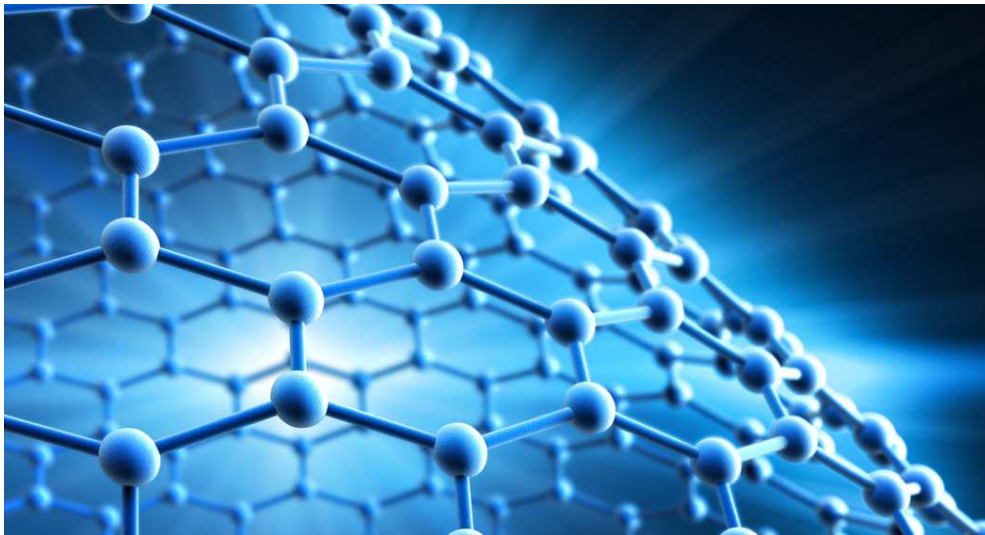


EL GRAFENO

POSIBILIDADES DEL GRAFENO EN LA ARQUITECTURA



Irene Paz Ortega

EL GRAFENO
POSIBILIDADES DEL GRAFENO EN LA ARQUITECTURA

Alumna
Irene Paz Ortega

Tutor
Alfonso García Santos

AULA 1 TFG
Coordinadora: Mercedes González Redondo

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid
Universidad Politécnica de Madrid

Madrid, 16 de enero de 2018

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	3
MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS	4
METODOLOGÍA	5
1. ESTRUCTURA DEL GRAFENO	7
1.1 Estados del grafeno	8
1.1.1 Grafito (3-D)	8
1.1.2 Nanotubos de carbono (1-D)	9
1.1.3 Fullerenos (0-D)	9
1.2 Formas de obtención de grafeno	9
1.2.1 A partir de materiales que tienen grafeno como bloque elemental	9
1.2.1.1 Exfoliación mecánica de grafito	9
1.2.1.2 Exfoliación química de grafito	10
1.2.1.3 Reducción de óxido de grafito	10
1.2.1.4 Descompresión de nanotubos de carbono	11
1.2.2 A partir de átomos de carbono procedentes de moléculas orgánicas	12
1.2.2.1 Deposición química de vapor (CVD)	12
1.2.2.2 Crecimiento epitaxial	12
2. PROPIEDADES DEL GRAFENO	13
2.1 Conductividad eléctrica	13
2.2 Electroquímicamente inerte	13
2.3 Potenciador de la resistencia mecánica	15
2.4 Potenciador fotocatalítico	18
3. APLICACIONES DEL GRAFENO	20
3.1 El grafeno en la electrónica	21
3.2 El grafeno en la industria automovilística y aeroespacial	23
3.3 El grafeno en el sector energético	26
3.4 El grafeno en medicina y biomedicina	29

4.	APLICACIONES EXISTENTES DEL GRAFENO PARA LA ARQUITECTURA	31
4.1	Material compuesto grafeno – óxido de titanio	31
4.2	Pinturas y morteros	32
4.2.1	Pinturas para exterior	32
4.2.2	Pinturas para interior	34
4.3	Recubrimientos y películas. Tintas conductoras	36
4.4	Hormigones mejorados	38
4.5	Elementos prefabricados	42
4.5.1	Compuestos para impresión 3-D	46
5.	PROPUESTAS	48
5.1	Elementos fotocatalizadores más eficaces	49
5.1.1	Aplicaciones para exterior	49
5.1.2	Aplicaciones para interior	50
5.1.3	Nuevas posibilidades	51
5.2	Superficies activas	52
5.3	Nuevas posibilidades en cáscaras de hormigón	53
5.4	Membranas flexibles y transparentes	54
6.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	58
7.	CONCLUSIONES	67
	BIBLIOGRAFÍA	68

RESUMEN

El grafeno es una forma alotrópica del carbono. Es un material en auge, cuya estructura molecular es bidimensional, organizado en una red hexagonal con el espesor de un átomo.

Tras un análisis de la estructura química del grafeno, sus formas de obtención y sus propiedades, en este trabajo se examinan las aplicaciones existentes de dicho material.

Gracias a su conductividad eléctrica y térmica, el grafeno puede utilizarse en aplicaciones electrónicas. Este material se encuentra entre los conductores y los semiconductores, haciéndolo idóneo para la creación de pantallas y circuitos flexibles, etc.

Además, el grafeno es electroquímicamente inerte y, por tanto, bactericida y resistente a la oxidación. Esto ofrece la posibilidad de usarlo como una película resistente a la corrosión y a microbios.

También se está investigando su uso en el nano-refuerzo de materiales cementosos. Se ha demostrado que, usado como aditivo, proporciona mucha más resistencia que el acero, evitando la formación y propagación de nano fisuras.

Por último, debido a su capacidad para adsorber CO_2 se está estudiando su uso como potenciador fotocatalítico.

Todas estas aplicaciones pueden ofrecer grandes posibilidades en el campo de la arquitectura. Ya existen numerosas patentes que trabajan con este material.

No sólo se está investigando el grafeno como material, sino también como elemento de un compuesto, mejorando las propiedades y el rendimiento de materiales convencionalmente utilizados.

Finalmente, en este trabajo se pretende hacer nuevas propuestas de aplicaciones del grafeno en el ámbito de la arquitectura, en base a las líneas de investigación existentes.

Palabras clave: grafeno, carbono, corrosión, nano-refuerzo, fotocatalizador, compuesto.

MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

Las razones por las que se elige el tema abordado en el presente trabajo comienzan por un interés personal por el grafeno, el que dicen ser “el material del futuro”. Esto me indujo a investigar sobre este material y sus propiedades.

A ello se suma una inquietud por la arquitectura en el futuro. En los últimos años se viene empleando cada vez más la nanotecnología. Es una herramienta interdisciplinaria, se trabaja con la estructura de los materiales a nivel molecular, mediante la ciencia y la tecnología disponibles. Tiene como objetivo la optimización de las propiedades de los materiales y el desarrollo de otras nuevas mediante el empleo de nanomateriales.

Durante mis investigaciones descubrí que se ha hablado mucho de las propiedades del grafeno y las mejoras que supondría su aplicación en muchos sectores, sobre todo en la creación de pantallas y otros dispositivos electrónicos. Sin embargo, su utilización en la construcción no ha tenido mucha relevancia por el momento.

El primer objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es contextualizar el papel del grafeno en el ámbito de la construcción y la arquitectura. Para ello, se plantean unos objetivos parciales:

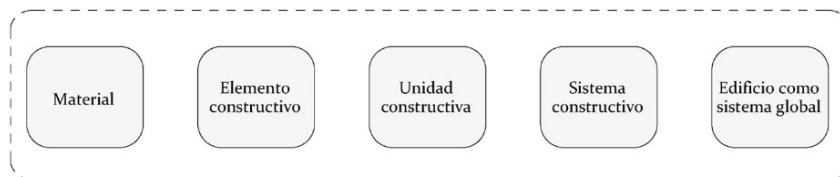
- Estudiar las aplicaciones existentes en función de su utilización arquitectónica: material, elemento constructivo, unidad constructiva, sistema constructivo y edificio como sistema global.
- Sistematizar las posibles aplicaciones del compuesto de óxido de grafeno: con óxido de titanio, con hormigón, con recubrimientos poliméricos.
- Sistematizar las posibles aplicaciones de láminas de grafeno como material de construcción.

Además, se analizarán las aplicaciones existentes del grafeno en los sectores donde haya tenido mayor impacto con el objeto de llegar al objetivo final: plantear propuestas de futuro para el grafeno en el campo de la arquitectura.

METODOLOGÍA

La metodología empleada para este trabajo se basa en cuatro principios resumidos en el acrónimo IMRAD: *Introduction* (introducción), *Methods* (métodos), *Results* (resultados), *Discussion* (discusión).

- **Introducción:** Es una primera fase de estudios previos. Se define la estructura química del grafeno, los estados en los que podemos encontrarlo y sus formas de obtención. Además, se analizarán sus propiedades y las aplicaciones más relevantes en los distintos sectores de la industria.
- **Métodos:** A continuación, se inicia una segunda fase en la que se van clasificando las aplicaciones existentes en un sistema según su utilización arquitectónica, que parte de lo más concreto a lo más general.



- **Resultados:** Como resultado de toda la investigación anterior, se elaboran una serie de propuestas de aplicaciones del grafeno en el ámbito de la arquitectura. Estarán fundamentadas en dichas investigaciones, siguiendo la línea de lo existente hasta el momento.

Se presentan una serie de cuadros en las que se sintetizan las propuestas, recogiendo tanto el nivel estructural (micro y macro molecular) como el nivel tecnológico constructivo.

- **Discusión:** Es una última fase de conclusiones, en la que se incluye además una valoración personal.

1. DEFINICIÓN DEL GRAFENO

El carbono presenta alotropía. La alotropía es la propiedad que poseen algunos elementos químicos de aparecer en más de una forma en el mismo estado físico. Presenta diferentes propiedades físicas y químicas dependiendo de la distinta agrupación de los átomos que constituyen sus moléculas.

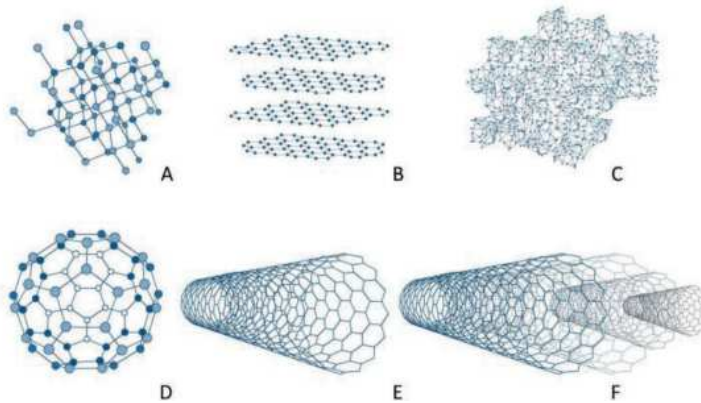


FIGURA 1. Formas alotrópicas del carbono: A – diamante; B – grafito; C – carbono amorfo; D – fullereno; E – nanotubo de carbono de pared simple; F – nanotubo de carbono de pared múltiple.

(Fuente: De la Peña Benítez, Pedro.2017. La nanotecnología en la arquitectura: el grafeno. Dyna, septiembre).

El grafeno es una forma alotrópica del carbono. Es un material cuya estructura molecular es la de un cristal bidimensional organizado en una red hexagonal (como un panel de abeja), con el espesor de un átomo.

Está formado por átomos de carbono y enlaces covalentes que se generan a partir de la superposición de los híbridos sp^2 de los carbonos enlazados.

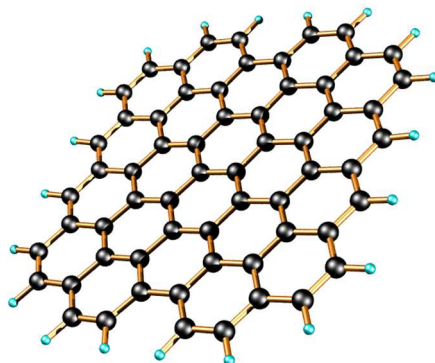


FIGURA 2. Estructura molecular del grafeno.

(Fuente: <http://www.infografeno.com/>)

La estructura química y atómica del grafeno fue ya descubierta en los años 30. Sin embargo, se consideraba que los cristales bidimensionales eran termodinámicamente inestables.

No fue hasta el año 2004 que los investigadores Konstantin Novoselov y Andrey K. Geim sintetizaron el grafeno por primera vez. Fueron separando láminas de grafito usando dos caras de cinta adhesiva, hasta que sólo quedó un material translúcido: la primera monocapa de grafeno.

Posteriormente, (en el año 2010) ganarían el Premio Nobel de Física por sus descubrimientos, generando el interés actual sobre este material.

El grafeno destaca por ser un material ligero, transparente, flexible, con una gran dureza, buen conductor térmico y eléctrico...

1.1 Estados del grafeno

En el grafeno, cada átomo de carbono está unido a otros tres átomos de carbono, formando una estructura hexagonal. Es la unidad estructural básica del resto de los elementos grafiticos de las demás dimensiones:

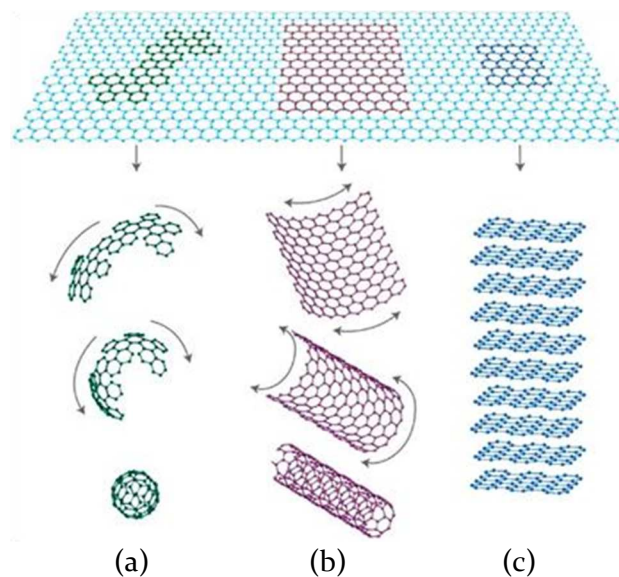


FIGURA 3. Elementos grafiticos. (a) Fullerenos – 0D;
(b) Nanotubos – 1D; (c) Grafito – 3D.

(Fuente: A.K. Geim y K.S. Novoselov. 2007. *The rise of graphene*.
Nature Materials. Vol 6. Nature Publishing Group, marzo).

1.1.1 Grafito

El grafeno se puede apilar sucesivamente dando lugar al grafito tridimensional (3D). Está formado por un extenso sistema policíclico

de anillos bencénicos fusionados que se disponen en capas, separadas entre sí $3,35\text{\AA}$. En realidad, la estructura del grafito puede considerarse una “pila” de láminas de grafeno.

1.1.2 Nanotubos de carbono

Una lámina de grafeno se puede enrollar en sí misma en estructuras 1D, dando lugar a los nanotubos de carbono (CNTs).

En los materiales de 1D, dos de sus dimensiones se encuentran en el orden nanométrico, teniendo una longitud variable superando los 100nm.

Son moléculas cilíndricas, con grandes propiedades eléctricas, mecánicas y térmicas.

1.1.3 Fullerenos

Finalmente, se puede arquear en estructuras de cero dimensiones (0D), como es el caso de los fullerenos. Los materiales 0D presentan sus tres dimensiones en el orden nanométrico, es decir, por debajo de los 100nm.

