

# PROPUESTAS DE FUNCIONALIDADES AVANZADAS EN UN APLACADO DE FACHADA

**Projecte fi de carrera**

Autor: Iván Rodríguez Pérez

Director: Francisco Javier Peña Andrés

Tutor: José Antonio Ayllón Esteve

Especialidad: Enginyeria de materials

Fecha: Septiembre 2012



**Universitat Autònoma  
de Barcelona**

El abajo firmante, Dr. Francisco Javier Peña Andrés, Doctor en Ciencias Químicas por la Universidad Politécnica de Cataluña y Director Científico de Materfad, centro de materiales impulsado por el FAD (Foment de les Arts i del Disseny), en calidad de director externo del proyecto de fin de carrera de Ingeniería de Materiales con título: “Propuestas de funcionalidades avanzadas en un aplacado de fachada”.

Certifica que dicho proyecto ha sido realizado por Iván Rodríguez Pérez bajo su dirección en el centro de materiales Materfad.

Para dejar constancia de ello firma el presente certificado en Barcelona, a 19 de Septiembre de 2012.



Dr. Francisco Javier Peña Andrés

Director Científico de Materfad

El abajo firmante, Dr. José Antonio Ayllón Esteve, profesor de la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de la UAB, en calidad de tutor del proyecto de fin de carrera de Ingeniería de Materiales con título: "Propuestas de funcionalidades avanzadas en un aplacado de fachada".

Certifica que dicho proyecto ha sido realizado bajo su supervisión por Iván Rodríguez Pérez.

Para dejar constancia de ello firma el presente certificado en Bellaterra, a 20 de Septiembre de 2012.

Dr. José Antonio Ayllón Esteve

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Fundamento teórico.....</b>	<b>10</b>
3.1	Materiales biomiméticos .....	10
3.2	Materiales con propiedades descontaminantes.....	17
3.3	Materiales activos.....	22
<b>4</b>	<b>Materiales y métodos.....</b>	<b>32</b>
4.1	Composición y densidad de las probetas .....	32
4.2	Determinación de la conductividad térmica de la placa.....	33
4.3	Estudio preliminar de la incorporación de PCM .....	35
<b>5</b>	<b>Resultados y discusión.....</b>	<b>40</b>
5.1	Superficies autolimpiables.....	40
5.2	Incorporación de activos fotocatalíticos.....	42
5.3	Captación de CO <sub>2</sub> .....	44
5.4	Incorporación de vidrio triturado fosforescente .....	47
5.5	Captación piezoeléctrica y fotovoltaica asociadas .....	48
5.6	Inercia térmica mediante PCMs.....	49
5.7	Conductividad térmica y capacidad aislante del mortero.....	52
5.8	Estudio preliminar de la incorporación de PCM .....	53
<b>6</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>58</b>
<b>7</b>	<b>Presupuesto .....</b>	<b>62</b>
<b>8</b>	<b>Referencias .....</b>	<b>63</b>
<b>9</b>	<b>Anexos .....</b>	<b>65</b>
9.1	Briefing FIDIMA.....	65
9.2	Dossier Técnico para la definición de producto (elaborado por ATEC) .....	67

## 1 Introducción.

*Contexto. Motivación del proyecto.*

El presente proyecto recoge un análisis de nuevas funcionalidades en materiales para la construcción y la rehabilitación de edificios, concretamente en placas para el revestimiento de paramentos exteriores de las fachadas. Para ello se estudian las posibilidades de aplicación de **materiales bioinspirados, materiales activos y materiales con propiedades descontaminantes en un aplacado de fachada.**

La selección de estos materiales se enfoca a la incorporación de funcionalidades que aporten un valor añadido a la placa (mejora de la eficiencia energética del edificio, disminución del impacto ambiental asociado...).

El contexto energético actual impone el reto de superar la dependencia de los combustibles fósiles; situación especialmente grave en el caso del petróleo, cuyos usos no energéticos y de alto valor añadido (en el sector químico o farmacéutico, por ejemplo) se ven obligados a competir con su utilización mayoritaria como simple combustible.

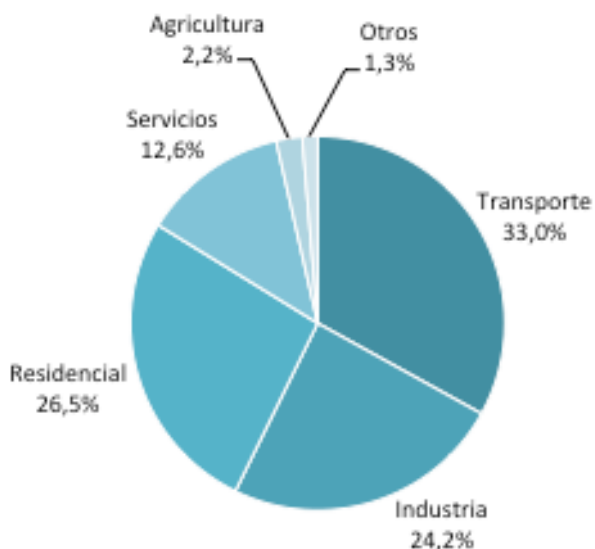


Fig. 1. Consumo de energía por sectores de actividad Eurostat [1].

En este sentido, el problema energético es uno de los campos más abiertos a la incorporación de estos materiales avanzados. El sistema energético mundial está dominado hoy en día por las energías de depósitos no renovables (fósiles), que cubren el 85% del consumo de energía primaria, frente a un 6,5% de la energía

generada por reacción nuclear, un 7% de la energía hidroeléctrica y un 1,3% del resto de energías renovables [2]. En cuanto a la demanda en Europa, un tercio la consume el sector del transporte (que es el que más ha crecido en las últimas décadas), mientras que los sectores de la industria y residencial consumen en torno al 25% cada uno. El resto lo completan los sectores terciario y primario.[1]

Cabe destacar el incremento en los últimos años de la demanda en el sector residencial, debido a la proliferación de sistemas de confort térmico y a la expansión de las viviendas unifamiliares (de mayores necesidades energéticas) frente a las plurifamiliares.

Para Ramón Folch e Iván Capdevila, una de las medidas locales necesarias para alcanzar un sistema energético sostenible es “el establecimiento de un sistema de certificación energética de edificios nuevos y rehabilitados, que establezca una eficiencia energética mínima (...) para reducir el consumo de los sectores que lo incrementarán más, el residencial y el de los servicios. Asimismo, es imprescindible que avance la I+D en ámbitos como el ahorro pasivo y la eficiencia energética global de los edificios mediterráneos, los sistemas de refrigeración a partir de la absorción de calor y la cogeneración con district-cooling (refrigeración urbana de producción centralizada que distribuye agua fría a través de una red tuberías) para grandes áreas de servicios.”[2]

En este sentido, la Directiva Europea 2002/91/CE pretende fomentar la eficiencia energética de los edificios de la comunidad y establece requisitos en relación a:

- (a) el marco general de una metodología de cálculo de la eficiencia energética integrada de los edificios;
- (b) la aplicación de requisitos mínimos de eficiencia energética de los edificios nuevos;
- (c) la aplicación de requisitos mínimos de eficiencia energética de grandes edificios existentes que sean objeto de reformas importantes;
- (d) la certificación energética de edificios;
- (e) la inspección periódica de calderas y sistemas de aire acondicionado de edificios y, además, la evaluación del estado de la instalación de calefacción con calderas de más de 15 años”.

El problema energético se enmarca en un contexto ambiental global, donde además de la problemática derivada de la obtención y el uso de energía, se encuentran los impactos negativos de la actividad humana sobre el medio ambiente. Entre estos impactos ambientales se encuentran:

- Efecto invernadero: derivado de la presencia de ciertos gases en la atmósfera que absorben y retienen la radiación infrarroja, permitiendo mantener una temperatura media del aire de la superficie terrestre compatible con la vida. El aumento de la concentración de estos gases de efecto invernadero ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , PFC, HCFC,  $\text{SF}_6$ ...) genera un calentamiento global de consecuencias negativas sobre el medio ambiente.
- Destrucción del ozono estratosférico: el ozono situado en la estratosfera filtra la radiación ultravioleta procedente del sol. Las emisiones de CFC (clorofluorocarburos) disminuyen la concentración de ozono, en una reacción catalítica que debilita la acción de la capa de ozono estratosférico.
- Lluvia ácida: precipitación acuosa que contiene en disolución ácido sulfúrico y ácido nítrico producidos por la combinación de óxidos de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ) con el vapor de agua atmosférico. El efecto ácido daña la vegetación y las aguas, empobrece el suelo y puede provocar problemas respiratorios.
- Eutrofización: se produce cuando los nutrientes (materia orgánica y mineral) se acumulan en los ecosistemas acuáticos, incrementan el crecimiento de plantas y agotan el oxígeno disuelto. Los sedimentos procedentes de las aguas residuales domésticas e industriales favorecen la eutrofización.
- Toxicidad: utilización y emisión de sustancias o radiaciones peligrosas para la salud de las personas y los ecosistemas. Depende de la propia sustancia, pero también de la vía de administración o exposición, la dosis, manera como se administra, etc. Se distingue entre toxicidad aguda (impacto inmediato) y crónica (impacto a largo plazo).
- Agotamiento de los recursos: crecimiento del consumo de recursos no renovables, aquellos que se renuevan mediante ciclos naturales extremadamente lentos (combustibles fósiles) o aquellos que a efectos de

utilización por parte de las personas, no se renuevan en ciclos naturales (depósitos minerales).

Todos estos impactos pueden ser evaluados mediante técnicas como el análisis de ciclo de vida (ACV), herramienta que estudia y evalúa todas las etapas de un producto o servicio en relación al conjunto global de impactos asociados al mismo.

¿Qué papel pueden jugar los materiales avanzados en los contextos de la problemática ambiental y la edificación? En primer lugar, disminuir el impacto ambiental asociado a la extracción, procesos de transformación y producción, instalación, vida útil y fin de vida de los materiales utilizados. En segundo lugar, contribuir a la reducción de la energía demandada por el edificio mediante sistemas pasivos que generen un ahorro energético en todo el ciclo de vida del edificio. En tercer lugar, mejorar el rendimiento de los sistemas utilizados para combatir la demanda, maximizando la energía obtenida de fuentes renovables frente a la procedente de combustibles fósiles. Y por último, estos materiales pueden contribuir a hacer del edificio un elemento activo que actúe de manera positiva para el entorno, como por ejemplo neutralizando las emisiones producidas por otros agentes.

Este proyecto ha sido realizado en Materfad, el centro de materiales de Barcelona impulsado por el FAD (Foment de les Arts i del Disseny) que surge como fuente de innovación de sectores económicos tan diversos como la biotecnología, la energía, la construcción, el transporte o el textil.

La nanotecnología, la fabricación directa, los criterios de fabricación sostenible o las energías renovables son de gran utilidad para empresas y profesionales, pero no siempre están suficientemente cerca. Por este motivo, Materfad facilita la transferencia y la adaptación de conocimiento mediante actividades de investigación, asesoría, divulgación y documentación al servicio de empresas y profesionales, al tiempo que da visibilidad a los proyectos de los centros tecnológicos y de las universidades.





## 2 Objetivos

**El objetivo de este proyecto es la selección de materiales avanzados para dotar a un aplacado de fachada de cualidades innovadoras. Se enmarca dentro de un proyecto desarrollado por FIDIMA (Fundación de Investigación, Desarrollo e Innovación en Medio Ambiente) con la colaboración de Materfad .**

Para dicha selección se estudiarán tres tipologías de materiales o sistemas de carácter innovador: los materiales o sistemas inspirados en modelos naturales que recoge la disciplina conocida como **biomímesis** o biomimética; los materiales que responden de una manera controlada a ciertos estímulos, conocidos como **materiales activos** o “smart materials”; y los materiales con propiedades **descontaminantes**. A partir de estas tipologías, se estudiarán **propuestas de actuación concretas** para su implementación en el diseño de una placa de fachada ya existente.

Por último, se realizará un **estudio preliminar de las propuestas escogidas** por FIDIMA que permita **valorar su viabilidad y establecer los criterios necesarios para su desarrollo y aplicación**.

El estudio de Materfad se enmarca en el proyecto global de FIDIMA, en el que participa también ATEC, empresa especializada en dirección de ejecución material y dirección de obras de edificación, y la empresa Arquipiedra. El proyecto se divide en una serie de etapas y tareas para hacer posible la preparación de la memoria que va a presentarse conjuntamente al CDTi y al Gobierno de Navarra.

### 3 Fundamento teórico

#### 3.1 Materiales biomiméticos

##### *Superficies superhidrófobas.*

El término “biomímesis” (en. “biomimicry”) procede del griego *bios*, vida y *mimesis*, imitación. La biomímesis es una nueva ciencia que estudia los modelos de la naturaleza para imitar o inspirarse en los diseños y procesos biológicos para resolver problemas humanos. [3]

La biomímesis puede ser una herramienta de estudio óptima para múltiples ramas del desarrollo. Los ejemplos más claros se han dado en aquellos campos donde la adaptación de la solución natural al sistema humano es más directa: la ingeniería y la arquitectura pueden obtener directamente de un modelo natural respuestas sobre la optimización de estructuras, el aprovechamiento de la luz o la minimización de la fricción.

De la misma manera, la ciencia de materiales está también directamente ligada a la extrapolación de los modelos naturales y su integración en nuestros procesos y sistemas. En una primera etapa se incluyen las reproducciones directas de la solución natural: su forma, su estructura, su composición o sus propiedades (ej.: velcro). En un segundo estadio, la reproducción de los procesos productivos naturales para optimizar la producción de materiales (ej.: autoensamblaje). Por último, la integración en ciclos cerrados de todas las etapas del ciclo de vida de los materiales (ej.: sistemas “de la cuna a la cuna” o de ciclo cerrado).

En este sentido, podemos observar la aplicación de la biomimética en dos campos principales:

- (a) la investigación sobre materiales naturales con elevadas propiedades mecánicas: la seda de araña, el nácar...;
- (b) la investigación sobre superficies bioinspiradas: superficies autolimpiables, con baja resistencia aerodinámica, con gran poder adhesivo...

Dentro del segundo campo se sitúa el caso de los recubrimientos superhidrófobos, basados en las propiedades de la hoja de loto.

El **control de la mojabilidad** de las superficies sólidas es un aspecto que atrae cada vez más interés por parte de los investigadores y de la industria. La mojabilidad se mide por el ángulo de contacto (CA) de una gota de agua en una superficie sólida. En función de este ángulo se clasifican las superficies según la **Tabla 1**.

**Tabla 1.** Tipos de superficies según su mojabilidad.

CA (°)	Tipo de superficie
> 150	Superhidrófoba
90 - 150	Hidrófoba
30 - 90	Normal
< 30	Hidrófila

Las superficies superhidrófobas pueden permitir que el agua e incluso el aceite se deslicen por ella sin dejar residuos e incluso atrapando cualquier contaminación de la superficie (propiedades de autolimpieza). Esta propiedad no sólo depende del CA (que es una medida de la mojabilidad "estática"), sino además de la capacidad de la gota de deslizarse por la superficie (mojabilidad "dinámica"). Una gota de agua sobre una superficie hidrófoba puede adoptar uno de dos estados: un estado de "Wenzel" (Fig. 2a) en el que la gota se pone en contacto íntimo con los picos y valles de una superficie rugosa, o un estado 'Cassie' (Fig. 2b) en el que la gota se mantiene en contacto sólo con los picos de la superficie. Aunque el CA sea alto, es sólo en este último estado en el cual la gota es libre de rodar a lo largo de la superficie, arrastrando con ella la suciedad, ya que el agua y la suciedad tienen más afinidad entre sí que cualquiera de ellas con la superficie.

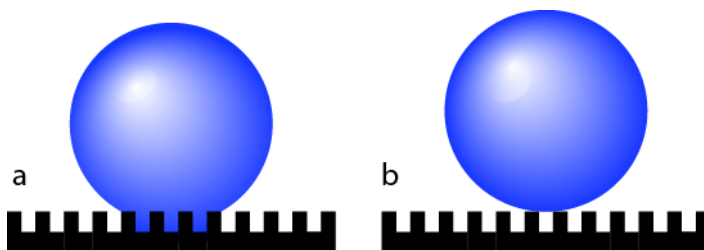


Fig. 2. Mojabilidad dinámica: (a) Estado Wenzel; (b) Estado Cassie

El ejemplo más conocido de una superficie autolimpiable es la hoja de loto, cuyo efecto fue descubierto a finales de los años 70 por Wilhelm Barthlott [4], aunque ya en 1945 se habían desarrollado textiles con propiedades hidrófobas superiores a las de la hoja de loto. [5] Barthlott, atraído por las posibilidades del microscopio electrónico de barrido (SEM), observó que algunas plantas apenas necesitaban una limpieza previa para ser observadas mediante esta técnica. Entre ellas destacaba el loto. Sus descubrimientos se tradujeron en aplicaciones comerciales para superficies autolimpiables, y él mismo registró la marca “Lotus-Effect®”.

El loto sagrado (*Nelumbo nucifera*) ha tenido tradicionalmente un fuerte carácter simbólico como representación de la pureza en las religiones del Antiguo Egipto, la India y China, debido a que sus hojas emergen limpias del agua fangosa en la que crece. La lluvia arrastra la suciedad de la superficie de sus hojas con más facilidad que en las del resto de plantas.

