



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

**Escuela de
Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo**

Máster en Ingeniería de Minas



Trabajo Fin de Máster

**Caracterización, análisis atributivo y desarrollo tecnológico de
un novedoso material “composite” para su aplicación en
viviendas pasivas**

Autor: Sergio Suárez Fernández

Tutor: Jose Florentino Álvarez Antolín

Oviedo, junio de 2016

Índice

1.	Introducción	3
1.1	El estándar Passivhaus	5
1.2	Proyecto de investigación	10
2.	Parte experimental.....	12
2.1	Descripción del material y estado del arte.....	12
2.2	Logística del material y defectos detectados.....	15
2.3	Ensayos estructurales.....	19
2.3.1	Ensayos de compresión y flexión	20
2.3.2	Ensayos de resistencia de conectores.....	25
2.4	Ensayos funcionales	28
2.4.1	Ensayo de caja caliente	28
2.5	Elección y selección de materiales	33
2.5.1	Deducción de los índices de mérito	35
2.5.2	Análisis atributivo.....	45
2.5.3	Expresiones de propiedades compuestas.....	46
3.	Resultados y discusión	48
3.1	Resultados estructurales.....	48
3.1.1	Flexión y compresión.....	48
3.1.2	Resistencia de conectores.....	51
3.2	Resultados funcionales.....	56
3.2.1	Caja caliente	56
3.2.2	Otros valores de interés	57
3.3	Comparación en base a los resultados.....	58
3.4	Posibilidades constructivas	65
3.4.1	Sistema base utilizado.....	66
3.4.2	Cálculos en base a los resultados estructurales obtenidos.....	67
3.4.3	Sistemas de unión propuestos	76
3.5	Detalles constructivos	80
3.6	Análisis con software y encaje en el modelo Passivhaus.....	88
3.7	Futuro del material.....	92
4.	Conclusiones.....	94
5.	Bibliografía	96

1. Introducción

En términos generales, y no refiriéndonos a zonas del mundo en particular, la población global crece a un ritmo medio aproximado del 1%, lo que en cifras absolutas se corresponde con unos 70 millones de nacimientos todos los años. La energía demandada por todas estas personas (continuando aquí con una perspectiva global) ha seguido de igual manera un crecimiento continuo durante los últimos años, lo que equivale a decir que, a pesar de los esfuerzos realizados por alejar nuestro sistema de abastecimiento energético de las energías fósiles, la cantidad de CO₂ emitida per cápita se sigue incrementando cada año.

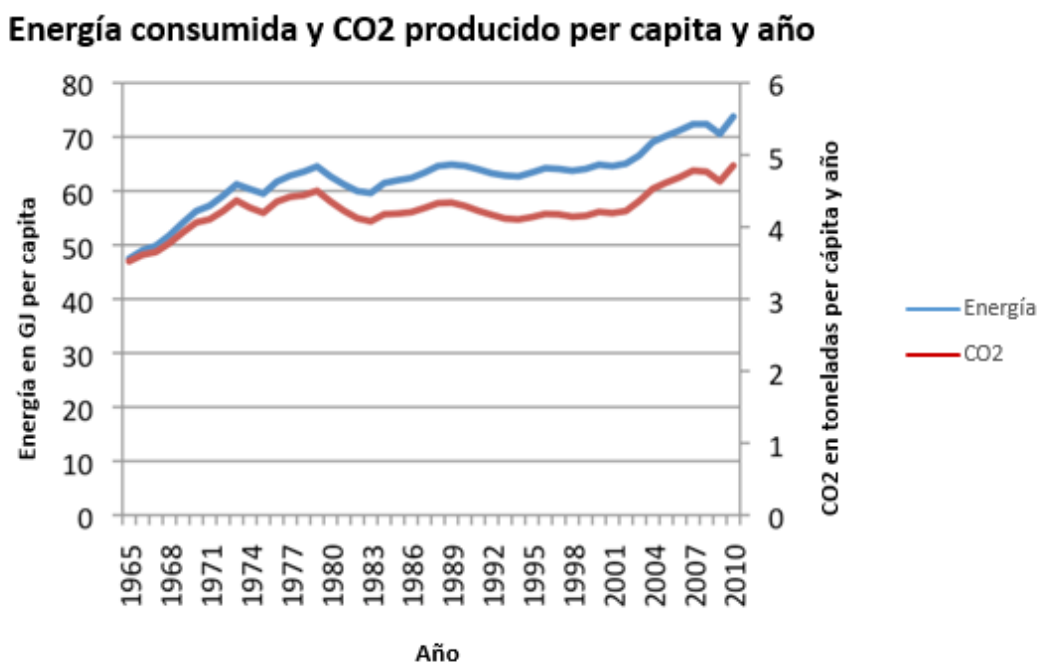


Figura 1: evolución del consumo energético y la producción de CO₂ a lo largo de los años

Parece claro y bastante admitido en toda la comunidad científica, que estas emisiones de CO₂, así como el resto de gases emitidos durante la quema de combustibles fósiles, contribuyen al fenómeno conocido como cambio climático, además de ser claramente compuestos que producen efectos negativos diversos sobre el medio ambiente como la contaminación atmosférica, la lluvia ácida, el smog... Fruto de esta problemática, existe en la actualidad una concienciación social que muestra un interés común en preservar el medio ambiente.

Generalmente, se toma la idea de que la solución pasa por eliminar la generación de energía eléctrica (y otras) por medio de la quema de combustibles fósiles tales como el gas natural, el carbón o el petróleo. Este planteamiento resulta en la actualidad difícil (por no decir imposible) de llevar a cabo por temas técnicos y económicos, ya que las energías renovables no resultan tan baratas y no poseen rendimientos tan elevados como se pudiera pensar.

La problemática podría sin embargo resolverse en gran medida mediante otra propuesta, que debería de ser contemplada antes de lo expuesto en el párrafo anterior, que consiste en considerar el concepto de eficiencia energética en viviendas (y resto de edificaciones).

La eficiencia energética de estructuras (naves, viviendas, oficinas...) se refiere aquí no a la forma de proporcionar energía térmica, si no a la cantidad demandada de ésta para crear en su interior unas condiciones “ambientales” cómodas para sus habitantes.

Esta idea no se debe de malinterpretar como antagónica de las energías renovables. Esto es: la demanda calórica de un edificio puede estar suplida por cualquier tipo de fuente de energía (quema de gas natural o madera, solar, geotermia...), pero independientemente de la forma seleccionada la magnitud requerida debe ser baja para que se pueda considerar como edificio energéticamente eficiente, y esta es precisamente una de las claves para tomar un camino hacia la reducción de emisiones de gases y partículas contaminantes. Simplemente se propone realizar primero un acercamiento a la eficiencia energética de los edificios para que el empleo de cualquier tipo de energía resulte coherente (ha de recordarse aquí que, si bien las energías renovables como la solar no producen gases de efecto invernadero durante su funcionamiento, sí lo hacen durante otras operaciones necesarias como la fabricación o el reciclaje de placas solares).

Comúnmente a este tipo de edificios se les conoce como edificios pasivos, en relación a un acercamiento no activo a la resolución de los problemas energéticos mundiales.

De la misma manera, un edificio energéticamente eficiente cubre la otra parte de la problemática mencionada al principio del epígrafe: una demanda energética global per cápita cada vez mayor. Es sencillo ver aquí que, si se consiguen reducir las calorías necesarias para alcanzar una misma temperatura (digamos 20°C) interior, la demanda energética global también se reducirá drásticamente, ya que una gran parte de ella se corresponde con la consumida en los hogares.

Esto a su vez resulta un buen incentivo para un futuro propietario. Si bien uno de estos edificios energéticamente eficientes puede resultar más caro, la hipoteca energética derivada resulta

mucho menor de manera indefinida. Uno puede pensar que esto solo es aplicable a zonas y estaciones climatológicamente frías, pero en realidad este tipo de estructuras se caracterizan por preservar unas condiciones atmosféricas interiores de manera constante en el tiempo, por lo que incluso en las zonas más calurosas se podría ahorrar al reducir el consumo en los métodos de climatización (aire acondicionado, por ejemplo).

Así, se puede entender que una vivienda “barata” inicialmente pueda resultar muy cara a la larga, mientras que una vivienda bien aislada y bien ejecutada pueda describir un comportamiento inverso.