El más común es el C₆₀. *“Se observó que la evaporación del grafeno por acción del láser originaba diversos agregados de carbono en fase de vapor, entre los que abundaban especies de 60 átomos. La estructura que mejor explica este agregado y que respeta la tetravalencia del carbono es la que forman 20 anillos de benceno fusionados, combándose sobre sí mismos hasta adoptar una disposición esférica y con las valencias sobrantes definiendo 12 pentágonos: una especie de icosaedro truncado de 60 vértices equivalentes”*. [2]

1.2 Formas de obtención de grafeno

1.2.1 A partir de materiales que tienen grafeno como bloque elemental

1.2.1.1 Exfoliación mecánica de grafito

El primer método con el que se obtuvo grafeno (2004) se basaba en la exfoliación micro mecánica de piezas macroscópicas de grafito.

Este método se ha ido perfeccionando y en la actualidad se produce la exfoliación frotando directamente grafito pirolítico altamente orientado contra una superficie (generalmente de Si/SiO₂). Así, se consigue la obtención de láminas de grafeno

monocapa o bicapa (espesores no mayores de 3 nm) de gran tamaño (hasta 0,2 mm) y de una calidad tanto estructural como electrónica muy alta.

El problema radica en que, al ser un proceso manual, la obtención del material es bastante laboriosa y el rendimiento que se obtiene es muy bajo. Este proceso que puede llevar varias horas da como resultado la identificación de sólo unas pocas láminas de grafeno por área de sustrato.

1.2.1.2 Exfoliación química del grafito

Se basa en la intercalación de moléculas entre láminas de grafito. Se prepara una solución de grafito en un surfactante y se somete a un proceso de sonicación.

Mediante la sonicación se aplican ultrasonidos al grafito para romper las fuerzas de Van der Waals de los enlaces interlaminares, lo que permite a las moléculas de surfactante introducirse entre las capas.

Se obtienen láminas de grafeno de gran calidad, aunque el área superficial obtenida es demasiado pequeña. La ventaja de este método radica en que se evitan los procesos previos de oxidación y reducción (lo que implica una mejor calidad estructural del grafeno obtenido).

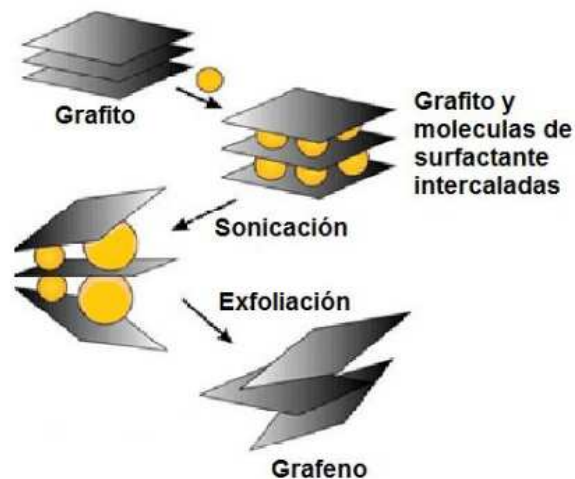


FIGURA 4. Proceso de exfoliación química del grafito.
(Fuente: Preparación Ultrasonica de grafeno.
Heilscher – Tecnología de Ultrasonidos).

1.2.1.3 Reducción de óxido de grafito

Implica la oxidación y posterior exfoliación de grafito en fase líquida, obteniéndose láminas de óxido de grafeno que pueden ser

reducidas para obtener dispersiones de grafeno.

Este método resulta prometedor con vistas a su producción y procesamiento a gran escala debido a que se obtiene una gran cantidad de material estable en forma de dispersión acuosa u orgánica sin la necesidad de emplear surfactantes o estabilizadores, y con un bajo coste económico.

La exfoliación del óxido de grafito se ve favorecida por los grupos funcionales oxigenados (grupos hidroxilo, epoxi y carboxílicos), ya que estos aumentan la distancia entre las capas de grafeno, facilitando su separación mediante la aplicación de ultrasonidos. Sin embargo, estos grupos funcionales no se eliminan del todo, lo que implica una disminución de la calidad estructural de las láminas de grafeno.

Debido a la presencia de todos estos grupos oxigenados, tanto el óxido de grafeno como el óxido de grafito son eléctricamente poco conductores, lo que limita su aplicabilidad. Por eso, se llevan a cabo tratamientos de reducción para poder obtener láminas conductoras (la hidracina es el agente reductor más extendido).

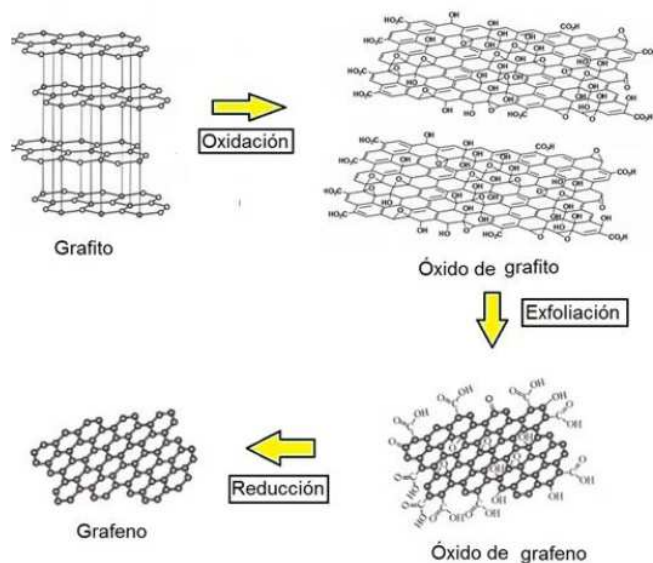


FIGURA 5. Reducción química de óxido de grafeno.
(Fuente: Millán Hernández, María. 2015. Proyecto fin de carrera ingeniería electromecánica).

1.2.1.4 Descompresión de nanotubos de carbono

Permite la obtención de nanocintas de grafeno desenrollando tubos de carbono. Para ello, se están desarrollando varios métodos experimentales para abrir los nanotubos, entre los que cabe destacar los métodos de corte de nanotubos por la acción de ácidos.

1.2.2 A partir de átomos de carbono procedentes de moléculas orgánicas

1.2.2.1 Deposición química de vapor (CVD)

En el interior de una cámara se coloca el sustrato metálico (generalmente níquel o rutenio) y metano. Se calienta a unos 1.000°C rompiéndose sus enlaces y produciéndose el depósito de los átomos de carbono (nucleación) en la superficie metálica y posterior crecimiento de la lámina de grafeno.

Mediante este método se sintetizan láminas monocapa de grafeno de una gran calidad estructural y que pueden ser de gran tamaño.

También permite la posibilidad de dopar las láminas mediante la sustitución de átomos introduciendo diferentes gases durante el crecimiento.

1.2.2.2 Crecimiento epitaxial

El crecimiento epitaxial del grafeno se produce en superficies eléctricamente aislantes, principalmente el carburo de silicio SiC. Se basa en la sublimación térmica del silicio a temperaturas que pueden superar los 1.300°C , dejando que los átomos de carbono de la superficie se reordenen formando una capa de grafeno.

2. PROPIEDADES DEL GRAFENO

2.1 Conductividad eléctrica

El sector de la electrónica es actualmente uno de los que más está utilizando este material debido a su alta conductividad eléctrica y térmica.

Posee una excelente capacidad para permitir el desplazamiento de campos eléctricos. *“Se debe a que 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 m^2/Vs ”.* [1]

De acuerdo con sus propiedades electrónicas, el grafeno se encuentra entre los conductores y los semiconductores:

Dentro de la categoría de los conductores porque no existe brecha energética entre la banda de valencia y la de conducción (como ocurre con los semiconductores y aislantes, “la banda prohibida”).

Dentro de los semiconductores porque cuenta con dos tipos de portadores de carga: los electrones y los huecos.

Una de las aplicaciones que más nos podría interesar son los diodos de emisión de luz.

Es posible crear diodos a base de grafeno gracias a que es capaz de transportar los dos tipos de carga. *“Estos dispositivos se basan en zonas de coexistencia de electrones y huecos: cuando un electrón cae en un hueco y se recombinan se produce la emisión de un fotón”.* [3]

2.2 Electroquímicamente inerte

Algunos estudios muestran la posibilidad de utilizar el grafeno como una capa ultra fina resistente a la corrosión.

Los revestimientos poliméricos convencionales dejan de ser efectivos cuando se degradan bajo la acción de procesos microbianos, mientras que el grafeno es electroquímicamente inerte, y por tanto, resistente tanto a ataques microbianos como a la oxidación. Además, la aplicación de estos materiales puede afectar a las propiedades del metal de base (su conductividad eléctrica o térmica, por ejemplo) debido al grosor de la capa que es necesario aplicar. Dos de los polímeros más utilizados son el parileno C (PA-C) y el poliuretano (PU).

Sin embargo, esto no ocurriría con el grafeno, ya que el grosor que se aplicaría es de 1-2 μ m.

En estudios recientes, se compara el comportamiento ante la “corrosión microbiana inducida” (MIC) del PA-C, el PU y el grafeno como recubrimiento de níquel y cobre.

Dentro de los análisis del grafeno, se comparan películas “cultivadas in-situ” de grafeno frente a películas transferidas, y se muestra que estas últimas son mucho más defectuosas.

“También se observa que el número de capas de grafeno aplicadas afecta a los resultados. Se muestra que una película de grafeno cultivada in-situ con pocas capas (few-layered as-grown graphene film) es la que menos defectos en su superficie presenta, y, por tanto, la más adecuada para aplicaciones de resistencia a la corrosión microbiana”. [4]

Se ha demostrado que una película de 3-4 capas de grafeno por deposición química de vapor (CVD) ofrece resistencia a largo plazo a la corrosión del níquel.

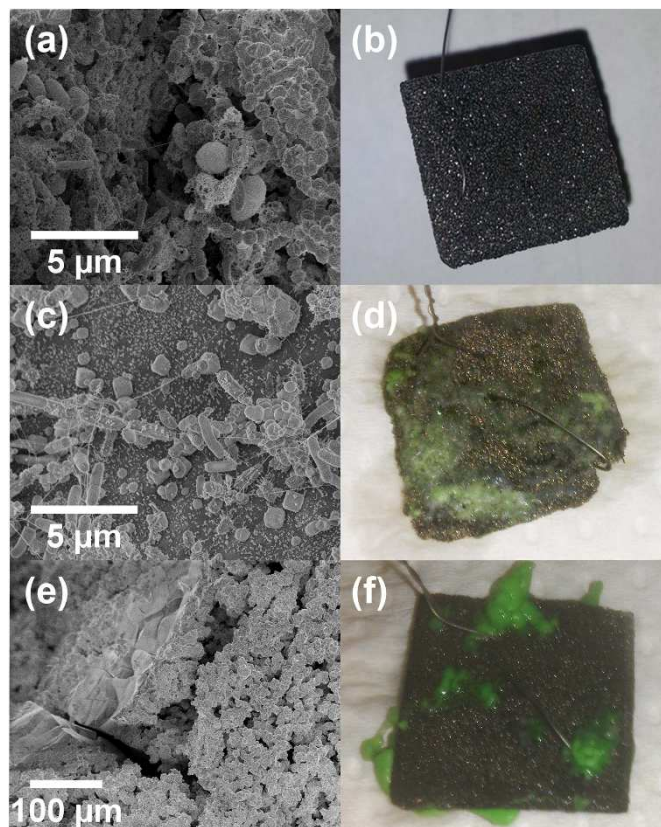


FIGURA 6. (a) Imagen SEM de la capa de grafeno sobre Ni, (b) Resistencia MIC del Gr/Ni después de 30 días, (c) Imagen SEM de la capa PA sobre Ni, (d) Corrosión del PA/Ni después de 30 días, (e) Imagen SEM de la capa PU sobre Ni, (f) Corrosión del PU/Ni después de 30 días.

(Fuente: Ajay Krishnamurthy, Venkataramana Gadhamshetty, Rahul Mukherjee, Bharath Natarajan, Osman Eksik, S. Ali Shojaee, Don A. Lucca, Wencai Ren, Hui-Ming Cheng & Nikhil Koratkar. 2015. Superiority of graphene over polymer coatings for prevention of microbially induced corrosion. Nature scientific reports, noviembre).

Algunas conclusiones que se pueden extraer de este estudio son que los recubrimientos con grafeno superan a sus homólogos polímeros en cuanto a resistencia ante la corrosión microbiana.

“El cobre recubierto por capas simples de grafeno mediante CVD corroe siete veces más lento que el cobre desnudo, mientras que el níquel cuando está recubierto por capas múltiples de este material lo hace 20 veces más despacio que el níquel sin recubrimiento.” [4]

En el grafeno influye tanto la forma en la que se aplica como el número de capas con las que cuenta.

Sin embargo, el proceso todavía se encuentra en la fase de pruebas de laboratorio.

Habrá que esperar, pero sin duda puede suponer una revolución en la aplicación de acabados en edificios con gran riesgo de corrosión (ambientes muy húmedos) y acabados interiores para edificios sensibles a las bacterias (como hospitales, clínicas, etc.)

2.3 Potenciador de la resistencia mecánica

En los últimos tiempos se está investigando el uso del grafeno en el nano-refuerzo de materiales de base cementicia. En concreto, el óxido de grafeno, que se obtiene por la exfoliación química del grafito.

El cemento Portland es ampliamente utilizado en la construcción. Sin embargo, debido a su poca resistencia a tracción y capacidad de deformación, tradicionalmente se ha reforzado con barras de acero.

Los avances recientes en la nanotecnología han producido partículas / fibras nanométricas (por ejemplo, nano-sílice y nanotubos de carbono) que podrían utilizarse como refuerzos para impedir la formación y propagación de microfisuras.

Los nanorefuerzos para este tipo de materiales son más eficaces que las barras o fibras de acero ya que pueden controlar la aparición de nano grietas (en la etapa de iniciación) antes de que aumenten y se conviertan en micro grietas.

“El nano-sílice tiene una forma esférica con diámetros inferiores a 30 μm y con una superficie específica de 300 m^2/g ” [4]. El rendimiento mecánico mejorado se atribuye generalmente a dos mecanismos:

En primer lugar, como núcleos para la fase de cemento, el nano-sílice puede favorecer la hidratación del cemento debido a su alta superficie específica.

En segundo lugar, como relleno, el nano-sílice puede densificar altamente la microestructura porque su tamaño es comparable al del poro del gel en la matriz del cemento.

Sin embargo, debido a su baja relación de proporción (relación longitud – espesor), el nano-sílice carece de capacidad para detener microfisuras derivadas de grietas de nano-tamaño.

Los nanotubos de carbono (CNTs) pueden considerarse como un tubo unidimensional. La combinación de beneficios por una alta relación de proporción y un excelente rendimiento mecánico proporcionan a los materiales cementíceos una mejora del módulo elástico y la resistencia.

Sin embargo, la incorporación de CNTs en compuestos de cemento ha demostrado ser bastante compleja y a veces con resultados contraproducentes. Generalmente esto se debe a la unión débil entre los CNTs y la matriz de cemento.

Se ha comprobado que el empleo de grafeno es mucho más eficiente que los nanotubos de carbono. Presenta una relación de proporción de 2000 y el área superficial de una única lámina de grafeno puede alcanzar teóricamente los 2600 m^2/g (valores mucho más altos que los de los CNTs).

