

Informes de la Construcción
Vol. 65, 532, 443-456,
octubre-diciembre 2013
ISSN: 0020-0883
eISSN: 1988-3234
doi: 10.3989/ic.12.068

F²TE³: sistema de cerramiento transparente, ligero, de altas prestaciones energéticas que permite el diseño con formas libres

F²TE³: Free-Form Transparent Energy Efficient Envelope

L. Alonso^(*), C. Bedoya^(*), B. Lauret^(*), F. Alonso^(*)

RESUMEN

Se plantea un nuevo sistema de cerramiento monocasco ligero, de espesor mínimo, de alta eficiencia energética, mediante la utilización de tecnología tipo VIP¹, con un alto grado de transmisión de la luz, que permite el diseño con formas libres, para su utilización en proyectos arquitectónicos. La investigación se basa en el estudio de los elementos de cerramiento existentes en el mercado, en especial los implementados con aerogel como aislamiento térmico, ya que se trata del aislante transparente que mejores prestaciones ofrece actualmente, y determina que ninguno otro sistema de aislamiento cumple todas las prestaciones que se buscan con el nuevo sistema propuesto. Aún así, de ellos se pueden extraer cualidades para generarlo: la tecnología VIP, el aerogel monolítico como material aislante, y el Polimetilmetacrilato como material de encapsulado. Estos elementos de diseño nos han permitido definir, junto con ensayos realizados, y datos de estudios independientes, un nuevo sistema de cerramiento de formas libres que ofrece altas prestaciones energéticas.

158-17

Palabras clave: Aislamiento con gel de sílice monolítico; aerogel; *energy reduction*; *space saving*; *thermal insulation*; *vacuum insulation transparent panels*; *structural panel*; cerramiento ligero; paneles de formas libres; paneles transparentes; alta eficacia energética.

SUMMARY

We propose a new lightweight, slim, high energy efficient, light-transmitting envelope system using VIP technology, providing for seamless, free-form designs for use in architectural projects. The research is based on envelope components already existing on the market, especially components implemented with aerogel insulation, as this is the most effective translucent thermal insulation there is today. This research revealed that no other insulation has all the features required of the proposed new envelope model. Even so, some systems, namely, VIP technology, monolithic aerogel used for insulation purposes, and polymethyl methacrylate (PMMA) barriers, do have properties that could be exploited to generate this envelope. Using these design elements, data from tests and independent studies, we have defined a new, variable geometry, envelope insulation system with excellent energy-saving levels.

Keywords: *Monolithic silica gel insulation*; *aerogel*; *energy reduction*; *space saving*; *thermal insulation*; *transparent vacuum insulation panels*; *lightweight envelope*; *free-form panels*; *transparent panels*; *high energy efficiency*.

^(*) Universidad Politécnica de Madrid, (España).

Persona de contacto/Corresponding author: luisalbertoalonsopastor@gmail.com (L. Alonso)

Recibido/Received: 09 jul 2012
Aceptado/Accepted: 01 feb 2013



Luis A. Alonso, Dr. Arquitecto, coautor de este trabajo, y creador del sistema de cerramiento F²TE³ que se presenta en este artículo, ha obtenido el reconocimiento internacional “Innovadores menores de 35 España” (TR35, MIT Technology Review) que por tercer año consecutivo presenta a los 10 jóvenes con los proyectos más punteros en ciencia y tecnología en el país. Uno de los miembros del jurado señala que el proyecto es innovador y puede suponer «...una revolución en el ámbito de los sistemas de cerramiento de cualquier tipo de edificios para mejorar notablemente la eficiencia energética».

1. a) Zaha Hadid: *National Holding Headquarters*, Abu Dhabi.
b) Frank Gehry: *West Side Highway lately*, New York.

1. INTRODUCCIÓN

La eficiencia energética en la arquitectura está cobrando cada vez mayor relevancia, ya que, además de la importancia que tiene la reducción del impacto medioambiental y el incremento del confort para los usuarios, la crisis energética y económica en la que nos encontramos hace que el peso del impacto económico sea cada vez más importante.

Desde la firma del Protocolo de Kyoto (1997) los gobiernos de todo el mundo están tratando de poner remedio al problema de la “ineficiencia energética” de nuestras edificaciones, pero estas iniciativas pierden fuerza cuando, a la hora de construir la envolvente (piel) de nuestras viviendas, se utilizan técnicas arcaicas, mal evolucionadas y poco adaptadas a las exigencias de nuestros días (1) (2) (3).

En Europa entre el 52 y el 57% de la energía que consume un edificio se dedica a calefactar el espacio interior (4). España ha invertido, hasta la fecha, 770 millones en la compra de derechos de emisiones de CO₂, y deberá destinar entre 400 y 850 millones más a lo largo del año 2012 (5) (6).

Las nuevas normativas energéticas mundiales, plasmadas a nivel Europeo por la *Commission of the European Communities en la First Assessment of National Energy Efficiency Action Plans as Required by Directive 2006/32/ec on Energy end-use Efficiency and Energy Services* (7), a la que posteriormente han dado respuesta de forma individual los países comunitarios, como por ejemplo con el *Building Regulations: Energy efficiency requirements for new dwellings* (2010-13) en Inglaterra (8), *Código Técnico de la Edificación* (CTE 2006-2010) en España (9), y a nivel internacional no comunitario, destacando los nuevos programas establecidos por el *U.S. Department Of Energy (DOE)* como por ejemplo en Estados Unidos con *The Commercial Building Initiative (CBI)* (10) o la *NIBS's Whole Building Design Guide 2010* (11) o en China, donde el Ministerio de Construcción (MoC) aprobó, en 2008, la norma “*Evaluation Standard for Green Building*” (12), que está destinada a regular la eficiencia energética en la construcción, promueve de forma indirecta el aumento de espesores de los muros de cerramiento, ya que, desde hace siglos, viene siendo la única forma de aislar correctamente un edificio.

Aparte del incremento del espesor, existe otra línea de investigación, basada en las nuevas tecnologías y materiales, que, además de ofrecer una mejora en el aislamiento térmico con un espesor mucho menor

que el de los sistemas convencionales, confiere nuevas cualidades arquitectónicas, como la posibilidad de generar una “piel estructural” o un cerramiento “autoportante”, o la opción de proporcionar herramientas para cubrir las necesidades del diseño arquitectónico que precisa poder modelar la fachada según los factores de contorno del proyecto, de su captación solar, su protección de los elementos ambientales, o las necesidades puramente estéticas.

Esta nueva línea de investigación está en la actualidad siendo estudiada y puesta en práctica en sus obras por los Premio Pritzker de arquitectura Zaha Hadid (13) (14) (Figura 1a), Frank Gehry (15) (16) (Figura 1b), Rem Koolhaas (17) (18), Herzog & de Meuron (19) (20), Jean Nouvel (21) (22), Kazuyo Sejima+Ryue Nishizawa (SANAA) (23) (24), Oscar Niemeyer (25) (26) y Renzo Piano (27) (28), además de otros arquitectos de reconocido prestigio, como por ejemplo Future System, Toyo Ito, Ben van Berkel, West 8, Plot-Big, Diller+Scofidio, Péripériques y Atelier Bow-Bow, entre otros.



1a



1b

Esta investigación propone mirar hacia las actuales formas de generar eficiencia energética desde el campo de la tecnología y la innovación en los materiales de construcción, teniendo en cuenta que la falta de eficiencia energética en la edificación se agrava cuando se trabaja con paramentos de translucidez y transparencia, donde el vidrio, en sus múltiples variantes, es casi la única opción existente.

Para determinar la viabilidad del sistema de cerramiento que se propone, se han compilado, estudiado y realizado ensayos

¹ Vacuum Insulation Panels (VIP)

en laboratorio de los materiales y de la información proporcionada por las marcas comerciales, y se ha comparado dicha información con la de otras investigaciones y ensayos científicos independientes, realizados por laboratorios como Zae Bayern en Alemania (29), el laboratorio Lawrence Berkley de la Universidad de California (30), o la Universidad de Dinamarca (31), o los estudios realizados en el campo de los VIPs, como el Annex 39 (32), así como también en el campo de aerogeles híbridos y en aerogeles de sílice modificados orgánicamente como vía de mejora del material de relleno, realizados por M. Moner-Girona, A. Roig, y E. Molins (33) (34) (35) (36).

Tras el estudio de los resultados obtenidos, se han descubierto planteamientos innovadores de interés que pueden participar en el sistema que se propone, siendo partes constituyentes del elemento de cerramiento de alta eficiencia energética, que proporcionará unas prestaciones superiores a las de los elementos existentes actualmente en el mercado. En concreto, el artículo plantea F²TE³ (*Free-Form, High Energy Performance, Transparent Vacuum Envelope*), un sistema novedoso de cerramiento transparente, ligero, de altas prestaciones energéticas y que permita el diseño mediante formas libres, prefabricado en taller a base de paneles de Polimetilmetacrilato (PMMA) termoconformado, con un núcleo al vacío de gel de sílice monolítico, para su utilización en la edificación en general.

