

# Diseño nanotecnológico de superficies con propiedades antibacterianas: el grafeno

## Nanosurface design with antibacterial properties: graphene

P.R. de la Peña Benítez <sup>1\*</sup>, A. García-Santos \*

\* Escuela Superior de Arquitectura de Madrid, UPM. ESPAÑA

Fecha de Recepción: 27/10/2016

Fecha de Aceptación: 27/11/2016

PAG 201-207

### Abstract

*In recent years, nanotechnology has emerged as an excellent tool for choosing materials for the architectural design of spaces that are sensitive to bacteria, such as hospitals, clinics, etc. This article deals with the main finishes. Graphene provides incomparable possibilities thanks to its properties. Its high bactericidal activity allows improving finishes.*

*Keywords: Nanotechnology, graphene, oligodynamic effect, graphene oxide, reduced graphene oxide*

### Resumen

La nanotecnología se está convirtiendo en los últimos años en una inmejorable herramienta en la elección de materiales para el diseño arquitectónico de espacios sensibles a las bacterias, como hospitales, clínicas, etc. El presente artículo hace un recorrido sobre las principales superficies antibacterianas. Siendo el grafeno un material que ofrece unas posibilidades inigualables gracias a sus propiedades, permitiéndonos mejorar los acabados superficiales por su alta actividad bactericida.

**Palabras clave:** Nanotecnología, grafeno, efecto oligodinámico, óxido de grafeno, óxido de grafeno reducido

## 1. Introducción

Las transformaciones que se vienen produciendo en la ciencia gracias a la nanotecnología, revolucionan cada cierto tiempo las posibilidades de solucionar los problemas que están frente a nosotros. La nanoescala se convierte en un espacio común para cualquier disciplina y su utilidad se hace patente en numerosos campos de investigación. Actualmente son innumerables los estudios que desarrollan las oportunidades, que estos nuevos frentes abiertos nos ofrecen (Serena, 2013).

El diseño arquitectónico se ve favorecido por la nanotecnología, al suponer una magnífica mejora en los diseños empleados en algunos acabados, como pueden ser quirófanos y espacios sensibles a la posible transmisión de patógenos que afecten a la salud de los usuarios, tanto pacientes como personal clínico.

En este artículo, pretendemos estudiar las distintas superficies con propiedades antibacterianas y lo que nos ofrecen los últimos avances de la nanotecnología, utilizados en los acabados de superficies sensibles a la presencia de vida microbiana.

## 2. Superficies antibacterianas

Los planteamientos iniciales en la elección de los materiales a emplear, pueden proporcionarnos una herramienta importantísima en el control de las infecciones, pero hay que tener en cuenta que todas las superficies que entran en contacto con los usuarios constituyen un importante foco de contaminación, por lo que es necesario una limpieza y desinfección adecuada, con un cuidado extremo a la hora de elegir los materiales que eviten la formación de colonias de bacterias en su superficie.

Las superficies con características antibacterianas deben, por tanto, evitar la fijación de los microorganismos en su superficie (efecto bacteriostático) y en caso de que esto ocurra, eliminarlos (efecto bactericida). Su funcionamiento dependerá de diversos factores: tipo de sustrato que queramos utilizar, concentración del principio activo en el sustrato, tipo de microorganismo que queramos combatir, tipo de luz existente, temperatura ambiente, humedad ambiente, pH y oxígeno.

Históricamente se ha usado la cal como el único acabado superficial de paramentos verticales con propiedades fungicidas y desinfectantes, al ser la cal una sustancia sumamente alcalina, lo que le dota de una buena efectividad contra los microorganismos, afectando a las paredes exteriores de las bacterias. Sin embargo, sus propiedades mecánicas y de solubilidad, la hacen ser incompatible con los procesos de limpieza y desinfección que se realizan en cualquier superficie clínica.

<sup>1</sup> Autor de correspondencia:

Escuela Superior de Arquitectura de Madrid, UPM, España.

E-mail: prpenabe@ucm.es



También existen en la naturaleza superficies que se protegen del ataque de las bacterias a través de su morfología, en concreto, se han estudiado tres tipos de insectos (*Psaltoda claripennis*; *Diplacodes bipunctata*; *Gryllus firmus*), en la que las superficies de sus alas presentan unas protuberancias con forma de micropilares, que si bien, no impiden que las bacterias se depositen en ellas, si tienen un efecto bactericida (Pogodin et al., 2013; Ivanova et al., 2013).