“Sólo se necesita el 0.1% del peso (del compuesto) de grafeno para mejorar las propiedades mecánicas del material en el mismo grado que mediante la adición del 1% de CNTs”. [5]

Como un derivado del grafeno, existe el óxido de grafeno (GO), que como veremos a continuación, es el más adecuado en el uso de refuerzo de materiales cementíceos. El GO puede obtenerse fácilmente a partir de escamas de grafito natural mediante una fuerte oxidación y posterior exfoliación.

La textura superficial de la lámina de GO es rugosa, lo que proporciona una conexión mecánica entre la lámina y la matriz de cemento. Esto ayuda a mejorar la transferencia de carga interfacial entre ambas y conseguir una mayor fuerza de enlace.

Las láminas de GO contienen grupos ácido carboxílico que pueden reaccionar con C-S-H o $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La interacción puede formar un fuerte enlace covalente en la interfaz entre el GO y la matriz, y por lo tanto aumenta la eficiencia de transferencia de carga de la matriz de cemento a las chapas GO. Como resultado, se mejoran las propiedades mecánicas del material compuesto.

La distribución de las láminas de GO en la matriz está influenciada en gran medida por su estado de dispersión en el agua.

A diferencia de los CNTs, que existen como una forma sólida aglomerada y, por lo tanto, su dispersión en agua sólo puede conseguirse usando surfactantes (que pueden degradar las propiedades del cemento); las láminas GO son hidrófilas y altamente dispersables en agua (debido a los grupos que contienen oxígeno).

“Los resultados obtenidos del compuesto GO-cemento muestran que sólo se necesita un 0.05% de peso de láminas de GO para aumentar la resistencia a flexión de la pasta de cemento Portland en un 41 – 59% y la resistencia a compresión en un 15 – 33%”. [5]

La resistencia de los materiales cementosos está relacionada con la edad, debido a la progresiva hidratación del cemento. Se investigó cómo el paso de los días (fraguado) afectaba al cemento con láminas de GO.

Los resultados se representan en la figura 7, donde se puede observar que en todos los casos el cemento con GO presenta una mayor resistencia a compresión que el cemento por sí solo.

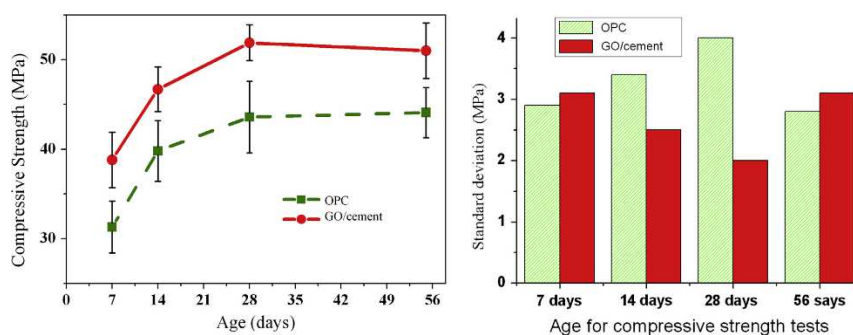


FIGURA 7. (a) Efecto de la edad sobre la resistencia a compresión; (b) Desviación estándar de los resultados de resistencia a compresión medidos en varias edades. (Fuente: Zhu Pan, Li He, Ling Qiu, Asghar Habibnejad Korayem, Gang Li, Jun Wu Zhu, Frank Collins, Dan Li, Wen Hui Duan, Ming Chien Wang. 2015. *Mechanical properties and microstructure of a graphene-oxide cement composite*. Elsevier, febrero).

Los resultados de las pruebas muestran que el GO puede lograr un alto nivel de refuerzo con un bajo porcentaje de contenido de peso.

Por ello, el óxido de grafeno es un candidato potencial para su uso como nano-refuerzos en materiales compuestos a base de cemento. La adición de GO puede conducir a una gran reducción en la trabajabilidad de la pasta de cemento. Sin embargo, aún se necesitan más estudios para mejorar estos nuevos compuestos y reducir los costes de producción.

2.4 Potenciador fotocatalítico

Cada día generamos una gran cantidad de gases y sustancias contaminantes con nuestras actividades. Estos gases son expulsados a la atmósfera, causantes del más que conocido cambio climático. Además, se ha probado que dichas partículas, como el dióxido de carbono (CO_2) o el óxido de nitrógeno (NO) tienen graves repercusiones sobre la salud de las personas.

Por ello, en los últimos años ha aumentado el interés en el proceso orgánico de fotodegradación de las partículas contaminantes.

El óxido de titanio (TiO_2) es una de las sustancias más prometedoras como fotocatalizador descontaminante. Sin embargo, la rápida recombinación del electrón con el hueco hace que su eficiencia sea baja, al no dar tiempo a absorber la polución. Además, sólo actúa con UV y no con todo el rango de la luz visible, lo que supone sólo un 5%.

Al combinarlo con grafeno se pretende mejorar estos aspectos. Estos compuestos se pueden clasificar en tres tipos: TiO_2 combinado con carbono activo, TiO_2 dopado con carbono y TiO_2 con un recubrimiento de carbono.

Gracias a que el grafeno puede ser modificado químicamente para ajustar sus propiedades superficiales, lo convierte en una sustancia ideal para crear materiales compuestos.

La combinación de TiO_2 con grafeno podría resolver algunos de los problemas que actualmente presentan los compuestos anteriormente mencionados, dando lugar a un material con excelente capacidad de adsorción, transparencia y conductividad.

En el laboratorio de química orgánica de fósforo y química biológica de la Universidad de Tsinghua, China, se demuestra una forma

fácil y reproducible de obtener un compuesto enlazado químicamente de óxido de titanio (P25) y óxido de grafeno (GO) mediante una reacción hidrotérmica.

Las nanopartículas de P25 se dispersan sobre un soporte de grafeno (una hoja de un átomo de espesor) como se muestra en la figura 8.

Comparado con el óxido de titanio aislado, este compuesto muestra significativas mejoras en tres aspectos:

- Un incremento en la adsorción de contaminantes.
- Un extendido rango de absorción de luz. Los enlaces químicos Ti - O - C y la buena transparencia del grafeno facilitan una utilización más eficiente de la luz para el catalizador.
- Suprimir la recombinación de cargas. El grafeno podría actuar como receptor de los electrones fotogenerados por el P25 y asegurar el rápido transporte de cargas gracias a su alta conductividad. Por lo tanto, se puede lograr una separación de cargas efectiva.

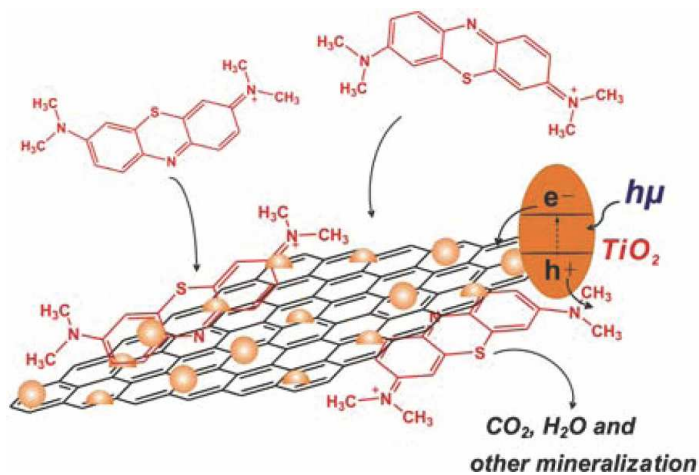


FIGURA 8. Estructura esquemática del P25-GR.
(Fuente: Hao Zhang, Xiaojun Lv, Yueming Li, Ying Wang, and Jinghong Li, 2009. P25-Graphene as a high performance photocatalyst. American Chemical Society, diciembre).

“Además, en la fotodegradación del azul de metileno (cloruro de metiltionina) se mostró una mejora de la actividad fotocatalítica en comparación con el P25-CNTs (el compuesto óxido de titanio – carbono más típicamente utilizado hasta ahora)”. [6]

Estas mejoras se deben a la estructura plana 2D del grafeno, más favorable a la adsorción de colorantes y transporte de cargas.

3. APLICACIONES DEL GRAFENO

Debido a las propiedades mencionadas anteriormente, el grafeno tiene su aplicación en numerosos campos, y son muchas las empresas y centros de investigación que están trabajando para desarrollar nuevas posibilidades.

Cabe destacar el proyecto “*The Graphene Flagship*”. Es la iniciativa de investigación más grande de la Unión Europea, con un presupuesto de 1 billón de euros para un periodo de tiempo de 10 años.

Es una nueva propuesta conjunta y coordinada. El consorcio central está formado por más de 150 grupos de investigación académica e industrial, de 23 países distintos. [11]

Su objetivo principal es llevar todos los estudios y experimentos académicos sobre el grafeno a aplicaciones para la sociedad, desde la producción de nuevos materiales hasta la integración de componentes y sistemas. Supone una revolución en múltiples sectores industriales, creando crecimiento económico y puestos de trabajo en Europa.

“*The Graphene Flagship*”, junto con “*Human Brain Project*” es la primera propuesta a esta escala de la Comisión Europea para el Futuro y la Tecnología Emergente (FET).

En el siguiente gráfico se muestra la cantidad de grafeno manufacturado que se destina a los distintos sectores (representado en porcentajes).

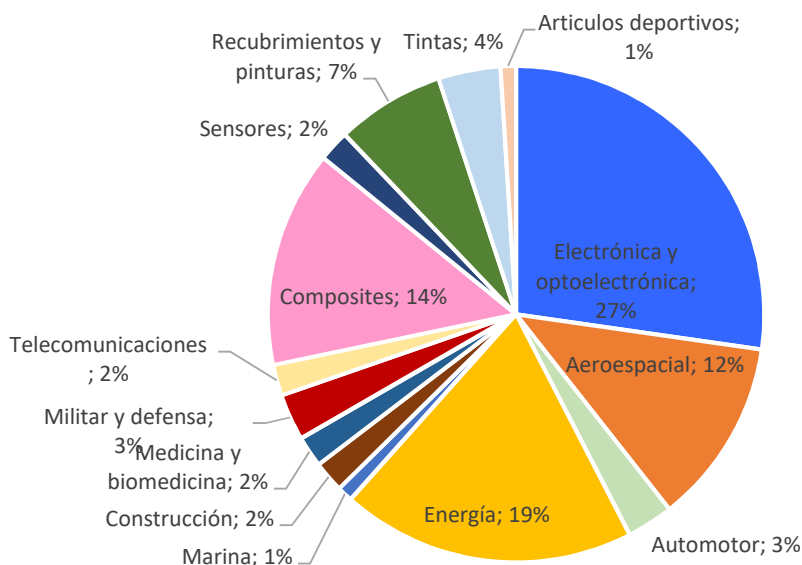


FIGURA 9. Consumo de grafeno (%) por industrias. (Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de <https://www.nanowerk.com/news/>)

3.1 El grafeno en la electrónica

Como se puede ver en la gráfica de la *Figura x*, el sector industrial de la electrónica es el mayor consumidor de grafeno manufacturado. Esto se debe a que las investigaciones en este campo han encontrado en el grafeno un material con altas prestaciones gracias a su potencial eléctrico.

Estas son algunas de las aplicaciones más relevantes hasta el momento:

- Pantallas transparentes y flexibles: Son dispositivos contruidos con grafeno como soporte.

La aplicación de este material, se debe a la combinación de sus propiedades como la conductividad, su transparencia (una lámina de grafeno sin defectos tiene una transparencia del 97,7%) y la capacidad de crear un elemento flexible y a la vez muy resistente.



FIGURA 10. Pantallas flexibles OLED
(Fuente: <http://www.flexenable.com/technology/flexible-olcd/>)

Estas pantallas estarán formadas por una lámina luminosa de tecnología OLED, "Organic Liquid Crystal Display" (representación visual por cristal líquido orgánico), que mostraría la imagen, protegida por una capa de grafeno.

El 90% de las pantallas LCD actuales están hechas con vidrio, lo que limita las posibilidades de uso. Lo que se propone es sustituir el vidrio por un plástico ultrafino y usar transistores orgánicos en lugar de silicio amorfo.

El grafeno aporta flexibilidad a las pantallas, siendo a la vez delgadas y muy resistentes. De larga duración y alto brillo, con el mismo rendimiento óptico que las tradicionales pantallas LCD.

El uso de sustratos plásticos y materiales orgánicos (grafeno) hace que el OLED sea al menos cuatro veces más delgado y diez veces más liviano que el LCD basado en vidrio. Puede adaptarse a superficies e incluso recortarse en formas. [13]

Propiedades	a-Si Glass LCD	OTFT Plastic LCD	Beneficios
Peso (g/cm^2)	0,25	0,025	10 veces más ligero
Espesor (mm)	~1,2	~0,03	4 veces más fino
Radio de curvatura (mm)	>1000	~30	Sobre 30 veces más flexible y conformable
Libertad de forma	Difícil	Fácil	Se puede convertir fácilmente en diferentes factores de forma
Rendimiento de movilidad ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	0,5	1,5	Una movilidad 3 veces más alta, resultando en una resolución más alta
Fuga eléctrica	$1\text{e-}13$	$1\text{e-}17$	1000 veces menos fuga eléctrica, lo que permite modos de conducción de energía y diseño flexible

FIGURA 11. Cuadro de beneficios del OLCD frente al LCD de vidrio
(Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de <http://www.flexenable.com/technology/flexible-olcd/>)

- Detector de huellas dactilares: Se trata de sensores flexibles que permitirán nuevas formas que no se pueden conseguir con los chips de silicio.

Elimina la necesidad de la óptica de vidrio utilizada en los escáneres de huellas digitales convencionales, lo que resulta en dispositivos menos voluminosos.

Capaz de obtener imágenes multispectrales, lo que lo hace menos susceptible a los contaminantes, el contacto inadecuado o las luces ambientales brillantes.

La creciente necesidad de una mejor seguridad y métodos de autenticación fáciles de usar está impulsando una mayor adopción de lectores de huellas digitales en la banca, la electrónica de consumo, la atención sanitaria, control de fronteras, etc.



FIGURA 12. Sensor huellas dactilares
(Fuente: <http://www.flexenable.com/applications/biometrics/>)

- Antenas NFC: Uno de los grandes objetivos para la tecnología moderna es reemplazar las convencionales antenas metálicas por otras de materiales más ligeros, baratos y sostenibles para el medio ambiente.

CNR-ISOF trabaja en dispositivos NFC, near-field communication, (comunicación de campo cercano) con derivados del grafeno. Estos pueden funcionar como llaves electrónicas, etiquetas flexibles, tarjetas inteligentes y otras aplicaciones NFC típicas.

3.2 El grafeno en la industria automovilística y aeroespacial

En el sector del automóvil se está trabajando por crear nuevos materiales compuestos que puedan servir para recubrimientos y carrocerías.

El grafeno mejora el rendimiento de los materiales existentes y permite nuevos campos de aplicación. Es un material muy adecuado para reforzar materiales como plásticos o resinas, ya que aporta una gran resistencia, permitiendo a su vez crear elementos ligeros y flexibles.

Además, al ser químicamente inerte y por tanto anticorrosivo, es muy adecuado para su uso en elementos que van a ser expuestos a los agentes atmosféricos. Al combinar pintura con grafeno, se puede crear un recubrimiento que podría suponer el fin del deterioro de coches, barcos, etc. por oxidación.

B.A.C (Briggs automotive Company) presentó en el Graphene Experience Zone de 2017 en Barcelona la última versión de su coche monoplace. Sus paneles de carrocería están hechos con un compuesto de fibra de carbono y grafeno. En este proyecto también participaron la Universidad de Manchester y Haydale.