El resto del artículo se estructura como sigue: En la sección 2 se realiza un estudio epistemológico del sistema, se explican tipologías de sistemas similares existentes, dividiéndolos en dos grandes grupos: los cerramientos translúcidos y los transparentes, sus propiedades, evaluando los pros y contras de estos sistemas. En la sección 3 se realiza un estudio experimental, en el que se combinan simulaciones por computador y ensayos empíricos. Tras lo cual, en la sección 4 se describe el diseño del sistema de cerramiento propuesto F²TE³, exponiendo las soluciones adoptadas en este nuevo sistema y las mejoras que se obtienen frente a otros sistemas existentes. Por último, en la sección 5, se extraen conclusiones sobre los mismos.

2. ESTUDIO EPISTEMOLÓGICO DEL SISTEMA

La vanguardia arquitectónica actual demanda un sistema constructivo como el que se propone en esta investigación: que sea ligero, de geometría libre y de superficie continua, que dé altas prestaciones energéticas, pero que a su vez permita el paso de la luz

natural y su retroiluminación. A día de hoy no existe un sistema con estas prestaciones y los sistemas similares tienen carencias en la libertad de formas, o en su translucidez, generan juntas y/o su respuesta térmica es muy limitada.

Desde el punto de vista del rendimiento energético, de los tres tipos de aislamientos translúcidos que existen en el mercado (fibras plásticas, gas y aerogel), se ha comprobado, tras la comparación de los resultados de laboratorios independientes (37), que el aislamiento que mejor responde a las necesidades de este nuevo sistema es el aerogel monolítico (38).

Existen cuatro ventajas que ofrecen tanto el aerogel monolítico como el aerogel de sílice granulado, a la hora de su uso como aislamiento térmico en paneles translúcidos:

- a) Transparencia: el aerogel monolítico compite con la transparencia del vidrio (39). El aerogel monolítico, puede llegar a tener un 87,6% de transparencia, que es mayor que la que ofrecen algunos vidrios aislados con gases.
- b) Aislamiento: a esta transparencia, debemos sumarle su excelente grado de aislamiento. Según datos publicados por estudios independientes (40), 70 mm de un panel VIP relleno de aerogel granular da mejor rendimiento térmico que un muro convencional de 270 mm y 4 cm de aislamiento proyectado. Un policarbonato de 15 mm relleno de aerogel granular tiene valores de aislamiento superiores a los de cualquier doble acristalamiento de similar espesor.
- c) Ligereza: el aerogel tiene tres veces el peso del aire, lo que hace que los paneles que utilizan este material como aislamiento sean muy ligeros.
- d) Versatilidad: el aerogel monolítico se puede conformar con la forma que deseemos.

En relación con los paneles de cerramiento transparentes y translúcidos de alta eficiencia energética implementados con aerogel, objeto de nuestro estudio, interesa señalar que, aunque existen algunos sistemas comerciales, prototipos y patentes que utilizan el aerogel como material de aislamiento (41) (42), la mayoría de estos sistemas son opacos o translúcidos, ya que utilizan aerogel granular en vez de aerogel monolítico.

A continuación se realiza un análisis de los paneles translúcidos y transparentes existentes a día de hoy, así como de los paneles opacos tipo VIP, determinando sus ventajas e inconvenientes y emitiendo unas conclusiones, resultado del estudio de los mismos.

2.1. Sistema opaco tipo VIP

El uso de paneles de aislamiento al vacío (VIP) en los sistemas de construcción no está muy extendido, a pesar de los esfuerzos que se vienen realizando, en los últimos años, en países como Estados Unidos, Canadá, Alemania y China.

Esta tecnología, pretende minimizar el espesor de la piel exterior del edificio, a la vez que se optimiza el rendimiento energético. Los sistemas opacos de aislamiento mediante cámara de vacío (VIS²) más utilizados en la industria de la construcción, hoy en día, son del tipo de película polimérica metalizada multicapa (FML) o película de aluminio laminado (43).

La mayoría de los estudios llevados a cabo en el campo de los elementos de tipo VIP (44) determinan que hay cuatro obstáculos clave para el uso de estos sistemas en la industria de la construcción:

1. Fragilidad de la piel exterior.
2. Puentes térmicos en los bordes del panel y en las uniones entre elementos.
3. Permeabilidad de la cámara de vacío.
4. Precio.

Como se describirá a lo largo del artículo, el nuevo sistema F²TE³ propuesto, al ser un panel al vacío, trata de ofrecer soluciones a estos cuatro obstáculos.

2.2. Sistemas translúcidos

En este tipo de sistemas hemos analizado los compuestos por paneles de policarbonato, de poliéster reforzado y los dobles acristalamientos, ya que son los que más concomitancias ofrecen con el nuevo sistema F²TE³.

- **Paneles de policarbonato:** El tipo de sistema más extendido en el mercado es el de los paneles de policarbonato celular rellenos de aerogel granular. Presentan las siguientes ventajas e inconvenientes:

Ventajas: Es un material muy ligero, gracias a su baja densidad 1,2 g/m³. Tiene un elevado índice de transmisión lumínica ±90% (casi la transparencia del metacrilato). Es un material de bajo coste e inmediatez de puesta en obra. A nivel de competitividad en el mercado, es el encapsulado más económico. Esto ayuda a que se reduzca la gran repercusión de coste que tiene el aerogel granular como material de aislamiento térmico, para poder comercializar en el mercado un producto muy competitivo.

Inconvenientes: Presenta una baja durabilidad. La mayoría de las marcas comerciales sólo aseguran los paneles de policarbonato por 10 años (ya que a partir de entonces pierden propiedades mecánicas y de transparencia), frente a la durabilidad muy elevada del aerogel granular. Se trata de paneles muy ligeros pero muy frágiles. A pesar de que el aerogel granular es un excelente material de aislamiento acústico, el espesor mínimo de estos paneles hace que tengan carencias acústicas

- **Paneles de poliéster reforzado:** Sólo se comercializan dos tipos de paneles de poliéster reforzado, a pesar del potencial que ofrece este material. Presentan las siguientes ventajas e inconvenientes:

Ventajas: Altas cualidades mecánicas; los compuestos de matriz de resina de poliéster reforzada con fibra de vidrio, ofrecen excelentes prestaciones a flexión, compresión e impacto. Buena maleabilidad; se podrían conformar según las necesidades del diseño, pero ningún sistema existente ofrece esta opción. Por último, disponen de una gran durabilidad ya que existen métodos con los que se alarga considerablemente la vida útil del material (más del doble que el policarbonato): como imprimaciones de tipo "gel-coat" o soluciones protectoras donde la última manta es de "cristal flexible".

Inconvenientes: No existe un panel autoportante (estructural) que esté estandarizado y comercializado a nivel mundial. Los sistemas existentes tienen carencias de diseño, ya que incorporan carpinterías o subestructuras de aluminio en su interior, mientras que, gracias a las características del poliéster reforzado, se puede generar un panel autoportante en sí mismo (como ocurre en los cascos semi-monocasco de las embarcaciones de recreo). También presenta problemas ecológicos, ya que el poliéster, al estar reforzado con fibra de vidrio, ha merma su uso en el mundo de la construcción, pero con las nuevas fibras y resinas plásticas y orgánicas, esto podría cambiar. A nivel económico los sistemas de fabricación del poliéster reforzado son muy caros.

- **Los dobles acristalamientos:** Los paneles de doble acristalamiento con aerogel granular como material de relleno de la cámara se encuentran a nivel de prototipo. Aunque existen muchas investigaciones aún son sistemas en fase de prototipo (45). Las ventajas e inconvenientes que presenta son:

² Vacuum chamber insulation systems.

Ventajas: Gracias a la combinación de vidrio y aerogel granular se obtiene el sistema que mejores prestaciones ha mostrado en los ensayos experimentales. Además, la vida útil del acristalamiento y del gel de sílice es muy similar y muy superior al del resto de sistemas estudiados.

Inconvenientes: Es un elemento excesivamente frágil, especialmente frente a roturas debidas a impacto. El alto coste de modelar el vidrio con geometrías complejas, hace que no se puedan realizar formas libres con este sistema. Es un sistema que depende de subestructuras y otros elementos para su utilización.

2.3. Sistemas transparentes

Todos los paneles implementados con aerogel monolítico, en vez de aerogel granular, son transparentes y proporcionan una alta transmitancia solar y un bajo valor-U. En la actualidad todos estos sistemas son prototipos no comerciales. Interesa destacar dos prototipos de paneles con doble acristalamiento con cámara de aire al vacío (VIP) y que utilizan el aerogel como elemento de aislamiento:

- Paneles con doble acristalamiento 4-13.5-4 / 21,5 mm relleno de aerogel monolítico con 100 hPa de vacío en la cámara del aerogel. Tienen un coeficiente de transmisión de calor para 14 mm de 0,7 W/m²K y para 20 mm ofrece un valor U de 0,5 W/m²K, frente a 1,2 W/m²K que ofrecen con 24 mm los dobles acristalamientos comerciales rellenos de aerogel granular.

Esto quiere decir que ofrecen casi el doble de aislamiento que el mejor panel comercial translúcido. La transmisión de la luz depende del ángulo de incidencia, pero varía de entre 64,7 y el 87,5%. Su índice de reducción del sonido aéreo es de 33 dB para 23 mm de espesor de panel y se espera llegar a 37 dB de reducción. Los por-

centajes de ahorro energético frente a los dobles acristalamientos de tres capas con aislamiento de gases (Argón, Criptón) son entre un 10 y un 20%.