Como resultado de todo lo comentado hasta este punto, surge en la Unión Europea (una de las organizaciones que más fervientemente luchan en pro del medio ambiente) la directiva 2010/31/UE en la que se compromete a que todos los edificios de nueva construcción y rehabilitaciones, se realicen de acuerdo al concepto Edificios de Consumo Energético Casi Nulo (NZEB – Near Zero Energy Buildings en inglés), para el año 2020 (2018 en el caso de edificios públicos). Estos NZEB se definen como aquellos edificios con consumo de energía neta cercana a cero, siendo suministrada la misma en gran parte por medio de energías renovables.

La definición de Edificios de Consumo Energético Casi Nulo que establece la propia directiva es poco precisa, dejando a las distintas regiones amplios márgenes para establecer unas exigencias más rigurosas. El objetivo perseguido es sin embargo claro: construir mejor para gastar menos.

Para alcanzar esta meta se pueden seguir varios patrones. Aunque todos ellos comparten características comunes, como por ejemplo la necesidad de construir con materiales de baja conductividad térmica para conseguir unas buenas características aislantes, cada uno propone soluciones diferentes. A estos patrones se les conoce como estándares de construcción.

Bajo este contexto energético es donde entra en juego el estándar de construcción alemán Passivhaus que ofrece un posible camino a la ya mencionada problemática. Su filosofía es la de “consumir la mínima energía necesaria” y se posiciona como el máximo exponente en cuanto a los diferentes métodos de construcción de baja demanda. Para alcanzar esta meta, el estándar establece unos métodos muy rigurosos tanto para el diseño y dimensionado como para la ejecución de una vivienda.

1.1 El estándar Passivhaus

Tal y como se menciona en el punto anterior, el Passivhaus es un estándar de edificación que intenta dar salida a la problemática económica mundial por un lado y a la crisis ambiental por otro. Para ello, propone reducir al máximo la demanda térmica mediante una buena envolvente,

un control riguroso de las infiltraciones y un óptimo aprovechamiento de la energía del sol. Todo este diseño deberá llevarse a cabo con el máximo rigor posible a la hora de su ejecución de tal manera que se pueda asegurar que los valores calculados en la teoría sean muy parecidos a los medidos en la realidad.

Este estándar se especificó en 1988 por parte de los profesores Bo Adamson, de la universidad sueca de Lund, y Wolfgang Feist, del Instituto alemán de Edificación y Medio Ambiente, siendo originalmente formulado para climas “fríos” de Centroeuropa. Por ello, una de las “complicaciones” que se presenta es la adecuación de este modelo a climas más calurosos como el nuestro. Como respuesta a este “problema”, y en colaboración con el Passive House Institute (de aquí en adelante PHI), que es el organismo encargado de la formación, investigación y certificación de los edificios pasivos, surge la Plataforma de Edificación Passivhaus (PEP) que además de realizar estas tareas difunde el modelo por toda la geografía española.

La esencia de este modelo de edificación se ejemplifica en la siguiente imagen:

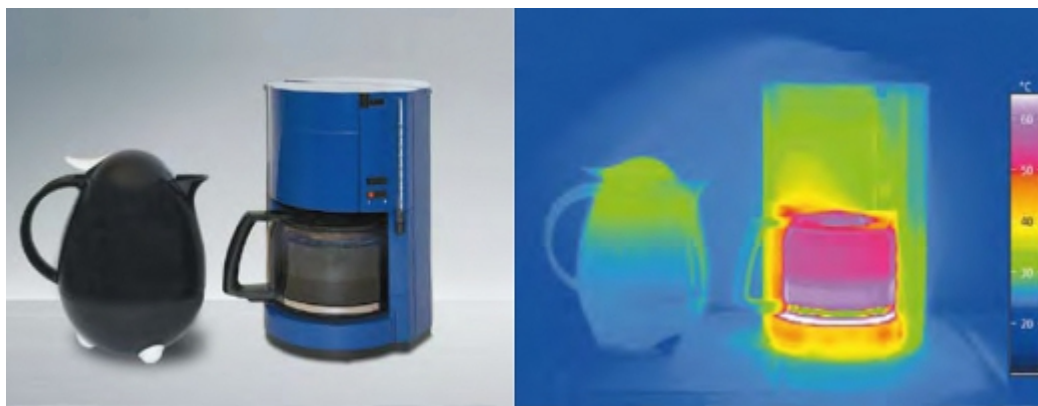


Figura 2: ejemplo del acercamiento pasivo a la problemática energética

La imagen infrarroja está captando la radiación infrarroja que emiten los dos cuerpos representados: un termo y una cafetera. Sabiendo que los cuerpos emiten más radiación cuanto mayor sea su temperatura (por la Ley de Stefan-Boltzmann) y que la cámara termográfica representa las temperaturas “más cálidas” con “colores vivos”, se puede observar que el termo desprende mucho menos calor que la cafetera. De esta manera, para mantener el café a la misma temperatura el termo cuenta con su aislamiento (PRINCIPIO PASIVO) y la cafetera con resistencias eléctricas (PRINCIPIO ACTIVO).

La base de la casa pasiva es el mismo. No se busca tanto el abastecimiento energético con energías experimentales limpias y renovables, como la demanda térmica extremadamente baja.

Las bases empleadas para alcanzar tales objetivos se resumen en cinco puntos:

1. Demanda máxima para calefacción de $15 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{año}$
2. Demanda máxima para refrigeración de $15 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{año}$
3. Valor del ensayo de estanqueidad al aire menor o igual a $0,6 \frac{\text{renovaciones}}{\text{h}}$ para una sobrepresión o depresión de 50 pascales
4. Energía primaria demandada inferior a $120 \text{ kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{año}$
5. Temperaturas superficiales interiores de la envolvente térmica en los meses de invierno superiores a 17 °C

El primer valor supone un parámetro muy importante de las casas pasivas. Si se llega a certificar dicho valor, la energía necesaria para alcanzar y mantener una temperatura cómoda supone un aporte mínimo. Para valorar dicho parámetro se deberá realizar un balance que tenga en cuenta las pérdidas por conducción y ventilación, por un lado, y las ganancias por uso de electrodomésticos, presencia humana y radiación solar (éste último muy importante) por otro.

El segundo valor es también importante en climas cálidos como el de la geografía española. Como ya se ha dicho, el estándar fue concebido originalmente para climas centroeuropeos pero la investigación arroja resultados positivos para aplicar en otros climas más calurosos como el del sur de Europa. Para alcanzar este objetivo, será muy importante planificar los sombreadamientos y evitar toda clase de sobrecalentamientos (la frecuencia o posibilidad de que se produzca deberá ser inferior al 10 %). Además, se deberá buscar un equilibrio entre el confort térmico y el confort lumínico.

Lógicamente, estos dos valores se deberán alcanzar con una buena envolvente térmica que aisle la vivienda contra las temperaturas exteriores (tanto temperaturas altas como bajas). Un buen aislamiento de la parte opaca permitirá por un lado que el calor no escape del interior de la casa por el invierno y que las ganancias solares se regulen mediante los huecos por otra. Para ello, la capa aislante deberá ser continua en toda la envolvente de la vivienda utilizando a su vez materiales de muy baja conductividad térmica y duplicando o incluso triplicando los espesores utilizados tradicionalmente en la construcción.

Otra operación fundamental, será la eliminación de puentes térmicos. Éstos se entienden como zonas de la envolvente térmica donde el calor se escapa con más facilidad, por ejemplo, uniones

de distintos elementos estructurales, de cambios en la geometría (una esquina) o intersección de materiales estructurales diferentes. El ejemplo clásico para explicarlo consiste en una tabla de madera con una punta. Lógicamente si se utiliza este elemento como envolvente térmica, el calor que se escape a través del metal de la punta será mucho mayor que el que se escape a través de la madera debido a las diferentes conductividades térmicas. La eliminación de estos puentes térmicos puede suponer el ahorro de entre el 20 y el 30% de energía.

Otros de los elementos que intervienen en gran medida en estos valores son los huecos. Por huecos aquí se refiere a todo elemento de la envolvente que no sea opaca, principalmente ventanas y lucernarios. Estos elementos son por un lado una fuente de calefacción (el aprovechamiento de la radiación solar) y por otro lado un medio de pérdidas de calor. En este sentido, el diseño buscará el equilibrio entre las ganancias solares y las pérdidas térmicas, dependiendo del clima y las condiciones del entorno (por ejemplo, el sombreado).

En la actualidad, existen ventanas que, en la medida de lo posible, transmiten gran parte de la radiación solar pero que a su vez tienen baja conductividad térmica. Son por ejemplo las ventanas con varias láminas entre las que se ha aplicado el vacío. De esta manera, la radiación solar puede entrar con total libertad ya que precisamente la radiación consiste en la transferencia de energía entre dos puntos en forma de ondas electromagnéticas, que no necesitan ningún material para su propagación. No sucede lo mismo sin embargo con la conducción (otra de las formas de transferencia de calor) que sí necesita moléculas para su propagación en el espacio.