FIGURA 13. Carrocería coche monoplace de B.A.C
(Fuente: Graphene Flagship. Graphene Experience Zone)

Graphene Flagship está llevando a cabo un proyecto de colaboración entre el Instituto Italiano de Tecnología (ITT) y la empresa italiana de diseño Momodesign para desarrollar un casco de motocicleta basado en grafeno. El resultado fue un casco más seguro y que proporciona un mayor confort térmico.

Están contruidos con dos partes: una cáscara exterior sólida y una parte interior de espuma de poliestireno.

Un recubrimiento de grafeno, con escamas de grafeno de pocas capas (*“few-layer graphene flakes”* [17]), se aplica por pulverización en la cáscara exterior. Esto permite una mejor distribución de la fuerza de impacto y hace que este sea menos susceptible a daños en comparación con los cascos convencionales. Gracias a la aplicación de grafeno, se puede conseguir el mismo nivel de seguridad con un casco más delgado.

Las excelentes propiedades de conducción térmica del grafeno permiten que el calor se disipe rápidamente a través del casco y protegen los materiales internos de la degradación causada por el calor.

Ya se ha producido una partida inicial de 3000 cascos para la venta en mercados especializados y grandes salas de exposición de automovilismo.



FIGURA 14. Casco de motocicleta basado en grafeno
(Fuente: Graphene Flagship. Graphene Experience Zone)

En cuanto al sector aeroespacial, Graphene Flagship tiene un proyecto denominado “Zero Gravity Graphene” dedicado a investigaciones y aplicaciones del grafeno es este sector.

En colaboración con la Agencia Espacial Europea, se están desarrollando experimentos con grafeno para dos aplicaciones concretas con resultados muy prometedores: tuberías de calor en satélites y velas espaciales solares.

- Tuberías de calor: Son utilizados en sistemas de refrigeración de satélites. Se está comprobando que, gracias a las excelentes propiedades térmicas que presenta el grafeno, se podría mejorar notablemente su rendimiento. Esto implicaría un aumento en la vida útil y una mejora en la autonomía de los satélites y las sondas espaciales.

En este proyecto participan el Microgravity Research Center (Université Libre de Bruxelles), The Cambridge Graphene Centre (University of Cambridge), The Institute for Organic Synthesis and Photoreactivity y el Institute for Microelectronics and Microsystems (ambos pertenecientes al National Research Council of Italy).

Como grupo industrial cuentan Leandro S.p.A, líder mundial en el sector aeroespacial. Opera en sistemas espaciales y fabricación de instrumentos de alta tecnología, y en la gestión de servicios de lanzamiento en órbita y servicios satélites.

La gestión térmica es muy importante, ya que la falta de aire precisa de soluciones tecnológicas específicas para expulsar el calor hacia el espacio.

Las altas temperaturas disminuyen la fiabilidad de los componentes y pueden afectar el rendimiento del equipo electrónico. La diferencia de temperatura entre los dos lados de un satélite (el que mira al sol y el contrario) puede llegar hasta los 200°C.

Utilizando un circuito de tuberías de calor, éste puede transferirse desde los puntos calientes a las partes frías, irradiando el exceso de calor al espacio.

El elemento principal de este circuito de tubería de calor es la mecha metálica, donde el calor se transfiere de un objeto caliente a un fluido que enfría el sistema.

Las mechas de metal se recubrirían con una espuma a base de grafeno. Esto aumenta el área de interacción de la superficie con el líquido, de modo que el calor puede transferirse más suavemente desde la mecha al fluido, reduciendo el diferencial de temperatura.

Las espumas a base de grafeno también mejorarán la presión capilar de la mecha, permitiendo que el fluido viaje más rápido a través de la tubería de calor.

Se pretende probar cómo los revestimientos a base de grafeno pueden mejorar la eficiencia de estas tuberías. Para ello, se probaron en condiciones de gravedad casi nula en un vuelo parabólico operado por la Agencia Espacial Europea.

- Velas espaciales solares: Se usan en el espacio como un método de propulsión de naves espaciales, usando luz del sol. Cuando la luz se refleja es absorbida por una superficie, ejerce una fuerza que empuja la superficie lejos de la fuente de luz. Esta presión de radiación se puede utilizar para impulsar objetos en el espacio sin usar combustible o gases.

Sin embargo, el empuje generado por la presión de radiación es muy bajo. Para una propulsión efectiva, la vela debe tener una superficie grande y ser lo más ligera posible. Esto hace que el grafeno sea un material muy adecuado, ya que es resistente y ligero.

El equipo GrapheneX (Delft Technical University) es el encargado de la investigación. Se realiza un experimento que simula las condiciones de gravedad casi nula, en el que se probará membranas de grafeno, suministradas por Graphenea.

3.3 El grafeno en el sector energético

Uno de los asuntos que más preocupa e interesa a la sociedad actual es el de la energía. Se están demandando energías limpias y renovables, como la energía solar o eólica, que sustituyan los combustibles fósiles convencionales. Por este motivo, se están dedicando muchos estudios sobre materiales que puedan convertir directamente o almacenar esas energías renovables.

El grafeno tiene un gran potencial para aplicaciones relacionadas con sistemas de energía. Esto es debido principalmente a su estructura bidimensional con el espesor de un átomo, su alta conductividad eléctrica y térmica, su transparencia óptica, su resistencia mecánica, flexibilidad inherente y su gran área específica.

Con este propósito, el grafeno se mezcla frecuentemente con polímeros para formar compuestos que mejoren las propiedades y rendimiento del material tradicionalmente empleado.

Los compuestos grafeno-polímero se han explorado como electrodos de supercondensadores o baterías de iones de litio, células solares (electrodos conductores transparentes y capas activas de células solares orgánicas), y celdas de combustible (electrodos catalíticos y membranas electrolíticas poliméricas).

- Baterías de iones de litio (LIBs): Son los dispositivos de almacenamiento de energía más atractivos debido a sus altas densidades de energía y potencia, a su largo ciclo de vida y su buena compatibilidad medioambiental.

Tradicionalmente los materiales empleados para estos dispositivos eran de origen inorgánico, procedentes de recursos minerales no renovables.

Como alternativa, se está investigando el uso de materiales poliméricos. Concretamente, se ha demostrado que creando un compuesto grafeno-polímero los resultados son mucho más efectivos.

La estructura molecular bidimensional del grafeno y sus altas conductividades eléctricas permiten que se puedan formar fácilmente estructuras 3-D porosas, que pueden actuar como redes de conductividad en los electrodos. El compuesto polipirrol-reducción de óxido de grafeno (PPy-rGO) presenta una mejora en la conductividad eléctrica, una mayor capacidad de velocidad de los electrodos y también una capacidad de descarga ligeramente mayor en comparación con el polímero aislado. [18]

- Supercondensadores: Son dispositivos de almacenamiento de energía que se pueden cargar y descargar a altas velocidades. Actúan como un complemento para baterías y celdas de combustible. Se consideran prometedores para su uso como suministro de energía en automóviles eléctricos “eco-friendly” y dispositivos electrónicos portátiles de alto rendimiento.

Los supercondensadores se pueden clasificar en dos tipos según sus mecanismos de almacenamiento: condensadores eléctricos de doble capa (EDLC) y pseudocondensadores.

Nos van a interesar sobre todo los pseudocondensadores, ya que es donde podemos emplear polímeros como material del electrodo. *“Un pseudocondensador funciona predominantemente a través de reacciones redox reversibles rápidas. En comparación con los EDLC, tienen capacidades mucho más grandes, pero generalmente poseen menor velocidad de carga/descarga y peor estabilidad en el ciclo”*. [18]

Los polímeros más adecuados para esto son la polianilina (PANI) y el polipirrol (PPy) dopados con grafeno, que mejoran

la mecánica y la estabilidad electroquímica del ciclo de los electrodos.

- Células solares: Pueden convertir directamente la energía solar en energía eléctrica. Hasta ahora, se han utilizado e industrializado sobre todo células solares compuestas por silicio. Estas presentan una alta eficiencia de conversión de energía. Sin embargo, implican unos costes muy altos y grandes problemas de contaminación para el medioambiente.

Como alternativa, se proponen células solares orgánicas, y entre ellas, las compuestas por grafeno.

Los electrodos transparentes conductores (ECT) son un componente clave en estos dispositivos optoelectrónicos. *“Las características que deberían poseer para tener un buen rendimiento son una gran transparencia (>80%), baja resistencia (<100Ω) y una función de trabajo apropiada (4,5 – 5,2 eV)”*. [18]

Actualmente, el material más utilizado para la fabricación de los ECT es una combinación de indio y óxido de estaño. A parte de los altos costes de producción y los recursos limitados de indio, presenta otras desventajas como que no puede ser utilizado en dispositivos flexibles porque es mecánicamente rígido y quebradizo.

El grafeno, por su alta conductividad eléctrica, su transparencia del 97% y su flexibilidad, es el material emergente para el desarrollo de los futuros ECTs, especialmente dispositivos fotovoltaicos que puedan ser flexibles y ultra finos.

- Celdas de combustible: Generan energía oxidando combustibles a bajas temperaturas por catalizadores inmovilizados en electrodos.

Los compuestos grafeno-polímero han sido utilizados como catalizadores y electrolitos sólidos de las celdas de combustible:

Los compuestos de grafeno y polímeros que contienen nitrógeno han sido probados como catalizadores efectivos para la reacción de reducción de oxígeno. Estos catalizadores son insensibles al monóxido de carbono (CO), por lo que tienen una buena durabilidad en electrocatálisis.

Respecto a los electrolitos sólidos, se ha desarrollado una membrana electrolítica polimérica fabricada con un compuesto de óxido de grafeno (GO) y óxido de polietileno (PEO).

El óxido de grafeno proviene del grafeno químicamente modificado con abundantes grupos funcionales de oxígeno y un área de superficie alta, proporcionado con canales de transporte de protones y la capacidad de retener al agua. Por lo tanto, es un nano relleno prometedor para mejorar las conductividades del protón y las propiedades mecánicas de la membrana electrolítica polimérica. [18]

3.4 El grafeno en medicina y biomedicina

Los materiales basados en grafeno, ya sean láminas de grafeno, escamas de grafeno de pocas capas (“few-layered graphene flakes”), u óxido de grafeno, poseen unas propiedades únicas que permitirán aplicaciones pioneras en el campo de la medicina y biomedicina.

- Implantes de retina: Pueden servir como prótesis ópticas para personas ciegas cuyos nervios ópticos están intactos.

A diferencia de los materiales usados tradicionalmente, el grafeno tiene una excelente biocompatibilidad gracias a su gran flexibilidad y durabilidad química. El grafeno proporciona una eficiente interfaz para la comunicación entre la prótesis de retina y el tejido nervioso debido a sus excelentes propiedades electrónicas.

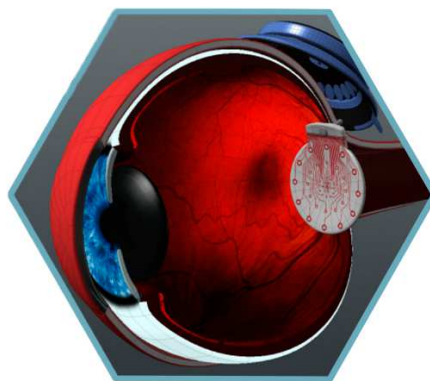


FIGURA 15. *Implante de retina*
(Fuente: *Graphene Flagship. Graphene Experience Zone*)

- Manos protésicas robóticas: Un sensor portátil fabricado con un compuesto de celulosa y grafeno podría controlar las manos protésicas robóticas.

Un dispositivo desarrollado por la IIT en forma de pulsera, se coloca en la muñeca y traduce el movimiento de la mano en señales eléctricas que se utilizan para mover la mano artificial.

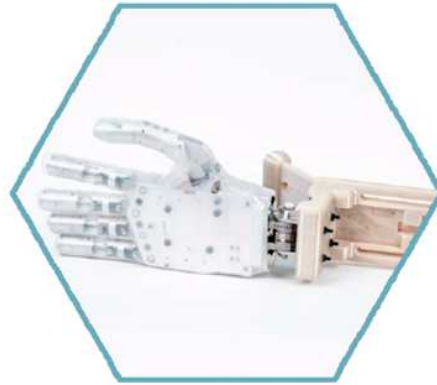


FIGURA 16. Prótesis robótica de una mano.
(Fuente: Graphene Flagship. Graphene Experience Zone)

- Sensores de bienestar flexibles: Mediante dispositivos portátiles (parches, brazaletes, etc) que incorporan unos sensores basados en grafeno, se puede medir el ritmo cardiaco, temperatura corporal, etc.

4. APLICACIONES EXISTENTES DEL GRAFENO PARA LA ARQUITECTURA

4.1 Material compuesto grafeno – óxido de titanio

Actualmente se está haciendo un esfuerzo global para comprender la influencia de las actividades humanas en el medio ambiente y para desarrollar nuevas tecnologías que mitiguen los problemas ecológicos y de salud asociados a los contaminantes producidos por dichas actividades.

Entre las diferentes estrategias para afrontar estos retos, ha cobrado un gran interés el campo de la nanotecnología. Desarrollar materiales fotocatalíticos estables y eficaces para la eliminación de partículas contaminantes en el aire y el agua se está convirtiendo en un tema cada vez más primordial. Hasta ahora, el material más estudiado para este fin es el óxido de titanio.

Sin embargo, el óxido de titanio presenta dos limitaciones:

- Durante el proceso fotocatalizador, los electrones se excitan desde la banda de valencia del TiO_2 a la banda de conducción. No obstante, los electrones excitados en la banda de conducción y los agujeros en la banda de valencia se recombinan fácilmente en pocos segundos, disipándose en forma de calor, antes de que lleguen a la superficie del fotocatalizador. Esto provoca que la eficiencia de la actividad fotocatalítica sea baja.
- Sólo actúa con UV y no con todo el rango de la luz visible, lo que supone sólo un 5%.

El grafeno está siendo ampliamente estudiado como refuerzo de materiales existentes, mejorando sus propiedades y su rendimiento. Uno de estos materiales con los que se está trabajando, y que en el campo de la arquitectura podría ser muy interesante, es el compuesto óxido de grafeno – óxido de titanio (GO- TiO_2). Con este compuesto se pretenden mejorar los dos aspectos anteriormente mencionados.

A través de la oxidación química de grafito, este se oxida y exfolia en láminas de óxido de grafeno (GO) con la introducción de grupos funcionales que contienen oxígeno. Además, en este proceso no se requieren tratamientos adicionales con ácidos para darle un carácter hidrofílico y reactivo al GO. Esta es una ventaja significativa, ya

que esos grupos funcionales son en gran parte los responsables de la adsorción de contaminantes.

Actualmente, se están desarrollando numerosas aplicaciones con propiedades fotocatalíticas basadas en el TiO_2 . Sería muy interesante que estas aplicaciones se elaboraran con este nuevo material compuesto, ya que daría como resultado elementos mucho más eficientes. Esta propuesta se desarrollará en el capítulo 5.1.

4.2 Pinturas y morteros

Son muchas las empresas que han desarrollado y trabajan con pinturas con grafeno. Añadiendo fibras de grafeno a la composición de las pinturas, se pueden mejorar propiedades como la resistencia y durabilidad, la facilidad de limpieza, una mayor resistencia a los agentes atmosféricos, etc.

Una de las empresas españolas más destacadas que trabaja con pinturas con grafeno es GRAPHENSTONE.