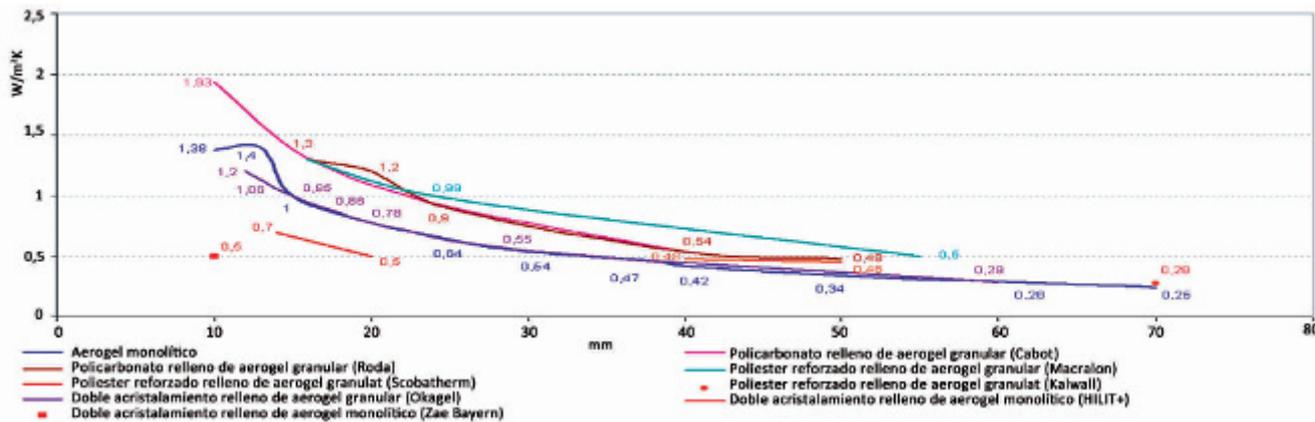
- Paneles de doble acristalamiento de 10 mm de espesor, cámara de aire al vacío y separadores de aerogel en el interior de la cámara (aún faltan entre 2 y 3 años para su posible comercialización). Su coeficiente de transmisión de calor para 10 mm ofrece un valor U de 0,5 W/m²K, el mayor de todos los paneles estudiados hasta el momento, siendo la transmisión de la luz, la del vidrio.

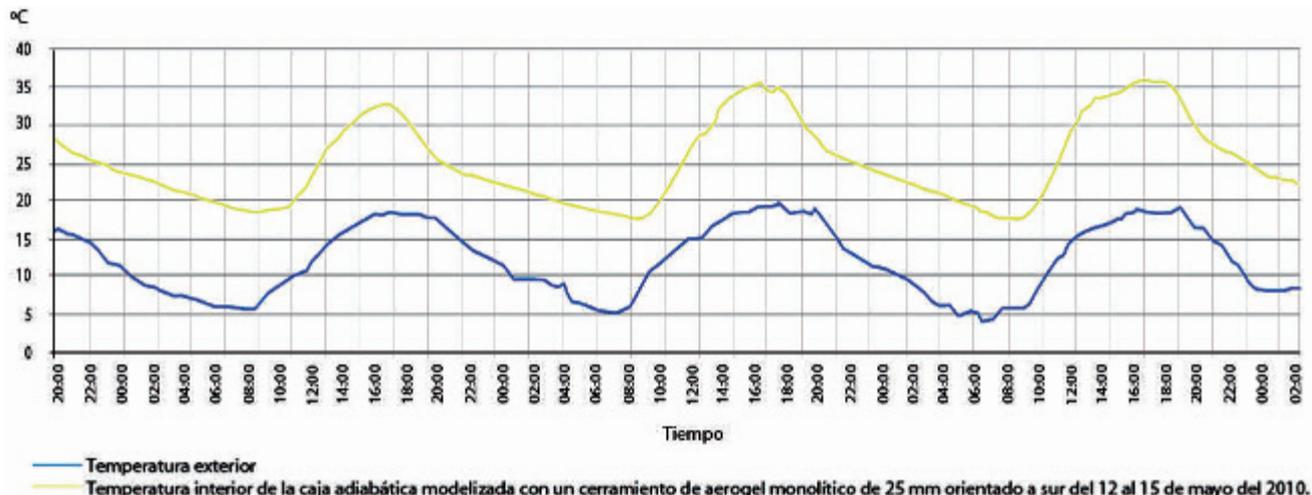
Como conclusión y tras un análisis comparativo de más de ciento cuarenta y siete (147) productos de las marcas comerciales, y la evaluación pormenorizada de los ocho (8) que mejores prestaciones tienen (Figura 2), podemos confirmar que los paneles transparentes tipo VIP, al utilizar aerogel monolítico como aislante, son los que mejor cumplen los objetivos de transparencia y aislamiento y los que más concomitancias tienen con el nuevo sistema propuesto F²TE³. Las principales debilidades de estos paneles son su condición de prototipo, su coste, su fragilidad y su falta de versatilidad formal.

En la Figura 2 también podemos observar que los paneles opacos (puntos grises) tipo VIP son los que mejor se comportan, a nivel energético, de todos los paneles comerciales. Los segundos paneles que mejor comportamiento energético tienen son los dobles acristalamientos implementados con aerogel monolítico, que con un espesor de 20 mm pueden llegar a aislar 0,5 W/m²K.

Entre estos dos sistemas (transparentes y opacos) de paneles al vacío se encuentra el nuevo sistema F²TE³ (punto azul), que con 25 mm ofrece un valor-U de 0,35 W/m²K, ofreciendo mejores prestaciones energéticas que los sistemas transparentes y translúcidos existentes en el mercado, a día de hoy.

2. Comparativa de sistemas comerciales y prototipos con el nuevo sistema F²TE³.





3

3. Simulación energética, mediante el programa *DesignBuilder*, del comportamiento de una placa de aerogel monolítico de 25 mm, con una densidad de 50-150 kg/m³, durante 78 horas, en el mes de mayo, en Madrid, orientación oeste.

4. Sistema de ensayo basado en la metodología MoWiTT, para medir las prestaciones energéticas de los cerramientos y poder calibrar y validar las simulaciones por ordenador.

3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

Después de realizado en la sección anterior el estudio teórico de los paneles comerciales, se contrastan, en este apartado, los datos obtenidos en la experimentación y los simulados por ordenador, de los paneles comerciales reales más relevantes.

3.1. Simulación por ordenador

Debido a la imposibilidad de conseguir una muestra de dimensiones mayores a los 10 cm x 10 cm, para realizar ensayos empíricos con el aerogel monolítico, se ha decidido generar un modelo por ordenador, mediante los datos y ensayos obtenidos utilizando aerogel granular (de propiedades muy similares al monolítico, a excepción del nivel de transparencia) y el programa de simulación energética *DesignBuilder*, cuyo motor de cálculo, el *EnergyPlus*, está validado por la IEA (*International Energy Agency*).

Este modelo se ha validado adaptando el método de la “caja negra”, que propone el Ministerio de Energía Industria y Turismo de España, para el cálculo de la demanda energética en la edificación, a los ensayos empíricos que se realizan en el seno del proyecto de investigación *Innpacto SOS Natura* de la UPM Arquitectura, basados en la metodología de ensayo tipo MoWiTT, diseñada por los Lawrence Berkeley Laboratories de la University of California.

La simulación por ordenador se ha modelado según las mismas condiciones de contorno que los ensayos empíricos. En la Figura 3 se describe el comportamiento de una placa de aerogel monolítico de 25 mm, y se comprueba que la temperatura interior del espacio de ensayo se mantiene de forma homogénea entre los 18 y los 37 °C.

3.2. Ensayos empíricos

Para calibrar las simulaciones realizadas por ordenador, y así obtener datos más fiables, se ha construido un primer prototipo, con la tecnología al alcance del investigador, y se ha procedido a ensayar, junto con los sistemas de cerramiento similares que existen en el mercado, mediante la metodología de contraste de las cajas adiabáticas móviles, desarrollada en el Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas de la ETSAM, basada en los ensayos empíricos tipo MoWiTT (46) realizados por los Lawrence Berkeley Laboratories (U.S.), y apoyada en el ensayo numérico que marca la norma ISO 10077-2:2012 (47) y los ensayos empíricos del tipo *Hot-box* (BS EN 12412-2:2003) (48) (49).

Estos ensayos se realizan utilizando cajas adiabáticas de 60 x 60 x 60 de dimensiones interiores, aisladas con 20 cm de poliuretano expandido. Una de las caras de la caja está abierta a modo de “ventana”. En esta abertura se colocan los elementos de estudio, mediante un marco aislado especial. El ensayo consiste en la exposición de dos de estas cajas a un entorno exterior real, para estudiar el comportamiento real de las mismas, pero con dos “ventanas” distintas: a una se le instala un doble acristalamiento 6 + 8 + 6 mm, de propiedades conocidas, como elemento de contraste, y a la otra el panel que queremos estudiar. Ambas cajas se monitorizan mediante dataloggers, situados en su interior, para medir y comparar su temperatura interior, y en el exterior se coloca una sonda térmica que capta la temperatura a la que se exponen las cajas. La orientación es la oeste, debido a que es la de mayor soleamiento (Figura 4).