Actualmente existe una numerosa tipología de acabados, que nos ofrecen unas prestaciones antimicrobianas.

- **Superficies metálicas**

Las superficies metálicas presentan unas propiedades que las hacen muy interesantes como acabados antibacterianos, ya que son uniformes, con alta resistencia físico-química, poseen una toxicidad baja o nula y son de fácil limpieza, incluso algunos metales presentan un efecto oligodinámico sobre los microorganismos.

Existen metales que en estado puro poseen una capacidad antibacteriana, mientras que otros necesitan combinarse con otros elementos para poder obtener esta cualidad. Es decir, metales que al entrar a formar parte de una matriz, dotan al conjunto de la propiedad oligodinámica.

Muchos de estos metales son micronutrientes, pero a elevadas concentraciones resultan tóxicos, ya que pueden inhibir la actividad celular cambiando la conformación enzimática, haciendo perder la integridad de la membrana, actuar sobre el ADN o generar reactivos de oxígeno.

Los iones metálicos más importantes que actúan sobre los microorganismos son:

**Plata:** es uno de los metales más tóxicos, su mecanismo de acción se puede presentar de tres maneras fundamentalmente: como plata metálica, que afecta a la superficie de las bacterias inhibiendo el proceso de respiración, también actúa sobre los mecanismos de absorción y liberación de moléculas esenciales para las bacterias; como nanopartículas de plata (AgNPs), liberando una gran cantidad de iones plata; y como ión plata, es el método más utilizado como principio activo de numerosas superficies, degradando el ADN de las bacterias, inhibiendo la multiplicación, y modificando la síntesis de proteínas, lo que termina causando la muerte a las bacterias.

**Cobre:** como en el caso de la plata, se conoce su poder bactericida desde hace miles de años. La EPA norteamericana lo considera el primer material antibacteriano. Permite por su maleabilidad un gran número de posibilidades en el diseño clínico, constituyendo la base de elementos susceptibles de contener una alta contaminación por su uso continuo, como: manetas de puerta, accesorios de fontanería (grifos, llaves de corte, etc.), barandas de cama, mecanismo de encendido (interruptores), etc. La actividad del cobre provoca cambios en el metabolismo de las bacterias, afectando a la membrana celular y fragmentando el ADN (Laluzza, 2013; Yasuyuki et al., 2010; Sreekumari et al., 2005; Grass et al., 2011).

- **Vidrio**

La acción antibacteriana de los vidrios, se basa en la adición del ión plata, que elimina los microorganismos tan pronto entran en contacto con la superficie del vidrio. Las pruebas de envejecimiento acelerado demuestran que la efectividad no disminuye con el tiempo.

Las posibilidades que ofrece el vidrio no se limitan al empleado en ventanas y puertas, sino que puede ampliarse a un recubrimiento antibacteriano de paramentos (Cuoghi et al., 2012; Laluzza, 2013).

- **Madera**

Existe en el mercado un compuesto de melanina y papel, usando como principio activo el ión plata, lo que permite realizar superficies en madera recubiertas por este compuesto que eviten el crecimiento de microorganismos (Li et al., 2010). También existen acabados en madera que utilizan un recubrimiento de zeolitas dopadas con ión plata, con igual resultado (Laluzza, 2013).

- **Plástico**

El empleo de plástico como acabado superficial, además de utilizarse en contenedores o receptores de material (envases, recipientes), también se puede usar como acabado superficial arquitectónico en solados, paramentos, mobiliario, etc.

El sistema a través del cual el plástico se convierte en una superficie antibacteriana, se realiza de dos formas: con el empleo de dopantes inorgánicos, como el ión plata, y su liberación lenta de los iones, usándose en espacios muy sensibles por su alto coste; o mediante el empleo de un dopante orgánico, como es el tricloro-difenil éter (triclosán), siendo este último muy efectivo, pero se degrada si durante el procesado supera los 260°C (Hasan, 2013).

- **Pinturas**

Las pinturas antibacterianas basan, principalmente, su mecanismo de actuación en la presencia en su composición de ión plata, utilizando aceites vegetales como elemento del secado oxidativo, en lugar de los agentes reductores o de estabilización, habituales en la pintura (Kumar et al., 2008).

Existen otros dopantes de la pintura, tales como el óxido de titanio, el óxido de cobre y el óxido de zinc, que también poseen propiedades antibacterianas (Mateus, 2014).