FIGURA 17. Graphenstone

(Fuente: <http://www.graphenstone.com/index.html>)

4.2.1 Pinturas para exterior

El empleo de pinturas con grafeno para exteriores nos ofrece varias ventajas. En primer lugar, el grafeno al ser inmune a los agentes atmosféricos (por tanto, no se corroe) permite que esas pinturas no se degraden y permanezcan inmutables en el tiempo. Esto se traduce en un menor mantenimiento y un ahorro en costes. Además, gracias a su flexibilidad, la pintura no se cuartea. Por último, al ser un material resistente y duradero, se puede crear una amplia gama de colores resistentes, que no pierden su intensidad ni su brillo con el paso del tiempo.

Estas pinturas son adecuadas tanto para fachadas de obra nueva como para la rehabilitación y restauración de patrimonio.

- Anticorrosión: Al ser el grafeno impermeable a cualquier gas y químicamente inerte, es una barrera muy efectiva contra la oxidación del sustrato. Además, es un material ecológicamente

sostenible, lo que lo convierte en una buena alternativa a elementos que se vienen utilizando, como los cromatos, que son tóxicos y perjudiciales.

Las fibras de grafeno se introducen en la matriz, aumentando la longitud de los recorridos de difusión para las especies corrosivas. La orientación de estos nanocompuestos en el recubrimiento debe ser paralela a la superficie.

- Resistencia y durabilidad: Al incorporar fibras de grafeno, que poseen una elevada dureza y bajo coeficiente de fricción, conseguimos aumentar la resistencia al desgaste y reducir el coeficiente de fricción total de la superficie, con lo que las temperaturas de trabajo se reducen, y con ello, se limitan los procesos de degradado de la cobertura. [23]

GRAPHENSTONE ha desarrollado toda una gama de pinturas para exterior con una gran variedad de colores y de acabados.

“BIOSPHERE Premium” es una pintura a base de cal obtenida por medios 100% naturales y grafeno. Tiene un acabado blanco mate. Con un alto poder de cubrición (6-9 m²/l en dos manos dependiendo del tipo y del estado del soporte). Además, presenta la propiedad añadida de absorber CO₂ (4,8 kg/ 15 l).



FIGURA 18. Ejemplo de acabado de BIOSPHERE Premium
(Fuente: <http://www.graphenstone.com/Graphenstone-Global-Biosphere>)

“GCS EXTERIOR Premium” es una pintura de color con fibras de grafeno. Presenta una gama de 322 colores de acabado mate. Se trata de un revestimiento con pigmentos seleccionados que permiten crear colores resistentes y duraderos.



FIGURA 19. Ejemplo de acabado de GCS EXTERIOR Premium
(Fuente: <http://www.graphenstone.com/Graphenstone-Global-GCS-Exterior>)

“KRATZPUTZ Premium” es un híbrido entre pintura y mortero. Es un revestimiento natural con grafeno de acabado texturizado. Se caracteriza por su gran resistencia a cambios de temperatura, zonas de intensas lluvias o nieve.

“Se trata de un producto híbrido entre un mortero de cal y una pintura con una granulometría de 2-3mm”. [26]



FIGURA 20. Ejemplo de acabado de KRATZPUTZ Premium
(Fuente: <http://www.graphenstone.com/Graphenstone-Global-Kratzputz>)

4.2.2 Pinturas para interior

Al igual que las pinturas para exterior, se pueden conseguir unas pinturas resistentes y duraderas para interiores.

Otro aspecto que resulta muy interesante para el acondicionamiento de interiores es que el grafeno, por ser químicamente inerte, puede servir como superficie bactericida. Gracias a esto se pueden conseguir ambientes más sanos con aire en espacios cerrados más purificado y limpio, aumentando el confort en ambientes domésticos.

Además, estas pinturas pueden ser muy útiles en espacios que necesiten especialmente de ambientes limpios, como pueden ser hospitales, clínicas, geriátricos etc.

- Antibacteriano: La mayoría de las investigaciones sobre el grafeno en este aspecto han concluido que el óxido de grafeno (GO) y la reducción de óxido de grafeno (rGO) son mucho más efectivos que el grafeno puro. Esto es debido a que son compuestos mucho más activos sobre la viabilidad de las bacterias.

“Tanto las láminas de GO como de rGO 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”. [25]

La fuerte actividad antibacteriana del GO se debe a la producción de radicales hidróxilo que atacan a las paredes celulares de las bacterias, provocando su muerte.

GRAPHENSTONE tiene varias pinturas para interior patentadas.

“ECOSPHERE Premium” es una pintura compuesta a base de cal de alta calidad con grafeno. Presenta acabados blanco mate y semi-mate (“egg-shell”). Con alto poder de cubrición y una blancura superior al 98%. Son superficies fáciles de limpiar, lo que favorece los espacios interiores salubres. Alta resistencia, adherencia y durabilidad.

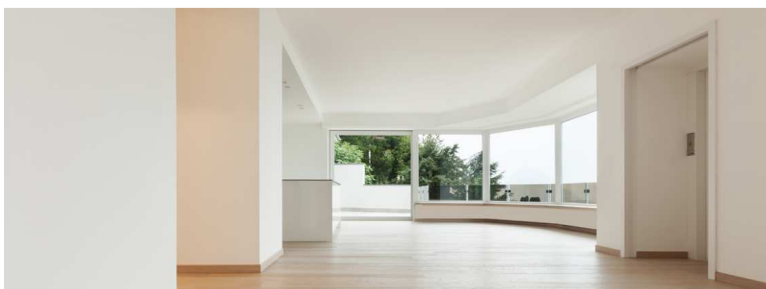


FIGURA 21. Ejemplo de acabado de ECOSPHERE Premium
(Fuente: <http://www.graphenstone.com/Graphenstone-Global-Ecosphere>)

“GCS INTERIOR Premium” es la versión GCS para interiores. Es una pintura de color con fibras de grafeno. Presenta una gama de 980 colores de acabado mate. Es ideal para decorar interiores, garantizando la transpirabilidad y la salubridad de la edificación.



FIGURA 22. Ejemplo de acabado de GCS INTERIOR Premium
(Fuente: <http://www.graphenstone.com/Graphenstone-Global-GCS-Interior.html>)

“STUKI Premium” es un revestimiento con grafeno para obtener estucos venecianos. De gran brillo y fácil aplicación. Permite una gran versatilidad de trabajos de alta decoración.

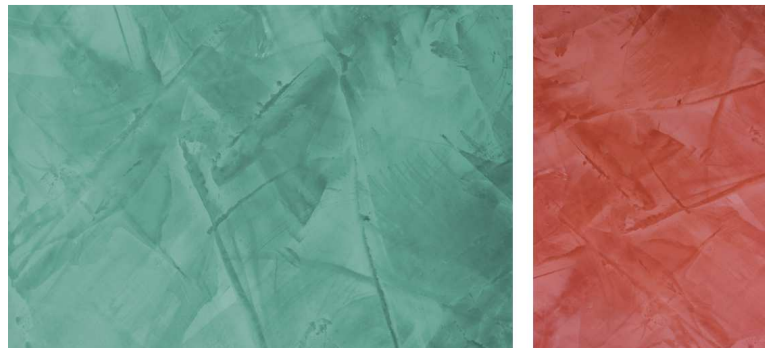


FIGURA 23. Ejemplo de acabado de STUKI Premium
(Fuente: <http://www.graphenstone.com/Graphenstone-Global-Stuki>)

4.3 Recubrimientos y películas. Tintas conductoras

Se ha experimentado con óxido de grafeno (GO) en tintas para obtener una alta conductividad eléctrica para su aplicación impresa en numerosos tipos de sustratos.

En la Universidad de Illinois (Chicago) se ha desarrollado una investigación en la que se refuerza una emulsión acrílica con grafeno, con el fin de obtener una pintura con alta conductividad eléctrica. Esta pintura tendrá además una gran adherencia y se podrá aplicar sobre distintos sustratos para fines tecnológicos. Esta emulsión acrílica contiene ftalocianina de cobre lorada y grafeno.

Son varias las empresas que están trabajando con tintas conductoras como recubrimientos y películas de otros sustratos. Caben destacar GNext y NOVALIA.



FIGURA 24. GNext

(Fuente: <http://www.graphene-xt.com/>).

GNext es una empresa italiana que ha patentado un método de producción de grafeno que rebaja los costes de producción, obteniéndose un material de alta calidad. Además, el material se dispersa en un medio acuoso y el proceso de fabricación no implica el uso de ningún agente exfoliante tóxico ni ninguna técnica o equipo peligroso. Toda la producción y el procesamiento se realiza a baja temperatura, lo que permite la deposición simple de cualquier sustrato polimérico.

Con el grafeno que producen, desarrollan varios productos, entre ellos las tintas conductoras. La “GNext XT Ink” contiene una suspensión altamente concentrada de grafeno en agua, con una concentración de grafeno de 20mg/ml. El grafeno, en forma de láminas planas, es producido por exfoliación química de grafito usando un agente exfoliante patentado. No hay ningún proceso de oxidación involucrado, por lo que se obtiene un producto con las excelentes propiedades electrónicas del grafeno.

Las tintas se pueden imprimir en películas poliméricas utilizando impresoras comerciales. Esto resulta una muy buena opción para realizar preparaciones rápidas o crear prototipos. Para producciones a mayor escala es preferible un método de impresión por huecograbado, ya que garantiza una mejor definición a menor coste.

Se pueden imprimir circuitos conductivos complejos y personalizados con varias tecnologías en una amplia gama de sustrato: láminas de polímero, papel, metales e incluso bioplástico.



FIGURA 25. Novalia

(Fuente: <http://www.novalia.co.uk/>)

Novalia es una compañía inglesa que también destaca por la elaboración de tintas conductoras con grafeno.

En Novalia usan esta tecnología para crear películas táctiles auto-adhesivas muy finas, a partir de tintas conductoras impresas y un micro módulo controlador de silicio adjunto.

Una aplicación muy interesante que podría tener esto en el sector de la arquitectura sería la creación de superficies activas. Además, se podrían integrar sistemas para controlar la tensión o el fallo de las estructuras. Se imprimirían en sustratos de plástico con grafeno y se acoplarían con varios tipos de polímero para obtener revestimientos inteligentes. Estas propuestas se desarrollarán en el capítulo 5.2

4.4 Hormigones mejorados

Los compuestos de cemento son los materiales más importantes y abundantes en lo que a construcción se refiere. Aunque en la actualidad se han desarrollado varios compuestos de alto rendimiento, estos siguen presentando un problema común: siguen siendo propensos a agrietarse debido a la fragilidad del cemento. Prueba de ello, es que estos compuestos suelen presentar una alta resistencia a compresión, pero baja resistencia a tracción y flexión.

De hecho, la forma de mejorar significativamente la resistencia de los compuestos depende principalmente de los materiales de refuerzo (barras de acero, fibras minerales, fibras de carbono, fibras de polímero, etc).

Estos materiales pueden mejorar la resistencia del conjunto, pero la alta fragilidad y el agrietamiento asociado aún ocurren. *“La razón principal de esto es porque la alta fragilidad de los compuestos proviene de la pasta de cemento endurecido, que se compone de productos de reacción de hidratación del cemento, como la etringita (AFt), monosulfonato (AFm), hidróxido de calcio (CH) y gel hidratado de silicato de calcio (CASAH). CH, AFt y AFm suelen exhibir varillas y cristales en forma de aguja”.* [27]

Hasta ahora, los métodos de endurecimiento descuidaban la regulación de la microestructura de la pasta de cemento (como la forma de los cristales de hidratación). Es aquí donde entra el óxido de grafeno (GO), que forma compuestos fácilmente con otros materiales y mejora notablemente la dureza a través del control de la

microestructura de cristales. Además, tiene un área superficial específica alta, es flexible y ultra resistente.

Las láminas de GO se obtienen por oxidación de grafito y posterior dispersión ultrasónica, con una concentración del 0,2%.

El contenido de oxígeno del GO ha aumentado hasta el 29,75% respecto al 3,72% del grafito antes de ser oxidado. Los grupos funcionales de oxígeno penetran en las capas intermedias del grafito, aumentando la distancia entre ellas y debilitando su interacción. Esto ayudará a dispersar fácilmente el GO en soluciones acuosas y formar una suspensión estable de láminas.

La Figura 26 muestra las resistencias a tracción, flexión y compresión para compuestos de cemento que contienen distintos porcentajes de GO (% de dosificación sólida y por peso de cemento).

El cemento utilizado para hacer estas mediciones se preparó mezclando 450 g de cemento, 1350 g de arena estándar, 165 g de agua y 0,9 g de PC (policarboxilato superplastificante).

% GO	Resistencia a tracción (MPa) / Incremento (%)		Resistencia a flexión (MPa) / Incremento (%)		Resistencia a compresión (MPa) / Incremento (%)	
	3 días	28 días	3 días	28 días	3 días	28 días
0%	1,94/0	3,83/0	5,63/0	8,84/0	36,74/0	59,31/0
0.01 %	2,47/28,0	5,63/47,0	8,55/51,9	13,4/51,7	41,2/12,2	67,2/13,4
0.02 %	2,48/27,8	6,11/59,5	8,68/54,2	11,8/32,9	48,3/31,5	75,7/27,6
0.03%	2,93/51,0	6,84/78,6	9,61/70,7	14,2/60,7	53,3/45,1	82,4/38,9
0.04%	2,42/24,7	5,23/36,6	7,23/28,4	11,54/30,5	56,4/53,6	84,4/42,2
0.05%	2,41/24,2	5,20/35,8	7,21/28,1	11,51/30,2	58,5/59,0	87,7/47,9

FIGURA 26. Cuadro de resistencias del compuesto de cemento con distinto % de GO.

(Fuente: Elaboración propia. Datos obtenidos de *Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites. Construction and building materials*, septiembre. p. 121-127).

Los resultados indican que la resistencia a tracción y a flexión aumentan con una dosificación de GO de hasta el 0,03%, llegando a aumentar a los 28 días un 78,6% y un 60,7% respectivamente. Generalmente hay una correlación significativa entre la resistencia a tracción y a flexión.

La resistencia a compresión va aumentando hasta el 0,05% de GO, incrementando un 47,9% a los 28 días.

Las propiedades mecánicas de los compuestos de cemento vienen determinadas por su microestructura.

Tal y como se muestra en la figura x, las imágenes SEM (Scanning Electron Microscope) de la microestructura del compuesto de cemento varían cuando es mezclado con GO en diferentes dosificaciones.

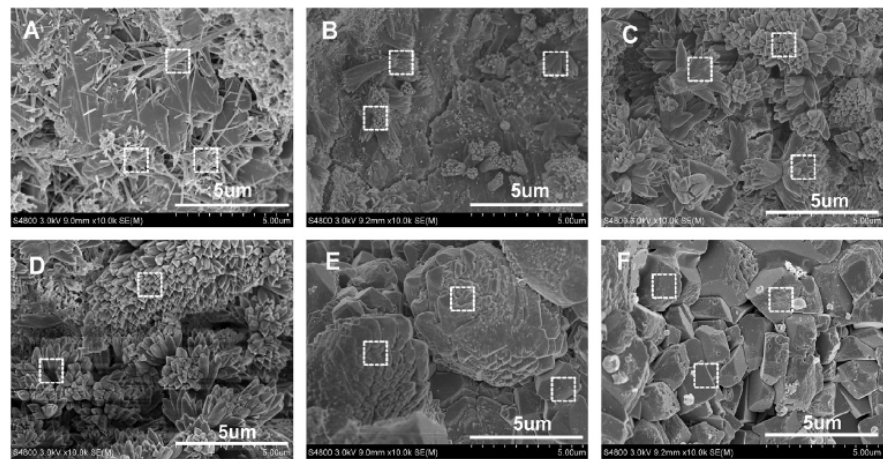


FIGURA 27. Imágenes SEM de compuesto de cemento con distinto % de GO. A) sin GO; B) 0,0,1% GO; C) 0,02% GO; D) 0,03% GO; E) 0,04% GO; F) 0,05% GO (Fuente: *Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites. Construction and building materials, septiembre. p. 121-127*).