Lo que Barthlott descubrió en la hoja de loto fue la combinación de dos propiedades en su superficie: por un lado, las rugosidades de escala micrométrica que recubren toda la hoja; por otra  $\theta$ , un revestimiento de cristaloides de cera epicuticular (en sí hidrófobas) sobre estas protuberancias. Gracias a estas dos propiedades, la hoja exhibe un carácter superhidrófobo: cuando las gotas entran en contacto con la planta, conservan una forma casi esférica, con un ángulo de contacto superior a los  $150^\circ$ . Esto es así gracias al aire atrapado en la rugosidad de la superficie, ya que las gotas se depositan en contacto con las crestas de las protuberancias. El ángulo de contacto queda definido por la Ecuación de Cassie (Ec. 1), la cual describe este ángulo para un líquido en la superficie de un material compuesto [6]:

$$\cos \theta_c = f_1 \cos \theta_1 + f_2 \cos \theta_2$$

Ec. 1

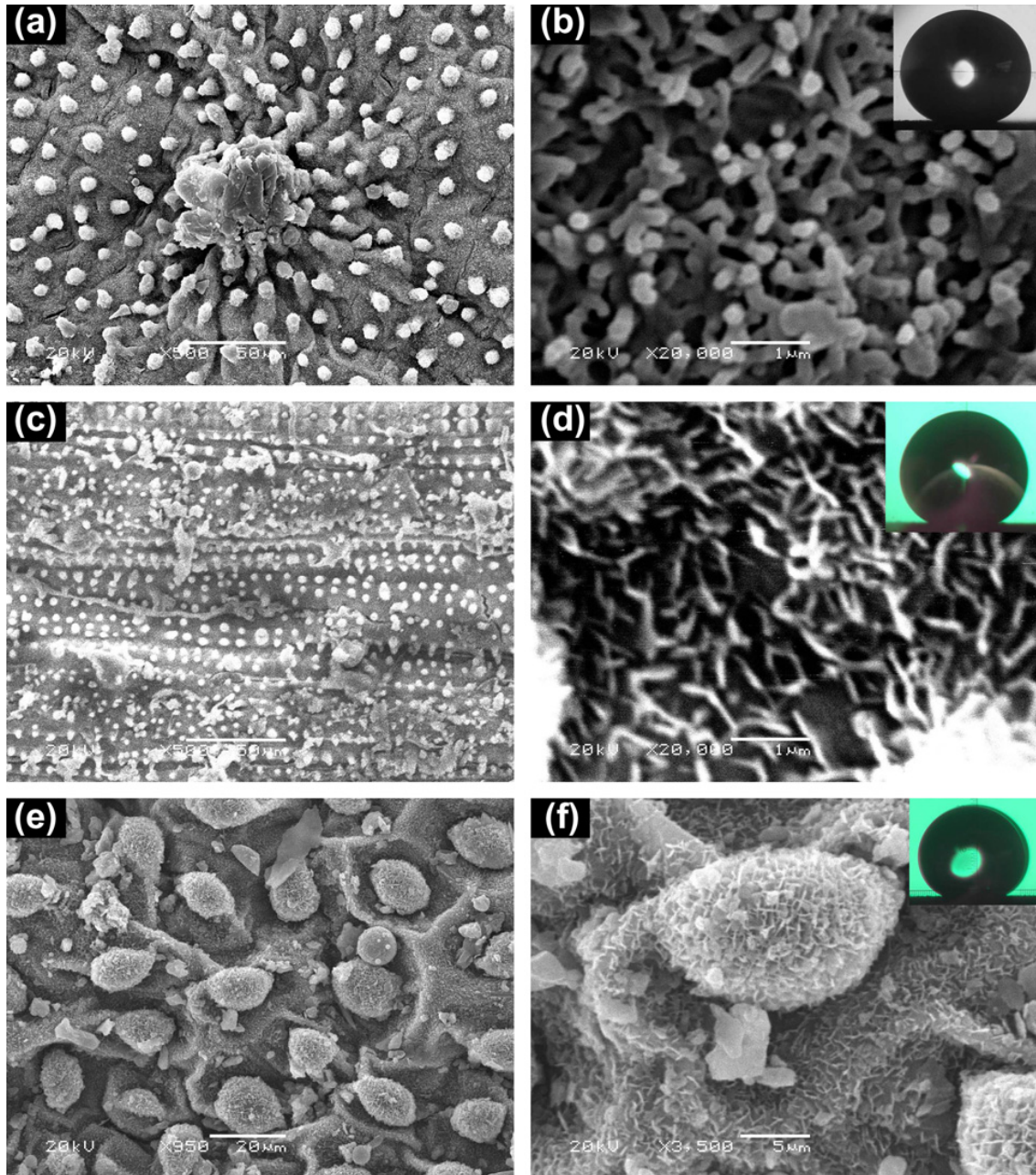
donde  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son los ángulos de contacto de los componentes 1 y 2 con las fracciones de área  $f_1$  y  $f_2$ , respectivamente. Cuando en un sistema de dos componentes, uno de ellos es aire, con un ángulo de contacto de  $180^\circ$  ( $\cos 180^\circ = -1$ ), la ecuación se reduce (Ec. 2) a:

$$\cos \theta_c = f_1 (\cos \theta_1 + 1) - 1$$

Ec. 2

La **Fig. 3** presenta imágenes SEM de 3 tipos de hojas superhidrófobas. En las **Fig. 3a** y **Fig. 3b** se muestra la superficie de la hoja de loto con picos y valles de 3-10  $\mu\text{m}$ , sobre la cual se sitúan partículas de material céreo de entre 70-100 nm. (**Fig. 3a**). En la capa sub-superficial se distribuyen aleatoriamente “bastoncillos” de un diámetro aproximado de 50 nm. Gracias a la combinación de esta jerarquía de estructuras con las partículas de cera se alcanza un CA de  $162^\circ \pm 2$  (recuadro de **Fig. 3b**). Se observa una estructura similar en la hoja de arroz (**Fig. 3c** y **d**). En la superficie, las papilas de un diámetro medio de 5-8  $\mu\text{m}$  se distribuyen en un orden paralelo unidimensional (**Fig. 3c**), a diferencia de lo que ocurre en la hoja de loto. En la capa sub-superficial aparecen numerosas agujas de escala inferior al nanómetro que permiten aumentar la cantidad de aire atrapado en la superficie. En este caso, el CA es ligeramente menor, de  $157^\circ \pm 2$  (recuadro de **Fig. 3d**). Por último, la hoja de taro presenta una microestructura particular, con picos elípticos de un diámetro aproximado de 10  $\mu\text{m}$  distribuidos regularmente en sus respectivos huecos (**Fig. 3e**). A una magnificación mayor, podemos observar la distribución de agujas por toda la superficie (**Fig. 3f**). El CA en este caso es de  $159^\circ \pm 2$  (recuadro de **Fig. 3f**).

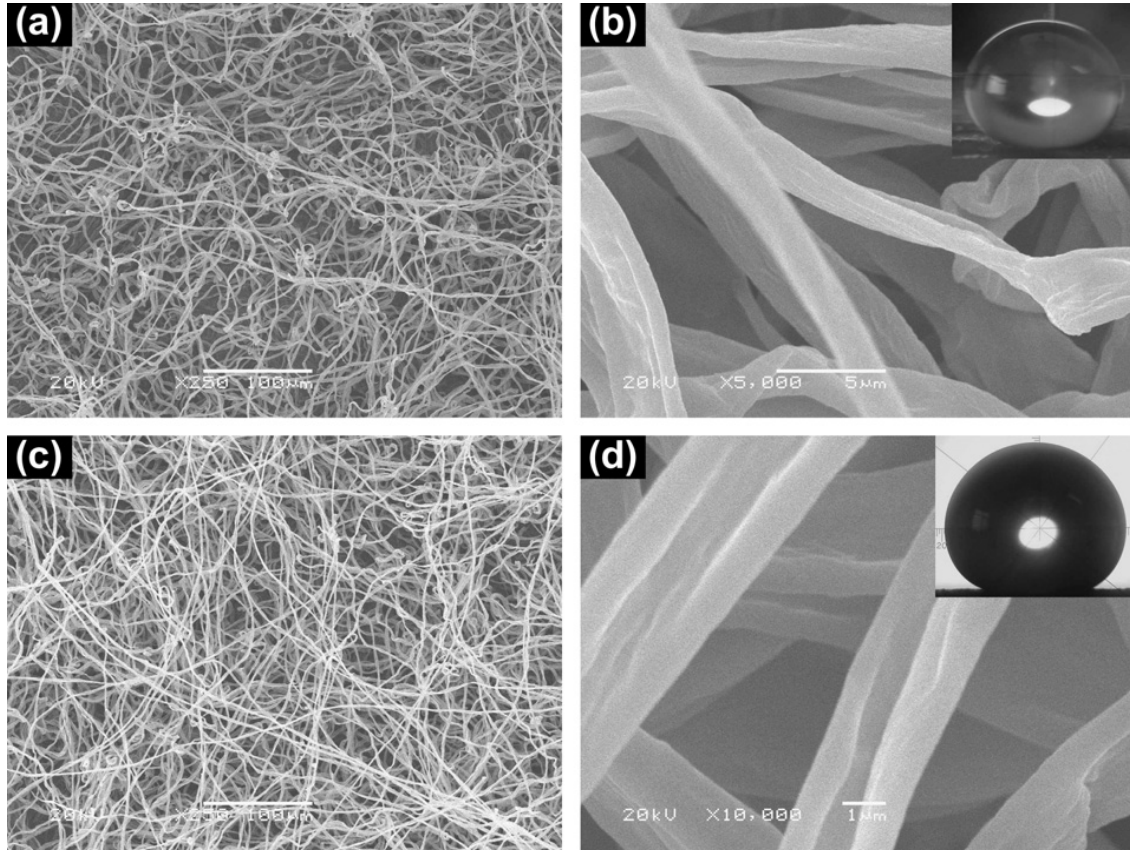
Diversos estudios reflejan la posibilidad de replicar las microestructuras mencionadas, utilizando la superficie de la hoja de loto como plantilla, ya sea por *nanocasting* de PDMS (polidimetilsiloxano) [7], *polymer casting* o litografía por nanoimpresión con UV [8]. Utilizando como plantilla la hoja de taro se ha conseguido un film de poliestireno con superficie superhidrófoba [9]. Sin embargo, estos métodos todavía tienen limitaciones derivadas de la complejidad y el tamaño de la hoja de loto.



**Fig. 3.** Imágenes SEM de superficies superhidrófobas naturales con estructuras jerárquicas [10]. (a) y (b) son imágenes SEM de la hoja de loto en baja y alta magnificación, respectivamente, y el recuadro de (b) es el CA de una gota de agua con un valor de  $162^\circ \pm 2^\circ$ . Las barras en (a y b) son 50 y 1  $\mu\text{m}$ , respectivamente; (c) y (d) son imágenes SEM de la hoja de la planta de arroz en baja y alta magnificación, respectivamente, y el recuadro de (c) es el CA de una gota de agua con un valor de  $157^\circ \pm 2^\circ$ . Las barras en (c y d) son 50 y 1  $\mu\text{m}$ , respectivamente; (e) y (f) son imágenes SEM de la hoja de taro en baja y alta magnificación, respectivamente, y el recuadro de (f) es el CA de una gota de agua con un valor de  $159^\circ \pm 2^\circ$ . Las barras en (e y f) son 50 y 1  $\mu\text{m}$ , respectivamente (reproducido con permiso de Elsevier B.V.)

En paralelo se han publicado estudios que demuestran que para obtener una superficie superhidrófoba no es necesario replicar las estructuras jerárquicas que hemos visto hasta el momento. En la hoja de ramio (**Fig. 4a y b**), la estructura uniforme de fibras de diámetro 1-2  $\mu\text{m}$  presente en su cara posterior alcanza un CA

de  $164^\circ \pm 2$  (recuadro de **Fig. 4b**). Esta disposición de fibras uniformemente distribuidas puede observarse también en la superficie de la sandía china (**Fig. 4c y d**), aunque el CA es ligeramente menor:  $159^\circ \pm 2$  (recuadro de **Fig. 4d**).



**Fig. 4.** Imágenes SEM de superficies superhidrófobas naturales con estructura unitaria [10]. (a) y (b) son imágenes SEM de la cara posterior del ramio en baja y alta magnificación, respectivamente, y el recuadro de (b) es el CA de una gota de agua con un valor de  $164^\circ \pm 2^\circ$ . Las barras en (a y b) son 100 y 1  $\mu\text{m}$ , respectivamente; (c) y (d) son imágenes SEM de la superficie de la sandía china en baja y alta magnificación, respectivamente, y el recuadro de (c) es el CA de una gota de agua con un valor de  $159^\circ \pm 2^\circ$ . Las barras en (c y d) son 50 y 1  $\mu\text{m}$ , respectivamente (reproducido con permiso de Elsevier B.V.)

Estudios como el de Rutledge et al. [11] confirman que las estructuras uniformes pueden obtener rendimientos mayores que las estructuras jerarquizadas. En este caso, utilizaron fibras por electrospinning (fibras uniformes y fibras con estructura de “cuentas de collar”) recubiertas con una capa fina de poli(perfluoroalquil etil metacrilato) (PPFEMA) mediante deposición química en fase vapor (CVD), logrando un CA de  $175^\circ$ .

A pesar de todos estos esfuerzos, las aplicaciones reales del efecto loto son todavía limitadas por la facilidad con la que se pueden contaminar las superficies. Con una mínima reducción de la hidrofobicidad o de la profundidad de la estructura

superficial (por ejemplo, por el efecto de una monocapa de un aceite) se puede destruir el efecto superhidrófobo [12]. La hoja del loto puede resolverlo mediante el crecimiento y la auto-reparación, pero para nuestras superficies artificiales todavía supone un reto.



### 3.2 Materiales con propiedades descontaminantes

#### *Recubrimientos fotocatalíticos. Captadores de CO<sub>2</sub>*

Los Procesos de Oxidación Avanzada (POAs) son procesos fisicoquímicos capaces de producir cambios profundos en la estructura química de diversos contaminantes, a través de procesos de oxidación que implican la generación de radicales hidroxilo en cantidad suficiente para interaccionar con los compuestos orgánicos del medio y degradarlos a sustancias inocuas para el medio ambiente. Entre los diferentes POAs, la fotocatalisis heterogénea es el sistema que presenta mayor interés, ya que no requiere reactivos químicos y puede emplear la radiación UV del sol. [13]

La fotocatalisis se define como la “aceleración de una fotorreacción mediante la presencia de un catalizador”. El catalizador se activa por la absorción de luz y acelera el proceso interaccionando con el reactivo a través de un estado excitado o mediante la aparición de pares electrón/hueco si el catalizador es semiconductor. En este caso, los electrones excitados son transferidos hacia la especie reducible, a la vez que el catalizador acepta electrones de la especie oxidable que ocuparán los huecos. De esta forma el flujo neto de electrones es nulo y el catalizador permanece inalterado [14]. Los componentes necesarios para que la reacción de fotocatalisis tenga lugar son: un compuesto a degradar, un compuesto oxidante (como el oxígeno del aire), un medio donde tiene lugar la reacción (aire), un fotocatalizador (un semiconductor como el TiO<sub>2</sub>) y una fuente de luz ultravioleta (radiación solar o artificial).

Los materiales con buenas propiedades como catalizadores en reacciones fotosensibilizadas son, entre otros, el arseniuro de galio (GaAs), el fosfuro de galio (GaP), el selenuro de cadmio (CdSe), el sulfuro de cadmio (CdS), el óxido de zinc (ZnO), el óxido de tungsteno (WO<sub>3</sub>), el óxido de titanio (TiO<sub>2</sub> (anatasa)) o el carburo de silicio (SiC). De ellos, el TiO<sub>2</sub> es el más utilizado en medio gaseoso, por propiedades como:

- Su banda de valencia está situada por encima del potencial de oxidación de muchos compuestos orgánicos;

- El potencial redox del par  $\text{H}_2\text{O}/\text{OH}$  se encuentra dentro del dominio del salto de banda del material;
- Posee gran estabilidad química frente a los ácidos y a las bases fuertes;
- Es químicamente inocuo;
- Es económico.

El dióxido de titanio  $\text{TiO}_2$  se presenta a presión atmosférica en tres formas polimórficas: rutilo, brooquita y anatasa. La estructura que presenta mayor actividad fotocatalítica es la anatasa, siempre dentro de la región ultravioleta cercana ( $\lambda < 400\text{nm}$ ).

Las propiedades fotocatalíticas del  $\text{TiO}_2$  se derivan de su carácter semiconductor. Un fotón de luz ultravioleta con una longitud de onda en torno a los 388 nm (para el caso del  $\text{TiO}_2$ ) permite a un electrón de la banda de valencia pasar a la banda de conducción. Tanto el electrón como el hueco generado pueden interactuar con el agua (en fase vapor o líquida) y el oxígeno presentes en la superficie: los electrones se combinan con las moléculas de oxígeno para formar aniones de radical superóxido ( $\text{O}_2^-$ ), mientras que los huecos transforman los aniones hidróxido en radicales hidroxilo ( $\text{OH}$ ) neutros. Ambas especies químicas son muy reactivas y pueden disociar los compuestos orgánicos en dióxido de carbono y agua. En presencia de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ), estos son oxidados a nitratos que quedan disponibles en la superficie, siendo necesario evacuarlos periódicamente con agua para no perjudicar el rendimiento de la superficie fotocatalítica. [15]

El rendimiento catalítico global de las partículas de dióxido de titanio depende de diversos parámetros: el método de preparación, la temperatura de recocido, el tamaño de partícula/cristal, la superficie específica, la relación entre las fases cristalinas anatasa y rutilo, la intensidad de la luz, y el sustrato a ser degradado [16].

El efecto fotocatalítico del  $\text{TiO}_2$  es cíclico y como tal no se consume durante el proceso. La eficiencia del efecto se maximiza si se reduce el tamaño de partícula y se dispersan adecuadamente, ya que se maximiza el contacto superficial con el ambiente.