- **Tejidos**

Se pueden crear tejidos que posean un comportamiento antibacteriano, mediante el recubrimiento de sus fibras con nanopartículas de plata, que poseen una alta superficie específica, por lo que presenta un amplio frente activo de iones (Maneerung et al., 2008; Khalil-Abad y Yazdanshenas, 2010). También se realizan tejidos con poder antimicrobiano en cuya composición entra a formar parte la Zeolita-Ag, que es un

aluminosilicato cristalino con iones de plata, que se van liberando poco a poco (Matsuura et al., 1997).

- **Cerámica**

Entre las superficies cerámicas antimicrobianas

se encuentra la aplicación de nanopartículas de dióxido de titanio, debido a su efecto fotocatalítico hace que sea necesario la presencia de radiación UV, por lo que sólo es útil en exteriores o en lugares muy expuestos al sol (Cuoghi et al., 2012). Los dopantes de óxidos metálicos, son también utilizados con fines bactericidas, tanto en la composición de la matriz cerámica como en la de los esmaltes (Verné et al., 2009; Sultana et al., 2013).

Actualmente también se desarrollan materiales vitrocerámicos, que además de disminuir el crecimiento de las bacterias, inhiben la adhesión de

las mismas a las superficies e impiden la formación de biopelículas (Cabal et al., 2014).

- **Colorantes**

Se han realizado investigaciones que consiguen obtener colorantes, para su aplicación en acabados superficiales, que permiten evitar la proliferación de bacterias. Estos estudios plantean la posibilidad de utilizar nanopartículas de oro y tecnologías de aplicación que hicieran más barato el producto final.

Los experimentos se aplicaron sobre superficies de silicona, similares a las empleadas en los utensilios propios de los quirófanos, mostrando un altísimo efecto bactericida en el transcurso de las primeras 3-6 h. La silicona no modificó sus propiedades, manteniéndose repelente al agua y conservando las propiedades al limpiarse posteriormente con alcohol (Wang et al., 2011).



**Figura 1.** Pruebas de pinturas antibacterianas dopadas con grafeno en el Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción

### 3. Grafeno

Son láminas monoatómicas de carbono, cuyos átomos se ordenan según una estructura hexagonal. Se aislaron e identifican por primera vez en la Universidad de Manchester en 2004 (Novoselov et al., 2004), descubriéndose que sus propiedades hacen del grafeno un material único.

Gracias a los rápidos avances en la sintetización del grafeno y sus derivados, se han realizado numerosas investigaciones en muchos campos de la ciencia, tales como los dispositivos electrónicos, la aeronáutica, la industria textil, la industria alimentaria, el deporte, etc.

Además de todas estas increíbles cualidades, el grafeno es un material biocompatible y no permite el crecimiento de bacterias en su superficie, por lo que se convierte en un material con un importante potencial de desarrollo en las superficies arquitectónicas sensibles a las infecciones.

#### 3.1 Grafeno antibacteriano

La mayoría de las investigaciones que se realizan sobre su actividad antimicrobiana, son óxido de grafeno y

óxido de grafeno reducido, y no con grafeno puro, por ser estos compuestos mucho más activos sobre la viabilidad de las bacterias.

Desde que se realizó la investigación, por parte del equipo de Dai et al., en 2008, sobre el uso del óxido de grafeno como nanotransportador eficiente para la administración de fármacos, se han sucedido numerosas publicaciones teniendo al grafeno como elemento fundamental en las investigaciones clínicas, que van desde la administración de fármacos, biosensores, creación de elementos biocompatibles, dispositivos oftalmológicos y materiales antibacterianos (Shen et al., 2012).

Los estudios que se vienen realizando sobre las posibilidades del grafeno y su efecto bactericida, se dividen en los artículos que exponen a los derivados del grafeno directamente en contacto con las bacterias y los artículos que estudian al grafeno en combinación con un sustrato o dopándolo con otro material.