Se puede apreciar un cambio significativo en la microestructura a medida que el porcentaje aumenta. La imagen A, sin GO, muestra muchos cristales finos como agujas apilados desordenadamente. Un contenido de GO de 0,01% a 0,03% se asocia con una formación “cristales en forma de flores”, que va siendo más densa y entrelazada a medida que este aumenta. Esta forma de microestructura deja cierto espacio para absorber el movimiento. Para un contenido de GO de 0,04% y 0,05% la forma de los cristales se asemeja a poliedros irregulares adheridos (imagen E) y poliedros regulares completos (imagen F).

Viendo el cuadro de propiedades mecánicas y las imágenes SEM, podemos concluir que la microestructura de cristales en forma de flor es más conveniente para mejorar la flexión y la tracción, mientras que los cristales poliédricos, al ser una estructura compactada, se asocian a una mejor resistencia a la compresión.

Como estos resultados son tan prometedores y podrían suponer grandes beneficios para la construcción, existen varias empresas que han patentado aditivos para hormigón. Cabe destacar Graphe-nano Smart Materials, una de las filiales del grupo murciano Graphenano.



FIGURA 28. *graphenano Smart materials*
(Fuente: <http://www.graphenano.com/smart-materials/>).

Graphenano desarrolla 3 aditivos para los hormigones: Solid Mechanic, Solid Precad, Solid Hard.

- *“Solid Mechanic: Es un aditivo de grafeno diseñado para hormigones fabricados en planta. Pensado para zonas sísmicas, edificios aligerados, edificios elevados y grandes estructuras.*
- *Solid Precad: Es un aditivo de grafeno formulado para elementos estructurales prefabricados. Ideal para vigas y viviendas prefabricadas, paneles de hormigón y piezas especiales.*
- *Solid Hard: Es un aditivo de grafeno pensado para protección de hormigones ante agresiones extremas. Idóneo para presas, diques, puertos o cualquier otra infraestructura en alta mar”. [28]*



FIGURA 29. Aditivos con grafeno para hormigones de Graphenano Smart Materials. (Fuente: www.graphenanosmartmaterials.com/)

Estos aditivos aumentan la vida útil de los hormigones, haciéndolos resistentes a agresiones de agentes externos. Casi 50 años más de durabilidad.

Incrementan sustancialmente la resistencia a compresión (en un 30%), y a flexión y tracción (en un 45%) del hormigón, dotando de una mayor ductilidad a la estructura de la edificación, lo que implica, por ejemplo, un aumento de la seguridad frente a sismos y fenómenos naturales. Además, presentan una mejora de hasta un 48% en la protección contra ataques de cloruros.

Con estos aditivos se consiguen hormigones casi impermeables, que presentan tan sólo un 2,5% de poros y un 2,7% de absorción de agua.

Un aumento de resistencia a compresión más el incremento de la impermeabilidad significa que se están rellenando los poros del hormigón. Por ello, se reduce las necesidades de material, de cemento. Al optimizar la utilización de recursos naturales se reducen las emisiones de CO₂ a la atmósfera procedente de la extracción, manipulación, producción y transporte de las materias primas necesarias.

4.5 Elementos prefabricados

La incorporación de grafeno a los compuestos poliméricos tradicionales sirve para mejorar su rendimiento y sus propiedades, como por ejemplo la resistencia, la flexibilidad, etc. dependiendo del fin o la aplicación para la que se quiera emplear dicho compuesto.

La empresa española Graphenano Composites, una de las filiales del grupo Graphenano, ha desarrollado varias piezas prefabricadas a partir de uno de estos compuestos.



FIGURA 30. *graphenano Composites*
(Fuente: <http://www.graphenanocomposites.com/>)

Para aplicaciones directamente ligadas al sector de la construcción, ha desarrollado una amplia gama de barras corrugadas y perfiles tubulares. Estos están compuestos por resinas sintéticas termoestables (resina de poliéster o epoxi) reforzados con fibra de vidrio y dopados con un aditivo de grafeno. Se fabrican por un proceso de pultrusión (las fibras de vidrio impregnadas de las resinas se someten a operaciones de arrastre y parado en un molde cerrado a altas temperaturas, de manera que el proceso de polimerización y curado de la resina se produce en su interior.

Las mejoras que el grafeno aporta son un aumento de la resistencia, consiguiendo a su vez piezas ligeras, y una mayor durabilidad del material.

Propiedades físicas	Resina de poliéster + grafeno	Resina de poliéster
Peso específico (kg/dm ³)	1,65	1,85
Contenido de vidrio (%)	50	70
Absorción de agua (% peso)	<0,5	1,0
Coef. dilatación lineal (1/°C.106)	<15	17

FIGURA 31. Cuadro propiedades físicas
(Fuente: <http://www.graphenanocomposites.com/>)

Propiedades mecánicas	Resina de poliéster + grafeno	Resina de poliéster
Resistencia a tracción (MPa)	850	400
Resistencia a compresión (MPa)	450	150
Módulo de elasticidad (MPa)	45000	15000
Resistencia al impacto (daN cm/cm ²)	>150	
Dureza (test barcol)	>50	

FIGURA 32. Cuadro propiedades mecánicas
(Fuente: <http://www.graphenanocomposites.com/>)

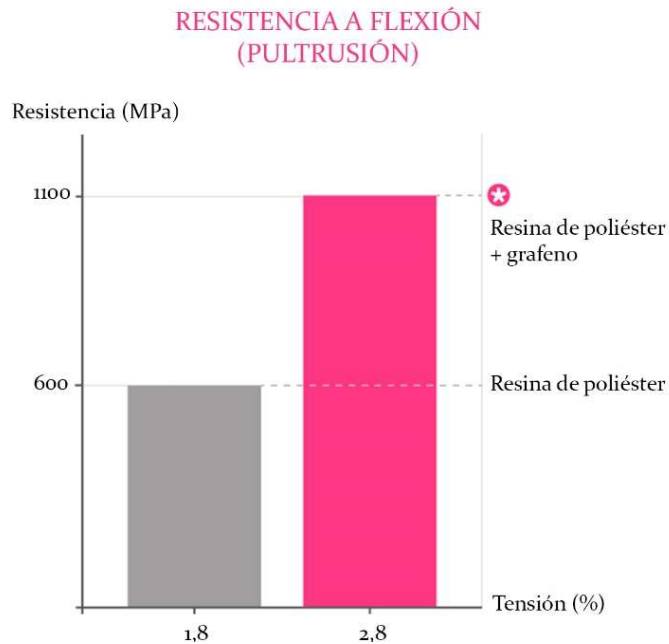


FIGURA 33. Gráfico de la resistencia a flexión. Ensayo según norma EN-ISO 527. Los especímenes no han sido sometidos a tratamiento térmico (Fuente: <http://www.graphenanocomposites.com/>)

Las barras corrugadas elaboradas con este material podrían ser una buena alternativa a los redondos de acero que se emplean hoy en día. El grafeno, al ser químicamente inerte, no se corroe ni se degrada, problema que sí presentan las barras de acero. Además, el grafeno le proporciona una alta resistencia, tanto a compresión como a flexión y tracción, por lo que podrían cumplir las mismas funciones estructurales.

El Centro Tecnológico de Componentes (CTC) es una fundación sin ánimo de lucro conocido como Centro Tecnológico por el Ministerio de Economía y Competitividad. Tiene un área dedicada al grafeno y colabora con otras empresas y entidades en algunos proyectos. Para este capítulo los más interesantes son:

- **PROMETEO:** Es un proyecto del programa CENIT (Consortios Estratégicos nacionales en Investigación Técnica).

El objetivo principal es el desarrollo de paneles sándwich y perfiles tubulares fabricados mediante el sistema de pultrusión, a partir de materiales compuestos. Se fabrican compuestos de matriz polimérica reforzada con fibra de vidrio, y se estudia su modificación con aditivos/cargas a nivel de laboratorio para mejorar sus prestaciones. Para ello se está llevando a cabo un estudio experimental con diferentes formulaciones de resina y configuración del refuerzo con el objetivo de obtener un alto carácter ignífugo.

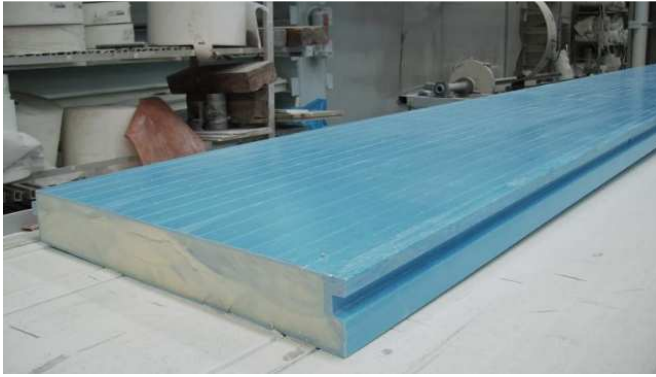


FIGURA 34. Panel sándwich del proyecto Prometeo
(Fuente: <http://ctcomponentes.es/nanomateriales-y-grafeno/>)

- **NANOCIT:** Es un proyecto del Plan Nacional De Investigación Científica, Desarrollo e Innovación. Subprograma de Investigación Aplicada Centros Tecnológicos.

El objetivo del proyecto fue emplear e implementar nano-materiales basados en grafeno en diferentes materiales, aplicaciones y sectores. La participación del CTC dentro del consorcio NANOCIT se centró en la fabricación de paneles tipo sándwich mediante la tecnología de la pultrusión.

En la matriz polimérica se introducirán nanotubos de carbono (CNT's) con el fin mejorar las prestaciones mecánicas e ignífugas de los paneles respecto a lo existente en la actualidad. Para ello se desarrolló e implementó un novedoso método de dispersión de los CNT's en la matriz polimérica (resina epoxi, poliéster) con el objetivo de obtener una dispersión homogénea de los mismos y por tanto transferir de una manera eficiente sus excelentes propiedades mecánicas a la matriz.

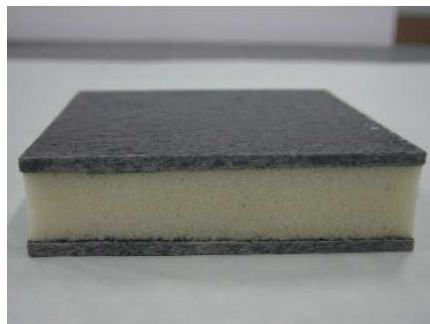


FIGURA 35. Panel sándwich del proyecto Nanocit
(Fuente: <http://ctcomponentes.es/nanomateriales-y-grafeno/>)

4.5.1 Compuestos para impresión 3-D

La Unión Europea impulsó un proyecto para el Horizon 2020: “*Nano-compuestos multifuncionales basados en grafeno con propiedades electromagnéticas y térmicas para la impresión 3-D (Graphene 3D)*”.

Lo que se propone es el desarrollo de compuestos y estructuras grafeno-polímero con las propiedades deseadas para aplicaciones específicas. Los objetivos principales son:

- Desarrollar una técnica efectiva de procesamiento para la fabricación de un compuesto polímero-grafeno.
- Conseguir un nano-compuesto con propiedades mejoradas (eléctricas, electromagnéticas, mecánicas y térmicas).
- Proponer una herramienta de diseño para optimizar la formulación de un nano-compuesto adecuado para la impresión 3-D.
- Diseñar estructuras celulares con una óptima configuración y características multifuncionales mejoradas.
- Probar el concepto de diseño por fabricación y validación experimental.

Las estructuras impresas en 3-D alcanzan una capacidad de adsorción electromagnética (>80%) en un rango de 1-100 GHz, una alta conductividad térmica (1-2 W/mK), un módulo de Young mejorado (>20%), bajo umbral de percolación del nano-relleno (<1% en peso) y ligereza (0,1 – 0,2 g/cm³).

Por otro lado, también existen empresas que han desarrollado filamentos elaborados con un compuesto polímero-grafeno para impresión 3-D.



FIGURA 36. Haydale
(Fuente: <https://www.haydale.com/>)

Haydale elabora filamentos de ácido poliláctico (PLA) mejorados con grafeno. Estos mejoran la velocidad, la resistencia, la precisión y la calidad de la impresión. Las propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas de estos filamentos se pueden adaptar para satisfacer las necesidades de diferentes aplicaciones.

En lo que a la arquitectura respecta, la innovación de estos proyectos reside en la mejora de propiedades para el material que se imprima en 3-D, pero por el momento, esta tecnología no habilita a la impresión de nuevos componentes y unidades. El grafeno mejora lo ya existente, pero los elementos que actualmente la tecnología no permite imprimir, siguen siendo un reto.

5. PROPUESTAS

Se van a plantear en este capítulo una serie de propuestas con grafeno basadas en las fundamentaciones científicas y en las aplicaciones ya existentes.

Puesto que la mayor parte de la tecnología desarrollada hasta el momento se encuentra a nivel de material y de elemento constructivo, se comienza haciendo una propuesta de elementos fotocatalizadores. Se fundamentan en elementos ya existentes, pero que van a ser más eficaces. Se emplean en aplicaciones tanto de exterior como de interior.

Se pasa después a plantear nuevas aplicaciones, también con esa propiedad fotocatalítica, correspondiente a los niveles de unidad y sistema constructivo.

Con las posibilidades que ofrece el grafeno, empleado tanto como material como parte de un compuesto, se pueden hacer varias propuestas con respecto a nuevas envolventes, que correspondería con el nivel de sistema constructivo. Se propondrá la creación de superficies activas, cáscaras de hormigón y membranas transparentes y flexibles.

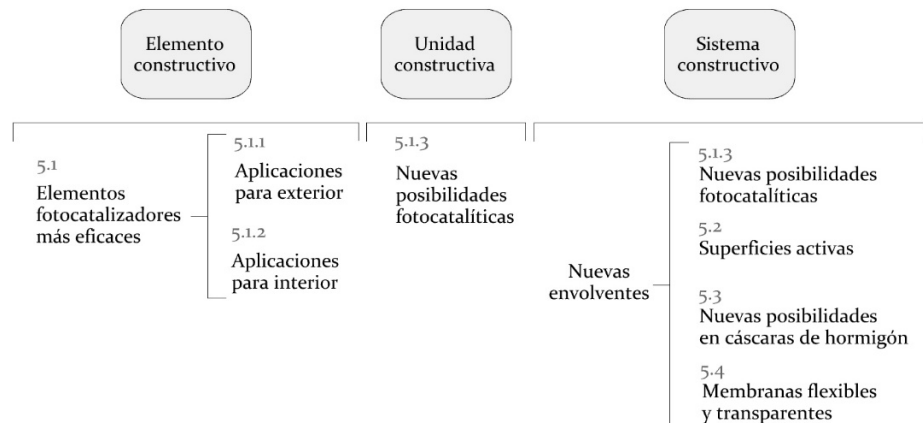


FIGURA 37. Diagrama de propuestas
(Fuente: Elaboración propia)

5.1 Elementos fotocatalizadores más eficaces

Actualmente se ha desarrollado un material compuesto de óxido de grafeno y óxido de titanio (GO-TiO₂) con propiedades fotocatalíticas.

En los últimos años ya se están añadiendo nanopartículas de TiO₂ en materiales de construcción con el fin de adsorber los contaminantes que producen los gases del efecto invernadero.

