 9-10, p. 351-355. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssc.2008.02.024>

[5] Lee C, Wei X, Kysar JW, et al. "Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene". *Science*, 2008, vol. 321, nº 5887, p. 385-388. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1157996>

[6] González Carmona J, Hernández Vozmediano MA, Guinea F. "Electrónica del grafeno". *Investigación y Ciencia*, 2010, vol. 408, p. 42-49.

[7] Bunch JS, Verbridge SS, Alden JS, et al. "Impermeable atomic membranes from graphene sheets". *Nano Letters*, 2008, vol. 8, nº 8, p. 2458-2462. <http://dx.doi.org/10.1021/nl801457b>

[8] Balandin AA, Ghosh S, Bao W, et al. "Superior

thermal conductivity of single layer graphene". *Nano Letters*, 2008, vol. 8, nº 3, p. 902-907. <http://dx.doi.org/10.1021/nl0731872>

[9] Geim AK. "Graphene: status and prospects". *Science*, 2009, vol. 324, nº 5934, p. 1530-1534. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1158877>

[10] Jang H, Park YJ, Chen X, et al. "Graphene based flexible and stretchable electronics". *Advanced Materials*, 2016. <http://dx.doi.org/10.1002/adma.201504245>

[11] Varghese SS, Lonkar S, Singh KK, et al. "Recent advances in graphene based gas sensors". *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, vol. 218, p. 160-183. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2015.04.062>

[12] Wang T, Huang D, Yang Z, et al. "A review on graphene-based gas/vapor sensors with unique properties and potential applications". *Nano-Micro Letters*, 2016, vol. 8, no 2, p. 95-119. <http://dx.doi.org/10.1007/s40820-015-0073-1>

[13] Horszczaruk E, Mijowska E, Kalenczuk RJ, et al. "Nanocomposite of cement/graphene oxide—impact on hydration kinetics and Young's modulus". *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 78, p. 234-242. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.009>

[14] Pan Z, He L, Qiu L, et al. "Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide—cement composite". *Cement and Concrete Composites*, 2015, vol. 58, p. 140-147. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.001>

[15] Mohammed A, Al-Saadi NTK, Al-Mahaidi R. "Utilization of Graphene Oxide to Synthesize High-Strength Cement-Based Adhesive". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, p. 04016258. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001705](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001705)

[16] Han B, Ding S, Yu X. "Intrinsic self-sensing concrete and structures: a review". *Measurement*, 2015, vol. 59, p. 110-128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.048>

[17] Vaithyalingam R, Ansari MNM, Shanks RA. "Recent advances in polyurethane-based nanocomposites: a review". *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2017, p. 1-14. <http://dx.doi.org/10.1080/03602559.2017.1280683>

[18] Atif R, Shyha I, Inam F. "Mechanical, thermal, and electrical properties of graphene-epoxy nanocomposites—a review". *Polymers*, 2016, vol. 8, nº 8, p. 281. <http://dx.doi.org/10.3390/polym8080281>

[19] Kausar A, Rafique I, Anwar Z, et al. "Perspectives of epoxy/graphene oxide composite: Significant features and technical applications". *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2016, vol. 55, no 7, p. 704-722. <http://dx.doi.org/10.1080/03602559.2015.1098700>

[20] Fan Z, Gong F, Nguyen ST, et al. "Advanced multifunctional graphene aerogel-Poly (methyl methacrylate) composites: experiments and modeling". *Carbon*, 2015, vol. 81, p. 396-404. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2014.09.072>

[21] Belmonte M, Nistal A, Boutbien P, et al. "Toughened and strengthened silicon carbide ceramics by adding graphene-based fillers". *Scripta Materialia*, 2016, vol. 113, p. 127-130. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2015.10.023>

[22] Çelik Y, Çelik A, Flahaut E, et al. "Anisotropic mechanical and functional properties of graphene-based alumina matrix nanocomposites". *Journal of the European Ceramic Society*, 2016, vol. 36, no 8, p. 2075-2086. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2016.02.032>

[23] Kim D, Lee E, Lee HS, et al. "Energy efficient glazing for adaptive solar control fabricated with photothermotropic hydrogels containing graphene oxide". *Scientific reports*, 2015, vol. 5, p. 7646. <http://dx.doi.org/10.1038/srep07646>

[24] Trapalis A, Todorova N, Giannakopoulou, et al. "TiO₂/graphene composite photocatalysts for NO_x removal: a comparison of surfactant-stabilized graphene and reduced graphene oxide". *Applied Catalysis B: Environmental*, 2016, vol. 180, p. 637-647. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.07.009>

[25] De la Peña Benitez P, García-Santos A. "Diseño nanotecnológico de superficies con propiedades antibacterianas: el grafeno". *Revista ingeniería de construcción*, 2016, vol. 31, no 3, p. 201-207. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732016000300006>

[26] Souza JC, Neckel IT, Valada J, et al. "Wettability effect of graphene-based surfaces on silicon carbide and their influence on hydrophobicity of nanocrystalline cerium oxide films". *Journal of colloid and interface science*, 2015, vol. 441, p. 71-77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcis.2014.10.070>

[27] Hu C, Xue J, Dong L, et al. "Scalable preparation of multifunctional fire-retardant ultralight graphene foams". *ACS nano*, 2016, vol. 10, no 1, p. 1325-1332. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.5b06710>

[28] De la Peña PR, García-Santos A, Santonja R, et al. "Evaluación ambiental de pinturas al agua para exteriores de los edificios modificadas con óxido de grafeno". *Superficies y Vacío*, 2016, vol. 29, no 4, p. 105-111.

[29] Liu J, Liu Z, Barrow CJ, et al. "Molecularly engineered graphene surfaces for sensing applications: a review". *Analytica chimica acta*, 2015, vol. 859, p. 1-19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aca.2014.07.031>

[30] Wu C, Kim TW, Li F, et al. "Wearable electricity generators fabricated utilizing transparent electronic textiles based on polyester/Ag nanowires/graphene core-shell nanocomposites". *ACS nano*, 2016, vol. 10, no 7, p. 6449-6457. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.nano.5b08137>

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento al apoyo inestimable del Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción de Madrid y a la continua colaboración y ayuda de María Grande Jara.