## Grafeno - bactericida

En 2010, se fabricó papel de grafeno, mediante la suspensión de derivados de este y su posterior filtración al vacío, obteniéndose unas propiedades físicas muy interesantes, al combinar la flexibilidad y la rigidez mecánica, además de poseer propiedades antibacterianas, comprobándose que tanto las nanoláminas de GO (del inglés graphene oxide) como las de la reducción de GO (rGO, del inglés reduced graphene oxide) exhiben un fuerte efecto bacteriostático y bactericida, alcanzando niveles de mortandad superiores al 90% en sólo dos horas de exposición con unas concentraciones adecuadas, afectando por igual a las bacterias Gram-positivas como las Gram-negativas. Las bacterias al entrar en contacto con los derivados del grafeno, se ven afectadas en su exterior, degradándose debido a un fuerte estrés oxidativo, lo que provoca la pérdida del citoplasma y su muerte. Siendo la actividad de las nanoláminas de rGO ligeramente inferior a las de GO (Hu et al., 2010).

El equipo formado por Liu et al., realizó en 2011 un estudio comparativo entre cuatro tipos de materiales basados en el grafeno: grafito (Gt), óxido de grafito (GtO), GO y rGO. Se utilizó, para ello, *Escherichia coli*, bajo similares condiciones de concentración y de incubación, siendo la dispersión de GO la que presentó mayor actividad antibacteriana, secuencialmente seguido de rGO, Gt y GtO. Demostrando que los contactos directos entre la parte externa de las bacterias y las nanoláminas de grafeno afectan de forma severa a su integridad, de forma parecida a como actúan los nanotubos de carbono (CNTs), que también actúa por una sinergia entre principios físicos y químicos, provocando la liberación de los contenidos intracelulares, además de interrumpir con procesos microbianos específicos, con la consiguiente muerte de la bacteria. Siendo las variables que acentúan estas propiedades la solubilidad, la dispersión, el tiempo de exposición y el tamaño de las nanoláminas de grafeno (Liu et al., 2011).

En 2012, se estudia la interacción entre las nanoláminas de GO, exfoliadas químicamente, y la bacteria *Escherichia coli*, comprobándose que a medida que aumentaba el tiempo de exposición, los grupos funcionales que contienen oxígeno se redujeron significativamente por la

acción metabólica de las bacterias supervivientes, a través de su proceso de glucólisis, presentando la superficie del material dos frentes, las áreas donde el GO no se había reducido y las áreas donde sí lo había hecho, siendo estas últimas las zonas donde se produce una mayor inhibición a la proliferación de las bacterias (Akhavan y Ghaderi, 2012).

La investigación realizada por Krishnamoorthy et al. en 2012, compara el efecto de las nanoláminas de GO sobre colonias de *Escherichia coli* y *Streptococcus iniae*. El efecto inhibitorio del GO afecta al crecimiento de ambas especies bacterianas para concentraciones de 38  $\mu\text{g/ml}$  y 29  $\mu\text{g/ml}$ , respectivamente. Estimándose, por los resultados obtenidos, que la actividad antibacteriana del GO, se basa en la producción de radicales hidroxilo que atacan a las paredes celulares de las bacterias, provocando su muerte. Es decir, que durante el proceso se generan especies reactivas de oxígeno, lo que conlleva un estrés oxidativo, superando la capacidad de defensa antioxidante de las células, generando daños en lípidos, proteínas y ADN. Se demuestra que con menor concentración de GO, se obtienen resultados en las Gram – positivas antes que en las Gram – negativas, aunque esta situación se invierte cuando se buscan resultados bactericidas, ya que las concentraciones necesarias son de 100  $\mu\text{g/ml}$  y 125  $\mu\text{g/ml}$  (Krishnamoorthy et al., 2012).

También se han realizado estudios sobre bacterias de tipo *Pseudomonas aeruginosa*, sometiénolas a la acción de láminas de GO y de rGO, utilizando como agente reductor para obtener rGO, el betamerceptoetanol, siendo la tasa de la actividad antibacteriana del GO superior a la que se produce en contacto con rGO. Se estudió con distintos tipos de concentraciones, durante dos horas y a 37°C, en presencia de células *P. aeruginosa*, y a medida que se aumentaba la concentración la actividad era mayor, si bien, más activo en las muestras de GO que en las de rGO. Se observó que a partir de 150  $\mu\text{g/ml}$  (pico de la máxima actividad antibacteriana) la viabilidad era casi nula. Luego se experimentó con la misma concentración (75  $\mu\text{g/ml}$ ) pero con diferentes períodos de exposición (1, 2 y 4 h). Provocando, en ambos casos, un estrés oxidativo y la fragmentación del ADN que conlleva una pérdida de viabilidad celular (Gurunathan et al., 2012).