Con este sistema se han realizado más de treinta ensayos de medición de temperatura, comparando las prestaciones de paneles



4

comerciales de distintos espesores rellenos de aerogel granular con un panel de doble acristalamiento 6+8+6 mm. De estos ensayos cabe destacar los realizados a cuatro (4) de estos paneles:

- Ensayo 1: Placa de policarbonato de 15 mm rellena de aerogel granular.

Resultados: Existen 2,5 °C de media de mejora térmica frente al doble acristalamiento comercial 6+8+6 mm (que tiene 5 mm más de espesor que el panel relleno de aerogel granular) en los periodos nocturnos, y aísla casi 6 °C más que el doble acristalamiento en la radiación directa diurna (Figura 5).

- Ensayo 2: Placa de policarbonato de 25 mm (triple muro) rellena de aerogel granular.

Resultados: Tiene entre 2 y 3 °C de mejora térmica frente al doble acristalamiento 6+8+6 mm (que tiene 5 mm menos de espesor que el panel) en los periodos nocturnos, y aísla entre 15 y 20 °C más que el doble acristalamiento en la radiación directa diurna (Figura 6).

- Ensayo 3: Placa de policarbonato de 25 mm (doble pared) rellena de aerogel granular.

Resultados: Tiene un comportamiento muy homogéneo. Se obtiene, en los periodos nocturnos, 3 °C de mejora térmica frente al doble acristalamiento, con 5 mm más de espesor, y aísla 5 °C más que el doble acristalamiento en la radiación directa diurna (Figura 7).

- Ensayo 4: Doble acristalamiento de 70 mm relleno de aerogel granular con cámara de vacío.

Resultados: Se mantiene de forma homogénea entre los 17 y los 32 °C, existiendo una diferencia de mejora térmica casi constante de entre 3 y 10 °C con el doble acristalamiento (Figura 8).

Estos ensayos empíricos han sido utilizados para calibrar y validar los ensayos de comportamiento energético realizados por ordenador, y corroboran el estudio teórico y la simulación realizada hasta el momento. También se ha determinado que existe un desfase entre los datos obtenidos en los ensayos empíricos y los que ofrece la simulación por ordenador, que oscila entre el 0,45 y el 13,5%, horquilla a tener en cuenta, pero que, en cualquier caso, es aceptable cuenta la vista de la escala de los ensayos empíricos realizados.

Las curvas muy tendidas en la gráfica en pérdidas explican un valor-U muy bajo. Existe una diferencia térmica en captación de casi 30 °C entre el doble acristalamiento relleno de aerogel granular y el peor de los paneles ensayados. En pérdida y en captación, el doble acristalamiento relleno de aerogel granular mantiene una diferencia de casi 10 °C con cualquier otro panel relleno de aerogel granular (Figura 9).

Del estudio experimental empírico y los ensayos realizados a través de la simulación por ordenador, y los datos de ensayos realizados en laboratorios independientes como la Universidad de Dinamarca (DTU) y TecNALIA, líderes del proyecto AERO-COINS, (*Aerogel-Based Composite/Hybrid Nanomaterials for Cost-Effective Building Super-Insulation Systems*), o el CSIC, esta investigación ratifica que los paneles con cámara de vacío ofrecen unas prestaciones superiores al resto de sistemas estudiados.

También revela que se puede diseñar un sistema innovador que, mediante la combinación de algunas cualidades de los elementos ya existentes como la cámara de vacío, la utilización de aerogel monolítico como material de núcleo, y el encapsulado de todo ello mediante una envolvente de fibra de vidrio, ofrecen un nuevo cerramiento continuo tipo VIP, monocasco, de espesor mínimo, transparente, que permita el diseño mediante formas libres y que ofrezca un alto rendimiento energético, mejorando así las cualidades de los paneles VIP existentes en el mercado.

4. PROPUESTA DE UN SISTEMA TRANSPARENTE DE ALTA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y FORMAS LIBRES³ (F²TE³)

Se propone un sistema de cerramiento cuya piel exterior se construya con Polimetilmetacrilato (PMMA) termoconformada, que permita el diseño mediante formas libres. Este sistema tendría un aislamiento mediante una cámara de vacío de 100 hPa, rellena de un núcleo de aerogel monolítico. El sistema puede desempeñar funciones estructurales como elemento monocasco, ocultando la junta entre paneles, gracias a un tratamiento final superficial, que se debe realizar *in situ* (Figura 10).

Para el diseño del panel F²TE³ se han tenido en cuenta las exigencias y el cumplimiento de la normativa vigente en España, contempladas en el Código Técnico de la Edificación (CTE). Los cálculos por ordenador para el estudio del cumplimiento del CTE han sido validados por el programa *memorias2*, desarrollado por el Departamento de Ayuda Profesional "cat" del Colegio Oficial de

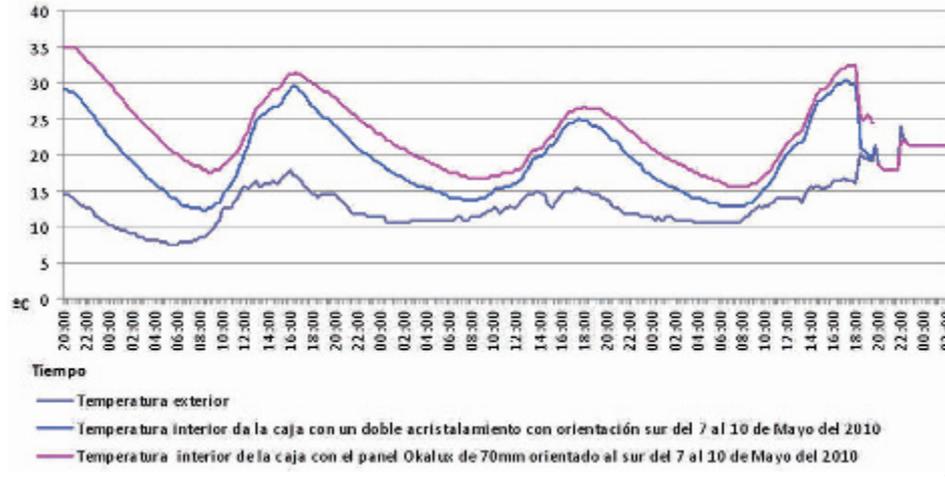
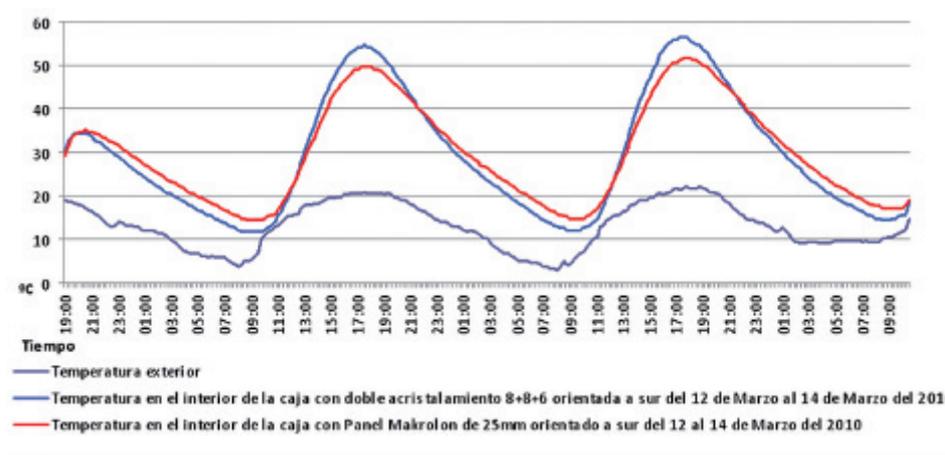
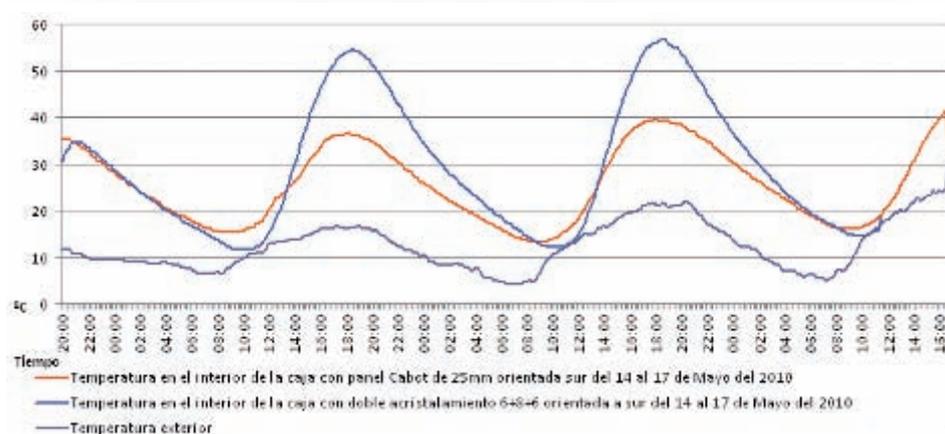
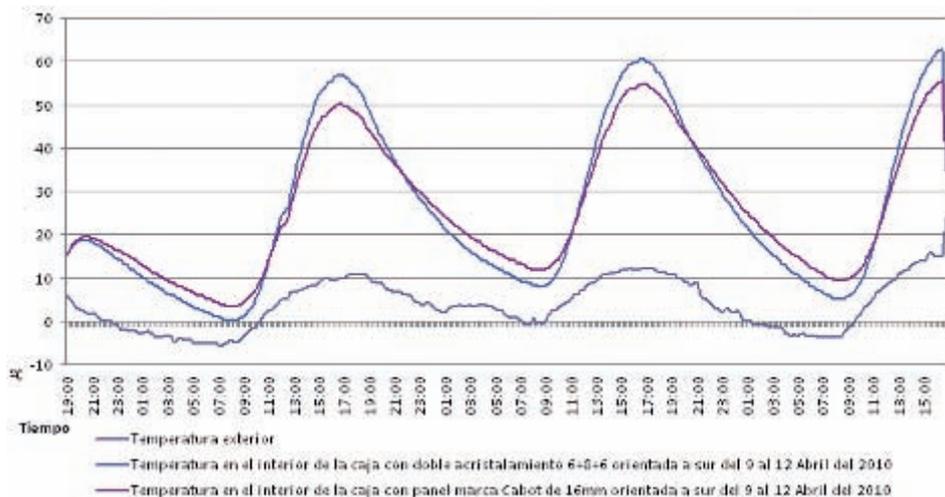
³ Free Form Transparent Energy Efficient Envelope.