Tecnológicamente es posible crear numerosos elementos constructivos con estas propiedades fotocatalíticas. Sin embargo, a día de hoy no resultan muy eficientes, motivo por el cual no se emplean de manera extensiva ni se asumen los sobrecostes que suponen.

El nuevo material (GO-TiO₂) aporta una mejora del rendimiento y una serie de ventajas que podrían propiciar que sí mereciera la pena implantarlos en futuros proyectos. En este capítulo se analizarán las aplicaciones existentes (pero inutilizadas) y las mejoras que presentarían empleando el compuesto.

Primero, cabe hacer una distinción entre aplicaciones para exterior e interior, ya que la fotocatalisis no sólo sirve para reducir la contaminación atmosférica, sino también para limpiar ambientes en el interior de edificios.

5.1.1 Aplicaciones para exterior

- Elementos de base cementícea: Se elaborarían a partir de cemento con un aditivo fotocatalítico ya incorporado.

Se pueden hacer adoquines y otros pavimentos cementíceos, recubrimientos para fachadas (bloques, paneles prefabricados, etc). Se recomienda que la aplicación del cemento fotocatalítico no sea meramente superficial, para evitar perder eficiencia tras la limpieza de los contaminantes.

- Láminas asfálticas fotocatalíticas: Son productos bituminosos de betún elastómero, con una autoprotección mineral tratada con un fotocatalizador. Estas láminas se podrían emplear en las cubiertas, limpiando el aire del entorno.
- Pinturas fotocatalíticas: Para el tratamiento de superficies exteriores. Se podrían emplear en fachadas del casco histórico

para la descontaminación de núcleos urbanos. Gracias al grafeno, las pinturas no pierden su color ni brillo, ni se degradan, por lo que son muy adecuadas para la rehabilitación del patrimonio existente, no sólo para edificios de nueva planta.

Estos elementos se emplean para descontaminar del aire los principales gases tóxicos emitidos por los motores de combustión de los núcleos urbanos (coches, calefacciones, etc.).

El grafeno no se degrada ante la acción de los agentes atmosféricos, por lo que los elementos citados tienen mucha mayor durabilidad. Esto implica un ahorro en costes de mantenimiento. Además, con este aditivo se le añade el valor de su capacidad de autolimpieza, con el consiguiente ahorro en costes de limpieza en los espacios públicos. Gracias a su capacidad autolimpiante, las superficies se mantendrían inalteradas desde el punto de vista estético.

5.1.2 Aplicaciones para interior

- Alicatados cerámicos: A las baldosas cerámicas se les puede aplicar una capa micrométrica de GO-TiO₂. El grafeno es un material altamente resistente, por lo que las baldosas serían muy resistentes al rayado (por el paso de personas), al impacto, etc.

La aplicación de alicatados fotocatalíticos en interiores es muy interesante por sus propiedades bactericidas, ya que pueden cumplir la demanda de algunos usos de espacios cerrados que sean esterilizados y desinfectados (hospitales, clínicas, geriátricos, etc.).

Si se aplica en cerámicas cocidas a altas temperaturas y poco porosas, como el gres porcelánico, las propiedades autolimpiantes del compuesto fotocatalítico dan lugar a un elemento fácil de mantener y limpiar (las baldosas adquieren una propiedad hidrofílica, evitando que la suciedad penetre o se adhiera a ellas). Los alicatados se pueden usar tanto para pavimentos, como para revestimiento de muros y tabiques.

- Pinturas fotocatalíticas: Se emplean para tratar superficies interiores. El grafeno aporta las ventajas ya mencionadas en las pinturas para exterior.

Los elementos fotocatalíticos en el interior de edificios sirven para descontaminar ambientes. La incorporación del grafeno, por ser

químicamente inerte, favorece la actividad bactericida que se genera durante la fotocatalisis. Esto da lugar a interiores más limpios y desinfectados. Además, gracias a la fotocatalisis, se descomponen los gases que producen olor, siendo muy eficaz desodorizar cualquier ambiente.

Al igual que para las aplicaciones de exterior, el grafeno aporta una mayor resistencia y durabilidad, por lo que los materiales no se degradan y requieren mucho menos mantenimiento.

5.1.3 Nuevas posibilidades

Sin duda, la fotocatalisis es un proceso que se debe seguir investigando ya que nos ofrece materiales con un gran potencial. Quizás, en un futuro, todos los elementos y unidades constructivas puedan contener el compuesto GO-TiO₂ y tener una actividad fotocatalítica.

Algunas posibilidades que no se han contemplado:

- Mobiliario: Unidades constructivas tanto a nivel urbano como para interior de edificios.
- Textiles fotocatalíticos: Se podría adherir una nanocapa fotocatalítica a una superficie textil. Se emplearían para cubrir pabellones y otras grandes superficies, como estadios, aeropuertos...

Arquitecturas como la imagen de la figura 38 se podrían proyectar, creando grandes superficies capaces de adsorber los contaminantes de la atmósfera.



FIGURA 38. Pabellón de Kuwait Expo Milán 2015
(Fuente: <http://cdn-media.ingegneri.info/wp-content/>)

5.2 Superficies activas

La tecnología que se ha desarrollado en cuanto a tintas conductoras con láminas de óxido de grafeno podría permitir la creación de superficies activas, que conducen la electricidad y permiten la transmisión de señales electrónicas.

Para crear las superficies, la tinta se imprime o se grava en una fina película polimérica para que pueda servir como recubrimiento de algún soporte.

Se pueden colocar tanto en interior como exterior. El grafeno es químicamente inerte, por lo que no se degrada ante agentes atmosféricos y resulta una superficie bactericida si se aplica para el acondicionamiento de interiores. Además, es un material muy resistente. Estas propiedades permiten obtener una unidad constructiva con una alta durabilidad, por lo que los costes de mantenimiento serán mínimos.

Por otro lado, el grafeno es un material transparente y flexible. Esto puede abrir un abanico de posibilidades a la hora de proyectar nuevos edificios en cuanto al diseño.

La inversión inicial que supone crear una superficie activa con grafeno se ve compensada por variedad de posibilidades que ofrece en cuanto al diseño, además de la certeza de que va mantener sus propiedades y su rendimiento a lo largo de los años a un bajo coste de mantenimiento.

Si se sitúan en el exterior, nos permiten interactuar con ellas mediante juegos de luces y colores. Colocados como pavimentos, por ejemplo, se pueden ir iluminando al pisar para que te vayan marcando el camino.



FIGURA 39. Ejemplo de fachada tecnológica. Klubhaus St. Pauli
(Fuente: <http://en.onlyglass.de/>)

Si se sitúan en el interior, todo el control, encendido y apagado de aparatos de climatización se podría realizar a través de estas superficies de manera táctil: control de calefacción y sistema de refrigeración, control de apertura de persianas y ventanas para una adecuada ventilación y soleamiento... Se eliminarían todos los aparatos de control de instalaciones, quedando integradas sus funciones en la superficie de tabique interior gracias a la capacidad del grafeno para recibir y transmitir señales electrónicas. Además, se podría controlar la iluminación interior, sustituyendo los interruptores convencionales.

También se puede abrir un abanico de posibilidades a la hora de proyectar la entrada de un edificio, gracias a la identificación y acceso mediante huellas dactilares, por lo que las puertas como las conocemos hasta ahora se podrían sustituir por superficies mucho más integradas con el resto de la envolvente del edificio.

5.3 Nuevas posibilidades en cáscaras de hormigón

Las cáscaras de hormigón son una envolvente tridimensional cuya resistencia se obtiene dando forma al material según las cargas que deben soportar.



FIGURA 40. Ejemplo de cáscara de hormigón.
(Fuente: <http://www.atd.com.cn>)

Los problemas más comunes a la hora de su construcción son que estas cáscaras deben ser lo suficientemente gruesas para soportar cargas por compresión, pero a su vez, suficientemente delgadas para no desarrollar tensiones a flexión. Además, se requiere una gran precisión a la hora de colocar el armado (al ser la envolvente una lámina tan delgada, el armado no debe moverse al hormigonar). Los bordes de la cáscara deben ir reforzados y, por tanto, ser más gruesos.

Asimismo, al estar trabajando con espesores mínimos, pueden producirse oxidaciones de la armadura, con los consiguientes problemas de durabilidad de la cubierta.

Gracias a los hormigones mejorados con el aditivo de grafeno, se pueden conseguir cáscaras más ligeras y a la vez más resistentes.

Añadiendo un 0.05% de láminas de óxido de grafeno (porcentaje de dosificación sólida y por peso de cemento) se aumenta la resistencia a compresión casi en un 50%. Esto nos va a permitir recudir espesores, ya que se va a necesitar de menos armado, y se va a poder reducir la capa de hormigón de limpieza para evitar su oxidación.

En un futuro se podrá, incluso, eliminar el armado, eliminando también la capa de hormigón de limpieza, consiguiendo espesores mucho más finos. Cabe decir que el grafeno por ser químicamente inerte no se corroe ni degrada ante agentes atmosféricos, por lo que es mucho más adecuado que el acero para ser colocado al exterior.

Con estas nuevas cáscaras construidas con hormigones mejorados, conseguimos cubiertas y envolventes con mucha más durabilidad. Gracias a todos los beneficios que le aporta el grafeno, va a necesitar de un mantenimiento mínimo y sus consiguientes costes también se reducirán.

Además, a la hora de producir el hormigón, como se necesitan menos cantidades de cemento (en torno a un 30% menos) se reducen las emisiones de CO₂ expulsadas a la atmósfera. Todas las mejoras tecnológicas deben ir también enfocadas hacia una arquitectura sostenible.

5.4 Membranas flexibles y transparentes

Existe tecnología empleada en el sector de la electrónica para crear dispositivos transparentes y flexibles con grafeno. Se puede extrapolar en el campo de la arquitectura para crear membranas flexibles y transparentes.

Actualmente, a la hora de proyectar envolventes transparentes, se opta por el vidrio o por plásticos. El problema es que el vidrio es un material muy rígido, lo que limita las posibilidades de diseño. Por su parte, los plásticos se degradan con el paso del tiempo y van perdiendo su transparencia.



FIGURA 41. Ejemplo de membrana transparente
(Fuente: <https://i.pinimg.com/>)

A partir de láminas de grafeno, se podrían crear estas membranas para envolventes. El grafeno nos permite crear superficies 4 veces más finas que el vidrio, siendo a su vez 10 veces más resistente. Además, el grafeno presenta una transparencia del 97,7% por lo que podemos conseguir las mismas calidades de iluminación y solemamiento que con el vidrio.

Empleando el grafeno, se abre una amplia gama de posibilidades de diseño. Al ser un material flexible, se pueden ejecutar formas curvas y geometrías antes imposibles de realizar en vidrio. A nivel expresivo, es un material transparente, pero es posible añadir aditivos para colorearlos, hacerlos translúcidos o incluso se puede serigrafar.

El otro material que se está utilizando cada vez con más frecuencia en envolventes es el plástico. Nos da más libertad de diseño ya que no es rígido como el vidrio. Sin embargo, es un material que se degrada y requiere de un mantenimiento muy costoso ya que, de lo contrario, perdería su transparencia y tendría una menor durabilidad.

El grafeno es un material químicamente inerte, lo que significa que no se corroe ni se degrada. Esto lo hace más adecuado para emplearse en el exterior que las fachadas metálicas que sirven de soporte a los recubrimientos plásticos (que sí presentan este problema).



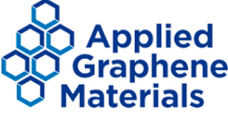







Las membranas de grafeno se podrían emplear también para hacer pieles retráctiles. Es un material flexible, que no pierde resistencia ni se fisura al retraerse. Este mecanismo puede servir para proteger el interior de la radiación solar en las horas de mayor exposición, y recogerse para permitir abrirse a vistas. Es, en efecto, una medida pasiva que supone un ahorro energético en los edificios.

Sin duda, es una inversión que merecería la pena hacer, no sólo por temas de diseño, también porque el producto final obtenido es muy resistente y durable a lo largo del tiempo. Estas propiedades implican un ahorro posterior en costes mantenimiento.

Para poder desarrollar este tipo de envolventes, se necesitan láminas de grafeno de gran tamaño. A día de hoy, los procesos de obtención de este material son caros, y para conseguir láminas con una gran superficie sin que pierda sus propiedades los costes se elevan considerablemente. Por eso, sabiendo las posibilidades que implican estas tecnologías, se requiere a la ciencia de más investigaciones y avances a nivel micro y macro molecular.

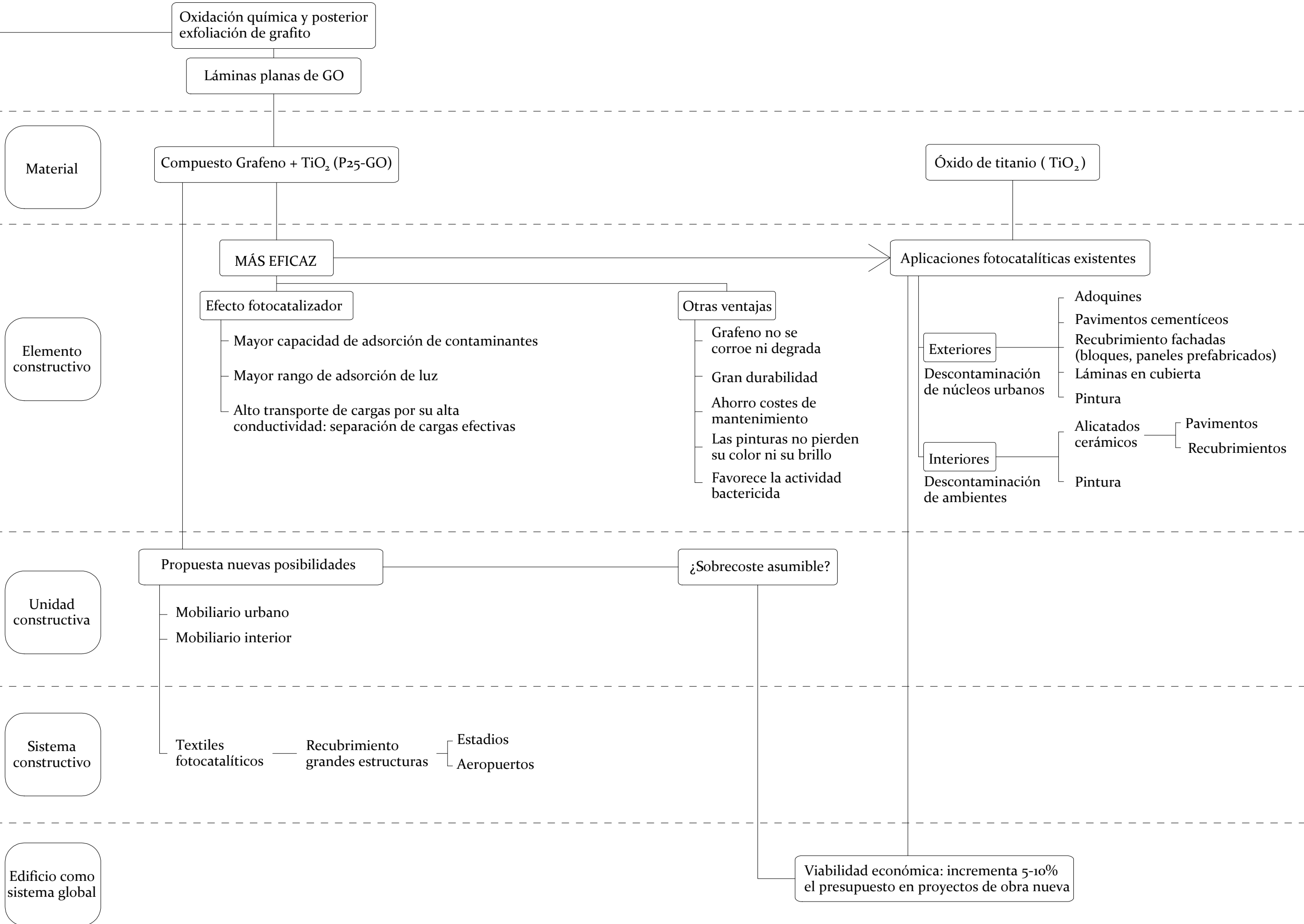
6. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