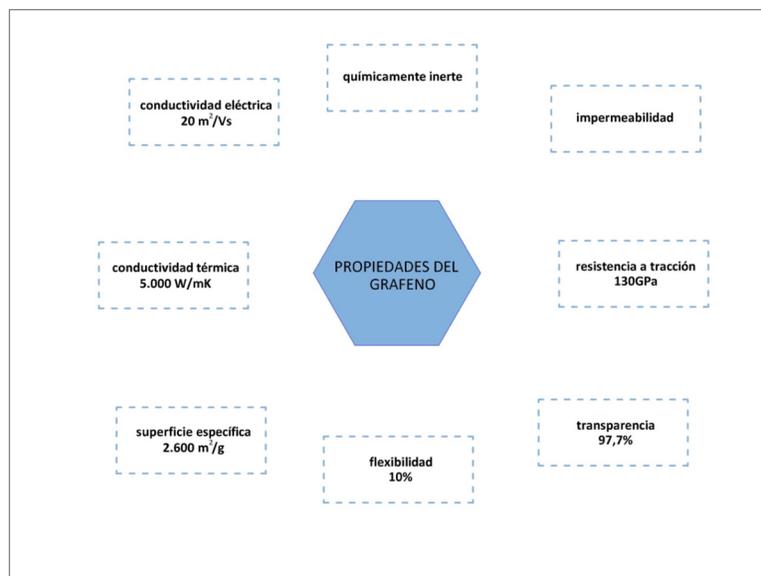


Figura 2. Esquema de las propiedades del grafeno

### Grafeno – material compuesto

Las numerosas investigaciones realizadas, han comenzado a delimitar los aspectos que influyen en esta actividad, desde el tipo de grafeno usado (G; GO; rGO), su concentración, el tiempo de exposición, el tamaño de sus nanoláminas, pero también las propiedades del sustrato sobre el que se deposita o con el material con el que se combina.

En 2010, el equipo formado por Akhavan y Ghaderi, investigaron la toxicidad bacteriana de las nanoláminas de grafeno depositadas sobre sustratos de acero inoxidable, tanto para Gram-positivas como Gram-negativas, en forma de nanowalls.

Como vimos en las alas de los insectos, la morfología superficial era la encargada de dotar a la superficie de un efecto bactericida, con los nanowalls de grafeno ocurre algo parecido, depositados sobre un sustrato de acero inoxidable, se combina una acción de estrés oxidativo y una acción mecánica, debido a que el efecto que producen los bordes afilados de los nanowalls sobre las bacterias, al depositarse éstas, provoca un daño irreparable en las membranas celulares.

Las membranas celulares tienen una ligera carga negativa que interacciona con los bordes de los nanowalls, que son buenos aceptores de electrones, por lo que se atraen, dañando a la pared celular. La acción combinada de los nanowalls, convierte al grafeno en un material excelente, al convertirse en una superficie homogénea y eficaz que interacciona con los microorganismos, debido a una muy buena relación entre la longitud del borde y el espesor de su recubrimiento.

Se comprobó que las Gram-negativas, que poseen membrana externa, demostraron ser más resistentes que las Gram-positivas. También se observó que los nanowalls obtenidos por reducción de GO eran más tóxicos que los nanowalls de GO no reducidos (Akhavan y Ghaderi, 2010).

La Universidad de Zhengzhou, en China, ha desarrollado un material compuesto a base de un crecimiento directo de nanopartículas de plata sobre nanotubos de halloysita (HNTs) y nanoláminas de rGO, mejorando la actividad de las nanopartículas de plata, que cuando actúan de forma individual. La acción combinada de plata y grafeno fortalece las propiedades antibacterianas, tanto en cepas bacterianas Gram-negativas como en las Gram-positivas. Se comprobó que este material compuesto (Ag/HNTs/rGO) actúa mucho mejor, que cada una de sus partes por separado (Yu et al., 2014).

Otra investigación que combina nanopartículas de plata con GO, es la realizada en la Facultad de Ciencias de Beirut, donde el equipo de Sheet et al. (2013), están desarrollando filtros para la depuración del agua (Sheet et al., 2013).

También se ha estudiado el comportamiento del rGO con nanopartículas de plata biogénica (Bio-AgNPs), producidas por el hongo *Fusarium oxysporum*, provocando una adsorción de los Bio-AgNPs sobre las láminas de GO.

Actuando mejor sobre las bacterias Gram- negativas, en especial contra la cepa *Salmonella typhimurium*, con una concentración de 2 µg/ml, inhibiendo la formación del biofilm en el 100% de los casos tras 1 hora de exposición (Fonseca de Faira et al., 2014).