Además del efecto fotocatalítico, las superficies de  $\text{TiO}_2$  pueden presentar anfifilia (hidrofilia y oleofilia) fotoactivada. Este carácter único se debe a la composición

microestructurada de las fases hidrofílica y olefílica, producidas por la radiación ultravioleta. Una capa fina de  $\text{TiO}_2$  policristalino a partir de un sol de anatasa sobre un substrato de vidrio muestra un CA con agua en torno a  $70^\circ$  antes de la irradiación. Tras la irradiación, las gotas de agua se expanden sobre la capa, con un CA de  $0^\circ$ . Este cambio en la mojabilidad se observa tanto en superficies de  $\text{TiO}_2$  de rutilo y de anatasa, tanto en policristales como en monocristales, independientemente de su actividad fotocatalítica. La anfifilia se mantiene durante días en un entorno oscuro, si bien un almacenamiento más extenso acaba resultando en un incremento gradual del ángulo de contacto, tendiendo hacia la hidrofobicidad.[17]

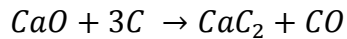
Por otra parte, se estudia la incorporación de captadores de  $\text{CO}_2$  en materiales de construcción expuestos a este gas. El fundamento de estos materiales consiste en la utilización de residuos industriales con capacidad de captación de  $\text{CO}_2$  como materiales cementantes. Los materiales cementantes son materiales aglomerantes que tienen las propiedades de adherencia y cohesión requeridas para unir fragmentos minerales entre sí, formando una masa sólida continua, de resistencia y durabilidad adecuadas. Dentro de esta categoría, además de los cementos propiamente dichos, se encuentran materiales empleados con menos frecuencia como las cales, los asfaltos y los alquitranes.

En este sentido, la cal hidratada (hidróxido de calcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) se muestra como un material cementante compatible con la gran mayoría de elementos de fábrica (piedra, ladrillo, hormigón, etc.), cuyo endurecimiento conlleva la captación de  $\text{CO}_2$  atmosférico. Cabe destacar que el hidróxido de calcio se ha utilizado frecuentemente en la agricultura, la industria, la ingeniería civil y la arquitectura. Puede usarse como aditivo para mejorar la calidad y reología del cemento Portland. Dado su tamaño micro y nanométrico, así como su morfología eminentemente planar, forma suspensiones o pastas de características reológicas óptimas y muy reactivas, de tal forma que al reaccionar con el  $\text{CO}_2$  del aire forma un nuevo material cementante a base de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

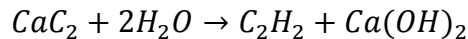
La obtención de cal por calcinación de piedra caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) conlleva la emisión de  $\text{CO}_2$  y generación de  $\text{CaO}$ , además de un considerable gasto energético. El  $\text{CaO}$  en

contacto con agua se transforma en  $\text{Ca(OH)}_2$ , que al ser expuesto al aire (con  $\text{CO}_2$ ) endurece al carbonatarse ( $\text{CaCO}_3$ ).

Una alternativa a este proceso consiste en generar carburo de calcio en un arco eléctrico a partir de óxido de calcio y coque a una temperatura de 2000-2500°C:



Posteriormente el carburo cálcico se hidrata:



En esta reacción se desprende acetileno ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) y se genera  $\text{CaO}$ , el cual se hidrata rápidamente formando una suspensión de hidróxido cálcico. En la industria del acetileno, esta pasta de cal se suele almacenar en balsas como residuo. Su uso como material cementante presenta una alternativa de valor añadido y gran potencial en la captación de  $\text{CO}_2$ .

Para optimizar el uso de estas pastas de cal de carburo se ha desarrollado un tratamiento patentado (por Trenzametel y la Universidad de Granada, PCT-ES 2010/070294) que permite oxidar los restos de carbono orgánico, oxidando los compuestos de azufre presentes como impureza a sulfato de calcio, el cual, mediante adición de  $\text{Ba(OH)}_2$ , es transformado en fases insolubles (barita:  $\text{BaSO}_4$ ) que incorporan e inmovilizan los metales pesados presentes en las pastas de cal.

En este caso, la carbonatación de la cal es un proceso natural que involucra la reacción entre el  $\text{CO}_2$  presente en el aire y el  $\text{Ca(OH)}_2$ , que se disuelve en el agua de los poros y capilares de un mortero o cemento. A partir de esta reacción se forma  $\text{CaCO}_3$  que actúa como agente cementante debido a su microestructura interconectada y su adhesión al resto de los elementos de fábrica. El fraguado de los materiales cementantes a base de cal comienza con un paso inicial de secado y contracción y sigue con la reacción de carbonatación, que avanza desde la superficie hasta el interior a través del sistema poroso (cuyas características controlan la difusión del  $\text{CO}_2$ ). La reacción global de carbonatación puede sintetizarse como sigue:



Considerando que el peso molecular del  $\text{Ca(OH)}_2$  es de 74, el del  $\text{CO}_2$  es de 44, el del  $\text{H}_2\text{O}$  es de 18 y el del  $\text{CaCO}_3$  es de 100, y dado que la reacción ocurre mol a mol,

se aprecia que 74 g de portlandita se transforman en 100 g de calcita, fijando un total de 44 g de CO<sub>2</sub> y desprendiendo un total de 18g de agua. En otras palabras, la carbonatación de 1 Tm de hidróxido cálcico ocasiona la fijación como carbonato cálcico de 0.59 Tm de CO<sub>2</sub> atmosférico.

En cuanto a la cinética de carbonatación de las pastas de cal tanto tradicionales como las de carburo optimizadas y sin optimizar, se ha demostrado que las cales de carburo son más reactivas que las cales tradicionales frente a la captación de CO<sub>2</sub> y la transformación de portlandita en calcita. Ello está relacionado con su mayor área superficial, su tamaño eminentemente nanométrico y su elevada dispersión. La reducción de la porosidad debida a la carbonatación es bastante limitada (en torno al 10%), y esta se debe fundamentalmente a la desaparición de los poros de menor tamaño. Se puede alcanzar la casi completa carbonatación (>95% de conversión en calcita) de un espesor de pasta de 0.5 cm en tan sólo 10 semanas.

### 3.3 Materiales activos

*Fotoluminiscencia. Captación fotovoltaica. Piezoelectricidad. Materiales de cambio de fase (PCM).*

Los materiales activos, inteligentes ('smart materials') o adaptativos son aquellos materiales que presentan como característica diferenciadora la capacidad de modificar alguna de sus propiedades de manera reversible, como respuesta a un estímulo externo (de carácter físico o químico).

Las características físicas de los materiales activos están determinadas por los campos energéticos que actúan sobre ellos. Si el mecanismo afecta la energía interna del material, cambiando su microestructura, entonces el aporte de energía resulta en un cambio de propiedades del material (Tipo I). Si el mecanismo cambia el estado energético de la composición del material, pero no lo altera, entonces el aporte de energía resulta en un intercambio de energía de uno a otro (Tipo II) [18].

En el tipo de materiales activos con cambio de propiedades, el material absorbe el *input* de energía, mientras que en el tipo de materiales con intercambio de energía el material permanece inalterado pero la energía experimenta un cambio.

El primer tipo de materiales activos experimentan un cambio en sus propiedades químicas, térmicas, mecánicas, magnéticas, ópticas o eléctricas, en respuesta a un cambio en las condiciones del entorno del material. Estas condiciones pueden ser ambientales o producidas por un *input* directo de energía. Dentro de esta clase de materiales están todos aquellos que cambian de color, como los termocrómicos, electrocrómicos, fotocromicos, etc., en los cuales la absorción de la radiación electromagnética visible se modifica debido a un cambio ambiental (radiación solar incidente, temperatura superficial) o un *input* directo de energía en el material (corriente, diferencia de potencial).

El tipo de materiales activos de intercambio de energía convierten un *input* de energía en otra forma de energía, para producir un *output* energético acorde con la Primera Ley de la Termodinámica. Aunque la eficiencia de la conversión energética en materiales inteligentes como los fotovoltaicos o los termoelectrónicos es mucho menor que la de las tecnologías convencionales, su potencial utilidad es mucho mayor. La forma de la energía saliente puede añadir capacidades de actuación

como las mostradas por materiales electrostrictivos (materiales dieléctricos que sufren una deformación en presencia de un campo eléctrico), quimioluminescentes (los que emiten luz a causa de una radiación química) o polímeros conductores.

Muchos de estos materiales exhiben la característica de la reversibilidad o de la bidireccionalidad. Por ejemplo, materiales piezoeléctricos que pueden generar una corriente a partir de una deformación mecánica o deformarse con una corriente aplicada. Los materiales con un cambio de propiedades o un intercambio de energía bidireccionales a menudo presentan más interés en la explotación de su cambio transitorio que en las energías y/o propiedades de entrada y salida. La absorción de energía característica de los materiales de cambio de fase (PCM) puede ser utilizada tanto para estabilizar un entorno o para ceder energía al ambiente según la dirección en que ocurra el cambio de fase. La naturaleza bidireccional de las aleaciones de memoria de forma puede ser utilizada para producir salidas múltiples o conmutables, permitiendo al material reemplazar componentes compuestos de varias partes.

La **Tabla 2** presenta los materiales activos con cambio de propiedades (Tipo I), mientras que los materiales con intercambio de energía se detallan en la **Tabla 3** (Tipo II.a) y la **Tabla 4** (Tipo II.b, bidireccionales).

**Tabla 2.** Tipologías de materiales activos con cambio de propiedades (Tipo I), en relación a los estímulos de entrada y de salida.

Tipo de material activo	Input	Output
Termocrómicos	Diferencia de temperatura	Cambio de color
Fotocrómicos	Radiación (luz)	Cambio de color
Mecanocrómicos	Deformación	Cambio de color
Electrocrómicos	Diferencia de potencial eléctrico	Cambio de color
Cristales líquidos	Diferencia de potencial eléctrico	Cambio de color
Partículas en suspensión	Diferencia de potencial eléctrico	Cambio de color
Electrorreológicos	Diferencia de potencial eléctrico	Cambio en la rigidez/viscosidad
Magnetorreológicos	Diferencia de potencial eléctrico	Cambio en la rigidez/viscosidad
Memoria de forma	Diferencia de temperatura	Recuperación de la forma inicial / Trabajo

**Tabla 3.** Tipologías de materiales activos con intercambio de energía (Tipo II.a), en relación a los estímulos de entrada y de salida.

Tipo de material activo	Input	Output
Electroluminiscentes	Diferencia de potencial eléctrico	Luz
<b>Fotoluminiscentes</b>	Radiación	Luz
Quimioluminiscentes	Concentración química	Luz
Termoluminiscentes	Diferencia de temperatura	Luz
Diodos emisores de luz (LEDs)	Diferencia de potencial eléctrico	Luz
<b>Fotovoltaicos</b>	Radiación (luz)	Diferencia de potencial eléctrico

**Tabla 4.** Tipologías de materiales activos con intercambio bidireccional de energía (Tipo II.b), en relación a los estímulos de entrada y de salida.

Tipo de material activo	Input	Output
<b>Piezoeléctricos</b>	Deformación	↔ Diferencia de potencial eléctrico
Piroeléctricos	Diferencia de temperatura	↔ Diferencia de potencial eléctrico
Termoeléctricos	Diferencia de temperatura	↔ Diferencia de potencial eléctrico
Electrostrictivos	Diferencia de potencial eléctrico	↔ Deformación
Magnetostrictivos	Campo magnético	↔ Deformación
<b>PCM</b>	Diferencia de temperatura	↔ Almacenamiento de calor latente y absorción/emisión de energía térmica

A continuación se exponen las características de los materiales activos con aplicación de interés en este proyecto. Dentro de los materiales activos de tipo II.a se encuentran los fotoluminiscentes y los fotovoltaicos, mientras que los materiales de tipo II.b incluyen los piezoeléctricos y los materiales de cambio de fase (PCM).

La luminiscencia es el proceso por el cual una sustancia absorbe y posteriormente, de manera espontánea, emite radiación en el espectro visible (fotones con energías  $1.8 \text{ eV} < hf < 3.1 \text{ eV}$ ). Normalmente, los fotones emitidos se generan por transiciones electrónicas en el sólido. Cuando la fuente de energía que causa la



excitación electrónica es de origen electromagnético, hablamos de fotoluminiscencia.

Según el tiempo que transcurre entre la absorción y la emisión posterior de luz, la luminiscencia se puede clasificar en:

- Fluorescencia: la emisión tiene lugar inmediatamente después de la absorción (antes de  $10^{-8}$ s).
- Fosforescencia: la emisión tiene lugar un tiempo después de la absorción superior a  $10^{-8}$ s.

Los materiales llamados fosforescentes son capaces de absorber radiaciones de  $\lambda$  corta (energía elevada) y emitir espontáneamente radiación luminosa de  $\lambda$  más larga (energía más baja).

El espectro de emisión de estos materiales se controla industrialmente añadiendo impurezas (activadores). Éstas introducen niveles de energía discretos en el *gap* en los que quedarán atrapados los electrones excitados por la absorción de luz. Esto explica el retardo de la luminiscencia.

Un dispositivo fotovoltaico convierte la energía solar directamente en energía eléctrica mediante semiconductores, y se compone principalmente de una unión P-N en la que los portadores minoritarios fotoexcitados son dirigidos a la unión. La energía solar incidente actúa sobre la unión y proporciona la entrada de energía externa. En las células fotovoltaicas típicas, la capa n se sitúa sobre la capa p, incidiendo la radiación solar sobre la capa n. Esta energía provoca un cambio en los niveles de electrones que a su vez hace que los electrones adyacentes se muevan debido a las fuerzas electrostáticas. Este movimiento de electrones produce un flujo de corriente.

La eficiencia de un dispositivo fotovoltaico se define por:

$$\eta = \frac{\text{potencia máxima disponible}}{\text{potencia de radiación incidente}} = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{P_{solar}}$$

La potencia solar es aproximadamente de  $1 \text{ kW/m}^2$ . De manera orientativa:  $\eta(\text{Si}) \sim 15\%$ ;  $\eta(\text{GaAs}) \sim 22\%$ ; y  $\eta(\text{Si-GaAs}) \sim 18\%$ .

Una propiedad inusual que presentan algunos materiales sólidos es la piezoelectricidad (literalmente *presión-electricidad*). La piezoelectricidad se manifiesta en dos caminos:

- Efecto piezoeléctrico directo: se induce la polarización y se establece un campo eléctrico a través de la muestra mediante la aplicación de una presión mecánica. Invirtiendo el signo de la fuerza (o sea, de tracción a compresión) se invierte la dirección del campo.
- Efecto piezoeléctrico inverso: se cambia el estado de polarización del material mediante la aplicación de un voltaje. Esta señal eléctrica hace de generador de presión, de manera que aparece el fenómeno de la electrostricción: la polarización modifica las dimensiones del material.

La piezoelectricidad de un material viene caracterizada por el coeficiente de acoplamiento piezoeléctrico  $\kappa$ , que se corresponde con la fracción de energía mecánica convertida en energía eléctrica.

Esta propiedad es característica de los materiales que tienen estructuras cristalinas complicadas con un bajo grado de simetría. Los grupos puntuales de simetría que presentan piezoelectricidad son: 1, 2, m, 222, mm2, 4, -4, 422, 4mm, -42m, 3, 32, 3m, 6, -6, 622, 6mm, -62m, 23, -43m.

Una característica de los materiales piezoeléctricos es que poseen una temperatura de Curie. Sometido el material a una temperatura mayor, los polos de los cristales pueden cambiar de orientación estando el material dentro de su fase sólida. En el caso de materiales cerámicos, para orientar la estructura molecular de los cristales se somete el material a un campo eléctrico durante su fabricación. La diferencia de potencial aplicada depende del espesor del material (hasta 10 kV) y la temperatura del material se debe elevar hasta la temperatura de Curie, dejándolo enfriar en presencia aún del campo. Al desaparecer éste, los cristales de la cerámica no se pueden desordenar debido a las tensiones mecánicas acumuladas, quedando una polarización remanente. Las cerámicas piezoeléctricas cuentan con una gran estabilidad térmica, magnética y física. Su principal desventaja reside en la sensibilidad térmica de sus parámetros en ambientes donde la temperatura está cerca de la Curie.

Los materiales piezoeléctricos se pueden clasificar en:

- Naturales: cristales de cuarzo y turmalina.
- Sintéticos: sal de Rochelle, el titanato de Bario ( $\text{BaTiO}_3$ ) y algunos componentes cerámicos como PZT (titanatos-zirconatos de plomo), metaniobato de plomo, el fluoruro de polivinilideno (PVF2 o PVDF), trifluoroetileno TrFE P(VDF/TRFE), el nylon y la poliurea.

Los PZT suelen ser los materiales piezoeléctricos más utilizados, pues en general presentan elevados  $\kappa$  y  $T_C$ :

- Existe materiales PZT duros, cuya temperatura de Curie está por encima de 300 °C. Son difíciles de polarizar, excepto a temperaturas elevadas.
- Los materiales PZT blandos tienen bajas temperaturas de Curie, por debajo de los 200 °C. Pueden ser polarizados a temperatura ambiente con campos eléctricos fuertes.

Los materiales piezoeléctricos son, por tanto, transductores, ya que realizan una conversión de un tipo de energía a otro (en este caso, energía mecánica en energía eléctrica, y viceversa).

Los materiales de cambio de fase (PCM, o "Phase Change Materials") se incluyen dentro de la familia de materiales activos no por la naturaleza de la energía intercambiada, sino por su excepcional capacidad de almacenamiento de esta energía.