Como ya se ha comentado, las pérdidas de calor por infiltraciones suponen un importante porcentaje en el balance energético global. Es por esto que el PHI limita el paso incontrolado de aire, asignando un valor a la estanqueidad de la vivienda con el test Blowerdoor. Dicho test se realizará mientras el aislamiento de la casa se puede modificar, colocando una "BlowerDoor" en una puerta o ventana exterior mientras el resto permanecen cerradas (las interiores deberán estar abiertas). De esta manera, se creará una diferencia de presión entre el interior y el exterior de la casa de 50Pa (depresión o sobrepresión) y mediante equipos informáticos se medirá el número de renovaciones por hora necesarios para mantener dicha diferencia (renovaciones se refiere aquí a volúmenes de aire). Este ensayo deberá arrojar un resultado inferior a $0,6 \frac{\text{renovaciones}}{h}$ siendo necesario la localización (existen diferentes métodos a tal efecto como los generadores de humo o la termografía infrarroja) y reparación de las aperturas en caso contrario.

Lejos de ser una exigencia caprichosa, la comprobación de estanqueidad de la envolvente térmica de la vivienda reduce el coste energético, mejora la salubridad impidiendo la entrada de partículas como el polen o el polvo exterior, se aumenta la comodidad deteniendo las infiltraciones de aire frío y reduce el mantenimiento estructural de la casa al impedir que se condense humedad en superficies internas de la envolvente.

Siendo según esta exigencia la casa pasiva una casa estanca al aire, se hace necesario ventilar para mantener niveles de CO₂ adecuados entre otras cosas. Además, el Código Técnico de Edificación (de aquí en adelante CTE) exige que las viviendas dispongan bien de un sistema ventilación híbrida (ventilación mecánica más ventilación natural) bien de un sistema de ventilación mecánica. En el caso de las casas pasivas, la ventilación natural resultaría en un derroche de calor. Parece poco lógico diseñar la vivienda para que el calor no se escape (principio pasivo) para después ventilar toda la casa con aire “fresco”. Surge entonces la idea de ventilación mecánica con recuperación de calor. De esta manera, el aire interior siempre es aire de alta calidad, ya que se trata con filtros antes de llegar a las habitaciones, y no se pierde calor, debido a un intercambiador de calor que transmite la energía térmica del aire “viciado” de las habitaciones de extracción al aire “limpio” de fuera (éste va hacia las habitaciones de impulsión) con un buen rendimiento.

Este método es también muy importante en cuanto a que se puede controlar la humedad del aire interior, la presión o los niveles de CO₂, creando unas condiciones más confortables y salubres (eliminación de polen o polvo exterior por ejemplo mediante los filtros).

El tercer parámetro limita la energía primaria total que se demanda en la vivienda. Con energía total se refiere aquí a energía consumida para todas las actividades, como, por ejemplo, la climatización, los electrodomésticos o la luz. A primera instancia, puede resultar raro pensar que se limite la energía consumida en una vivienda, pero tiene menos sentido diseñar una envolvente térmica que demande muy poca calefacción, para luego proporcionarla mediante la energía calorífica desprendida del uso de dispositivos electrónicos (por el Efecto Joule), derivada de un gran consumo de energía primaria.

Este valor, está cuantificado de acuerdo a datos experimentales de edificios “normales”, sin embargo, el PHI lo considera actualmente poco estricto, estando por tanto en vías de establecer un nuevo valor con objeto de aprovechar las tecnologías actuales más eficientes.

La última variable tiene que ver con la sensación térmica de un local. En este sentido, la sensación térmica que tengamos en una habitación no depende sólo de la temperatura del aire, si no que será la media entre ésta y la temperatura media de las superficies:

$$\text{Sensación térmica} = \frac{\text{Temperatura media de las superficies} + \text{temperatura del aire}}{2}$$

En este sentido, si nos encontramos en un local con la temperatura del aire a 21°C podremos tener frío, estar cómodos o tener calor dependiendo de la temperatura media de las superficies. En éste valor influye mucho el diseño del aislamiento de la envolvente opaca.

Todos estos objetivos se pueden cumplir y a la vez obtener un adecuado confort térmico mediante el uso de la herramienta de software PHPP, que en español significa “Paquete de Planificación PassivHaus” (se aplicará al caso de la vivienda objetivo de este proyecto más adelante). Consiste en unas hojas de Excel en las cuales, introduciendo los valores característicos de la vivienda, por ejemplo, localización, transmitancias de los cerramientos o temperaturas exteriores mensuales medias, realizan un balance energético y otras operaciones concluyendo al final si el proyecto entra o no dentro del estándar Passivhaus. Si el PHPP concluye positivamente, el proyecto se certificará como Passivhaus.

1.2 Proyecto de investigación

De todo lo expresado en relación a la eficiencia energética, las casas pasivas en general y de la Passivhaus en particular, se extrae la enorme importancia de los materiales que conforman la envolvente térmica de los edificios que se desea describan un comportamiento pasivo de bajo consumo energético. A propósito de lo anterior, es fácilmente detectable una tendencia común a la búsqueda de materiales cada vez más aislantes por parte de las áreas de la ingeniería de ciencias de los materiales y eficiencia energética y sostenibilidad.

Un buen material de edificación para este grupo de construcciones con peculiaridades tan singulares debería poseer una serie de propiedades que son difíciles de concentrar en uno sólo.

Entre otras, es especialmente interesante mencionar las siguientes:

- i) Bajo aislamiento térmico
- ii) Capacidad portante/estructural
- iii) Alta resistencia al fuego
- iv) Alto aislamiento acústico

La solución pasa generalmente por colocar varias capas de materiales que van aportando las diferentes propiedades mencionadas. Una secuencia típica en los modelos construidos bajo el estándar Passivhaus consiste en colocar primero bloques de termoarcilla o ladrillo como

elemento portante y de cerramiento y a continuación un Sistema de Aislamiento Térmico Exterior (SATE) compuesto a su vez por unas 4-5 capas principales (fijación, aislamiento con XPS o EPS entre otros, armadura, acabado y otros accesorios), además de los acabados realizados sobre estos en cada caso.

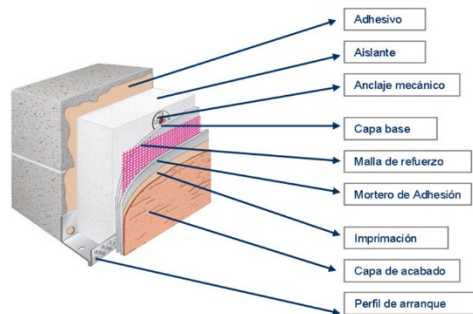


Figura 3: generalización del sistema SATE

Bajo esta premisa surge en el año 2014 el proyecto de investigación *Diseño de un sistema constructivo modular mediante la optimización, por aplicación del modelo estadístico de Weibull, de componentes formados por fibra de madera aglomeradas con cemento* que básicamente pretende explorar las posibilidades tecnológicas del material que escuetamente podríamos describir como lana de madera aglomerada con cemento (de aquí en adelante se le nombrará indistintamente con las siglas WW y WWW provenientes de su denominación en inglés Wood Wool Wall). Dicho proyecto ha sido impulsado por la empresa Georenova SL con la ayuda para la ejecución de proyectos de I+D+i del Principado de Asturias de la FICYT.

El objetivo de éste consiste en investigar, caracterizar y optimizar el material compuesto (el cual debería de ser capaz de reunir todas las características anteriormente descritas) y desarrollar con él un sistema constructivo modular compatible con los edificios pasivos en general y con el Passivhaus en particular.



Figura 4: logotipos de las partes involucradas en el proyecto de I+D+i

Se desarrollará en este Trabajo Fin de Máster el proyecto de investigación, describiendo las labores realizadas, analizando los resultados obtenidos y explorando las posibilidades y el futuro que pueda tener dicho material y el sistema constructivo asociado.

2. Parte experimental

2.1 Descripción del material y estado del arte

El material compuesto que se estudia en este trabajo está conformado, principalmente, por los constituyentes siguientes:

- i) Fibras o virutas de madera, de aproximadamente 20mm de longitud y mineralizadas para evitar que se degraden por procesos químicos o biológicos y preservar sus propiedades en el tiempo.