En 2014, en el Instituto Cerámico de Shanghai, se han realizado experimentos con distintos tipos de sustratos sobre los que depositar grafeno y determinar su capacidad antibacteriana. Para ello se pensó que dependiendo de la conductividad del sustrato la eficiencia bactericida se podía ver afectada, por lo que se planteó hacer unas muestras con materiales conductores, semiconductores y aislantes. Para la primera muestra se utilizó un sustrato de cobre (material conductor) sobre el que se depositó una película continua de grafeno, como material semiconductor se utilizó una muestra de germanio sobre el que también se depositó una lámina de grafeno. En ambos casos el método utilizado fue por deposición química de vapor a presión atmosférica. Por último, se utilizó para la muestra de material aislante un sustrato de SiO<sub>2</sub>. Comprobándose en estas muestras, que se mantenían grandes cantidades de bacterias viables, pero no así en las muestras de cobre y germanio, donde se comprobó que las bacterias sufrieron graves alteraciones en las membranas con la consiguiente pérdida de citoplasma, siendo superior la actividad antibacteriana en las muestras con sustrato de cobre, por lo que se pensó, que quizás los iones de cobre hubieran participado en la acción bactericida. Para determinar la posible acción combinada de los iones de cobre, se realizó una espectrometría de masas, determinando que no existe presencia de iones sobre la lámina de grafeno, por lo que la acción bactericida se debe únicamente al contacto entre la superficie del grafeno y las membranas celulares, de hecho la lámina de grafeno sobre el cobre impide la oxidación de éste, actuando como una barrera eficiente de difusión.

Se cree que la conductividad del sustrato puede afectar a la respuesta microbiana, al interferir en el proceso de respiración de las bacterias, ya que requieren aceptores de electrones extracelulares y el grafeno es un aceptor de electrones excelente, por lo que las membranas microbianas pueden perder electrones de forma constante, causándoles las alteraciones y la consiguiente muerte (Li et al., 2014).

Como vemos el GO y el rGO, mejoran su capacidad antibacteriana al utilizar sustratos metálicos o en combinación con dopantes como la plata, generando una sinergia en las cualidades del material obtenido.



PRODUCTO ANTIBACTERIANO	Principio Activo	Bacteriostático	Método	
Psaltoda claripennis	Natural		morfología superficial	
Diplacodes bipunctata	Natural		morfología superficial	
Gryllus firmus	Natural		morfología superficial	
Superficies metálicas	Ag	Sintético	X	ión Ag; AgNPs
	Cu	Sintético	X	ión Cu
	Ti	Sintético		TiO <sub>2</sub>
	Cd	Sintético		ión Cd
	Ni	Sintético		ión Ni
	Al	Sintético		ión Al
Vidrio	Sintético		ión Ag	
Madera	Sintético		ión Ag; Zeolitas/ión Ag	
Plástico	Sintético		ión Ag; triclosán	
Pintura	Sintético		ión Ag; TiO <sub>2</sub>	
Tejido	Sintético		AgNPs; Zeolitas/ión Ag	
Cerámica	Sintético	X	óxidos metálicos	
Colorantes	Sintético	X	ión Ag	
Silicio negro (bSi)	Sintético		morfología superficial	
Grafeno	Sintético	X	pelígula G; GO; rGO; nanowalls; Ag/HNTs/rGO	

Figura 3. Tabla del principio activo de los distintos materiales frente a las bacterias

## 4. Conclusión

Los microorganismos son la forma más antigua de vida en nuestro planeta, por lo que a lo largo de los años han generado mecanismos de adaptación muy versátiles para la colonización de superficies. Con el empleo antibacteriano de la nanotecnología, nos enfrentamos al problema con otra perspectiva, ya que combate a los microorganismos desde distintos frentes, físico y químico, haciendo su implantación en el medio casi imposible.

La principal enseñanza que nos muestra la nanotecnología, es que a escala nanométrica, las propiedades de los materiales cambian drásticamente debido a los fenómenos de la mecánica cuántica. Los nanomateriales presentan una mayor relación entre su superficie y su volumen, por lo que los átomos de borde crecen con respecto a los del interior, modificando el comportamiento.