Un cambio en la temperatura y/o la presión de un material puede producir la transformación de un estado físico a otro. El proceso de cambio de fase involucra la absorción, almacenamiento y emisión de una cantidad de energía en forma de calor latente, y ocurre a una determinada. La utilización de PCM se basa en su gran capacidad de almacenamiento de calor latente, y la posibilidad de obtener temperaturas de cambio de fase adaptadas a las necesidades de la aplicación. En general, las características de interés en un PCM son:

- Alta capacidad de almacenamiento de calor latente
- Conductividad térmica alta
- Temperatura de fusión en el rango de la aplicación
- Estabilidad química

- Fusión congruente con mínimo subenfriamiento
- Bajo coste
- No tóxico
- No inflamable
- No corrosivo

En términos generales, los tipos de PCM se pueden clasificar en 2 categorías:

- Inorgánicos: sales hidratadas
- Orgánicos: parafinas y ácidos grasos

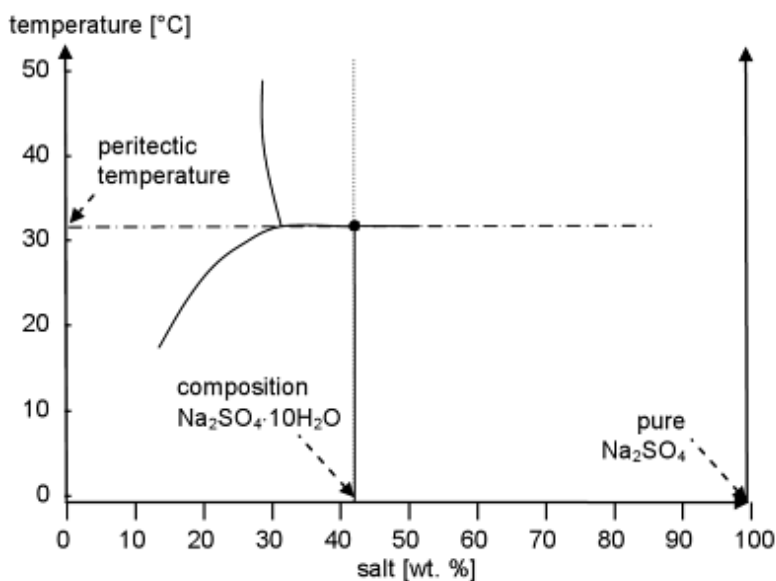
Las principales ventajas de las sales hidratadas (como la sal de Glauber) son su alta capacidad de almacenamiento de calor latente por unidad de volumen (~270-350 MJ/m<sup>3</sup>) y su bajo coste. Sin embargo, estos materiales son susceptibles de presentar subenfriamiento, manteniéndose el líquido subenfriado en un estado metaestable varios grados por debajo de la temperatura de cambio de fase. En este caso, el calor latente no se emitirá hasta que se produzca la cristalización, lo que invalidaría la aplicación del PCM.

El subenfriamiento se debe a la barrera energética presente en la nucleación y crecimiento de un núcleo cristalino: para que un núcleo crezca mediante la solidificación de la fase líquida de su superficie, el sistema tiene que liberar calor para alcanzar su mínimo energético. Hay una competición entre la energía superficial, que es proporcional al área superficial y por tanto a  $r^2$  ( $r$  es el radio del núcleo), y el calor liberado en el cambio de fase, que es proporcional al volumen y por tanto a  $r^3$ . Con radios pequeños, es posible que el calor liberado por la cristalización sea menor que la energía superficial ganada. Aquí está la barrera energética; sólo cuando un núcleo es suficientemente grande comienza la solidificación. Por ello, en algunos casos (y en particular en las sales hidratadas) se presenta este subenfriamiento. En base a esto, la nucleación se divide en dos casos:

- Nucleación homogénea: nucleación a bajas temperaturas o a partir de partículas de PCM sólido añadidas al líquido subenfriado (nucleación secundaria)
- Nucleación heterogénea: incorporación de aditivos nucleantes, impurezas o puntos de nucleación en las paredes de la cápsula contenedora.

La solución más común es la adición de agentes nucleantes que promueven la correcta fusión y respectiva cristalización aumentando la vida útil en ciclos de la sal hidratada usada como PCM. Se han desarrollado agentes nucleadores que reducen el subenfriamiento a valores de pocos K. La mayoría son materiales con una estructura cristalina similar a la del PCM sólido, para permitir que la fase sólida del PCM crezca sobre su estructura, pero con una temperatura de fusión de 10 a 20 K por encima de la del PCM [19].

Otro de los problemas que pueden presentar las sales hidratadas es la segregación de fases, la cual puede reducir drásticamente la densidad de almacenamiento de calor del material. Un ejemplo es la sal de Glauber ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), cuyo diagrama de fases se muestra en la **Fig. 5**. En el punto peritético de  $32^\circ\text{C}$  se forma  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (más denso, que se hundirá) y un líquido con aproximadamente un 32 wt.% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Al aumentar la temperatura, la concentración de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  en el líquido disminuye, ya que la solubilidad del  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  disminuye con la temperatura. Por tanto no se podrá obtener un líquido homogéneo con la composición original mediante el aumento de la temperatura. Cuando la composición se enfría por debajo de  $32^\circ\text{C}$ , se forma de nuevo  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  a partir de la solución diluida, quedando una líquido todavía más diluido. A pesar de que  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  es la fase más estable por debajo de la temperatura de fusión, la disolución de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  por difusión molecular será muy lenta, pues quedaría separada de la solución por una capa de  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ . Este comportamiento se conoce como fusión incongruente.



**Fig. 5.** Diagrama de fase de  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ , que presenta fusión incongruente.[20]

Es importante indicar que el diagrama de fase es válido en condiciones de equilibrio termodinámico. Según la velocidad de enfriamiento y calentamiento, el grado de segregación de fases será diferente.

Una de las posibles soluciones pasa por favorecer los procesos de difusión entre las diferentes fases, eficientes sólo a pequeña escala. Una manera de hacer que las fases no se separen más de unos pocos milímetros sería utilizando cápsulas estrechas, aunque a menudo no es suficiente. Para llegar a una distancia microscópica entre fases, puede utilizarse el *gelling*, es decir, la formación de una red tridimensional (p.ej. polimérica) en el interior de la masa que mantenga las diferentes fases formadas unidas a escala microscópica. Puede lograrse el mismo efecto si se infiltra el PCM en un material poroso.

Otra solución pasaría por aumentar la viscosidad del PCM mediante aditivos, lo que reduciría la distancia entre fases. Por último, la solución más efectiva y complicada es la modificación del diagrama de fase mediante la adición de otros materiales, hasta alcanzar una fusión congruente.

Los problemas de subenfriamiento y segregación desaparecen en los PCM orgánicos. En contraposición, son más caros, presentan valores de calor latente menores que los inorgánicos, son materiales inflamables y emiten gases nocivos durante su combustión. Otros problemas a tener en cuenta son las reacciones con los productos de la hidratación del hormigón (hidróxido de calcio) en el caso de los ácidos grasos, el envejecimiento por oxidación, y los cambios de volumen en la transición de fase.

Existen parafinas comerciales y ceras de parafina con temperatura de fusión próxima a la temperatura de confort, siendo una alternativa más económica a la utilización de ácidos grasos.

La utilización de PCM como aditivo termorregulador en materiales compuestos requiere su encapsulación, tanto para retener el PCM en estado líquido como para evitar su contacto con el material o el ambiente circundante. Normalmente se clasifica según su tamaño como macro- y microencapsulación.

La macroencapsulación se refiere a la utilización de contenedores con capacidades entre pocos mililitros y varios litros. En estos casos, su función principal es

contener el PCM líquido y, si es suficientemente rígido, dotar de estabilidad mecánica al sistema.

La microencapsulación se refiere a la utilización de una cápsula sólida para contener partículas de 1  $\mu\text{m}$  a 1000  $\mu\text{m}$  de diámetro. Además de la contención de la fase líquida, permiten mejorar la transferencia de calor con el entorno gracias a su alto ratio superficie-volumen, y mejoran la estabilidad frente al número de ciclos gracias a que la segregación de fases se limita a distancias de separación microscópicas. Sin embargo, la microencapsulación aumenta las posibilidades de aparición del subenfriamiento.

Algunos de los materiales utilizados para la formación de las cápsulas son la resina urea-formaldehído, resina melamina-formaldehído, resina  $\beta$ -naftol-formaldehído y goma arábica.

## 4 Materiales y métodos

En este capítulo se estudian los materiales de base propuestos por ATEC para la placa de fachada y se introducen los conceptos básicos para los posteriores análisis requeridos.

### 4.1 Composición y densidad de las probetas

A continuación se detallan las características de las probetas preparadas, y los ensayos a los que son sometidas.

En primer lugar, se analizan 3 tipos de mortero que difieren en su composición, ya que se pretende estudiar la incorporación de diferentes cargas procedentes de residuos. Como elemento conglomerante se utiliza cemento portland, mientras que se estudia la incorporación de granos de caucho (procedentes de neumáticos fuera de uso -NFU-) y polvo de cáscara de huevo (con alto contenido en  $\text{CaCO}_3$ ) como elementos conglomerados.

El cemento portland se produce moliendo y mezclando minerales con contenidos en arcilla y caliza en las proporciones correctas y luego calentando la mezcla a alrededor de  $1400^\circ\text{C}$  en un horno giratorio; este proceso (calcinación) produce cambios físicos y químicos en las materias primas; el producto resultante, el clinker, es entonces triturado hasta que se forma un polvo muy fino al cual se le añade una pequeña cantidad de yeso ( $\text{CaSO}_4$ ) para retrasar el proceso de fraguado. El producto final es el cemento portland, cuyas propiedades, incluidos el tiempo de fraguado y la resistencia final, dependen en gran medida de la composición. En el cemento portland se encuentran diferentes constituyentes: los principales son el silicato tricálcico ( $3\text{CaO-SiO}_2$ ) y el silicato dicálcico ( $2\text{CaO-SiO}_2$ ).

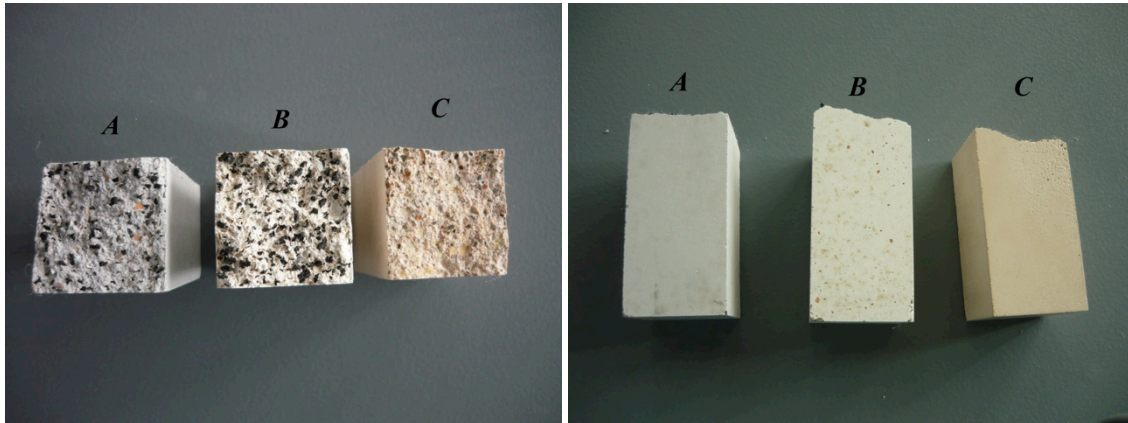
La adición de caucho de NFU se propone para aprovechar sus características elásticas, baja densidad, compatibilidad con el cemento y estabilidad. Este tipo de caucho procede de neumáticos al fin de su ciclo de vida, compuestos fundamentalmente por cauchos naturales y artificiales, alambre de acero, negro de humo y otros materiales de carga (derivados del sílice) y aditivos. La cáscara de huevo posee en general un alto contenido en  $\text{CaCO}_3$ , y su uso como elemento conglomerado propone una salida a las largas cantidades de este residuo



producidas por la industria alimentaria, al tiempo que sustituye parte de la masa de cemento sin afectar al rendimiento mecánico del compuesto.

La probeta A incorpora un porcentaje de cáscara de huevo y caucho. La probeta B sólo incorpora caucho como carga adicional. La probeta C está constituida únicamente por el mortero original.

La densidad aparente de cada una de las probetas queda recogida en la **Tabla 5**.



**Fig. 6.** Probetas analizadas: (a) Mortero con incorporación de una carga de  $\text{CaCO}_3$  (cáscara de huevo) y caucho (NFU); (b) Mortero con incorporación de caucho (NFU); (c) Mortero

**Tabla 5.** Determinación de la densidad aparente de las distintas probetas.

Probeta	Densidad aparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
A	1,522
B	1,449
C	1,929

#### 4.2 Determinación de la conductividad térmica de la placa

La conducción térmica es el fenómeno por el cual el calor es transportado desde las regiones de alta temperatura a las de baja temperatura de una sustancia. La propiedad que caracteriza la capacidad de un material para transferir calor es la conductividad térmica.

La conductividad térmica es el coeficiente que controla la velocidad de transferencia de calor por conducción ( $dQ/dt$ ) a través de un área  $A$ , debido a un gradiente de temperatura ( $dt/dx$ ). Es decir:

$$k = -\frac{dQ/dt}{A dT/dx}$$

Si este material en forma de lámina plana se encuentra en contacto con dos focos térmicos a diferente temperatura  $T_c$  (caliente) y  $T_f$  (frío) y ha alcanzado el régimen estacionario, la cantidad de calor por unidad de tiempo y superficie que atraviesa la placa será proporcional a la diferencia de temperaturas e inversamente proporcional a su espesor, siendo esta constante de proporcionalidad la conductividad térmica,  $k$ , del material.

La técnica de medida de la conductividad térmica utilizada que emplearemos en esta experiencia, se basa en la determinación experimental del flujo de calor que atraviesa la muestra situada en el soporte de experimentación, que mantiene al foco térmico,  $T_c$  a la temperatura constante de ebullición del agua haciendo circular vapor a su través, y el foco frío a la temperatura de fusión, también del agua, mediante un bloque de hielo en fusión que se sitúa en contacto térmico con la otra cara de la muestra,  $T_f$ . Las variables a determinar para el correcto cálculo del coeficiente de conductividad térmica son:

- Espesor de la muestra,  $\Delta x$ .
- Superficie de contacto entre el hielo y la muestra,  $A$ .
- Flujo de calor,  $dQ/dt$ , se determinará midiendo la masa de agua fundida en un intervalo de tiempo determinado. Esta medida se realizará en dos condiciones diferentes:
  - Cuando el foco caliente esté a la temperatura ambiente.
  - Cuando el foco caliente está ya a la temperatura de ebullición.

La diferencia entre estas dos cantidades será realmente el flujo de calor intercambiado a través de las superficies paralelas del material.



Fig. 7. Sistema experimental para la determinación del coeficiente de conductividad térmica.

### 4.3 Estudio preliminar de la incorporación de PCM

Para realizar una primera aproximación a la incorporación de PCM en la placa de fachada se escogen dos tipos de PCM microencapsulado, uno basado en sales hidratadas y otro en parafinas; ambos con una temperatura de transición de fase cercana a la temperatura de confort.

El primero es el producto S21 de la empresa PCMproducts, cuya transformación de fase ocurre a 22 °C. Sus propiedades quedan reflejadas en la **Tabla 6**.

**Tabla 6.** Propiedades físicas del PCM S21 (sal hidratada)

Temperatura de cambio de fase (°C)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Calor latente (kJ/kg)	Calor específico (kJ/kg·K)
22	1530	170	2,20

El PCM del tipo parafina que se estudiará es el Micronal DS 5040 X, suministrado por BASF, cuyas propiedades se recogen en la **Tabla 7**.

**Tabla 7.** Propiedades físicas del Micronal DS 5040 X (parafina). 'n.i.' = no informado

Temperatura de cambio de fase (°C)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Calor latente (kJ/kg)	Calor específico (kJ/kg·K)
23	n.i.	96	n.i.

A pesar de que los detalles precisos sobre la composición de Micronal están sujetos a una patente internacional, conocemos que se basa principalmente en n-

Hexadecanos ( $C_{16}H_{34}$ ), por lo que utilizaremos la información bibliográfica [21] de este compuesto para sustituir a los valores no informados por el fabricante:

- Densidad ( $kg/m^3$ ) = 773
- Calor específico ( $kJ/kg\cdot K$ ) = 2,20 (liq); 2,25 (sol.)

Como veremos más adelante, estas aproximaciones no afectarán significativamente a los resultados, puesto que la principal propiedad estudiada será el calor latente del PCM.

El objetivo central del estudio preliminar será estudiar el rendimiento del sistema mortero-PCM para conocer la capacidad de almacenamiento del calor del sistema, y estimar la cantidad de PCM a incorporar para alcanzar una capacidad determinada.

Para ello será necesario, en primer lugar, evaluar el calor sensible absorbido por la el mortero (siempre en estado sólido) y el PCM (en estado sólido y en estado líquido). El calor sensible es la cantidad de calor absorbido o cedido por un cuerpo y que se emplea en aumentar o disminuir su temperatura, sin producir un cambio molecular en su estructura.

La capacidad calorífica indica la cantidad de energía necesaria para aumentar la temperatura de 1 mol de material en 1 K. Por tanto, es una medida de la capacidad que tiene un material para absorber calor de su entorno. Se expresa como:

$$C = \frac{dQ}{dT} \left( = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \right)$$

donde  $dQ$  es la energía necesaria para producir en 1 mol un cambio de temperatura  $dT$ .