Se obtienen principalmente de madera de pino o abeto a partir de tareas de clareo de bosques, sobrantes de aserradero o reciclado de diferentes elementos fabricados con madera como palés, siendo por tanto un producto totalmente ecológico.

El material compuesto debe a este constituyente disperso sus propiedades aislantes.

- ii) Cemento Portland (CEM I 52,5 R). Éste es comúnmente utilizado en el área de la construcción y es el que proporciona al material sus propiedades estructurales (constituyente matriz).
- iii) Si bien los dos anteriores son los principales componentes que conforman el material WWW, en el proceso de fabricación también intervienen otros constituyentes en proporciones mucho menores y con objetivos de estabilidad del proceso de manufacturación, tales como el agua y algunos aditivos químicos como el silicato de sodio.

El resultado es un material que posee alta durabilidad y resistencia a la vez que presenta alta resistencia al fuego, alto aislamiento térmico y acústico e impermeabilidad entre otras reseñables propiedades funcionales.

Las proporciones de cada uno de los constituyentes dependen de la densidad de material escogida (existiendo varias ofertadas en el mercado), siendo para el caso estudiado de 400kg/m^3 aproximadamente de un 10% de cemento y un 90% de madera. Cabe destacar aquí que, además de las proporciones de los compuestos que conforman este material, la distribución y tamaño de las virutas, su porosidad interna e incluso el proceso de fabricación seguido son variables que determinarán la densidad y el resto de sus propiedades finales, tanto estructurales como funcionales. De aquí se extrae la alta variabilidad en los resultados que puede existir entre dos materiales fabricados en lugares diferentes y la necesidad de establecer normas que garanticen la reproducibilidad en el futuro.

Tal y como se comenta previamente, las características (tamaño, proporción, forma, distribución...) de las fibras o virutas de madera, son las que van a condicionar las propiedades funcionales (siendo la más importante para este proyecto el aislamiento térmico), mientras que el cemento jugará un papel más importante en cuanto a las propiedades estructurales. Dado que la densidad del cemento es ampliamente mayor que la de la madera empleada, se deduce que la densidad del material disminuirá de manera inversamente proporcional a la cantidad de madera (además de la porosidad interna del material) y por tanto, a menor densidad, mayores propiedades funcionales y menores propiedades estructurales. Esta idea se puede resumir en la siguiente gráfica:

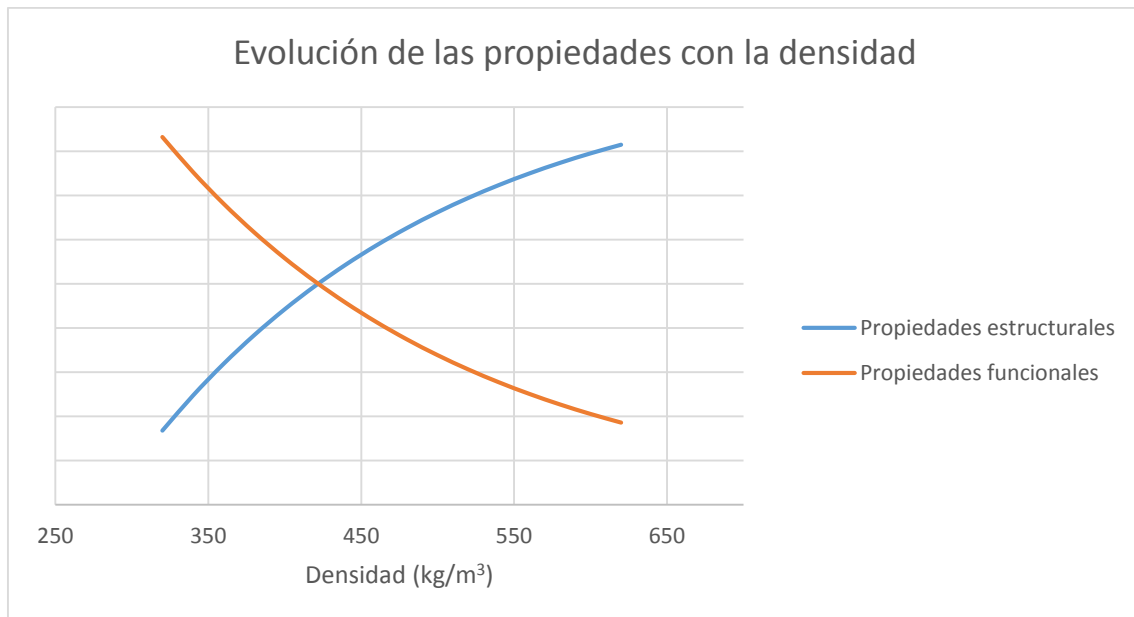


Figura 5: relación entre densidades y propiedades funcionales y estructurales

Uno de los objetivos del proyecto de investigación en el que se encuadra este Trabajo Fin de Máster, consiste en observar el punto de equilibrio mostrado en la gráfica anterior (en la práctica, dicho punto representa el equilibrio entre las propiedades estructurales y funcionales). Dado los límites económicos del mismo, se optó por estudiar tres densidades diferentes: 300, 400 y 500 kg/m³, y, debido al alcance limitado de este documento, se hará referencia casi de manera exclusiva a la densidad media que ha sido la que mejores resultados ha presentado, mostrando el equilibrio más óptimo entre propiedades funcionales/estructurales. No obstante, se mencionará de manera leve y puntual en algunos puntos algunas características del resto de densidades.

En líneas generales, este material presenta buenas propiedades para su utilización a modo de cerramiento de viviendas como consecuencia de su baja conductividad térmica, su elevada permeabilidad al vapor de agua y su alta absorción sonora. Es lógico en base a esto que los paneles de WWW se hayan venido empleado durante varios años en distintas localizaciones de clima frío europeo (Suecia principalmente) y norteamericano (Canadá) para formar la envolvente térmica de edificios.

No se han explorado, sin embargo, las posibilidades de este material como elemento estructural portante, en el que, por supuesto, se seguirían aprovechando las bondades funcionales que presenta de la misma manera que se ha venido haciendo hasta ahora. Será pues, objetivo del presente proyecto desarrollar un cerramiento constructivo modular (en relación a la facilidad

del proceso de manufacturación para fabricar paneles) de éste material con capacidad estructural.

Los objetivos del proyecto de I+D+i en el que se enmarca este trabajo, serían, partiendo de un material compuesto por fibras de madera aglomeradas con cemento:

- i) Caracterizarlo, dentro de los límites de tiempo y dinero.
- ii) Buscar el equilibrio entre las propiedades mecánicas y funcionales
- iii) Explorar las posibilidades estructurales y, si fuera posible, desarrollar un sistema constructivo basado en módulos
- iv) Introducir el material dentro de la lista de recomendados por el PHI y observar cómo se puede encajar con las viviendas de bajo consumo energético

Se debe remarcar llegado a este punto que, aunque el proyecto es muy ambicioso, no es su meta desarrollar un sistema que permita construir con este material estudiado de manera inmediata, pero si un primer acercamiento a las posibilidades tecnológicas que presenta de tal manera que, si se continúa su estudio e interés, se puedan levantar estructuras basadas en el mismo en un futuro cercano.

2.2 Logística del material y defectos detectados

El material estudiado fue transportado en un contenedor desde el puerto de Shanghái en China hasta el puerto del Musel, en Gijón, donde se descargó con la ayuda de un camión grúa:



Figura 6: descarga de los paneles

El contenedor transportaba en su interior:

- i) Dos bloques de densidad 300 kg/m^3 ($\pm 50 \text{ kg/m}^3$) de dimensiones $5700 \text{ mm} \times 2250 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$
- ii) Dos bloques de densidad 400 kg/m^3 ($\pm 50 \text{ kg/m}^3$) de dimensiones $5700 \text{ mm} \times 2250 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$
- iii) Dos bloques de densidad 500 kg/m^3 ($\pm 50 \text{ kg/m}^3$) de dimensiones $5700 \text{ mm} \times 2250 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$

Los paneles transportados estaban en líneas generales en buen estado, aunque se detectaron en pequeñas zonas periféricas de los mismos, defectos originados en principio por su colocación en el interior de los contenedores y transporte:



Figura 7: desperfectos originados por el descuelgue de una de las barras del contenedor y por las bridas de agarre para introducción/extracción

De estos desperfectos se puede extraer que las dimensiones de los bloques transportados resultan demasiado grandes para las densidades trabajadas. Sólo hay que pensar a cada bloque

de densidad 400 le corresponde una masa de más de 2 t. Este enorme peso propio produce que la extracción de los bloques a través de únicamente dos eslingas, produzca deformaciones en los puntos de sujeción.