El grafeno es un nanomaterial con unas posibilidades increíbles en el mundo de la arquitectura, pudiendo desarrollar soluciones altamente eficientes, tanto como acabado superficial, como entrando a formar parte de la composición de los mismos productos, generando nuevos materiales compuestos. Como se puede ver, son numerosas las publicaciones que analizan el grafeno con una finalidad bactericida, pero cada sistema de obtención de las láminas de grafeno, cada derivado obtenido a partir de él y cada material compuesto, confiere al resultado unas propiedades distintas, por lo que es importante realizar una sistematización y catalogación de cada uno de estos materiales.

Las aplicaciones del grafeno, pese a llevar sólo diez años de investigación, van creciendo de forma exponencial. Los continuos avances que se realizan, con el objetivo de obtener una sintetización barata y eficiente, darán como resultado que, en breve, comiencen a saltar al mercado productos de la construcción, cuyo principio activo fundamental sea el grafeno.

El grafeno posee un alto potencial de desarrollo como nueva herramienta en la lucha contra las infecciones hospitalarias, utilizado como nueva superficie antibacteriana y aplicado en el diseño de los materiales que se utilicen en lugares sensibles para los pacientes y los usuarios.

## 5. Agradecimientos

Agradecer a la dirección del Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción el apoyo prestado en la redacción de este artículo y a la constante ayuda de Doña María Grande Jara. También expresar nuestro agradecimiento a la profesora Doña María del Dulce Nombre Sánchez Cifuentes de la Facultad de Bellas Artes de la Universidad Complutense de Madrid.