El calor específico representa la capacidad calorífica por unidad de masa. Se expresa como:

$$c = \frac{C}{PA}$$

donde PA es el peso atómico.  $c$  se expresa en  $J/Kg\cdot K$  o  $cal/g\cdot K$ .

En la mayoría de los sólidos la manera principal con la que se absorbe energía es mediante un aumento de la energía vibracional de los átomos.

Los átomos en los sólidos se encuentran vibrando constantemente a frecuencias muy elevadas y con amplitudes pequeñas. No obstante, estas vibraciones no son independientes, sino que están acopladas con las vibraciones de los átomos vecinos con los que están enlazados químicamente. Estas vibraciones están coordinadas de tal manera que producen ondas viajeras (ondas que se propagan por el sólido). Sólo algunos valores de energía vibracional están permitidos (sólo algunas frecuencias de vibración), por tanto, la energía vibracional está cuantificada y el cuanto se llama fonón (análogo al fotón de la luz).

La dispersión térmica de los electrones libres durante la conducción eléctrica es debida a estas ondas vibracionales, que también participan del transporte de energía durante la conductividad térmica.

En el caso que nos ocupa, consideramos un proceso de absorción de calor que se efectúa a presión constante. Por esto, el calor sensible que calcularemos para el mortero y el PCM vendrá determinado por:

$$Q_s = \Delta H = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Donde  $\Delta H$  es la entalpía del sistema,  $m$  es la masa del cuerpo,  $c_p$  es su calor específico y  $\Delta T$  es el rango de temperatura definido por la temperatura inicial y final del cuerpo.

Por otra parte, la finalidad de la incorporación del PCM es aprovechar el calor intercambiado durante su transformación de fase (calor latente). A diferencia del calor sensible, esta energía calorífica es absorbida o desprendida por el material para producir el reordenamiento molecular que conlleva la transformación de fase. Por ello, la temperatura del cuerpo se mantiene constante durante el cambio de fase, ya que el calor no se emplea en variar la temperatura del material.

El calor latente se determina como:

$$Q_L = m \cdot \lambda$$

Donde  $m$  es la masa del cuerpo y  $\lambda$  es el calor latente de fusión o solidificación (o entalpía de cambio de fase) característico del material PCM. En este caso, la composición del PCM comercial S21 está ajustada de manera que el calor latente de fusión y el de solidificación sean iguales o muy similares.

La Fig. 8 presenta la evolución del calor almacenado por un material (en forma de calor sensible y de calor latente) en función de la temperatura.

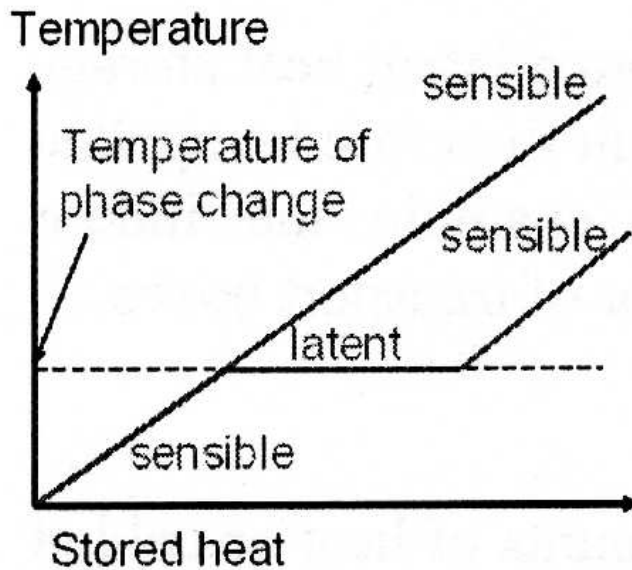


Fig. 8. Evolución del calor sensible y el calor latente en función de la temperatura.

Para la obtención del comportamiento del sistema mortero-PCM utilizaremos las ecuaciones ya mencionadas y las relacionaremos con una variable de entrada que será el % de PCM a añadir a una placa de dimensiones determinadas. El cálculo se realizará a través de una hoja de cálculo donde se definen las propiedades de los componentes del sistema y las condiciones de trabajo (ver la **Tabla 8** para la sal hidratada S21 y la **Tabla 9** para la parafina Micronal DS 5040X).

Tabla 8. Condiciones iniciales y propiedades de los componentes (PCM S21)

Propiedades	PCM sólido	PCM líquido	Placa A	Placa B	Placa C
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1530	1530	1522	1449	1929
c <sub>p</sub> (kJ/kg·K)	2,2	2,2	0,84	0,84	0,84
λ (kJ/kg)	170		-	-	-
T <sub>mp</sub> (°C)	22		-	-	-
			↓	↓	↓
			<b>Mortero + cáscara de huevo y NFU</b>	<b>Mortero + NFU</b>	<b>Mortero</b>
<b>Condiciones</b>					
T <sub>i</sub> (°C)	18				
T <sub>f</sub> (°C)	28				
ΔT (°C)	10				

**Tabla 9.** Condiciones iniciales y propiedades de los componentes (PCM Micronal DS 5040X)

Propiedades	PCM sólido	PCM líquido	Placa A	Placa B	Placa C
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	773	773	1522	1449	1929
c <sub>p</sub> (kJ/kg·K)	2,25	2,2	0,84	0,84	0,84
λ (kJ/kg)	96		-	-	-
T <sub>mp</sub> (°C)	22		-	-	-
			↓	↓	↓
Condiciones			<b>Mortero + cáscara de huevo y NFU</b>	<b>Mortero + NFU</b>	<b>Mortero</b>
T <sub>i</sub> (°C)	18				
T <sub>f</sub> (°C)	28				
ΔT (°C)	10				

El rango de temperaturas seleccionado será de 10°C, con una temperatura mínima de 18°C y una máxima de 28°C, si bien puede modificarse fácilmente a la hora de adaptar el cálculo a las condiciones de una aplicación determinada (latitud, orientación de la fachada, clima, etc.).

Como restricción del problema tenemos el volumen de la placa estándar, cuyas dimensiones son de 600x400x25 mm, con un volumen total de 6000 cm<sup>3</sup>.

Se debe tener en cuenta que, ante la falta de datos sobre el calor específico de los 3 tipos de placa, tomaremos como valor de referencia el calor específico del cemento portland (c<sub>p</sub> = 0,84 kJ/kg·K), componente mayoritario en todos ellos. En los resultados se discutirán las limitaciones de esta aproximación.

Por último, los resultados iniciales se orientarán a cumplir una premisa indicada por FIDIMA, que consiste en duplicar el calor almacenado por los 3 tipos de mortero (sin PCM), al introducir un % de PCM en la composición (que será el valor a determinar). Esta premisa permitirá obtener una primera comprensión de los resultados, si bien el resultado más realista pasaría por obtener un valor de calor almacenado acorde con la demanda de energética de una edificación concreta.

## 5 Resultados y discusión

Los resultados presentados corresponden a dos etapas sucesivas del estudio realizado para FIDIMA. En primer lugar, se presentan las propuestas de incorporación de materiales avanzados en la placa de fachada (apartados 5.1 – 5.6), en base a la investigación teórica expuesta en el capítulo 3. Tras la valoración de estas propuestas por parte de FIDIMA, se procede al estudio preliminar de la implantación de las propuestas seleccionadas, lo que queda recogido en los apartados 5.7 – 5.8.

### 5.1 Superficies autolimpiables

La primera actuación propuesta consiste en la aplicación de recubrimientos autolimpiables basados en el efecto loto sobre la placa de la fachada, generando superficies autolimpiables.

StoCoat® Lotusan® (**Fig. 9**) es una pintura acrílica de base acuosa que genera una superficie superhidrófoba, imitando las propiedades autolimpiables del loto. El producto fue desarrollado a partir de la patente y marca registrada (Lotus-Effect®) de William Barthlott, y se comercializa desde 1999. Se aplica sobre paredes verticales de hormigón, mampostería o yeso.



**Fig. 9.** Superficie recubierta con StoCoat® Lotusan®. Foto por Pablo Axpe.



StoCoat® Lotusan® se compone de: 1-5% Trietoxi(2,4,4-Trimetilpentil) Silano, 15-40% Cristobalita ( $\text{SiO}_2$ ), y 10-30%  $\text{TiO}_2$  [22]. La microestructura superficial generada permite obtener un ángulo de contacto de  $140^\circ$ , por lo que se considera una superficie hidrófoba. Cabe señalar que la presencia de  $\text{TiO}_2$  en la composición no se debe a sus propiedades fotocatalíticas, sino a su capacidad para proporcionar rugosidad y controlar la formación de la superficie hidrófoba.

Tecnadis PRS® (**Fig. 10**), comercializado por Tecnan S.L., una composición hidrofobizante basada en nanopartículas con una alta repelencia al agua y que se puede aplicar sobre sustratos porosos, como piedra natural, ladrillo, teja, hormigón, madera, etc. El tratamiento es superficial y está recomendado en fachadas, superficies verticales o inclinadas. Tecnadis PRS® se compone de una dispersión de nanopartículas (con un tamaño medio de 15 nm) tratadas con agentes activos y otros aditivos en un disolvente básico sin VOC (compuestos orgánicos volátiles).



**Fig. 10.** Aplicación de la composición hidrofobizante Tecnadis PRS® sobre una superficie cerámica. Foto por Pablo Axpe.

Presenta la gran ventaja frente a hidrofugantes tradicionales (basados en siloxanos, polisiloxanos o siliconas) que no forma ninguna película o barrera sobre el sustrato, permitiendo así la total transpirabilidad del material a la vez que

impide que penetre el agua en su interior (por el efecto de la lluvia, salpicaduras, etc.) evitando problemas de humedades y condensaciones.

Además, no reacciona con el material sobre el que se aplica, no cambia su color original ni su textura. Debido a su composición, las gotas resbalan sobre la superficie con mucha facilidad, arrastrando a su vez el polvo o restos de suciedad que puedan estar presentes sobre la misma, permitiendo tener limpia la superficie durante mucho más tiempo. Es totalmente compatible con cualquier material de construcción, puede ser reaplicable y tiene una durabilidad del efecto protector frente al agua de más de 10 años [23].

## 5.2 Incorporación de activos fotocatalíticos

Se propone un recubrimiento superficial de acción fotocatalítica que dote a la placa de una funcionalidad descontaminante. El comportamiento fotocatalítico del  $\text{TiO}_2$  se aplica en el desarrollo de superficies con propiedades antibacterianas, autolimpiables y descontaminantes. Se han desarrollado recubrimientos superficiales a base de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  para interiores (baldosas cerámicas, vidrios de ventana, etc.) que actúan descomponiendo la materia orgánica (aceites, suciedad, residuos de humo...) depositada en dicha superficie. Determinados recubrimientos transparentes de  $\text{TiO}_2$  (que no alteran el color del sustrato o su transparencia) pueden actuar tanto bajo la acción de la luz solar como de la iluminación artificial.



**Fig. 11.** Revestimiento fotocatalítico Hydrotect, de TOTO. Foto por Pablo Axpe.

En el caso que nos ocupa, el interés principal del recubrimiento fotocatalítico es su acción descontaminante (de contaminantes atmosféricos como NO<sub>x</sub> y VOCs), autolimpiable, antimicrobiana y antihongos y en fachadas situadas en un entorno urbano.

Los óxidos de nitrógeno constituyen una de los principales causantes de la lluvia ácida y forman contaminantes secundarios responsables del smog fotoquímico, relacionado con enfermedades respiratorias como el asma. Las emisiones de NO<sub>x</sub> derivan principalmente de la combustión de petróleo, carbón y gas natural. El NO<sub>2</sub> presente en el aire de las ciudades proviene en su mayor parte de la oxidación del monóxido de nitrógeno, NO, cuya fuente principal son las emisiones provocadas por los automóviles, sobre todo los diesel. El NO<sub>2</sub> constituye pues un buen indicador de la contaminación debida al tráfico rodado. Por otro lado, el NO<sub>2</sub> interviene en diversas reacciones químicas que tienen lugar en la atmósfera, dando lugar tanto a la producción de ozono troposférico como de partículas en suspensión secundarias menores de 2,5 micras (PM<sub>2,5</sub>), las más dañinas para la salud[24].

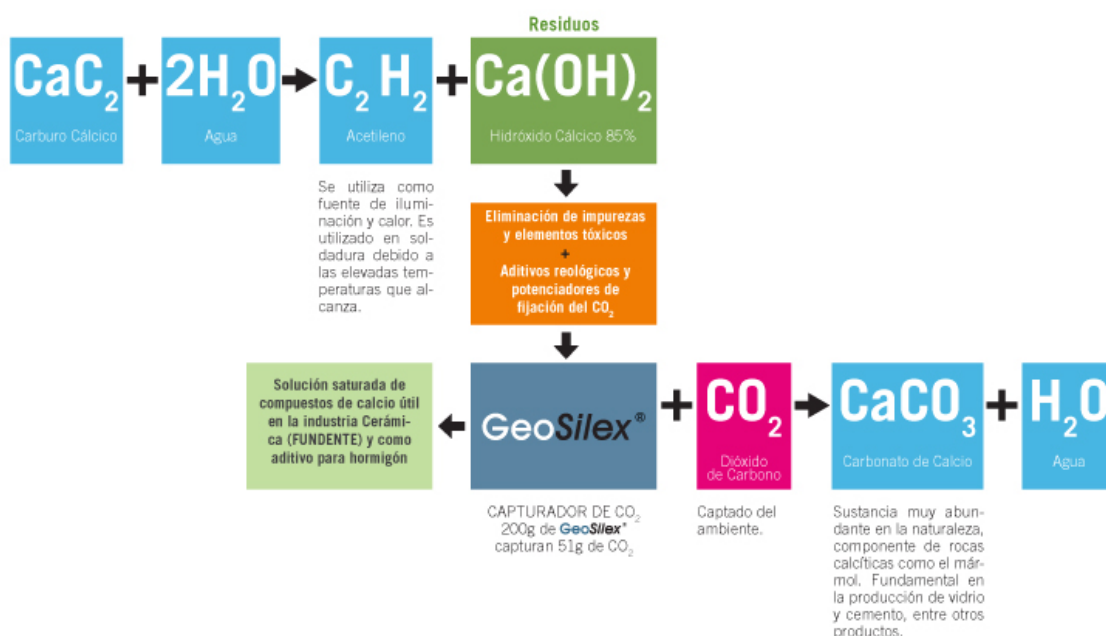
Existen soluciones comerciales para fachadas que incorporan recubrimientos fotocatalíticos. Es el caso de Bionictile® de Ceracasa [25], un revestimiento porcelánico para fachada con microrrelieves que cuenta con un esmalte especial constituido por TiO<sub>2</sub> y potenciadores, que presenta actividad fotocatalítica y al ser iluminado con luz solar ó ultravioleta transforma continuamente los NO<sub>x</sub> de la atmósfera en NO<sub>3</sub>-soluble en agua e inocuo, regenerando los centros activos mediante el lavado natural durante periodos de lluvia o humedad ambiental. En este caso se

La cantidad de NO<sub>x</sub> que la muestra es capaz de descomponer por unidad de área y de tiempo se ha calculado en 33 mg NO<sub>x</sub> por m<sup>2</sup> y por minuto, lo que con luz solar equivaldría a 0.52 mg NO<sub>x</sub> por m<sup>2</sup> y por min, ó 31.2 mg NO<sub>x</sub> por m<sup>2</sup> y por hora. Suponiendo una irradiación de 12 horas de luz solar por día el dato de reducción de contaminantes NO<sub>x</sub> sería de: 374.4 mg NO<sub>x</sub> por m<sup>2</sup> y por día. [26]

Nano E502, de la empresa Ekoeaso, es un recubrimiento de nanopartículas de TiO<sub>2</sub> (fase anatasa) modificado VLR (Visible Light Responsive) en una dispersión coloidal en base acuosa con un contenido de material activo de 7500 -

10000(PPM), de elevada adhesión para aplicaciones exteriores, secado a temperatura ambiente hasta 600°C y con propiedades de auto-limpieza (superhidrófilo). Presenta un pH entre 7 y 9 y un tamaño de partícula inferior a 8 nm. Su aplicación está especialmente indicada en superficies exteriores, donde además del efecto de neutralización de NO<sub>x</sub>, puede generar una capa superhidrófila autolimpiable.

### 5.3 Captación de CO<sub>2</sub>



**Fig. 12.** Esquema de obtención y usos del GeoSilex®.

En la línea de la incorporación de propiedades descontaminantes a la envolvente del edificio, se propone la inclusión de aditivos con capacidades de captación de CO<sub>2</sub>, en particular del producto GeoSilex®. Éste es un aglomerante captador de CO<sub>2</sub> obtenido tras la purificación y optimización de cales residuales de carburo seleccionadas, obtenidas como subproducto en la producción de acetileno. Se comercializa como una pasta aditiva para hormigones, que se añade a estos en una proporción del 3-10%.

Posee una elevada capacidad de captación del CO<sub>2</sub> ambiental al estar compuesto básicamente por hidróxido de calcio inestable optimizado en condiciones de captar el CO<sub>2</sub> necesario para su transformación en carbonato de calcio. La patente de GeoSilex®, desarrollada por Trenzamet S. L. y la Universidad de

Granada no sólo protege las múltiples aplicaciones del Hidróxido Cálcico ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) en formaciones nanométricas altamente reactivas obtenido mediante su procedimiento. El proceso productivo patentado neutraliza el efecto penalizante de impurezas de los residuos debidas a la presencia de sulfuros, sulfitos y sulfatos; elimina la presencia de restos de carbono orgánico, que penalizan la reactividad de la cal de carburo en contacto con sílice y aluminosilicatos; potencia reacciones hidráulicas puzolánicas; modula su capacidad de captación del ambiental y fraguado aéreo (carbonatación); y preserva la facultad de las partículas de producir agregaciones con microestructura tridimensional muy coherente.