Los bloques más afectados en este sentido fueron, como era de esperar, los de densidad 300. Ello obligó a realizar una “limpieza” de los bordes de los paneles con el objeto de eliminar desperfectos que pudieran dar lugar a falsos resultados en los ensayos. Con este objetivo y con la finalidad de dividir los paneles en bloques de menor tamaño más manejables y que pudieran ser transportados de manera sencilla, se subcontrató un aserradero.

Debido a la dirección preferencial de las fibras de madera, desde el inicio se espera una alta anisotropía en las propiedades del material (en las tres direcciones del espacio). Sin embargo, además de ésta, se detectó de manera visual durante los despieces realizados que el material presentaba aspectos diferentes en función de la porción de panel observada. Esto se achaca al proceso industrial de fabricación de paneles tan grandes.

Para tener esto en cuenta a la hora de ensayar y de caracterizar el material, los paneles se dividieron, nombrando cada bloque extraído del panel original según una letra y marcando cada densidad con un color, de tal manera que cada ensayo se pudiera correlacionar con la posición original.



Figura 8: bloques intermedios extraídos de los paneles

Estos bloques se mecanizaron posteriormente en probetas utilizando para ello una mesa de corte dotada de sierra mecánica ya situada en las instalaciones de la Universidad de Oviedo en Gijón, cerca de los laboratorios donde después posteriormente se ensayarían, con el objetivo de adaptar los tamaños de las probetas a las necesidades del material y a la maquinaria disponible:



Figura 9: mesa de corte empleada y probetas de compresión y flexión de dos densidades diferentes

Las probetas extraídas de los bloques para cada ensayo deben llevar una marca que identifique su posición relativa dentro de los mismos, ya que, como se ha dicho, el material presenta una alta anisotropía, por lo que cada propiedad obtenida de los ensayos será triple (una por cada dirección del espacio). Se tomará para los resultados el siguiente convenio direccional como consecuencia de la dirección preferencial de las fibras (el esquema sería el mismo para el caso de ensayos de compresión pero con probetas cúbicas):

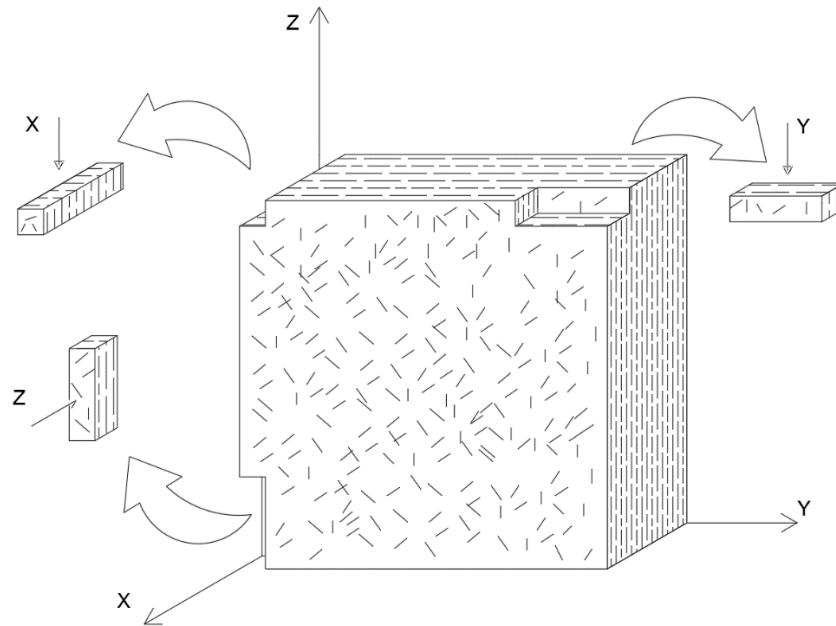


Figura 10: criterio direccional tomado para los ensayos

2.3 Ensayos estructurales

En esta fase se pretende caracterizar cuantitativamente el material con el objetivo de conocer si es posible utilizarlo además de como elemento principal de la envolvente térmica, como elemento estructural de las propias edificaciones.

Dados los límites en presupuesto y tiempo del proyecto de investigación, esta fase se ha limitado a ensayos de compresión, flexión a tres puntos y resistencia de anclajes o conectores. Todos ellos se han realizado en una máquina de ensayos universal (INSTROM 5582), en el Departamento de Materiales de la Universidad de Oviedo en Gijón.

Como normas y referencias tenidas en cuenta a la hora del desarrollo de esta fase, resulta interesante mencionar los siguientes:

- UNE-EN 1015-11:2000. Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del cemento endurecido.
- UNE-EN 12390-3:2009. Determinación de la resistencia a compresión de probetas.
- UNE-EN 12390-5:2009. Determinación de la resistencia a flexión de probetas.
- Saleh Pascha , Khaled. (2013). Construcciones de madera compuestas para cerramientos autoportantes. ARQ. Mayo-Agosto, 76-83.

2.3.1 Ensayos de compresión y flexión

Los primeros tipos de ensayo se realizan con el objetivo de caracterizar intrínsecamente el material desde el punto de vista de su resistencia mecánica (capacidad de soportar esfuerzos aplicados). Además de obtener unas propiedades numéricas, estas pruebas también permiten observar su comportamiento ante fuerzas externas (cómo se deforma, a partir de cuándo se debe considerar que el material no tiene recuperación...), lo cual supone un conocimiento básico (cualitativo) si se pretende utilizar como estructura.

Al comienzo de dichos ensayos se realizaron una serie de pruebas para:

- i) Precisar si el tamaño para las probetas estimado inicialmente era adecuado a este material, a la célula de carga y a las características de las máquinas de ensayar en general.
- ii) Deducir la velocidad de aplicación de la carga para los ensayos de flexión y compresión óptima de este material, de tal manera que el ensayo tuviera una duración adecuada para sacar conclusiones de los mismos.
- iii) Definir una velocidad de deformación adecuada y constante en todos los ensayos.
- iv) Fijar un criterio de rotura, de tal forma que se identifique en cada ensayo el momento real de la tensión de rotura, para no alargar innecesariamente los ensayos, ni poner en peligro la integridad del equipo si llegara a trabajar sin reacción a la carga aplicada.

Para llevar a cabo dicha fase intermedia se mecanizaron probetas de dos densidades (alta y baja) de medidas cúbicas de 15x15x15 cm y de 20x20x20 cm para compresión y de 10x10x47 cm para flexión (8 probetas por tipo de ensayo y de densidad). Inicialmente se habían previsto probetas de menor tamaño, pero debido a que el material, en sus densidades más bajas, no presentaba la rigidez y compactación esperada, fue necesario redimensionar el tamaño de las probetas a ensayar.



Figura 11: primeros experimentos realizados sobre el material WWW

Las conclusiones extraídas de estas pruebas fueron:

- i) El corte del material en cubos a tamaños de arista inferiores de 10 cm es inestable en las esquinas. Con esto, y con el objetivo de hacer las probetas lo más pequeñas posibles para aprovechar al máximo el material se establecen unas dimensiones de las probetas para ensayos de compresión de 15x15X15 cm. Estos tamaños son sustancialmente mayores que los planteados inicialmente en el proyecto de investigación.
- ii) Las dimensiones de las probetas de flexión son adecuadas tanto a la máquina (con una distancia entre apoyos de 25cm) como a la estabilidad del material con lo que se acepta el tamaño pudiendo este variar un poco si el despiece de los bloques lo considerara óptimo (finalmente se considerarán 30 cm de largo).
- iii) Para los ensayos a compresión se comienza aplicando una velocidad de 1mm/s. La duración del mismo es de menos de 1 minuto. Por lo que se cambia a una velocidad de 0,5 mm/s. Los tiempos de duración de ensayos siguen pareciendo ligeramente cortos para utilizarse con este tipo de material por lo que se decide finalmente una velocidad de aplicación de la carga en los ensayos a compresión 1 mm/min durando los ensayos aproximadamente 8-9 minutos y obteniéndose una gráfica como resultado con partes elásticas y plásticas bien definidas.
- iv) Estas primeras pruebas de compresión fueron realizadas en el departamento del área de ingeniería de construcción. Sin embargo, durante las pruebas se detectaron emisiones de polvo por parte del material tanto en el mecanizado

como en el ensayo que podrían dañar las máquinas de ensayar de pistón. Debido a esto se decide un cambio a la máquina del departamento de materiales dotada de fuelle y siendo por tanto más adecuada a este material.