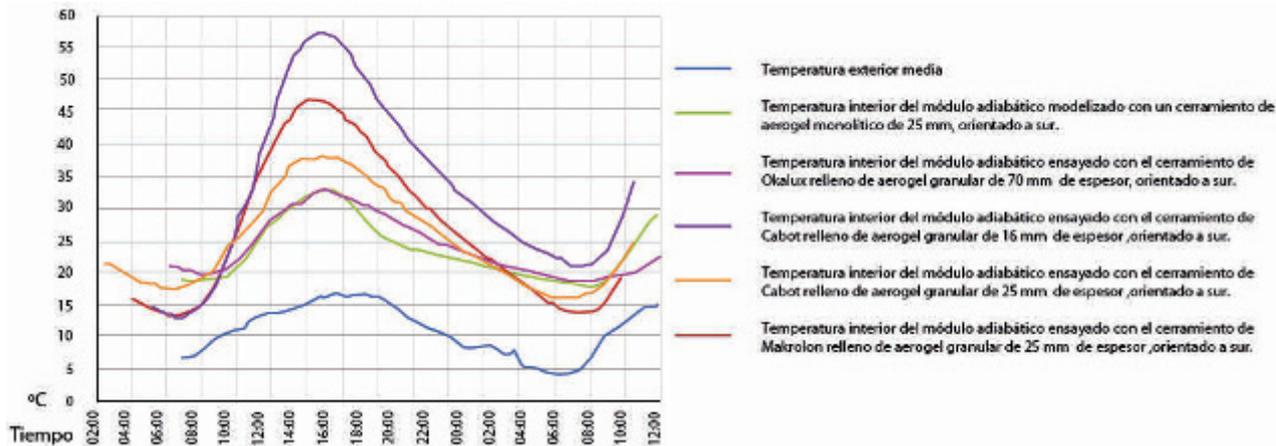
5. Ensayo 1: Comparación del comportamiento de un acristalamiento 6+8+6 mm con una placa de policarbonato de 15 mm relleno de aerogel granular, durante 70 horas, en el mes de abril, en Madrid, orientación oeste.

6. Ensayo 2: Comparación del comportamiento de un acristalamiento 6+8+6 mm con una placa de policarbonato de 25 mm (triple muro) relleno de aerogel granular, durante 70 horas en el mes de marzo en Madrid, orientación oeste.

7. Ensayo 3. Comparación del comportamiento de un acristalamiento 6+8+6 mm con una placa de policarbonato de 25 mm (doble muro) relleno de aerogel granular, durante 70 horas en el mes de marzo, en Madrid, orientación oeste.

8. Ensayo 4. Comparación del comportamiento de un acristalamiento 6+8+6 mm con un doble acristalamiento de 70 mm relleno de aerogel granular con cámara de vacío, durante 70 horas en el mes de mayo, en Madrid, orientación oeste.





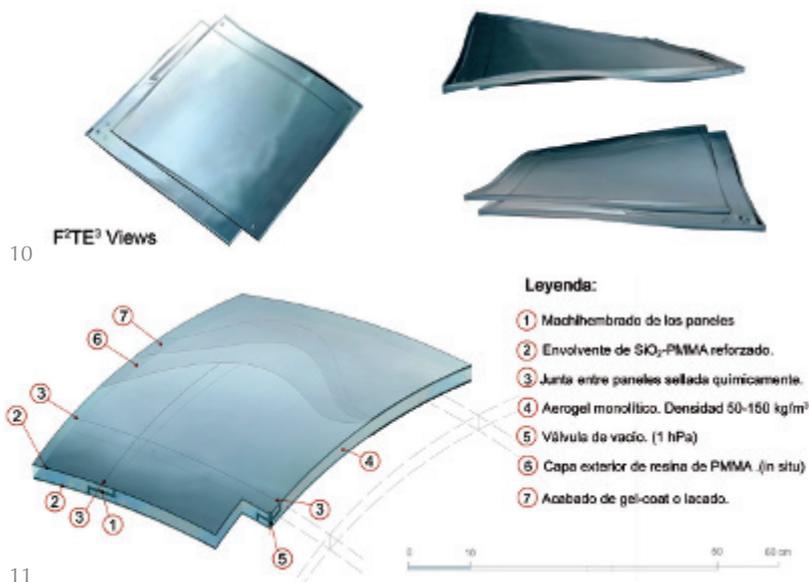
Arquitectos de Galicia (COAG) en colaboración con la empresa CYPE Ingenieros S.A. y que está respaldado, como coordinador, por el Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España.

Dimensiones del F²TE³: Los paneles del sistema se han modelado con un espesor mínimo de 25 mm y la anchura de la plancha, aunque las dimensiones podrán ser variables, no superará los 600x600 mm (Figura 11). El peso por unidad de superficie será entre 15 y 7 kg/m² y el radio de flexión mínimo admisible será de 4.000 mm aprox.

Aunque algunos de los valores que a continuación se detallan, aún no han sido ratificados por un ensayo experimental real, estos datos provienen tanto de datos extraídos de la bibliografía y de investigaciones independientes, como de un prototipo parcial construido con aerogel granular en vez de monolítico. Otras características del sistema son:

RESISTENCIA: Los datos que a continuación se exponen se refieren a la resistencia del encapsulado, sin tener en cuenta el aerogel monolítico que funciona como material de núcleo. Estos datos se han calculado según la metodología norteamericana ASTM. *International - Standards Worldwide (ASTM D. American Standard Test Methods for Determining)* y se han contrastado con los ofrecidos en la investigación de S. Özçiftçi (2006) y con los datos del programa de análisis estructural estático y dinámico por elementos finitos SAP2000 (50).

- ASTM D695. Resistencia a compresión: 1265 \ 31635 kg/cm²
- ASTM D732. Resistencia al corte: 632,7 kg/cm²
- Módulo de cizallamiento: 11.740,1 kg/cm²
- D256. Resistencia al impacto: 15,492 Nm. En el umbral de EN 356-P5A (5 impactos)
- D785. Dureza de Rockwell: M-100
- Factor de dilatación térmica: 1,0414 x 10⁻⁵ mm/m



- Temperatura de conformación en caliente: 143,3 y 148,88 °C
- D648. Temperatura máxima: la temperatura de servicio continuo oscila entre los 120 °C y los 130 °C, tal y como explican A. Ghatak y R. B. Dupaix en sus investigaciones del año 2010 (51).
- Resistencia a la llama: El PMMA es Euroclase B_{s1,d0} (EN 13501-1) y B2 (DIN 4102-1), por lo que cumple la normativa de resistencia Europea / Alemana según ensayos (AG.Plastics 2010)

- 9. Comparación de los datos empíricos.
- 10. Vistas de uno de los paneles del sistema F²TE³.
- 11. Axonometría explicativa del Sistema F²TE³.