Debido a que el material base del GeoSilex® es una pasta de cal de carburo producida como residuo industrial, su uso como aditivo en el cemento conlleva un gasto energético cero, y unas emisiones de  $\text{CO}_2$  también cero.

Teniendo en cuenta que la industria del cemento Portland (estimada en unos 2800 Tm anuales) es responsable de la emisión de 5-8% del  $\text{CO}_2$  antropogénico (por cada tonelada de cemento producida se emiten 870 kg de  $\text{CO}_2$ ), la sustitución de una parte del cemento de un mortero o un hormigón por GeoSilex® implica una notable reducción de las emisiones de  $\text{CO}_2$  y del coste energético de dicho elemento de construcción. Pero, además, la carbonatación del hidróxido de calcio presente en el GeoSilex® una vez puesto en obra y expuesto al  $\text{CO}_2$  atmosférico, contribuye a fijar dicho gas de efecto invernadero como carbonato cálcico (material cementante). La carbonatación de 1 Tm de hidróxido de calcio ocasiona la fijación como carbonato de calcio de 0,59 Tm de  $\text{CO}_2$  atmosférico. [27]

GeoSilex® ya ha sido aplicado con éxito en pavimentos prefabricados (baldosas, adoquines, mosaicos, etc.) y en pavimentos continuos de hormigón in situ (calles, plataformas, explanadas, canchas al aire libre, etc.) en entornos urbanos. En estos casos, su aplicación se orienta a la captación del  $\text{CO}_2$  emitido por los motores de combustión dado que el  $\text{CO}_2$ , más pesado que el aire, tiende a concentrarse en las cotas más próximas al suelo.

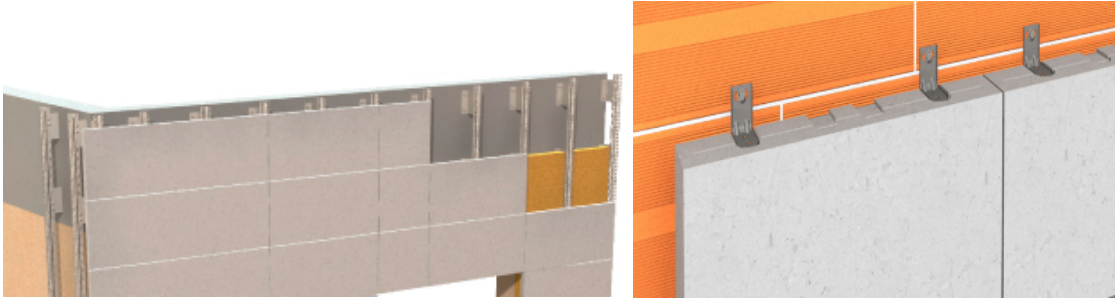


**Fig. 13.** Baldosas Ecosit KlimCO (Hnos. Eguskiza, Grupo UGP) con incorporación de GeoSilex®, en el Parque de la Campa de los Ingleses (Bilbao).

En cuanto a su aplicación en fachada, las actuaciones realizadas hasta el momento corresponden a diseños de aplacados por parte de la propia compañía Trenzametel S. L. Por un lado, se ha desarrollado un sistema de fachada ventilada ligera en forma de placas prefabricadas autoportantes de 80x40x3 cm con incorporación de GeoSilex®.

Las placas tienen aspecto de piedra arenisca, densidad muy baja ( $0,98 \text{ g/cm}^3$ ), se comportan como un buen aislante térmico de elevada inercia térmica y baja conductividad ( $0,30 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ ), y respecto a las propiedades de técnica constructiva se caracterizan por incorporar insertos metálicos que facilitan la fijación a los soportes, sin tornillos, con seguridad antisísmica y reemplazables en caso de deterioro. Se pueden serrar, moldurar, taladrar, encolar, clavar, etc., con herramientas y operaciones sencillas en obra. Tienen estabilidad dimensional a temperaturas normales.

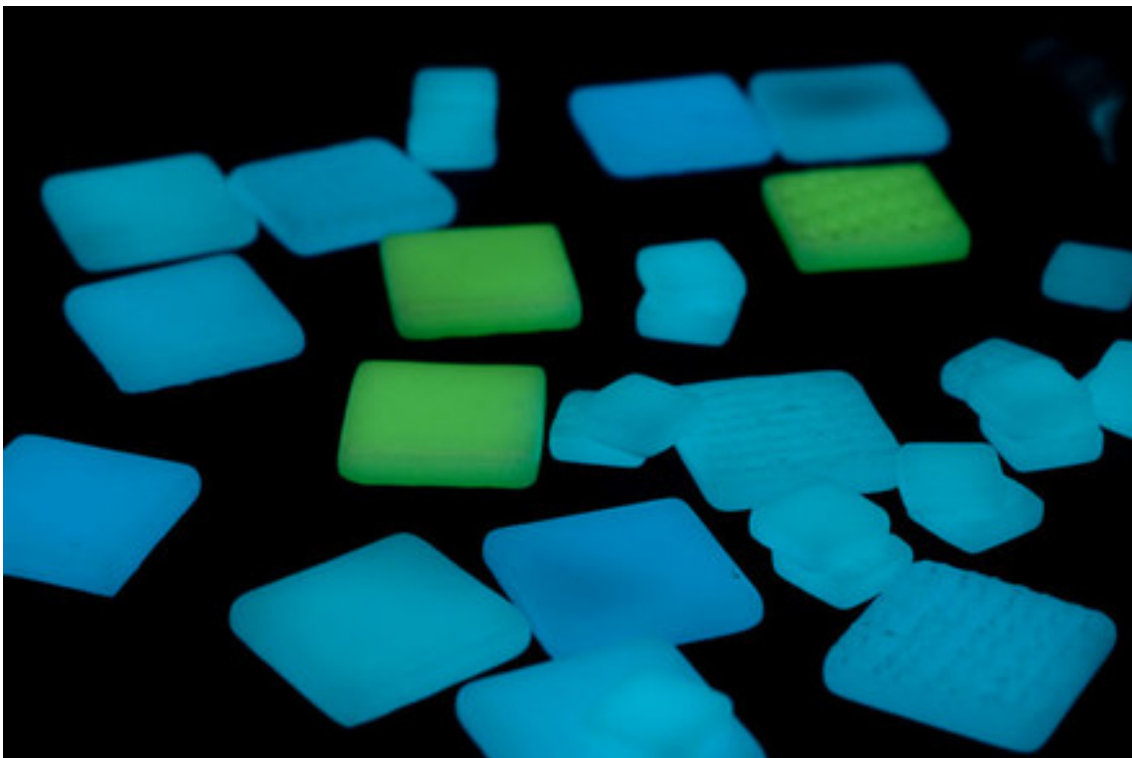
En caso de aplacado directo sobre fachadas existentes, el sistema se compone de placas de gran espesor (10 cm) y grapas de fijación a muro regulables que no necesitan rastreles. Las placas son ligeras y por sí mismas aportan aislamiento térmico suficiente dada su baja conductividad térmica.



**Fig. 14.** Fachada ventilada (izquierda) y aplacado directo (derecha), con incorporación de GeoSilex®.

#### **5.4 Incorporación de vidrio triturado fosforescente.**

La propuesta de incorporación de pigmentos fosforescentes se basa en el aprovechamiento de la energía lumínica absorbida por estos pigmentos durante su exposición a la radiación solar, que posteriormente es emitida y visible durante las horas de oscuridad. Su funcionalidad reside en la posibilidad de incorporar elementos de señalización y comunicación sin necesidad de un aporte energético externo, así como en la capacidad formal de la que puede dotar a la envolvente constructiva.



**Fig. 15.** Teselas fotoluminiscentes (fosforescente) Luminis, de Reviglass.

En particular, se propone la incorporación de un producto comercial (Luminis) producido por la empresa Reviglass, consistente en teselas de vidrio reciclado con

pigmentos fosforescentes. Estas teselas serían convenientemente molidas para obtener un tamaño de partícula idóneo para su incorporación en la superficie de la placa. El objetivo de la utilización del pigmento “encapsulado” en el vidrio es protegerlo frente al desgaste y los agentes externos que pudieran deteriorar la capacidad fosforescente de la placa, así como dotar a ésta de una superficie atractiva aún cuando la fosforescencia no es visible. [28]



**Fig. 16.** Fachada fosforescente en Belem (Lisboa), por R2 ([www.r2design.pt](http://www.r2design.pt))

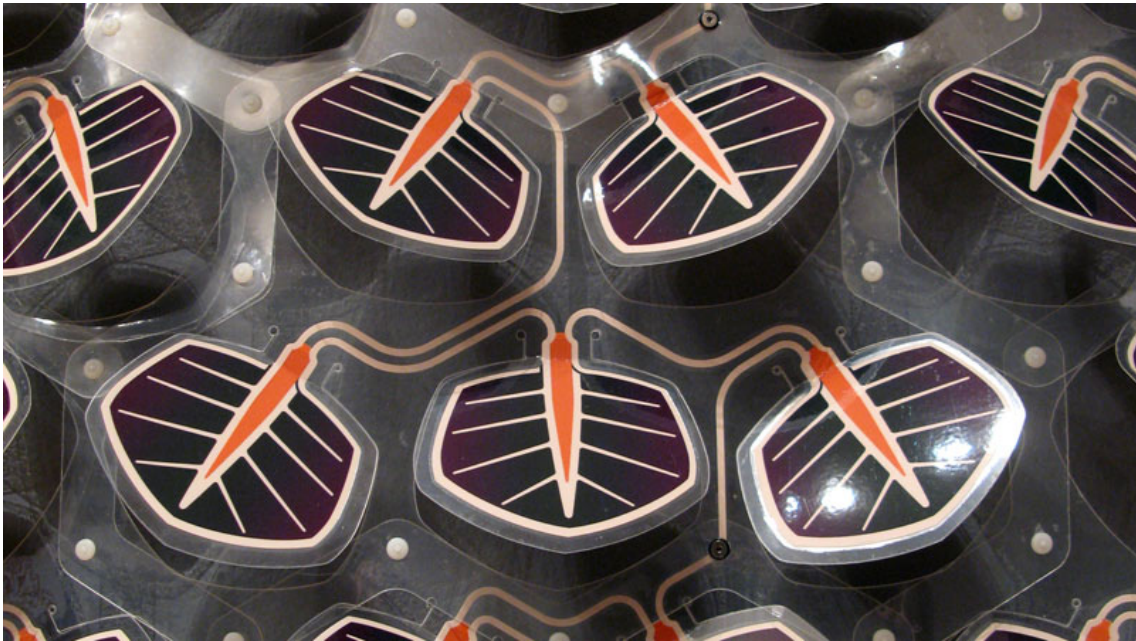
Tras la carga de los pigmentos fosforescentes con la luz solar, el tiempo de emisión se prolonga aproximadamente 8 horas, en las que la intensidad de emisión decae gradualmente.

### 5.5 Captación piezoeléctrica y fotovoltaica asociadas

Se trata de la propuesta más conceptual de todas las mencionadas. Se plantea de incorporar un sistema combinado de captación fotovoltaica (a partir de la radiación solar) y piezoeléctrica (a partir de la acción del viento) en fachada. La idea surge a raíz del prototipo GROW desarrollado por la empresa americana SMIT, basado en un sistema modular que incorpora pequeñas placas fotovoltaicas



(a semejanza de las hojas de hiedra) dispuestas sobre soportes piezoeléctricos que se deforman bajo la acción del viento.



**Fig. 17.** Detalle del sistema GROW, de SMIT.

En un desarrollo paralelo, el sistema Solar Ivy utiliza un sistema de soporte a base de una red de acero inoxidable, fabricado por Carl Stahl Decorcable. Las hojas del sistema están fabricadas en polietileno, y están disponibles en una diversidad de



**Fig. 18.** Detalle del sistema Solar Ivy, de SMIT.

colores y opacidades. Sobre ellas se disponen los módulos flexibles fotovoltaicos encapsulados en EFTE (DuPont™ Tefzel®) y son fabricados por PowerFilm Solar. Solar Ivy es un sistema flexible que se puede adaptar a diversos tipos de edificaciones, tamaños, orientaciones y latitudes. El sistema permite proporcionar diversos niveles de opacidad para modular la ganancia de la radiación solar, la transmisión de la luz natural y la apariencia [29].

## 5.6 Inercia térmica mediante PCMs

La masa de un edificio juega un papel fundamental en su climatización. Un edificio de gran masa es capaz de suavizar los picos de temperatura, gracias a su gran

inercia térmica. Un buen aislamiento es esencial para proteger el interior del frío del invierno. Previene que el calor interior se escape, por lo que se necesita menos energía para calentarlo. En verano, cuando el sol penetra en las estancias y las calienta, el aislamiento reduce la velocidad en la que el calor penetra en el interior a través de los muros, aunque la mayor parte del calor entra al interior a través de las ventanas, en forma de radiación solar y cargas internas de calor como la gente y la iluminación. El problema del aislamiento es que dificulta que, una vez el calor haya entrado en las estancias, se pueda evacuar durante la noche. La temperatura interior resultante dependerá de la interacción de varios factores como el área superficial de las ventanas, la orientación del edificio, el clima, la masa del edificio, el aislamiento y las fuentes de energía interna.

La única forma de mantener una temperatura de confort durante el verano sin la instalación de un sistema de aire acondicionado es aumentar la capacidad calorífica de la estructura. La solución pasa por almacenar el calor dentro de la propia envolvente del edificio, pudiéndose alcanzar una gran mejora en el confort si se hace adecuadamente.

Para este fin pueden utilizarse los materiales de cambio de fase (PCM), con un adecuado punto de fusión y un encapsulado adecuado, para ser incorporados en distintos componentes del muro.

El PCM debe encapsularse e introducirse en la matriz de manera que no afecte negativamente en el rendimiento mecánico del material. Existen dos opciones básicas: la macroencapsulación y la microencapsulación. El principal problema asociado a la macroencapsulación está asociado a la baja conductividad térmica del PCM: al recuperar el calor de la fase líquida, el PCM tiende a solidificar en torno a los bordes, dificultando la transferencia de calor. Este efecto desaparece con el cambio de escala a la microencapsulación. Ésta permite incorporar los PCM de manera sencilla y económica en los materiales de construcción. Su incorporación en el cemento fresco es muy efectiva, pero puede afectar a la resistencia mecánica del hormigón. La inclusión de PCM en la envolvente de un edificio influirá en las pérdidas y ganancias térmicas del mismo, así como en su inercia térmica. Sin embargo, este efecto es difícil de predecir y controlar, ya que influyen en su

comportamiento muchos parámetros que es necesario estudiar, como la respuesta en distintas estaciones del año, variaciones del clima, orientación, ventilación...

La opción más implantada es la incorporación de PCM en tableros de yeso o productos similares. Éstos comienzan a almacenar calor latente en el punto en el que la temperatura interior comienza a ser excesiva. El PCM, por ejemplo de una temperatura de transición de fase de 26°C, comienza a absorber calor del aire a esta temperatura, evitando que el aire interior se caliente más. Esto asegura unas condiciones interiores agradables.

Además de la mejora en el confort, también es posible lograr una reducción de costes asociados a la disipación de la energía acumulada durante la noche, ya sea prescindiendo del aire acondicionado o disminuyendo su uso. Además la masa de las paredes divisorias puede reducirse, lo que posibilita aumentar el área de espacio útil dentro del edificio.

Uno de los productos comerciales adaptados a estas aplicaciones es Micronal® PCM de BASF, glóbulos de cera de entre 2 y 20 micras encapsulados en microesferas de polímeros acrílicos altamente reticulados. Estas microcápsulas pueden ser incorporadas a la matriz sin afectar a sus posibilidades de mecanizado.

El proceso de fabricación da como resultado una dispersión de estas microcápsulas en agua, apto para todas las aplicaciones que requieran un medio líquido. Si la aplicación requiere un material base en forma de polvo, se puede eliminar mediante spray-drying. En este caso, se forman partículas secundarias formadas por agregados de partículas primarias, con un diámetro de ente 0,1 a 0,3 mm.

Los tests de durabilidad de estas partículas han demostrado una durabilidad de 10000 ciclos sin observarse alteración de la impenetrabilidad y la capacidad calorífica del PCM. Tomando como referencia unos 300 ciclos al año, la durabilidad del producto asegura un funcionamiento óptimo durante 30 años.

La funcionalidad del PCM en revestimientos exteriores ha sido menos contrastada. En principio, la habitual presencia de aislamiento entre el muro exterior y el interior opondrá una gran resistencia térmica a los flujos de calor desde y hacia el PCM, con lo que resultará mucho más eficiente situarlo en las paredes interiores, como se ha visto.

Sin embargo, colocado en una pared exterior, el PCM puede alterar el perfil de temperaturas en el interior de la pared y por lo tanto influir en el transporte de calor a través de esta. Esto permitiría reducir el transporte de energía neta a través de la pared mediante las interacciones con los cambios de temperatura diurnas en el ambiente externo, o bien reducir la energía eléctrica necesaria para cumplir con la carga neta a través de la pared desplazando el pico de carga a un momento en el sistema de refrigeración opere más eficientemente. Aunque los estudios demuestran que el potencial de ahorro para un PCM con propiedades optimizadas es mayor cuando éste se sitúa cerca de la superficie de la pared interior, otras consideraciones revelan el potencial de sistemas de espesor total para reducir la cantidad de energía transportada a través de la pared.