- v) La célula de carga debe ser de al menos 100kN debido a la carga de rotura del material en todas sus caras y direcciones.
- vi) Debido a los mismos condicionantes de la conclusión anterior se opta por efectuar las pruebas de flexión en el Departamento de materiales, usando una célula de carga de 10 kN. En este caso se concluye una velocidad de aplicación idónea de 1 mm/min.
- vii) Durante el transcurso de los ensayos de flexión se detectó que los cilindros de apoyo y la célula de carga se “incrustaban” en el material registrando con esto la máquina unos valores de *flecha* no coincidentes con la deformación real del material. Para solventar este problema se colocaron unas chapas de acero rígidas entre el cilindro y el material evitándose esta penetración del cilindro en la superficie del material ensayado. El efecto de estas chapas sobre los resultados finales será tenido en cuenta en los cálculos, ya que debe considerarse el esfuerzo uniformemente repartido sobre la superficie de dichas chapas.



Figura 12: penetración de la célula en el material



Figura 13: detalle de la chapa flexible que evita la incrustación

- viii) Los ensayos de compresión tienen problemas similares y por lo tanto se realizan utilizando una chapa colocada sobre la probeta y otra debajo de ella. Además, en este caso, dada la dificultad de obtener superficies de ensayo paralelas, se decide colocar una rótula que permita cierta inclinación de éstas sin riesgo de perjudicar la célula de carga.



Figura 14: detalle de las chapas y la rótula utilizada en los ensayos de compresión

- ix) Como se verá en el apartado de resultados y discusión, es sencillo observar la rotura en las gráficas que la propia máquina de ensayos dibuja en tiempo real. Se adelanta que se considera como criterio de rotura, el punto a partir del cual

se pueden observar visual y sonoramente que las fibras comienzan a romper (se puede asociar fácilmente con la curva graficada). Esta rotura es irreversible y por lo tanto el daño y las deformaciones producidas también lo son, no existiendo aquí recuperación elástica.



Figura 15: rotura de dos probetas ensayadas a flexión y compresión

Teniendo estos puntos en cuenta, los ensayos de compresión se realizaron con probetas de 15x15x15 cm y los de flexión con probetas de 10x10x30 cm con el fin de aprovechar el máximo el material disponible, usando una célula de carga de 10kN y con una velocidad de aplicación de exactamente 1mm/min. El número de ensayos realizados es de 12 para cada densidad y dirección del espacio (36 en total por cada densidad) y para cada tipo de ensayo.

Mediante los ensayos de flexión, se pueden obtener los valores de tensión (σ) y módulo de elasticidad (E) del material (en función de la dirección estudiada) mediante las siguientes expresiones:

$$\sigma = \frac{3 \cdot F \cdot (l - d)}{2 \cdot b \cdot t^2}$$

$$E = m \cdot \frac{(l - d)^3}{4 \cdot b \cdot t^3}$$

Donde:

$F =$ fuerza aplicada

$l =$ distancia entre apoyos

$d =$ ancho de la chapa situada entre el cilindro de carga y el material (9cm)

$b =$ ancho

$t =$ espesor

$m =$ pendiente en el rango elástico de la curva $F(\delta)$

$\delta =$ flecha o deformación alcanzada

Por su lado, los resultados de los ensayos de compresión deben ser tratados con las expresiones siguientes:

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Donde:

$S =$ superficie de aplicación de la fuerza

$\Delta\sigma =$ variación de tensión considerada

$\Delta\varepsilon =$ variación de deformación considerada

2.3.2 Ensayos de resistencia de conectores

Dado que uno de los objetivos del proyecto es el desarrollar un sistema constructivo modular, y puesto que estos paneles deben estar anclados a los elementos estructurales mediante “conectores”, se dedicó parte del trabajo a analizar el comportamiento del material frente a esfuerzos de tracción, combinando el material estudiado, una varilla metálica y diferentes tipos de adhesivos.



Figura 16: bloque de WWW siendo ensayado a tracción mediante un conector y adhesivo de mortero

Para ello, se tomaron probetas o bloques de dimensión 400x400x500mm. La razón de seleccionar dimensiones tan grandes, residen en la necesidad de reproducir condiciones parecidas a las reales, utilizando también otros elementos de gran tamaño.

A los bloques se les practicó un taladro con el objetivo de colocar en su interior una varilla de acero roscada de 10 mm de diámetro. Éstos se realizaron de diferentes tamaños (12, 16 y 20 mm de diámetro) a fin de conocer el óptimo, y se centraron en la cara de 500x400 mm paralela a las fibras y en su perpendicular (direcciones z y x según el esquema anterior), tal y como serían realizarían en obra, con una profundidad de 300 mm.

Con el objetivo de aprovechar la máquina utilizada en los ensayos de flexión y compresión, se diseñó un arnés capaz de sujetar las probetas tal y como se muestra en la siguiente figura:

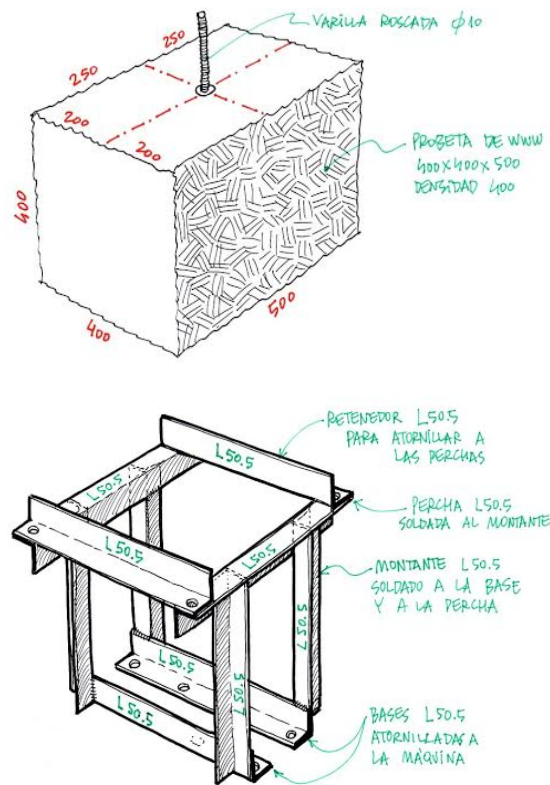


Figura 17: esquema de las probetas y arnés empleados en los ensayos de resistencia de conectores

Los adhesivos empleados fueron:

- Adhesivo 1: SikaAnchorFix -1 (basado en poliéster libre de estirenos)
- Adhesivo 2: Sikadur 42 Anclajes (basado en resina epoxi)
- Adhesivo 3: WÜRTH VIT-P 200 (basado en una mezcla de poliéster libre de estirenos y arena de cuarzo)
- Adhesivo 4: cemento rápido (basado en un mortero de fraguado rápido, con naturaleza del árido silico-carbonática, intervalo granulométrico 0-2.5 mm, agua de amasado 4 L/25 kg y densidad aparente de la mezcla 2250 kg/m³. El tiempo aproximado de fraguado fue de unos 60-70 minutos)

El par de apriete de los tornillos de esta estructura al material fue de 5 Nm y la velocidad de ensayo de 1 mm/minuto.

Las conclusiones extraídas de estos ensayos precisan de la interpretación de las gráficas obtenidas y serán por tanto tratados en el siguiente apartado de resultados y discusión. No obstante, se puede comentar aquí que la extracción de la varilla se produce con el

arrancamiento de un cono de material atacado por el adhesivo tal y como se ve en las siguientes imágenes:



Figura 18: extracción de la varilla a tracción

2.4 Ensayos funcionales

2.4.1 Ensayo de caja caliente

Puesto que se tiene constancia del uso del material WW para formar la envolvente térmica de edificios en diferentes zonas de clima frío de Europa, desde el principio del proyecto se parte de la idea de que el material cuenta con una excelente capacidad de aislamiento térmico.

La no existencia, sin embargo, de unas reglas establecidas para la fabricación de éste, y la variabilidad de las propiedades que puede presentar en función de los materiales utilizados o el proceso seguido, obliga a estudiar la conductividad térmica real que presenta el material considerado en particular, siendo esta propiedad intrínseca uno de los pilares fundamentales del proyecto. El conocimiento de este valor permite también realizar una estimación de la calidad de los bloques recibidos y correlacionarla con otras propiedades interesantes que, por

motivos económicos, no pueden ser estudiadas directamente mediante ensayos en el proyecto de investigación.

Los trabajos que se han realizado para llevar a cabo el ensayo de caja caliente que derivan en el conocimiento de la propiedad mencionada, son:

- Colocación de la placa de virutas de madera en bastidor con sistemas de aislamiento y acabado exterior.