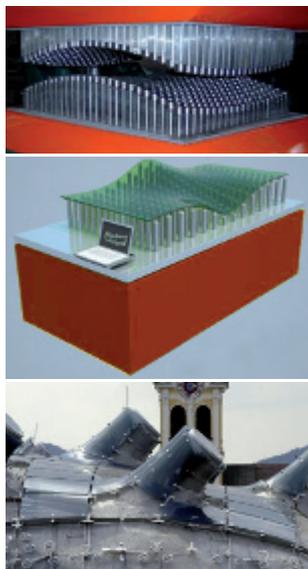
ACÚSTICA: Estos datos están basados en la investigación de S. Özçiftçi (2006) y del equipo de investigación de J. E. Carlson (2003), en lo referente al análisis de paneles de PMMA, y en las investigaciones de W. Maysendhölter (2008) y la patente de M. J. Rickards (2008), en lo referente al comportamiento acústico de paneles tipo VIP (52) (53) (54):

- Valor ponderado de insonorización: el rango para las altas frecuencias predominantes se encuentra entre 44 dB (aerogel granular según Cabot) y los 45,51 dB
- Bajas frecuencias predominantes: se encuentra entre los 39 dB y los 40 dB
- Espectro de frecuencia plana: se encuentra entre los 43 dB y los 44 dB

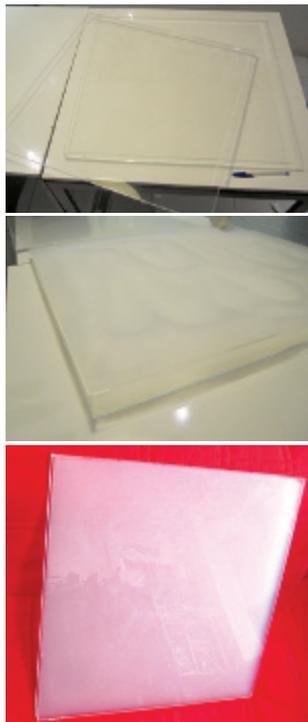
12. Sistema conformado de paneles de PMMA mediante la tecnología *FlexiTool*: ejemplo de diseño mediante forma libre con PMMA: Museo de Arte en Graz. Arquitecto, Peter Cook

13. Fabricación de uno de los prototipos. Se ha sustituido el aerogel monolítico por aerogel granular, debido a las dificultades de abastecerse de aerogel monolítico.

14. Comparación, mediante simulación energética por ordenador, de una placa de 25 mm de espesor de aerogel monolítico de 50-150 kg/m³ de densidad con el sistema F²TE³, durante 96 horas, en el mes de mayo, en Madrid, para una orientación oeste.



12



13

COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO: Estos parámetros han sido calculados mediante el programa *DesignBuilder* y contrastados con los resultados de ensayos empíricos y simulaciones con otros programas de cálculo como el *memorias2*:

Superficie hacia el interior del edificio:

- Resistencia superficial: 0,13 m²K/W

Superficie exterior del cerramiento:

- Resistencia superficial: 0,04 m²K/W

Panel F²TE³ sin tener en cuenta los puentes térmicos:

- Resistencia térmica: (R) 3,198 m²K/W

- Transmitancia: U = 0,313 W/m²K

Panel F²TE³ con puentes térmicos, calculado según la BS EN ISO 6946:

- Resistencia térmica: (R) 3,160 m²K/W

- Transmitancia: U = 0,316 W/m²K

TRANSMISIÓN DE LA LUZ: Estos datos han sido obtenidos de la bibliografía consultada, en especial del trabajo realizado por el equipo de G. Katumba (2008), y han sido contrastados, por un lado, con los datos ofrecidos por la empresa francesa Separex, a partir de los ensayos realizados a las muestras de aerogel monolítico, y, por el otro, con los datos sobre PMMA comercializado por la empresa Evonik Industries.

- Grado de transmisión de la luz τ_{D65}: oscilará entre 87,5% y 71,6% dependiendo del ángulo de incidencia de la luz (entre 0° y 60°)

- Absorción UV: aprox. 92,3%

- Absorción de los rayos infrarrojos: aprox. 80%

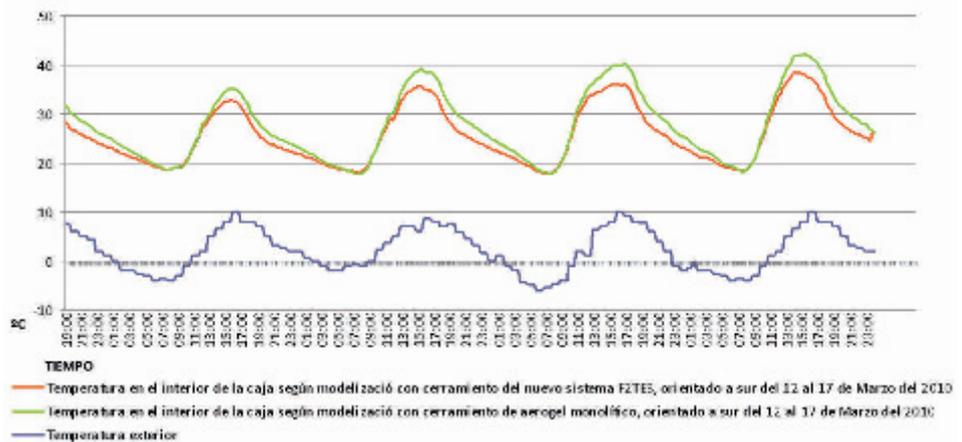
Ejecución del sistema: El sistema F²TE³ está constituido por la unión de paneles machihembrados (dos lados hembra y dos macho en cada panel, para que encajen, generando una continuidad), previamente diseñados según las necesidades del proyectista. Una vez que el elemento queda definido, se da una imprimación con "gel-coat", para proteger el conjunto de los agentes externos.

El sistema se prefabrica en taller, para ahorrar tiempos de montaje en obra y mejorar la precisión del mismo. La piel exterior del panel se realiza con una plancha plana de 0,25 mm de espesor y 600x600 mm de lado, de Polimetilmetacrilato, que, gracias al molde móvil de termoconformado "Flexi-Tool" (Figura 12), se puede modelar según cualquier geometría. Una vez realizado el panel, nos servirá de encofrado para el secado supercrítico del aerogel monolítico, que adaptará la geometría deseada quedando encapsulado dentro del Polimetilmetacrilato.

Ensayos realizados: Para la validación de este nuevo sistema de fachada a nivel teórico, se ha procedido a modelizar el mismo, basándose en los datos obtenidos y contrastados de los sistemas y estudios preexistentes, mediante diversos programas de ordenador, que compendiados ofrecen una visión global del comportamiento de esta innovadora piel.

Para respaldar esta simulación, se han realizado diversos prototipos parciales (Figura 13) que, tras haberse monitorizado, han ayudado a calibrar y validar los resultados obtenidos. Como conclusión, esta investigación valida, a un nivel teórico-experimental, el nuevo sistema transparente (aunque también responde a soluciones translúcidas y opacas) F²TE³ de altas prestaciones energéticas, de un espesor de 3 cm y que permite el diseño mediante formas libres. El prototipo F²TE³ se ha modelado por computadora con un espesor de 25 mm, para estudiar su comportamiento a nivel energético, comparándolo con el modelado de un cerramiento realizado con aerogel del mismo espesor (Figura 14).

Tal y como se detecta en la Figura 14, el sistema F²TE³ ofrece un comportamiento térmico mayor al que se obtendría con un cerramiento de aerogel monolítico sin encapsular en una cámara de vacío (si la hi-



14

groscofia del aerogel así lo permitiera). La curva tendida en las pérdidas significa un valor-U muy pequeño, que termina igualándose a los valores ofrecidos por el aerogel, mientras que a nivel de captación solar el sistema F²TE³ proporciona una mejora de 5 °C, respecto al aerogel monolítico.

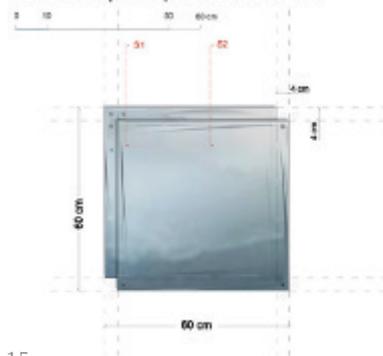
5. RESPUESTA DEL F²TE³ A LAS CONTRAPRESTACIONES DE LOS SISTEMAS TIPO VIP

La gran mayoría de los estudios realizados en el campo de los elementos tipo VIP (VIS) (55), determinan que existen cuatro contraprestaciones fundamentales a la hora de utilizar estos sistemas en la construcción; a) Fragilidad del velo protector exterior, b) Puente térmico en los bordes y juntas de los paneles, c) Condensaciones en la cámara de vacío y d) Precio. A estas contraprestaciones debemos sumar la dificultad de obtener transparencia y eficiencia energética con un mismo elemento, sumado a la nueva demanda que proviene de las vanguardias arquitectónicas de generar formas libres mediante sistemas monocasco.