En este sentido, estudios en condiciones reales como el realizado por la Universidad de Lleida [30] revelan resultados positivos. En este caso se estudió la incorporación de un 5% en peso de Micronal en una matriz de hormigón. En el marco del proyecto europeo MOPCON (2003-2006) se analizó el comportamiento mecánico del hormigón, resultando en una resistencia a compresión de más de 25 MPa y a tracción de más de 6 MPa. Estas y otras propiedades ensayadas concluyen que es posible utilizar estos compuestos de manera real. Los experimentos realizados con este material arrojaron resultados especialmente significativos en períodos de verano, donde las temperaturas máximas se suavizan hasta 4°C respecto a la referencia. De la misma manera, la inercia térmica del sistema aumenta hasta alcanzar un desfase de dos horas respecto a la referencia.

### 5.7 Conductividad térmica y capacidad aislante del mortero

En primer lugar, los resultados obtenidos del análisis de la conductividad térmica de las distintas composiciones del mortero se muestran en la **Tabla 10**.

**Tabla 10.** Resultados de conductividad térmica,  $k$ , para las distintas probetas.

Probeta	Densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ )	Conductividad térmica, $k$ ( $\text{W/m } ^\circ\text{C}$ )
A	1,522	0,8320
B	1,449	0,7930
C	1,929	1,4310

Según se puede observar en la tabla, se puede comprobar como para la probeta C (la de mortero convencional) el resultado es casi el doble que para las probetas que incorporan cargas (caucho y  $\text{CaCO}_3$ ).

Entre las probetas A y B se observa como es ligeramente más aislante la probeta que incorpora únicamente caucho procedente de NFU. Con estos resultados, se concluye que la probeta B (la de menor densidad) es la que presenta una mayor capacidad aislante.

### 5.8 Estudio preliminar de la incorporación de PCM

En base a las actuaciones recogidas en los apartados 5.1 – 5.6, FIDIMA ha seleccionado la mejora de la inercia térmica de las placas mediante la incorporación de PCM como aquella que se ajusta en mayor medida a los requerimientos deseados. Como siguiente fase del proyecto, se realiza un estudio preliminar de esta aplicación en los morteros seleccionados, cuyos resultados se muestran a continuación.

A continuación se presentan los resultados correspondientes a las 3 composiciones de mortero, para cada los dos tipos de PCM seleccionados, según la metodología recogida en el punto 4.3. En ellos se calcula la cantidad de PCM a incorporar para duplicar la capacidad de almacenamiento de calor ('thermal storage') de cada una de las placas analizadas.

Las siguientes tablas recogen en primer lugar los resultados obtenidos para el PCM S21 (sal hidratada), en una matriz de mortero de cemento portland con incorporación de caucho de NFU y residuos de cáscara de huevo (**Tabla 11**), en una matriz de mortero portland y caucho de NFU (**Tabla 12**), y en una matriz de mortero portland (

**Tabla 13**). Los resultados análogos para la incorporación de PCM Micronal DS 5040 X en los mismos tipos de matrices se recogen en la **Tabla 14**, **Tabla 15** y **Tabla 16**.

**Tabla 11.** Resultados de la incorporación de PCM S21 (sal hidratada) en una matriz compuesta de mortero de cemento portland, polvo de cáscara de huevo y caucho de NFU.

Placa A	% PCM	V <sub>total</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>PCM</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>placa</sub> (m <sup>3</sup> )
Entrada de datos	<b>4,55%</b>	6,00E-03	2,73E-04	5,73E-03
<b>Q<sub>Placa sin PCM</sub> [kJ]</b>				
	<b>76,71</b>			
<b>Resultados</b>	<b>Q<sub>PCM</sub> (kJ)</b>	<b>Q<sub>Placa</sub> (kJ)</b>	<b>Q<sub>PCM</sub> + Q<sub>Placa</sub></b>	<b>(Q / Q<sub>Placa sin PCM</sub>) - 1</b>
$Q_1 = m \cdot c_{pS} \cdot (T_2 - T_1)$	3,68	73,22	<b>153,42</b>	<b>100,00%</b>
$Q_2 = m \cdot \lambda$	71,01	-		
$Q_3 = m \cdot c_{pL} \cdot (T_2 - T_1)$	5,51	-		
$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$	<b>80,20</b>	<b>73,22</b>		

**Tabla 12.** Resultados de la incorporación de PCM S21 (sal hidratada) en una matriz compuesta de mortero de cemento portland y caucho de NFU.

Placa B	% PCM	V <sub>total</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>PCM</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>placa</sub> (m <sup>3</sup> )
Entrada de datos	<b>4,32%</b>	6,00E-03	2,59E-04	5,74E-03
<b>Q<sub>Placa sin PCM</sub> [kJ]</b>				
	<b>73,03</b>			
<b>Resultados</b>	<b>Q<sub>PCM</sub> (kJ)</b>	<b>Q<sub>Placa</sub> (kJ)</b>	<b>Q<sub>PCM</sub> + Q<sub>Placa</sub></b>	<b>(Q / Q<sub>Placa sin PCM</sub>) - 1</b>
$Q_1 = m \cdot c_{pS} \cdot (T_2 - T_1)$	3,49	69,87	<b>146,06</b>	<b>100,00%</b>
$Q_2 = m \cdot \lambda$	67,46	-		
$Q_3 = m \cdot c_{pL} \cdot (T_2 - T_1)$	5,24	-		
$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$	<b>76,19</b>	<b>69,87</b>		

**Tabla 13.** Resultados de la incorporación de PCM S21 (sal hidratada) en una matriz compuesta de mortero de cemento portland.

Placa C	% PCM	V <sub>total</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>PCM</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>placa</sub> (m <sup>3</sup> )
Entrada de datos	<b>5,84%</b>	6,00E-03	3,50E-04	5,65E-03
<b>Q<sub>Placa sin PCM</sub> [kJ]</b>				
	<b>97,22</b>			
<b>Resultados</b>	<b>Q<sub>PCM</sub> (kJ)</b>	<b>Q<sub>Placa</sub> (kJ)</b>	<b>Q<sub>PCM</sub> + Q<sub>Placa</sub></b>	<b>(Q / Q<sub>Placa sin PCM</sub>) - 1</b>
$Q_1 = m \cdot c_{pS} \cdot (T_2 - T_1)$	4,72	91,55	<b>194,44</b>	<b>100,00%</b>
$Q_2 = m \cdot \lambda$	91,11	-		
$Q_3 = m \cdot c_{pL} \cdot (T_2 - T_1)$	7,07	-		
$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$	<b>102,90</b>	<b>91,55</b>		

**Tabla 14.** Resultados de la incorporación de Micronal 5040 X (parafina) en una matriz compuesta de mortero de cemento portland, polvo de cáscara de huevo y caucho de NFU.

Placa A	% PCM	V <sub>total</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>PCM</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>placa</sub> (m <sup>3</sup> )
Entrada de datos	<b>16,27%</b>	6,00E-03	9,76E-04	5,02E-03
<b>Q<sub>Placa sin PCM</sub> [kJ]</b>				
	<b>76,71</b>			
<b>Resultados</b>	<b>Q<sub>PCM</sub> (kJ)</b>	<b>Q<sub>Placa</sub> (kJ)</b>	<b>Q<sub>PCM</sub> + Q<sub>Placa</sub></b>	<b>(Q / Q<sub>Placa sin PCM</sub>) - 1</b>
$Q_1 = m \cdot c_{pS} \cdot (T_2 - T_1)$	6,79	64,23	<b>153,42</b>	<b>100,00%</b>
$Q_2 = m \cdot \lambda$	72,44	-		
$Q_3 = m \cdot c_{pL} \cdot (T_2 - T_1)$	9,96	-		
$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$	<b>89,19</b>	<b>64,23</b>		

**Tabla 15.** Resultados de la incorporación de Micronal 5040 X (parafina) en una matriz compuesta de mortero de cemento portland y caucho de NFU.

Placa B	% PCM	V <sub>total</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>PCM</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>placa</sub> (m <sup>3</sup> )
Entrada de datos	<b>15,37%</b>	6,00E-03	9,22E-04	5,08E-03
<b>Q<sub>Placa sin PCM</sub> [kJ]</b>				
	<b>73,03</b>			
<b>Resultados</b>	<b>Q<sub>PCM</sub> (kJ)</b>	<b>Q<sub>Placa</sub> (kJ)</b>	<b>Q<sub>PCM</sub> + Q<sub>Placa</sub></b>	<b>(Q / Q<sub>Placa sin PCM</sub>) - 1</b>
$Q_1 = m \cdot c_{pS} \cdot (T_2 - T_1)$	6,42	61,81	<b>146,06</b>	<b>100,00%</b>
$Q_2 = m \cdot \lambda$	68,43	-		
$Q_3 = m \cdot c_{pL} \cdot (T_2 - T_1)$	9,41	-		
$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$	<b>84,25</b>	<b>61,81</b>		

**Tabla 16.** Resultados de la incorporación de Micronal 5040 X (parafina) en una matriz compuesta de mortero de cemento portland.

Placa C	% PCM	V <sub>total</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>PCM</sub> (m <sup>3</sup> )	V <sub>placa</sub> (m <sup>3</sup> )
Entrada de datos	<b>21,56%</b>	6,00E-03	1,29E-03	4,71E-03
<b>Q<sub>Placa sin PCM</sub> [kJ]</b>				
	<b>97,22</b>			
<b>Resultados</b>	<b>Q<sub>PCM</sub> (kJ)</b>	<b>Q<sub>Placa</sub> (kJ)</b>	<b>Q<sub>PCM</sub> + Q<sub>Placa</sub></b>	<b>(Q / Q<sub>Placa sin PCM</sub>) - 1</b>
$Q_1 = m \cdot c_{pS} \cdot (T_2 - T_1)$	9,00	76,26	<b>194,44</b>	<b>100,00%</b>
$Q_2 = m \cdot \lambda$	95,98	-		
$Q_3 = m \cdot c_{pL} \cdot (T_2 - T_1)$	13,20	-		
$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$	<b>118,18</b>	<b>76,26</b>		

En estos resultados se puede apreciar la contribución de cada componente a la capacidad térmica de la placa, en cada uno de las 6 combinaciones propuestas (2 tipos de PCM, 3 tipos de matriz). En todos los casos se observa que la contribución del calor latente ( $Q_{2-PCM}$ ) del PCM a la capacidad de almacenamiento térmico total del sistema placa+PCM es similar o incluso superior a la contribución del calor sensible ( $Q_{1-Placa}$ ) de la placa, a pesar de estar en una proporción de entre 4 y 20 veces menor. Los cálculos se completan con la aportación del calor sensible del PCM al sistema, tanto cuando se encuentra en estado sólido ( $Q_{1-PCM}$ ) como líquido ( $Q_{3-PCM}$ ).

Como se ha explicado en el capítulo 4, el sistema de cálculo está planteado de manera que se pueda conocer el efecto de la adición de un determinado porcentaje en volumen de PCM (cuyo valor máximo suele estar especificado por el fabricante). El valor final  $(Q / Q_{Placa \text{ sin PCM}} - 1)$  da una idea del porcentaje de “mejora” que supone la adición del PCM al sistema.

A modo de resumen, la **Tabla 17** muestra la masa y el porcentaje en volumen de PCM a añadir, en cada uno de los 6 casos.

**Tabla 17.** Cantidad de PCM (en volumen -%- y peso -kg-) a incorporar en la placa para duplicar su capacidad de almacenamiento térmico.

<b>Matriz</b>	<b>PCM</b>	<b>% PCM (en volumen)</b>	<b>Masa PCM (kg)</b>
<b>Placa A</b>	S21	<b>4,55 %</b>	<b>0,418</b>
	Micronal	<b>16,27 %</b>	<b>0,755</b>
<b>Placa B</b>	S21	<b>4,32 %</b>	<b>0,397</b>
	Micronal	<b>15,37 %</b>	<b>0,713</b>
<b>Placa C</b>	S21	<b>5,84 %</b>	<b>0,536</b>
	Micronal	<b>21,56 %</b>	<b>1,000</b>

De los resultados se interpretan dos tendencias claras:

-Debido a su mayor calor latente, se requiere una cantidad menor de PCM del tipo sal hidratada para alcanzar un almacenamiento de calor determinado.



- La incorporación de residuos en la matriz (Placas A y B) reduce su densidad, y por tanto la capacidad de almacenamiento térmico de la placa. Sin embargo, este resultado está condicionado por la utilización del mismo valor de calor específico (el del cemento portland) para los tres tipos de matriz.

## 6 Conclusiones

En primer lugar, se ha decidido abordar el proyecto propuesto a partir de tres tipologías (en el sentido menos estricto de la palabra) de materiales, seleccionadas por su carácter innovador intrínseco. El estudio teórico de cada una de ellas y el consiguiente análisis de los productos de estas características en el mercado ha resultado en una selección de propuestas muy heterogénea pero con características comunes que cumplen con las especificaciones requeridas.

En este sentido, hemos podido observar cómo de las líneas de investigación basadas en la biomimética aportan soluciones de alto valor añadido y de aplicación real en el sector de la construcción. La aplicación de los recubrimientos superhidrófobos basados en el efecto loto ha sido ampliamente estudiada y documentada, por lo que sería una estrategia muy factible a la hora de lograr un factor diferenciador de carácter innovador en el aplacado de fachada. Por otra parte, sus propiedades autolimpiables suponen una reducción del coste del mantenimiento de la fachada, lo que redundaría en un menor impacto en el cómputo global del ciclo de vida del edificio. Sin embargo, como se ha explicado anteriormente, esta propuesta y todas las siguientes deberán ser evaluadas y confirmadas por técnicas como el Análisis de Ciclo de Vida. Fuera del ámbito de este estudio, pero relacionados con los campos de la biomímesis y la eficiencia energética, existen numerosas líneas de investigación que sugieren nuevas aplicaciones para el sector de la construcción en los próximos años.

La utilización de aditivos o recubrimientos con propiedades descontaminantes en materiales de construcción es más reciente, en parte debido a las necesidades actuales relacionadas con el problema ambiental urbano. Estas propiedades permiten que el edificio se convierta en un elemento activo y beneficioso dentro del ámbito de la ciudad. Los activos fotocatalíticos, debidamente incorporados en la superficie de la placa, pueden actuar en la neutralización de compuestos como los óxidos de nitrógeno, lo que afectaría de nuevo a la evaluación del impacto ambiental del edificio. De la misma forma, productos más recientes (y no tan evaluados) como GeoSilex® podrían conseguir un efecto similar, en este caso a través de la captación de CO<sub>2</sub> ambiental, gas de efecto invernadero con alta

concentración en entornos urbanos, debido principalmente a los motores de combustión. Ambas propuestas son especialmente interesantes, además de por sus propiedades, por el cambio de paradigma que suponen en el desarrollo de elementos de construcción.

La familia de materiales activos constituye un claro factor de innovación en campos diversos, como la biomedicina (aleaciones de memoria de forma) o el sector energético (células fotovoltaicas). Mediante la aplicación de estos materiales (de funcionalidades diversas) de forma adecuada, se puede conseguir la respuesta deseada para una determinada aplicación (luminiscencia, emisión/absorción de calor, generación de energía eléctrica) a partir de entradas de energía diferentes a la eléctrica convencional (radiación solar). En el caso de la fotoluminiscencia, si bien no constituye una alternativa a los sistemas de iluminación tradicionales debido a su baja intensidad lumínica, sí resulta efectiva en la sustitución de elementos de señalización y comunicación formal del edificio. El desarrollo de sistemas de fachada de captación combinada de energía solar fotovoltaica y piezoeléctrica se encuentra todavía en una fase bastante experimental, pero podría suponer un proyecto de alto contenido tecnológico a desarrollar con el apoyo del CDTi. Si bien el planteamiento propuesto por SMIT resulta interesante, su aplicación real presenta varias incógnitas, sobre todo las relacionadas con el balance (económico, energético y ambiental) de su producción frente a su utilización, y el rendimiento que se pueda obtener de la generación piezoeléctrica. El interés de este concepto reside en el máximo aprovechamiento de las entradas de energía (solar y eólica) a las que se ve expuesta una superficie de grandes dimensiones como es la fachada de un edificio.

La aplicación de PCM en la placa de fachada ha sido la propuesta que finalmente se ha estudiado en profundidad. El objetivo básico es explicar los mecanismos de funcionamiento de estos materiales y las distintas tipologías existentes, y obtener una primera idea de su rendimiento.

En primer lugar, se constata que la adición de cargas como el caucho y el  $\text{CaCO}_3$  reduce la densidad del material y mejoran su capacidad de aislamiento térmico. Sin embargo, debe estudiarse la influencia de estos materiales sobre el resto de propiedades (mecánicas, acústicas...) del compuesto.

El análisis preliminar de la incorporación de PCM permite obtener una estimación comparativa de la cantidad de energía térmica que se puede almacenar en función de la cantidad de material de cambio de fase presente en la placa.

El sistema de calor sensible descarga la energía a temperatura variable, ya que se va enfriando o calentando en el proceso según las condiciones externas. Sin embargo, el sistema empleado basado en el cambio de fase se descarga siempre a una temperatura fija hasta que cambie de estado por completo. La gran ventaja del almacenamiento por calor latente es que presenta siempre una densidad energética de almacenamiento mucho más grande que por calor sensible. Esto se puede comprobar en los 6 casos presentados, donde el valor del calor latente del PCM es comparable al del mortero, aún teniendo un volumen mucho menor.

Queda ejemplificado que las necesidades de PCM pueden variar fuertemente en función de las condiciones externas (rango de temperatura de trabajo), además de las propiedades de los materiales (densidad, calor específico, calor latente...).