Figura 19: colocación del panel WW en el bastidor y aplicación de los acabados

- Colocación de sensores de temperatura, humedad y flujo térmico.
- Secado y estabilización del cerramiento objeto de ensayo.

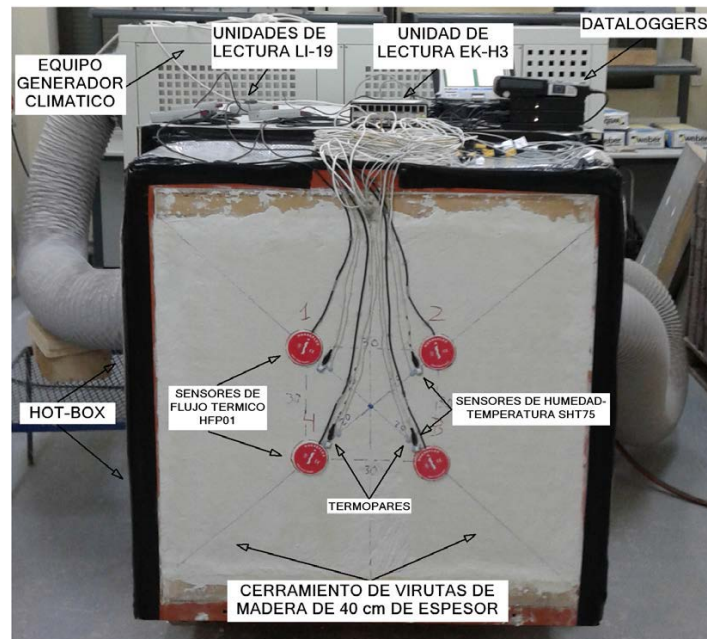


Figura 20: cerramiento finalizado

- Realización de ensayo de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario del cerramiento a una humedad relativa del 25% en el interior de la Hot-Box.
- Realización de ensayo de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario del cerramiento a una humedad relativa del 45% en el interior de la Hot-Box.
- Realización de ensayo de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario del cerramiento a una humedad relativa del 75% en el interior de la Hot-Box.
- Monitorización de datos durante cada uno de los ensayos.
- Procesamiento de datos y estudio de los resultados obtenidos en los ensayos realizados.

El equipamiento utilizado está situado en los laboratorios del Área de Ingeniería de la Construcción de la Universidad de Oviedo, sitios en los bajos del Edificio Departamental nº 6 Campus de Gijón, y consta básicamente de los siguientes elementos:

- Equipo generador climático: se trata de un equipamiento que permite mantener el control de los valores de humedad relativa y temperatura en un ambiente cerrado mediante la generación de frío, calor y humedad.
- Caja caliente calibrada: se trata de una caja caliente (Hot-Box) de 1 m³ de capacidad completamente aislada a su alrededor, a la que está conectada al generador climático,

y en cuyo interior se puede crear un ambiente de ensayo bajo condiciones controladas de temperatura y humedad.

- Marcos porta-muestras: se unen a la caja caliente calibrada, y sirven para colocar las muestras que se desean ensayar. Para éste ensayo se utilizó un marco de 0.40 m de anchura para soportar la muestra objeto de ensayo, que fue colocado y aislado sobre una de las caras de la caja caliente calibrada.



Figura 21: detalle del bastidor empleado

- Equipos de medida:
 - Medida de temperatura y humedad relativa, Sensirion EK-H3: es un registrador de datos que permite la aplicación de 20 sensores de temperatura y humedad, y la lectura de humedad relativa y temperatura de forma simultánea.
 - Medida de flujo térmico: sensores de flujo térmico, Hukseflux HFP01: se suelen utilizar en construcción para la medición tanto de la resistencia térmica de

envolventes como de su transmitancia térmica según se indica en las Normas ISO 9869, ASTM C1046 y ASTM 1155.



Figura 22: detalle de los sensores

- Unidades de lectura, Hukseflux LI-19: con registrador de datos integrado del sensor HFPO1, que puede transmitir a través de una interface USB a un PC.

Las medidas de los espesores de los elementos empleados fueron:

WeberGrueso	Panel	WeberGrueso	TOTAL
0.01	0.40	0.01	0.42

Tabla 1: resumen de los recubrimientos empleados

Y las resistencias superficiales usadas en los cálculos (UNE-EN-ISO 6946) son:

Rse	0,05
Rsi	0,15

Tabla 2: resumen de las resistencias superficiales tomadas

Asimismo, los documentos seguidos para la realización del ensayo de caja caliente se pueden resumir en:

- Ensayos referentes a Transmisión de calor y Conductividad térmica en base a proyectos de investigación previamente desarrollados en la Universidad de Oviedo (Plan Nacional BIA2008-00058, "Estudio y optimización del comportamiento higró-térmico de nuevos tipos de bloques huecos elaborados en base a hormigones ligeros para su empleo en suelos y paredes").
- Norma UNE-EN ISO 10456:2012 - "Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrótérmicas. Valores tabulados de diseño y procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados y de diseño". (ISO 10456:2007).
- Norma UNE-EN 1745:2013 - "Fábrica de albañilería y componentes para fábrica. Métodos para determinar las propiedades térmicas."
- Norma UNE-EN ISO 6946:2012 - "Componentes y elementos para la edificación. Resistencia térmica y transmitancia térmica. Método de cálculo". (ISO 6946:2007).
- Norma UNE-EN ISO 8990:1997. "Determinación de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario. Métodos de la caja caliente guardada y calibrada".
- Norma ASTM C 1363-11. "Standard Test Method for Thermal Performance of Building Materials and Envelope Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus".

Finalmente, con el fin de evaluar la posible repercusión del contenido de humedad en las propiedades aislantes, se debe mencionar que se han llevado a cabo tres ensayos para determinar la respuesta térmica del cerramiento bajo tres condiciones diferentes de humedad relativa en el interior de la caja de ensayo (Hot-Box): 25%, 45% y 70%.

2.5 Elección y selección de materiales

A partir de los resultados obtenidos mediante los ensayos (véase epígrafe resultados y discusión), resulta interesante realizar una pequeña comparación del posible sistema constructivo basado en el WW con otros sistemas más convencionales que cumplan igualmente las funciones de cerramiento térmico y estructural de edificios. Por lo general estos sistemas están formados por varias capas que cumplen diversas funciones tal y como se ha comentado con anterioridad.

La comparación se puede realizar mediante un análisis atributivo (basado en el área selección y elección de materiales) el cual sienta sus pilares en el cálculo y ponderación de unos índices de

mérito (relaciones matemáticas deducidas de modelos físicos) que se deben maximizar o minimizar con el objetivo de optimizar una determinada propiedad.

Dado que las cualidades en las que se basa la motivación del estudio de este material son la baja conductividad térmica, la capacidad estructural y las ventajas derivadas de construir con un sistema basado en módulos, se tomarán varios índices de mérito relacionados con estas propiedades que ponderarán de manera equitativa las tres capacidades.

Por el lado estructural, las dos propiedades de los materiales de construcción más interesantes a tener en cuenta en el diseño de una vivienda, por ejemplo, serían la resistencia a flexión (requerida en las zonas de huecos) y a compresión (requerida por el apoyo de la cubierta entre otras cosas).

Por su parte, el aislamiento energético se relaciona fácilmente con el fenómeno de conducción térmica (se obviará aquí fenómenos de radiación y convección) y como se verá, con el de calor específico por temas de inercia y estabilidad térmica.

Finalmente, las principales ventajas que se pueden extraer de levantar una vivienda en base a unos paneles (sistema modular) prefabricados serían el ahorro económico y de tiempo de construcción y ejecución de la obra. Ambos se pueden relacionar con la única variable de tiempo (a menor tiempo menor coste de mano de obra, por ejemplo).

Hay que considerar además que para materiales de construcción resulta muy beneficioso el utilizar la menor masa posible por razones obvias tales como el precio (este suele venir expresado en unidades monetarias por unidad de peso) la manejabilidad, el transporte o la facilidad de colocación en obra (sin olvidar los problemas ya comentados en operaciones de carga y descarga de paneles de mucho peso).