## 6. Referencias

- Akhavan O. y Ghaderi E. (2010)**, Toxicity of graphene and graphene oxide nanowalls against bacteria. *ACS nano*, 4(10), 5731-5736.
- Akhavan O. y Ghaderi E. (2012)**, Escherichia coli bacteria reduce graphene oxide to bactericidal graphene in a self-limiting manner. *Carbon*, 50(5), 1853-1860.
- Cabal B., Alou L., Cafini F., Couceiro R., Sevillano D., Esteban-Tejeda L. ... y Moya J. S. (2014)**, A new biocompatible and antibacterial phosphate free glass-ceramic for medical applications. *Scientific reports*, 4.
- Cuoghi Fenollar L., Romero Valiente J., Villar Apellaniz C., Faubel Serra V., Noguera Ortí J. F., García Ten F. J. ... y Durán Á. (2013)**, MAB Revestimientos vítreos con propiedades bactericidas y fungicidas.
- Fonseca de Faria A., de Moraes A. C. M., Marcató P. D., Martínez D. S. T., Durán N., Souza Filho A. G. ... y Alves O. L. (2014)**, Eco-friendly decoration of graphene oxide with biogenic silver nanoparticles: antibacterial and antibiofilm activity. *Journal of nanoparticle research*, 16(2), 1-16.
- Grass G., Rensing C. y Solioz M. (2011)**, Metallic copper as an antimicrobial surface. *Applied and environmental microbiology*, 77(5), 1541-1547.
- Gurunathan S., Han J. W., Dayem A. A., Eppakayala V. y Kim J. H. (2012)**, Oxidative stress-mediated antibacterial activity of graphene oxide and reduced graphene oxide in *Pseudomonas aeruginosa*. *International journal of nanomedicine*, 7, 5901.
- Hasan J., Crawford R. J. y Ivanova E. P. (2013)**, Antibacterial surfaces: the quest for a new generation of biomaterials. *Trends in biotechnology*, 31(5), 295-304.
- Hu W., Peng C., Luo W., Lv M., Li X., Li D. ... y Fan C. (2010)**, Graphene-based antibacterial paper. *Acs Nano*, 4(7), 4317-4323.
- Ivanova E. P., Hasan J., Webb H. K., Gervinskas G., Juodkazis S., Truong V. K. ... y Watson J. A. (2013)**, Bactericidal activity of black silicon. *Nature communications*, 4.
- Khalil-Abad M. S. y Yazdandshenas M. E. (2010)**, Superhydrophobic antibacterial cotton textiles. *Journal of colloid and interface science*, 351(1), 293-298.
- Krishnamoorthy K., Umasuthan N., Mohan R., Lee J. y Kim S. J. (2012)**, Antibacterial Activity of Graphene Oxide Nanosheets. *Science of Advanced Materials*, 4(11), 1111-1117.
- Kumar A., Vemula P. K., Ajayan P. M. y John G. (2008)**, Silver-nanoparticle-embedded antimicrobial paints based on vegetable oil. *Nature materials*, 7(3), 236-241.
- Laluzza P. (2013)**, Materiales inorgánicos nanoestructurados basados en plata: aplicaciones bactericidas. Universidad de Zaragoza (España), Departamento de Ingeniería Química y Tecnologías del Medio, 19-49.
- Li J., Wang G., Zhu H., Zhang M., Zheng X., Di Z. ... y Wang X. (2014)**, Antibacterial activity of large-area monolayer graphene film manipulated by charge transfer. *Scientific reports*, 4.
- Li P., Tao Y., Wang F. (2010)**, A surface antibacterial wood composite decorated by nano-sized silver melamine impregnated paper. *Proceedings of the International Convention of Society of Wood Science and Technology and United Nations Economic Commission for Europe – Timber Committee*, Geneva, Switzerland.
- Liu S., Zeng T. H., Hofmann M., Burcombe E., Wei J., Jiang R. ... & Chen Y. (2011)**, Antibacterial activity of graphite, graphite oxide, graphene oxide, and reduced graphene oxide: membrane and oxidative stress. *Acs Nano*, 5(9), 6971-6980.
- Maneerung T., Tokura S. y Rujiravanit R. (2008)**, Impregnation of silver nanoparticles into bacterial cellulose for antimicrobial wound dressing. *Carbohydrate polymers*, 72(1), 43-51.
- Mateus E. (2014)**, Recubrimientos antimicrobianos: solución aséptica para piezas y componentes metálicos. *Metal Actual*; disponible en [http://metalactual.com/revista/28/recubrimientos\\_anti.pdf](http://metalactual.com/revista/28/recubrimientos_anti.pdf) [consultado en noviembre de 2014].
- Matsuura T., Abe Y., Sato Y., Okamoto K., Ueshige M. y Akagawa Y. (1997)**, Prolonged antimicrobial effect of tissue conditioners containing silver-zeolite. *Journal of dentistry*, 25(5), 373-377.
- Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S. A. ... y Firsov A. A. (2004)**, Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 306(5696), 666-669.
- Pogodin S., Hasan J., Baulin V. A., Webb H. K., Truong V. K., Nguyen T. H. P. ... y Crawford R. J. (2013)**, Biophysical model of bacterial cell interactions with nanopatterned cicada wing surfaces. *Biophysical journal*, 104(4), 835-840.
- Serena P. A. (2013)**, La Nanociencia y la Nanotecnología: en la frontera de lo pequeño. *Revista Española de Física*, 27(1), 29-33.
- Sheet I., Holail H., Olama Z., Kabbani A. y Hines M. (2013)**, The Antibacterial Activity of Graphite Oxide, Silver, Impregnated Graphite Oxide with Silver and GO-Coated Sand Nanoparticles against Waterborne Pathogenic *E. coli* BL21. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci*, 2, 1-11.
- Shen H., Zhang L., Liu M. y Zhang Z. (2012)**, Biomedical applications of graphene. *Theranostics*, 2(3), 283.
- Sreekumari K. R., Sato Y. y Kikuchi Y. (2005)**, Antibacterial metals-A viable solution for bacterial attachment and microbiologically influenced corrosion. *Materials transactions*, 46(7), 1636-1645.
- Sultana P., Das S., Bhattacharya A., Basu R. y Nandy P. (2013)**, Study of Antibacterial Activity of Metal Nanoparticle Absorbed Fly-Ash based Ceramics. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 10(6), 939-948.
- Verné E., Miola M., Brovarone C. V., Cannas M., Gatti S., Fucale G. ... y Di Nunzio S. (2009)**, Surface silver-doping of biocompatible glass to induce antibacterial properties. Part I: massive glass. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 20(3), 733-740.
- Wang K., Ruan J., Song H., Zhang J., Wo Y., Guo S. y Cui D. (2011)**, Biocompatibility of graphene oxide. *Nanoscale Res Lett*, 6(8), 1-8.
- Yasuyuki M., Kunihiro K., Kurissey S., Kanavillil N., Sato Y. y Kikuchi Y. (2010)**, Antibacterial properties of nine pure metals: a laboratory study using *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. *Biofouling*, 26(7), 851-858.
- Yu L., Zhang Y., Zhang B. y Liu J. (2014)**, Enhanced antibacterial activity of silver nanoparticles/halloysite nanotubes/graphene nanocomposites with sandwich-like structure. *Scientific reports*, 4.