A pesar de que los resultados ofrecen una primera interpretación sobre el rendimiento de los dos tipos de PCM más empleados en la construcción (los basados en parafinas y en sales hidratadas), y el comportamiento de las composiciones del mortero propuestas, sería necesario un análisis más profundo para obtener resultados y valores más fiables. Para ello se requeriría, en primer lugar, una mayor caracterización de los morteros propuestos, incluyendo las composiciones exactas y los valores de calor específico de cada uno de ellos.

La selección final del PCM de mayor eficacia estará condicionada por el análisis de las condiciones existentes en el lugar de aplicación de la placa. Para ello será necesario determinar las características del clima (distribución de temperaturas externas a lo largo del día y del año, radiación solar incidente), la funcionalidad del edificio (vivienda, oficinas...) y las características del aislamiento. Conocidas estas variables se podrá seleccionar la temperatura de cambio de fase más eficaz.

Por último, será necesario modelizar y evaluar la cinética de la transformación de fase y de la transferencia de calor en el espesor de la placa. Para ello sería interesante la utilización de software de análisis de elementos finitos (FEM).

En cualquier caso, el análisis de la incorporación de PCM se ha realizado considerando la placa como un sistema aislado. Conocidos los condicionantes de su

aplicación (como sistema de aplacado exterior), se plantean dudas sobre su efectividad real dentro del sistema de envolvente del edificio.

El efecto de la inercia térmica en construcción se basa en la capacidad de la envolvente de amortiguar la variación de temperaturas, y de retardar la temperatura interior respecto a la exterior. Edificios de gran inercia térmica tienen variaciones térmicas más estables ya que el calor acumulado durante el día se libera en el período nocturno, consiguiendo una mayor estabilidad térmica.

En el caso de la incorporación de PCM en el aplacado (situado en el exterior de la envolvente), éstos cederán o absorberán una cantidad de energía térmica que se transmitirá en una pequeña parte hacia el interior (donde se encontrará con la resistencia del aislante térmico), y en una gran parte hacia el exterior (donde no hay resistencia térmica).

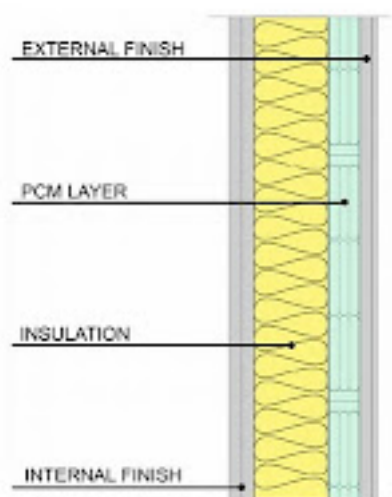


Fig. 19. Esquema del sistema de aislamiento de un muro.

Sí resultaría efectiva, sin embargo, su aplicación en elementos interiores, como en suelos (soleras o forjados) o en muros interiores. En estos casos, el PCM sufriría una reacción endotérmica durante el día (en el caso de los suelos debido además al aporte “extra” de calor de la radiación solar incidente a través de las ventanas), y una reacción exotérmica durante la noche, que contribuirían a contrarrestar las variaciones de temperaturas del ciclo diario.

Con el objetivo de tomar decisiones concluyentes sobre la efectividad de la incorporación de PCM en una placa para aplacado de fachada, se plantea necesario el estudio real en envolventes constructivas definidas y con un emplazamiento concreto.

## 7 Presupuesto

A continuación se detalla un presupuesto estimativo de la realización de este trabajo.

<b>1 Personal investigador</b>	2.510,00 €
<b>2 Equipos, software y servicios técnicos</b>	1.840,00 €
<b>3 Transportes y salidas de campo</b>	18,75 €
<b>4 Material bibliográfico y fotocopias</b>	116,00 €
<b>TOTAL</b>	<b>4.484,75 €</b>

Desglose:

<b>1</b>	<b>Personal investigador</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Total</b>
	Estudiante (€/hora)	320	6,00 €	1.920,00 €
	Profesor tutor (€/hora)	10	29,00 €	290,00 €
	Director externo (€/hora)	10	30,00 €	300,00 €
Subtotal 1				<b>2.510,00 €</b>

<b>2</b>	<b>Equipos y software</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Total</b>
	Ordenador con conexión a internet (€/mes)	8	230,00 €	1.840,00 €
Subtotal 2				<b>1.840,00 €</b>

<b>3</b>	<b>Transportes y salidas de campo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Total</b>
	Desplazamientos UAB (€/viaje)	10	1,88 €	18,75 €
Subtotal 3				<b>18,75 €</b>

<b>4</b>	<b>Material bibliográfico y fotocopias</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Total</b>
	Edición memoria (€/memoria)	4	14,00 €	56,00 €
	Documentación (libros, fotocopias...)	1	60,00 €	60,00 €
Subtotal 4				<b>116,00 €</b>

## 8 Referencias

- [1] Eurostat. "Consumption of energy" - Statistics Explained (2012/5/5) <[http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics\\_explained/index.php/Consumption\\_of\\_energy](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Consumption_of_energy) - >.
- [2] Folch R, Capdevila, I., Indústria CDdTi. La Energía en el horizonte del 2030: Generalitat de Catalunya, Departament de Treball i Indústria; 2005.
- [3] Benyus JM. Biomimicry : innovation inspired by nature. New York: Harper Perennial; 2002.
- [4] Barthlott W, Ehler N. Raster-Elektronenmikroskopie der Epidermis-Oberflächen von Spermatophyten: Akademie der Wiss. u.d. Literatur; 1977.
- [5] Gao L, McCarthy TJ. "Artificial Lotus Leaf" Prepared Using a 1945 Patent and a Commercial Textile. *Langmuir*. 2006;22:5998-6000.
- [6] Cassie ABD, Baxter S. Wettability of porous surfaces. *Transactions of the Faraday Society*. 1944;40:546-51.
- [7] Sun M, Luo C, Xu L, Ji H, Ouyang Q, Yu D, et al. Artificial lotus leaf by nanocasting. *Langmuir*. 2005;21:8978-81.
- [8] Lee S-M, Kwon TH. Effects of intrinsic hydrophobicity on wettability of polymer replicas of a superhydrophobic lotus leaf. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2007;17:687.
- [9] Yuan Z, Chen H, Tang J, Gong H, Liu Y, Wang Z, et al. A novel preparation of polystyrene film with a superhydrophobic surface using a template method. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2007;40:3485.
- [10] Guo Z, Liu W. Biomimic from the superhydrophobic plant leaves in nature: Binary structure and unitary structure. *Plant Science*. 2007;172:1103-12.
- [11] Ma M, Gupta M, Li Z, Zhai L, Gleason KK, Cohen RE, et al. Decorated Electrospun Fibers Exhibiting Superhydrophobicity. *Advanced Materials*. 2007;19:255-9.
- [12] Abbott SJ, Gaskell PH. Mass production of bio-inspired structured surfaces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2007;221:1181-91.
- [13] Cortés C, Páez, A., Costa, A., García, J.L., Feroso, J., Irusta, R., Esquena, J., Vílchez, A., Potti, J.J. Nanomateriales activos para la reducción de gases de combustión (Proyecto Fénix). 2009.
- [14] Malato Rodríguez S. Procesos fotocatalíticos para la destrucción de contaminantes orgánicos en el agua.
- [15] Dalton JS, Janes PA, Jones NG, Nicholson JA, Hallam KR, Allen GC. Photocatalytic oxidation of NO<sub>x</sub> gases using TiO<sub>2</sub>: a surface spectroscopic approach. *Environmental Pollution*. 2002;120:415-22.
- [16] Gao L, Zhang Q. Effects of amorphous contents and particle size on the photocatalytic properties of TiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Scripta Materialia*. 2001;44:1195-8.
- [17] Kaneko M, Okura I. Photocatalysis: Science and Technology: Kodansha; 2002.

- [18] Addington M, Schodek D. Smart Materials and Technologies in Architecture: Taylor & Francis; 2012.
- [19] Khudhair AM, Farid MM. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. Energy Conversion and Management. 2004;45:263-75.
- [20] Mehling H, Cabeza LF. Heat and Cold Storage with PCM: An Up to Date Introduction Into Basics and Applications: Springer; 2008.
- [21] Yaws CL. Thermophysical Properties of Chemicals and Hydrocarbons: Elsevier Science; 2008.
- [22] Sto AG, StoCoat® Lotusan®, <http://www.sto.de/>.
- [23] Alvarez de Buergo M, Ascaso C, Blanco-Varela MT, Fort González R, García Heras M, Gúmez Villalba LS, et al. La conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio: Programa Geomateriales; 2012.
- [24] Ecologistas en acción, La calidad del aire en el Estado español durante 2010. 2011.
- [25] Ceracasa SA. Website <http://www.ceracasa.com/>.
- [26] H. García FL, E. Domínguez, R. Artigas, F. Raya, F. Sierra, J.L. Ros. Porcelánico Bionictile®: reducción selectiva de NOx ambiental con productos cerámicos esmaltados aditivados con una composición conteniendo dióxido de titanio y potenciadores. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 2009;48:91-4.
- [27] GeoSilex. Website <http://geosilex.com/>.
- [28] Reviglass. Website <http://www.reviglass.es/>.
- [29] SMIT. Website <http://www.s-m-i-t.com/>.
- [30] Castellon C, Medrano M, Roca J, Nogues M, Castell A, Cabeza LF. Use of microencapsulated phase change materials in building applications. Buildings X, ASHRAE. 2007.



## 9 Anexos

### 9.1 Briefing FIDIMA

*El producto a desarrollar es una placa para fachada exterior con las siguientes características:*

- *Dimensiones:*
  - *600x400x25 mm*
  - *800x400x30 mm*
  - *Formato de gran tamaño.*
- *Peso:*
  - *40-45 kg*
  - *64-72 kg*
- *Componentes:*

Tabla 18. Componentes de la placa para fachada exterior.

<b>Material</b>	<b>Kg/m2</b>	<b>%</b>	<b>Procedencia</b>
<b>Cemento</b>	12,5	30	<b>Comprado</b>
<b>Carbonato cálcico</b>	10	24	<b>Reciclado</b>
<b>Caucho</b>	4	10	<b>Reciclado</b>
<b>Resina de fibra de vidrio</b>	4	10	<b>Reciclado</b>
<b>Sílice</b>	10	24	<b>Comprado</b>
<b>Otros (hidrofugantes y fluidizantes)</b>	0,25-0,63	2	<b>Comprado</b>

- *Propiedades que se quieren conseguir:*

- *Material ligero y fácil de manipular.*
- *Absorción acústica.*
- *Respetuoso con el Medio Ambiente, pues incorpora materiales reciclados.*
- *Apariencia versátil (texturas, colores, relieves).*
- *Versatilidad en forma, tamaño y diseño*
- *Propiedades antidesprendimiento.*
- *Resistente (fuego, heladas, tensiones estructurales)*
- *Mantenimiento reducido.*
- *Instalación sencilla, sistemática, industrializada y de bajo coste.*
- ***Propiedades que confieran a la placa un cualidad innovadora (Materfad)***
- ***Propiedades de transformación energética (Materfad)***

*Estos últimos aspectos son de vital importancia porque es lo que va a remarcar y enfatizar el carácter innovador e inventivo del proyecto, permitiendo de esta forma la concesión de la patente.*

*El producto ya cuenta con una serie de propiedades diferenciadoras, no obstante, se desea otorgar un punto de calidad extra al conseguir cualidades especiales, que actualmente no son propias ni características del sector de la rehabilitación. Algunos ejemplos serían:*

- ***Recubrimientos que fijen contaminantes como el CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>...***
- ***Sistemas de autolimpieza.***
- ***Recubrimientos que permitiesen la captación de energía fotovoltaica.***

*Paralelamente, sería conveniente que se investigase un sistema de sujeción novedoso para conseguir una mayor diferenciación de lo que existe actualmente en el mercado. Este punto es secundario al anterior, puesto que se podría utilizar un sistema tradicional de fijación, pero de lograrse complementaría en gran medida al proyecto.*

*Las estructuras de fijación actuales están formadas principalmente por perfiles de aluminio, tal vez existan materiales capaces de ser portantes, procedentes de reciclado, estables y resistentes.*

## **9.2 Dossier Técnico para la definición de producto (elaborado por ATEC)**

### ***Definición de producto***

*El objetivo del planteamiento de investigación es la fabricación de baldosas/placas para su disposición como revestimiento de paramentos exteriores de las fachadas de edificios.*

*El producto que se pretende diseñar es una placa dentro del campo de la “piedra artificial”, formada mediante un conglomerado que aglutina productos provenientes de la revalorización de residuos de diversa naturaleza.*

*Se pretende utilizar como conglomerante silicato cálcico (clinker portland) y/o resinas. Como elementos conglomerados se pretende investigar sobre la incorporación de granos de caucho (procedentes de neumáticos fuera de uso), polvo de carbonato cálcico (procedentes de residuos de cáscara de huevo), fibras plásticas (procedentes de los residuos de la fabricación de aerogeneradores) y otros elementos que supongan la puesta en valor de residuos procedentes de otros procesos.*

*Se investigará también la posible incorporación de materiales que le confieran propiedades adicionales a las propias de un aplacado, como la fotocatalización, iluminación pasiva y demás materiales de funcionamiento pasivo.*

### **Características técnicas del objetivo**

- *En cuanto a su diseño:*

*Se pretende la fabricación de elementos de aplacado que, por su naturaleza y sistema de fabricación, puedan diseñarse en variedad de color, textura y forma.*

- *En cuanto a funcionalidad:*

*Se pretende que el producto sea apto para su colocación en exteriores e interiores, sea apto para su colocación adherida (aplacado) y suspendida (fachadas ventiladas)\*. Se quiere conseguir que el producto diseñado sea mejor*

*en cuanto a su manejabilidad con respecto de otros productos de su ámbito de competencia.*

- *En cuanto a sus características:*

*Se pretende que el producto mejore la resistencia a flexotracción con respecto de otros productos de su ámbito de competencia, tenga una durabilidad óptima (estabilidad física y química) y que sea técnicamente apto para su utilización en todas las casuísticas de fachada según la normativa vigente.*

### **Condicionantes técnicos normativos**

*En función del uso al que fuese destinada, debe cumplir los siguientes requisitos exigidos por el Código Técnico de la Edificación (CTE):*

#### CTE-DB Salubridad – HS1 Protección contra la humedad

- *Estanqueidad al agua suficiente para que el agua de filtración no entre en contacto con la hoja del cerramiento dispuesta inmediatamente por el interior del mismo;*
- *Adherencia al soporte suficiente para garantizar su estabilidad;*
- *Permeabilidad al vapor suficiente para su deterioro como consecuencia de una acumulación de vapor entre él y la hoja principal;*
- *Adaptación a los movimientos del soporte y comportamiento muy bueno frente a la fisuración, de forma que no se fisure debido a los esfuerzos mecánicos producidos por el movimiento de la estructura, por los esfuerzos térmicos relacionados con el clima y con la alternancia día-noche, ni por la retracción propia del material constituyente del mismo;*
- *Estabilidad frente a los ataques físicos, químicos y biológicos que evite la degradación de su masa.*

#### CTE-DB Ahorro de energía – HE1 Limitación de la demanda energética

*Su transmitancia influirá en el valor de aislamiento de cerramiento del que forme parte integrante.*

#### CTE-HR Protección contra el ruido

*Su capacidad de aislamiento acústico contribuiría al valor de aislamiento del cerramiento del que forma parte.*

#### CTE-DB Protección contra incendios – SI2 Propagación exterior del fuego

*La clase de reacción al fuego de los materiales que ocupen más del 10% de la superficie del acabado exterior de las fachadas o de las superficies interiores de las cámaras ventiladas que dichas fachadas puedan tener, será B-s3,d2 hasta una altura de 3,5 m como mínimo, en aquellas fachadas cuyo arranque inferior sea accesible al público desde la rasante exterior o desde una cubierta, y en toda la altura de la fachada cuando esta exceda de 18 m, con independencia de donde se encuentre su arranque.*

*Mejoras: Las principales ventajas que posee la placa son características que la dotan como aislante acústico y aligerante. Además está constituida por materiales reciclados: Caucho, carbonato cálcico y resina polimérica.*

*Acústico, térmico e impermeable. Además de sus dotaciones de resistencia mecánica.*

*Funciones: Placa fachada exterior y Revestimiento de Cubiertas Inclinadas y de las funciones estéticas que por sus características técnicas a la placa se le pueden aplicar, ya que siendo una placa exterior se puede utilizar también en interiores siempre y cuando las solicitudes de resistencia al fuego no requieran un comportamiento específico o especial.*

*Segmento de Mercado de Interés: Construcciones de Edificación y/o Industriales.*

*Competidores: Todos los fabricantes que se dediquen especialmente a revestimiento de fachadas técnicas, prefabricados y cubiertas.*

El autor del proyecto,

Iván Rodríguez Pérez

EL PRESENTE PROYECTO RECOGE UN ANÁLISIS DE NUEVAS FUNCIONALIDADES EN MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN Y LA REHABILITACIÓN DE EDIFICIOS, CONCRETAMENTE EN PLACAS PARA EL REVESTIMIENTO DE PARAMENTOS EXTERIORES DE LAS FACHADAS.

PARA ELLO SE ESTUDIAN LAS POSIBILIDADES DE APLICACIÓN DE MATERIALES QUE APORTEN UN VALOR AÑADIDO A LA PLACA: MATERIALES BIOINSPIRADOS, MATERIALES ACTIVOS Y MATERIALES CON PROPIEDADES DESCONTAMINANTES.