El nuevo sistema F²TE³ da respuesta, a nivel teórico, a todas estas contraprestaciones planteadas desde el campo de los VIPs, ofreciendo el valor añadido de la transparencia y las formas libres:

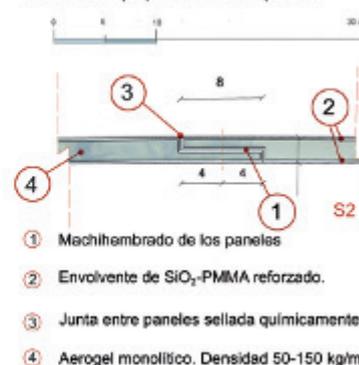
- Fragilidad del velo protector exterior:** Debido a la necesidad de que el nuevo sistema sea transparente y autoportante, se han cambiado los frágiles elementos exteriores de encapsulado como son el velo exterior multicapa de polímero metalizado, los dobles acristalamientos o las finas hojas de chapa de acero inoxidable, por un elemento compuesto PMMA muy resistente.
- Puente térmico en los bordes y juntas de los paneles:** Los paneles comerciales no están diseñados para formar elementos continuos por adición de los mismos. El nuevo sistema que proponemos está específicamente diseñado para generar elementos monocasco continuos, mediante un sistema de machihembrado de paneles, gracias al cual se rompe el puente térmico entre los mismos (Figura 15).
- Condensaciones en la cámara de vacío:** Las condensaciones dentro de la cámara de los sistemas tipo VIP, es uno de los principales problemas de estos sistemas. Aunque algunos estudios estiman que esta condensación es mínima, y que el humo de sílice con sus cualidades higroscópicas es capaz de absorber buena parte de estas condensaciones sin perjuicio

Planta de un panel tipo del sistema F²TE³



15

Secciones tipo por unión entre paneles



de sus capacidades portantes o térmicas, lo cierto es que, en cualquier caso, la humedad en el interior de la cámara termina volviendo opaco el bloque monolítico de aerogel.

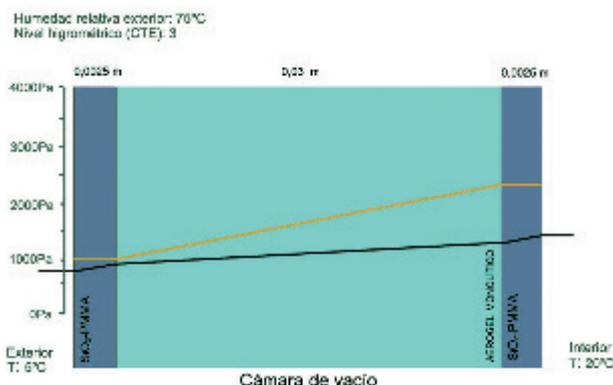
Este problema ha sido resuelto en el sistema F²TE³, mediante la variación de los espesores del encapsulado. La cara exterior dispone de un espesor de 3 mm (como mínimo) frente a la cara interior que ha de disponer de espesores de entre 6 y 8 mm como mínimo, para evitar las condensaciones en el interior de la cámara.

Se ha calculado la gráfica de condensaciones del nuevo cerramiento, mediante los datos obtenidos con el programa de simulación energética *DesignBuilder*, así como con los datos que ofrece el programa *memorias2* del COAG. El programa *memorias2* ha facilitado el estudio de la validación del sistema bajo las exigencias del CTE, así como la obtención de datos de tipo más normativo, orientados a la obtención de la patente del nuevo sistema.

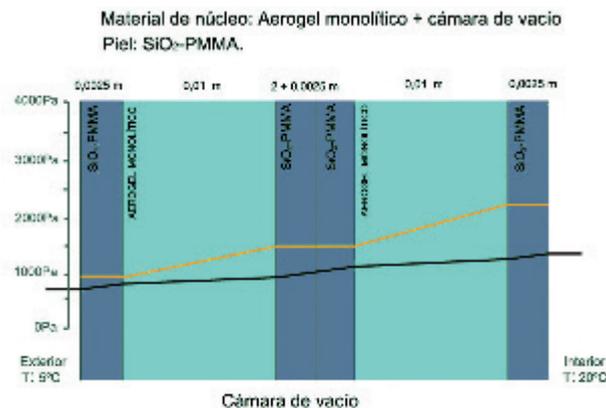
Los resultados obtenidos se han verificado según las exigencias de la norma UNE-EN ISO 13788:2002, y el método de verificación, mediante el cálculo estático, de condensaciones intersticiales. El comportamiento del cerramiento frente a las condensaciones superficiales se puede observar en la Figura 16.

- Precio:** En la actualidad, el precio de los sistemas VIP es elevado, en comparación con los sistemas constructivos tradicionales (aproximadamente 200 €/m²). Sin embargo, los estudios de la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU) muestran que la producción masiva de estos sistemas, utilizando un autoclave automático de 10 m³, podría permitir su comercialización con un precio más económico. A esto se suma que el proyecto de investigación a nivel Europeo HIPIN, enmarcado en el FP7, pretende producir aerogel monolítico a 5 € el litro (56).

15. Detalle del machihembrado entre paneles del sistema F²TE³.



A.- Sección tipo.



B.- Junta machihembrada entre paneles. Sección tipo.

16

16. Gráficas de condensación en la sección del panel tipo, así como en la junta machihembrada tipo del sistema F²TE³.

Por otro lado debemos tener en cuenta que el sistema F²TE³ dispone, con sus 3,5 cm de espesor, entre 70 y 88% menos de espesor que la mayoría de los cerramientos convencionales, lo que libera, una serie de metros cuadrados útiles. Si tomamos como unidad de análisis una vivienda unifamiliar de 150 m² construidos, y comparamos los metros útiles de esta vivienda utilizando el sistema propuesto en esta investigación (148,75 m² útiles), con un sistema de fachada convencional de 30 cm de espesor (135,36 m² útiles), el resultado que se obtiene es que con el sistema F²TE³ se pueden comercializar 13,39 m² útiles más (un 8,9% más).

Con todo esto en mente, se puede estimar que, una vez que se consiga la fabricación y producción en serie del sistema, éste podría ser competitivo frente a los sistemas convencionales de cerramiento.

Relación entre transparencia, rendimiento energético y forma libre: Desde el punto de vista constructivo y del rendimiento energético, de los tres tipos de aislamientos translucidos y transparentes que existen en el mercado (fibras plásticas, gas y aerogel), se ha comprobado que el que mejor responde como material del núcleo del nuevo sistema F²TE³ es el aerogel, ya que ofrece:

a) Transparencia: el aerogel compite con la transparencia del vidrio (87,6%).

b) Aislamiento: el aerogel dispone de un excelente grado de aislamiento. Según datos publicados (57), 70 mm de un panel VIP relleno de aerogel granular da mejor rendimiento térmico que un muro capuchino de 270 mm.

c) Material de relleno: el aerogel es el material, gracias a su porosidad y a su grado de unión por la fricción, que gran parte de los estudios (58) recomiendan como elemento de núcleo para elementos tipo VIP, siempre y cuando disponga de una piel exterior protectora.

d) Ligereza: el aerogel tiene tres veces el peso del aire.

e) Versatilidad: el aerogel monolítico se puede conformar con la forma que deseemos (59).

6. CONCLUSIONES

F²TE³ es un sistema de cerramiento que proporciona un alto grado de eficiencia energética en un espesor mínimo, mediante una continuidad superficial, dando libertad para generar formas libres y la posibilidad de resolver estructuras monocasco con la misma piel transparente del sistema. Aunque aún está diseñado a nivel de prototipo, ofrece unas prestaciones superiores a las de los sistemas existentes en el mercado, ofreciendo valores añadidos a nivel estructural, de transparencia y forma libre, y resolviendo los problemas que plantean tradicionalmente los paneles tipo VIP.

REFERENCIAS

- (1) Clinton Foundation. (2009). *CCIs Energy Efficiency Building Retrofit Program*. American Collage&University, Presidents Climate Commitment, EPC Toolkit for Higher Education.
- (2) English Heritage. (2008). *Energy conservation in traditional buildings*. *English Heritage Program*.
- (3) Groesser, S. N., Ulli-Beer, S., Mojtahedzadeh, M. T. (2006). *Diffusion Dynamics of Energy-Efficient Innovations in the Residential Building Environment*. 24th International Conference of the System. Países Bajos.
- (4) Heinemann, U., Weinländer, H., Gintars, D. (2011). *Insulation through vacuums. High performance thermal insulation for building envelopes and windows*. Themen Info 1/2011. A compact guide to energy research. BINE Informationsdienst. Fiz Karlsruhe. Leibniz (Alemania): Institute for Information Infrastructure Helmann-von-Helmholtz-Platz.