CLASIFICACIÓN DE APLICACIONES EXISTENTES

Material	<ul style="list-style-type: none"> - Grafeno + TiO₂  <ul style="list-style-type: none"> - Fibra de vidrio pultrusionada con grafeno - Resinas termoestables dopadas con grafeno 	 <ul style="list-style-type: none"> - Pinturas para exterior e interior - Morteros y masillas  <ul style="list-style-type: none"> - Pinturas 	 <ul style="list-style-type: none"> - Polímeros infiltrados con grafeno para filamentos de impresión 3-D <p>PROYECTO HORIZON 2020: GRAPHENE 3-D</p> <ul style="list-style-type: none"> - Composite polímero-grafeno  <ul style="list-style-type: none"> - Filamentos de ácido poliláctico mejorados con grafeno (PLA) para impresión 3D
Elemento constructivo	 <ul style="list-style-type: none"> - Film polimérico: tinta conductora impresa con un micro módulo de silicio. 	 <ul style="list-style-type: none"> - Pantallas flexibles OLED - Sensores de huellas flexibles 	 <ul style="list-style-type: none"> - Barras corrugadas (sustituto del armado de acero) - Perfiles estructurales H, T - Tubos recondos, cuadrados...
Unidad constructiva	 <ul style="list-style-type: none"> - Paneles solares 	 <ul style="list-style-type: none"> - Panel sándwich 	<p>PROYECTO PROMETEO:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Panel sándwich mediante sistema de pultrusión de grafeno.
Sistema constructivo			
Edificio como sistema global			

NIVEL ESTRUCTURAL:
MACRO Y MICRO

NIVEL TECNOLÓGICO CONSTRUCTIVO



Material

Elemento constructivo

Unidad constructiva

Sistema constructivo

Edificio como sistema global

Oxidación química y posterior exfoliación de grafito

Láminas planas de GO

Compuesto Grafeno + TiO₂ (P25-GO)

Óxido de titanio (TiO₂)

MÁS EFICAZ

Aplicaciones fotocatalíticas existentes

Efecto fotocatalizador

Otras ventajas

- Mayor capacidad de adsorción de contaminantes
- Mayor rango de adsorción de luz
- Alto transporte de cargas por su alta conductividad: separación de cargas efectivas

- Grafeno no se corroe ni degrada
- Gran durabilidad
- Ahorro costes de mantenimiento
- Las pinturas no pierden su color ni su brillo
- Favorece la actividad bactericida

Exteriores

Descontaminación de núcleos urbanos

Interiores

Descontaminación de ambientes

- Adoquines
- Pavimentos cementíceos
- Recubrimiento fachadas (bloques, paneles prefabricados)
- Láminas en cubierta
- Pintura
- Alicatados cerámicos
 - Pavimentos
 - Recubrimientos
- Pintura

Propuesta nuevas posibilidades

¿Sobrecoste asumible?

- Mobiliario urbano
- Mobiliario interior

- Textiles fotocatalíticos
 - Recubrimiento grandes estructuras
 - Estadios
 - Aeropuertos

Viabilidad económica: incrementa 5-10% el presupuesto en proyectos de obra nueva

NIVEL ESTRUCTURAL:
MACRO Y MICRO

Oxidación química y posterior
exfoliación de grafito

Láminas planas de GO

Aplicación existente

Tintas conductoras

Concentración grafito:
20 mg/ml
Impresión en varios soportes: papel,
polímeros, metales, incluso bioplásticos

Material

Recubrimientos y films poliméricos

No afecta al rendimiento eléctrico del grafito

Elemento
constructivo

PROPUESTA

Unidad
constructiva

SUPERFICIES ACTIVAS

Posibilidades

- Interacción con el usuario mediante juegos de luces y colores : Ej- pavimentos que se iluminan al pisar y te van marcando el camino
 - Encendido, apagado y control de aparatos de climatización
 - Sustitución de interruptores convencionales
 - Proyección de nuevas entradas a edificios: identificación y acceso mediante huellas dactilares
- Superficies de acceso más integradas con la envolvente

Beneficios

- Conducen la electricidad y permiten la transmisión de señales electrónicas
 - El grafito es químicamente inerte
 - Agente bactericida si se coloca en interiores
 - No se degrada ni se corroe ante agentes atmosféricos: Adecuado para exteriores
 - Gran resistencia
 - Versatilidad de opciones de diseño
- Alta durabilidad
Ahorro costes mantenimiento

Compensa inversión inicial

NIVEL TECNOLÓGICO CONSTRUCTIVO

Sistema
constructivo

Edificio como
sistema global

NIVEL ESTRUCTURAL:
MACRO Y MICRO

Oxidación química y posterior exfoliación de grafito

Láminas planas de GO

Hidrófilas y altamente dispersables en agua

vs.

CNT's necesitan surfactantes que pueden degradar el cemento

Material

Aplicación existente

Hormigones mejorados

0,05% del peso de láminas de GO

Incremento del 47,9% resistencia a compresión

Incremento del 30,2% resistencia a flexión

Más impermeable (2,5% de poros)

Aumenta 50 años su vida útil

Elemento constructivo

PROPUESTA

Piezas prefabricadas

Unidad constructiva

Nuevas posibilidades en cáscaras de hormigón

NIVEL TECNOLÓGICO CONSTRUCTIVO

Problemas actuales

Deben ser gruesas para soportar cargas por compresión y suficientemente delgadas para no desarrollar tensiones a flexión

Problemas en la colocación de la armadura durante el hormigonado

Oxidaciones de la armadura

Sistema constructivo

Beneficios

Menos necesidad de armado

Reducimos espesor de la envolvente

El grafeno es químicamente inerte

No se degrada

No se corroe ante agentes atmosféricos

Respecto al armado de acero

Alta durabilidad

Ahorro costes mantenimiento

Se reduce la necesidad de cemento en un 30%

Perspectivas de futuro

Eliminar el armado

Reducimos a espesores mínimos al eliminar la capa de hormigón de limpieza que evita la corrosión del acero

Edificio como sistema global

Reducción de emisiones CO a la atmósfera

Hacia una arquitectura más sostenible

NIVEL ESTRUCTURAL:
MACRO Y MICRO

Exfoliación química de grafito

PROBLEMA

Requerimientos científicos desde un punto de vista tecnológico

Láminas de grafeno

Viabilidad económica: Método de obtención poco eficiente. A menor eficiencia mayor coste

Material

Grafeno como soporte

Elemento constructivo

Aplicación existente

PROPUESTA

Dispositivos OLCD flexibles

Membrana flexible

Unidad constructiva

NUEVAS ENVOLVENTES

Necesidad de láminas de grafeno de mayor tamaño

NIVEL TECNOLÓGICO CONSTRUCTIVO

Posibilidades de diseño

Pieles retráctiles

Beneficios

Formal

- Curvas
- Geometrías imposibles

No pierde resistencia ni se fisura

Ahorro energético

- 4 veces más fino
- 10 veces más resistente
- Más flexible

Respecto al vidrio

Expresivo

- Transparente
- Translúcido
- Color
- Seriegraffias

Protege el interior de la radiación solar

+ Se retira y permite abrirse a vistas

- El grafeno es químicamente inerte
- No se degrada ni pierde transparencia
- No se corroe ante agentes atmosféricos

Respecto a los plásticos

97,7% transparencia

Alta durabilidad

Ahorro costes mantenimiento

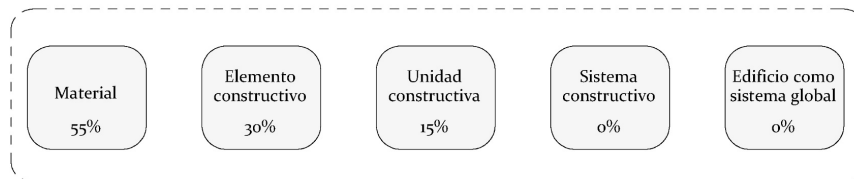
Compensa inversión inicial

Sistema constructivo

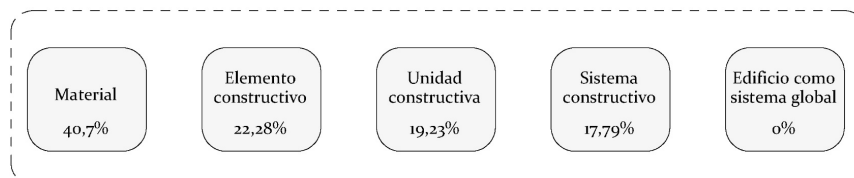
Edificio como sistema global

7. CONCLUSIONES

1. La nanotecnología y, en concreto, el grafeno van a suponer una revolución en la industria de la construcción. Para ello, es necesario ser capaces de intuir todas las posibilidades que nos ofrece la ciencia.
2. Existe un mundo que se nos abre: no sólo el grafeno como material resulta prometedor, sino también el grafeno como compuesto. En los próximos años se podría producir un cambio en la configuración de las cosas tal y como funcionan actualmente. Para ello, es necesario ser capaces de intuir todas las posibilidades que nos da la ciencia.
3. En valores cuantitativos, se ha desarrollado sobre el grafeno un 55% de aplicaciones en materiales de construcción, un 30% en elementos constructivos y un 15% en unidades constructivas. Los arquitectos todavía no hemos entrado en aplicaciones a una mayor escala: no existe nada a nivel de sistema constructivo o de edificio como sistema global.



4. Se ha sistematizado en cuadros los beneficios y posibilidades sobre las nuevas propuestas. Se han aportado nuevas aplicaciones, lo que permite cambiar los porcentajes de la realidad existente:



Estas nuevas propuestas son posibles ya que están basadas en fundamentaciones científicas, no son meras utopías.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Todo sobre el grafeno.
<http://www.infografeno.com/>
- [2] Alótopos del carbono: Grafito, diamante y fullerenos.
<https://nanotecnologia.fundaciontelefonica.com/2007/01/10/alotropos-del-carbono-grafito-diamante-y-fullerenos/>
- [3] Millán Hernández, María. 2015. Síntesis de estructuras grafeno/metal/grafeno mediante la técnica CVD y caracterización para su posible aplicación como interconectores de circuitos integrados. Proyecto fin de carrera ingeniería electromecánica.
- [4] Ajay Krishnamurthy, Venkataramana Gadhamshetty, Rahul Mukherjee, Bharath Natarajan, Osman Eksik, S. Ali Shojaee, Don A. Lucca, Wencai Ren, Hui-Ming Cheng & Nikhil Koratkar. 2015. Superiority of graphene over polymer coatings for prevention of microbially induced corrosion. *Nature scientific reports*, noviembre.
- [5] Zhu Pan, Li He, Ling Qiu, Asghar Habibnejad Korayem, Gang Li, Jun Wu Zhu, Frank Collins, Dan Li, Wen Hui Duan, Ming Chien Wang. 2015. Mechanical properties and microstructure of a graphene-oxide cement composite. *Elsevier*, febrero.
- [6] Hao Zhang, Xiaojun Lv, Yueming Li, Ying Wang, and Jinghong Li, 2009.
P25-Graphene as a high performance photocatalyst. *American Chemical Society*, diciembre.
- [7] Espiga Lisbona, Lucía. 2016. Materiales fotocatalíticos y sus aplicaciones en construcción. Proyecto final de máster en edificación.
- [8] Graphene Technologies Inspire at MWC17.
<https://graphene-flagship.eu/mwc>
- [9] GRAPHENSTONE
<http://www.graphenstone.com>
- [10] Monografías del SPOT (Sistema de observación y prospectiva tecnológica). Ministerio de Defensa. 2013. Propiedades y aplicaciones del grafeno.

[11] Graphene Flagship

<https://graphene-flagship.eu>

[12] Worldwide Graphene Database

<https://www.nanowerk.com/news/>

[13] Flexible OLCD

<http://www.flexenable.com/technology/flexible-olcd/>

[14] Graphene Experience Zone at Mobile World Congress

<https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/graphene-experience-zone-mobile-world-congress>

[15] GraphWear

<http://www.graphwear.co/#>

[16] Zero Gravity Graphene

<http://graphene-flagship.eu/material/ZeroGravityGraphene/Pages/ZeroGGraphene.aspx>

[17] Graphene Motorcycle Helmet

<http://graphene-flagship.eu/graphene-motorcycle-helmet>

[18] Yiqing Sun, Gaoquan Shi.2012. Graphene/Polymer Composites for Energy Applications. *Journal of polymer science*, diciembre.

[19] Andreas Pospischil, Marco M. Furchi, and Thomas Mueller.2012. Solar energy conversion and light emission in an atomic monolayer p-n diode. *Vienna University of Technology, Institute of Photonics*.

[20] Chul Chung, Young-Kwan Kim, Dolly Shin, Soo-Ryoon Ryoo, Byung Hee Hong, Dal-Hee Min. *Department of Chemistry, College of Natural Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea*. 2012. Biomedical Applications of Graphene and Graphene Oxide. *Accounts of chemical research*, mayo.

[21] Jincheng Liu , Hongwei Bai , Yinjie Wang , Zhaoyang Liu , Xiwang Zhang ,and Darren Delai Sun. 2010. Self-Assembling TiO₂ Nanorods on Large Graphene Oxide Sheets at a Two-Phase Interface and Their Anti-Recombination in Photocatalytic Applications. *Advanced Functional Materials Journal*.

[22] Tintas conductoras GNext XT Ink

<http://www.graphene-xt.com/>

[23] François Perreault, Andreia Fonseca de Faria and Menachem Elimelech. 2015. Environmental applications of graphene-based nanomaterials. *Royal Society of Chemistry*, enero.

[24] François Perreault, Andreia Fonseca de Faria, Siamak Nejati, and Menachem Elimelech. 2015. Antimicrobial Properties of Graphene Oxide Nanosheets: Why Size Matters. *American Chemical Society*, junio.

[25] P.R. de la Peña Benítez, A. García-Santos. 2016. Diseño nanotecnológico de superficies con propiedades antibacterianas: el grafeno. *Revista Ingeniería de Construcción RIC*, noviembre.

[26] Soluciones Graphenstone.

<http://www.graphenstone.com/Graphenstone-Global-Productos.html>

[27] Shenghua Lv, Yujuan Ma, Chaochao Qiu, Ting Sun, Jingjing Liu, Qingfang Zhou. 2013. Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites. *Construction and building materials*, septiembre. p. 121-127.

[28] Aditivos para hormigón

<http://www.graphenanosmartmaterials.com/aditivos-para-el-hormigon/>

[29] Tintas conductoras Novalia

<http://www.novalia.co.uk/>

[30] Graphenano Composites

<http://www.graphenanocomposites.com/>

[31] Nanomateriales y grafeno

<http://ctcomponentes.es/nanomateriales-y-grafeno/>

[32] Multifunctional Graphene-based Nanocomposites with Robust Electromagnetic and Thermal Properties for 3D-printing Application (Graphene 3D).

<http://graphene3d.imbm.bas.bg/>

[33] Haydale

<https://www.haydale.com/>