- (5) Nieto, J., Linares, P. (2011). *Cambio Global España 2020/50. Energía, Economía, Sociedad*. Resumen ejecutivo. Fundación CONAMA, Centro Complutense de Estudios e Información Ambiental.
- (6) Ministerio de Medio Ambiente. (2012). *Plan Nacional de Asignación de Derechos de Emisión 2008-2012 (PAN)*. Ministerio de Medio Ambiente. Actualización.
- (7) Comisión Europea. (2010). *Europa 2020. Una estrategia para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador*. Bruselas: Comisión Europea (2010-2014).
- (8) Department for Communities and local Government of London. (2007). *Building Regulations. Energy efficiency requirements for new dwellings. Good practice and guidance, Reports and summaries, planning, building and the environment 2010-2013*.
- (9) Ministerio de Vivienda. (2006). Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo 2006, (BOE 28-marzo-2006).
- (10) U.S. Department of Energy. DOE 2008. (2008). *Building Technologies program*. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy.
- (11) U.S. Building Commissioning and the WBDG Project Management Committee (2010). *Hole Building Design Guide*. National Institute of Building Sciences.
- (12) MoC. (2009). *MOHURD's Three Star green building rating system*. Ministry of Construction Green Building Evaluation Standard.
- (13) Heredia-Winery, L. (2007). Zaha Hadid. *Architecture and Urbanism*, 440: 38-45.
- (14) Puebla-Pons, J. (2002). *Visualidad y representación en Zaha Hadid*. Visualización en Arquitectura y Patrimonio, ETS de Arquitectura de Barcelona - Universidad Politécnica de Cataluña - UPC.
- (15) Hutt D. (2004). Walt Disney Concert Hall, Los Angeles, California, USA 2003; Architects: Frank Gehry of Gehry Partners. *A+U: Architecture and Urbanism*, 400(1): 8-26.
- (16) Lubell, S. (2004). Gehry proposes plan that would transform Brooklyn. *Architectural Record*, 192(1): 26.
- (17) Koolhaas, R. (2002, octubre). Junkspace. *STOR, Obsolescence*, 100: 175-190.
- (18) Weill, C., Melot C., Vermande, E. (2007). Rethinking Berlin//a city and its river. Rem Koolhaas/S,M,L,XL. *Urban and architectural research*, TU Berlin-Master Urbanism.
- (19) Herzog & De Meuron. (2003). Herzog & de Meuron's Chinese bird's nest swoop. *Architects Journal*, pág. 8.
- (20) Herzog & De Meuron, Craig-Martin, M. (2003). Laban Dance Centre, Deptford. *Building Design*, pp.10-15.
- (21) Grillo, A. C. (2008). *Nature's mimesis in architecture*. PUC Minas.
- (22) Gelbard, S. (2005). *Jean Nouvel's Guggenheim Rio: a Global and Ideological Análisis*. Carleton School of Architecture.
- (23) Márquez-Cecilia, F., Levene, R. (2007). SANAA: Kazuyo Sejima, Ryue Nishizawa 2004-2008: topología arquitectónica = architectural topology. *El Croquis*, 139.
- (24) Buck, D. N. (2000). *Responding to chaos: tradition, technology, society and order in Japanese design*, London: Spon.
- (25) Philippou, S. (2008). *Oscar Niemeyer: curves of irreverence New Haven*. London: Yale University Press.
- (26) Ryser, J. (2008). Island of Innovation for Aviles: a new Guggenheim effect?; architects: Oscar Niemeyer and others. *Topos: the International Review of Landscape Architecture and Urban Design*, 63.
- (27) Elmer, F. L., Gless, R. M. (2001). Renzo Piano, Dialogue.
- (28) Graham, P. (2007). What if streets went upwards? Rethinking the skyscraper context and its context. *Evolvo'07 Skyscraper Ideas Competition*, Arch 384 Competition Elective.
- (29) Heinemann, U., Weinläder, H., Ebert, H.P. (2009). *Envolturas de edificios energéticamente eficientes: los nuevos materiales y componentes*. (ZAE BAYERN, Grupo de trabajo de energía, EPA). Hamburgo (Alemania).
- (30) Rubin, M., Lampert, C. M. (1982). *Transparent Silica Aerogel for Window Insulation*. Lawrence Berkley Laboratory, University of California.
- (31) Jensen, K., Kristiansen, F., Schultz, J. (2005). HILIT+. Highly Insulating and Light Transmitting Aerogel Glazing for Super Insulating Windows. Department of civil engineering (BYG-DTU), Lyngby (Dinamarca).
- (32) Simmler, H., Heinemann, U., Kumaran, K., Quénard, D., Noller, K., Stramm, C., Cauberg, H. (2005 septiembre). *Vacuum Insulation Panels. Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications (Subtask A)*. *HiPTI, IEA/ECBCS*, Anexo 39.
- (33) Casa Duocastella, Ll. (2008). *Aerogeles nanocomposats: un nou material* (Tesis doctoral). UAB, ICMAB y CSIC.
- (34) Ibeh, C. C., Bubacz, M. et al. (2008). Current Trends in Nanocomposite Foams. *Journal of Cellular Plastics*, 44(6): 493-515. doi: 10.1177/0021955X08097707.
- (35) Cotet, L.C., Gich, M., Roig, A., Popescu, I.C., Cosoveanu V., Molins, E. (2006). Synthesis and Structural Characteristics of Carbon Aerogels with a High Content of Fe, Co, Ni, Cu, and Pd. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 352(26-27): 2772-2777.
- (36) Martín, L., Oriol Ossó, J., Ricart, S., Roig, A., García, O., Sastre, R. (2008). Organo-modified silica Aerogels and implications for material hydrophobicity and mechanical properties. *Journal of Materials Chemistry*, 18: 207-213. doi: 10.1039/B712553D.

- (37) Ismail, K. A. R., Salinas, C. T. (2008). Comparison between PCM filled glass windows and absorbing gas filled windows. *Energy and Buildings*, 40(5): 710-719.
- (38) Wong, I.L., Eames, P.C., Perera, R.S. (2007). A review of transparent insulation systems and the evaluation of payback period for building applications. *Solar Energy*, 81(9): 1058-1071.
- (39) Moner-Girona, M., Martínez, E., Roig, A. (2002). Micromechanical properties of carbon-silica Aerogel composites. *Applied Physics A Materials Science & Processing*, (74)1: 119-122.
- (40) Baetens, R., Jelle, B. P., Thueb, J. V., Tenpierik, M. J., Grynninga, S., Uvsløkk, S., Gustavsen, A. (2010). Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond. *Energy and Buildings*, 42(2):147-172.
- (41) Gibson, D. A. (2009). Construction Panel System and Method of Manufacture Thereof. Patent Cooperation Treaty Application. (WO09105468).
- (42) Bartley-Cho, J. D., Pousha, F.D., Yasaki, C.M., Reynolds & Ross, S. at Northrop Grumman Corporation. (2006). Thermally insulated sandwich type joint structure. European Patent, patno:EP1719924.
- (43) Willems, W. M., Schild, K. (2008). Where to use vacuum insulation... and where not! 8th Nordic Symposium on Building Physics, Proceedings págs. 1165-1172, Copenhagen (Dinamarca).
- (44) Mukhopadhy, P., Kumaran, K., Ping, F., Normandin, N. (2011, 10-13 de mayo). Use of Vacuum Insulation Panel in Building Envelope Construction: Advantages and Challenges. *NRCC 13th Canadian Conference on Building Science and Technology*, pp. 1-10. Winnipeg (Manitoba).
- (45) Fricke J., Heinemann, U., Ebert, H.P. (2008). Vacuum insulation panels. From research to market. *Vacuum*, 82(7): 680-690.
- (46) Arasteh, D., Mitchell, R., Kohler, C., Rubin, M., Selkowitz, S., Lee, E., Huang, J. (2006). LBNL Software for Analyzing Window Thermal Properties and Energy-Efficiency: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- (47) ISO (2012). ISO10077-2:2012: Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 2: Numerical method for frames.
- (48) Kony, J., Childs, P. (2000). Validation of Heating 7.2 Simulations Using Hot Box Test Data for RASTRA Wall Form System with Expanded Polystyrene-Beads. Oak Ridge National Laboratory Buildings Technology Center, Tennessee (USA).
- (49) BS EN (2003). BS EN 12412-2:2003: Thermal performance of windows, doors and shutters. Determination of thermal transmittance by hot box method. Frames.
- (50) Özçiftçi, S. (2006). Development of reinforced PMMA sheets for office furnitures & a new junction detail proposal. Thesis Submitted to the Graduate School of Engineering and Sciences of Izmir Institute of Technology in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Industrial Design. Turkey.
- (51) Ghatak, A., Dupaix, R. B. (2010). Material Characterization and Continuum Modeling of Poly (Methyl Methacrylate) (PMMA) above the Glass Transition. *International Journal of Structural Changes in Solids-Mechanics and Applications*, 2(1): 53-63.
- (52) Carlson, J. E., Van Deventer, J., Scolan, A., Carlander, C. (2003, 5-8 de octubre). Frequency and temperature dependence of acoustic properties of polymers used in pulse-echo systems. Proceedings IEEE Ultrasonics Symposium. Honolulu (Hawaii).
- (53) Maysendhölde, W. (2008). Sound transmission loss of vacuum insulation panels. *Journal of the Acoustical Society of America*, 123(5): 3815. Proceedings: Acoustics'08. Paris. Del 29 de junio al 4 de julio.
- (54) Rickards, M. J. (2008). Braced sound barrier vacuum panel. Patent application number: 20080289898.
- (55) NAHB Research Center, Inc. (2002). Accelerating the adoption of VIP technology in home construction, renovation, and remodeling. Project final report cooperative agreement, nº H-21173CA. USA Department of Housing and Urban Development Office of Policy Development and Research.
- (56) HIPIN. <http://www.hipin.eu/project/objectives.jsp>. Revisado en enero de 2012.
- (57) Aegerter, M.A., Leventis, N., Koebel, M M. (eds.). (2011). *Aerogels Handbook*. Series: Advances in Sol-Gel Derived Materials and Technologies.
- (58) Musgrave, D. (2009). *Structural Vacuum Insulation panels*. Thermal Visions, Inc. Ohio, USA. IVIS 2009.
- (59) Tenpierik, M., Cauberg, H. (2006, 6-8 de septiembre). Vacuum Insulation Panel: friend or foe?. PLEA2006, The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva (Suiza).

* * *