2.5.1 Deducción de los índices de mérito

2.5.1.1 Trabajo a compresión

Se toma como base de análisis un machón que debe soportar el peso del forjado:

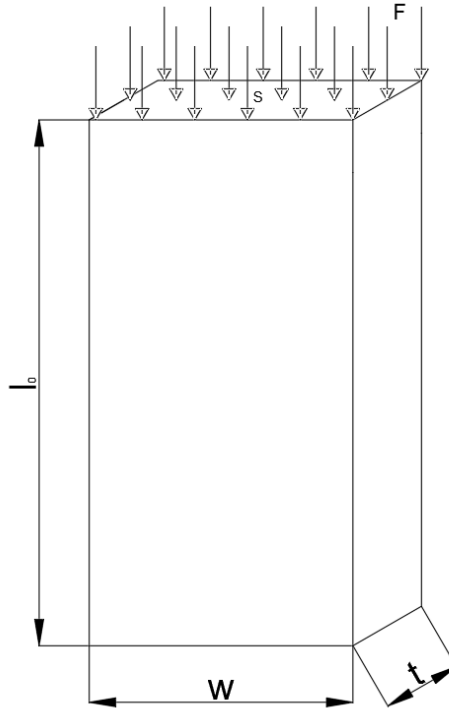


Figura 23: conceptualización del machón sometido al peso del forjado

Éste queda por tanto sometido a una fuerza F (peso del forjado), teniéndose que la tensión derivada debe ser menor que la tensión máxima admisible característica del sistema considerado:

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{t \cdot w} < \sigma_y = E \cdot \frac{\Delta l_{max}}{l_0} \rightarrow w > \frac{F \cdot l_0}{t \cdot E \cdot \Delta l_{max}}$$

Donde:

σ = tensión soportada por el machón

S = superficie de apoyo del forjado

t, w y l_0 = variables dimensionales del machón según esquema de la figura 23

σ_y = límite elástico o tensión máx. admisible utilizada en los cálculos estructurales

E = módulo de young o de elasticidad del material

Δl_{max} = máxima variación de longitud admisible en el machón

De aquí se toman las variables Δl_{max} , F , t y l_0 como constantes al no depender del material y estar fijadas por la geometría y demás características del proyecto en particular. Se escoge para despejar la variable w por ser esta la dimensión que más oscilará entre distintas edificaciones como resultado del amplio abanico de posibilidades a la hora de configurar huecos.

Despejando por tanto e introduciendo dentro de la expresión que relaciona masa, densidad y dimensiones de un cuerpo, se tiene:

$$m = \rho \cdot t \cdot w \cdot l_0 > \rho \cdot t \cdot \frac{F \cdot l_0}{t \cdot E \cdot \Delta l_{max}} \cdot l_0 = cte \cdot \frac{\rho}{E}$$

Donde:

m = masa del machón

ρ = densidad del material del machón

Se deduce que la masa se relaciona con la densidad y el módulo de elasticidad a través de una constante definida por las particularidades de la estructura estudiada. Con eso, se puede observar que para minimizar masa se debe maximizar el siguiente valor (se podrían llegar a unas conclusiones análogas manteniendo constante la rigidez), que se corresponde con el primer índice de mérito:

$$M_1 = \frac{E}{\rho}$$

2.5.1.2 Trabajo a flexión

Para conceptualizar el esfuerzo que han de soportar los materiales de construcción que gravitan por encima de los huecos (la puerta de entrada, por ejemplo), se puede tomar una viga biapoyada sobre la que actúa una carga constante y uniforme (se supone además que se cumple la Ley de Hooke y las Hipótesis de Navier).

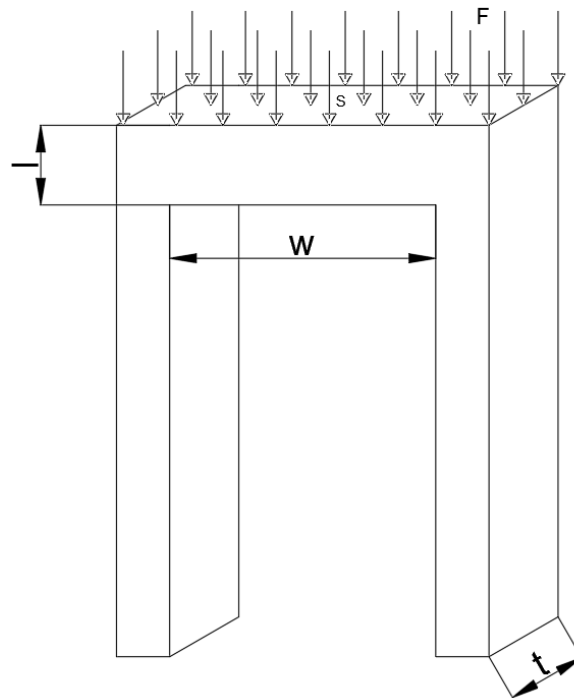


Figura 24: conceptualización de la vigueta que gravita por encima de un hueco

Se puede aplicar entonces la Ley (o fórmula) de Navier (ecuación fundamental de la flexión), que proporciona las tensiones normales producidas por un momento flector en la misma:

$$\sigma_z = \frac{M_x \cdot y_x}{I_x} \rightarrow \sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_{min}}$$

Donde:

σ_z = tensión soportada por la vigueta en el eje z

M_x = momento flector a lo largo del eje x

y_x = distancia de una fibra cualquiera a la fibra neutra

I_x = segundo momento de inercia de la sección de la vigueta

σ_{max} = máxima tensión sobre la vigueta

M_{max} = momento flector máximo aplicado

W_{min} = módulo resistente mínimo de la sección

En principio (generalmente), la vigueta que gravita por encima de puertas y ventanas, es rectangular, por lo que sustituyendo en la expresión anterior y procediendo con el mismo razonamiento que en el caso anterior:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} \cdot l/2}{t \cdot l^3/12} = \frac{6 \cdot M_{max}}{t \cdot l^2} < \sigma_y \rightarrow l > \sqrt{\frac{6 \cdot M_{max}}{t \cdot \sigma_y}}$$

Despejando de aquí la variable l (no se necesita sustituir $M_{max} = \frac{F \cdot w}{8}$ por solo depender geoméricamente de la constante w) y sustituyendo en la expresión de la masa:

$$m = \rho \cdot t \cdot w \cdot l > \rho \cdot t \cdot w \cdot \sqrt{\frac{6 \cdot M_{max}}{t \cdot \sigma_y}} = cte \cdot \frac{\rho}{\sigma_y^{1/2}}$$

El segundo índice de mérito a maximizar (tomando constantes los parámetros geométricos y el momento o esfuerzo solicitado) será, por tanto:

$$M_2 = \frac{\sigma_y^{1/2}}{\rho}$$

Realizando ahora el mismo procedimiento pero maximizando rigidez se parte de la ecuación de la elástica:

$$E \cdot I \cdot \frac{d^2y}{dx} = -M(x)$$

Donde:

$y =$ forma geométrica que toma la deformación de la vigueta

Para el caso que ocupa, la función de M(x) resulta:

$$M(x) = \frac{F}{2} \cdot x - q \cdot x^2 \cdot \frac{t}{2} = \frac{F}{2} \cdot x - F \cdot x^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot w}$$

Se debe integrar dos veces para llegar a la ecuación de la elástica $y(x)$, por lo que se generarán dos constantes de integración. Para conocer su valor se tiene que:

- i) La derivada de dicha ecuación tiene un valor exactamente igual a cero cuando la distancia al origen es igual a la mitad de la longitud (w) por existir un mínimo relativo (pasa de tener pendiente negativa a positiva justo en este punto por simetría):

$$\frac{d}{dx}y(x = w/2) = 0$$

- ii) La viga, por estar biapoyada, tiene su movimiento restringido en el plano vertical justo en los apoyos, por lo que:

$$y(x = 0) = y(x = w) = 0$$

A partir de estas condiciones de contorno e integrando la ED de segundo orden, se llega a la ecuación de la elástica para el caso contemplado:

$$y(x) = \left[F \cdot \frac{x^4}{24 \cdot w} - F \cdot \frac{x^3}{12} + F \cdot \frac{x \cdot w^2}{24} \right] \cdot \frac{1}{E \cdot I}$$

De donde fácilmente se puede obtener la flecha máxima sustituyendo $x=w/2$, resultando:

$$\delta = \frac{5}{384} \cdot \frac{F \cdot w^3}{E \cdot I}$$

Donde:

$\delta =$ flecha máxima

Procediendo de manera similar a los modelos anteriores:

$$\delta = \frac{5}{384} \cdot \frac{F \cdot w^3}{E \cdot I} = \frac{5}{32} \cdot \frac{F \cdot w^3}{E \cdot t \cdot l^3} < \delta_{max} \rightarrow l > \left(\frac{5}{32} \cdot \frac{F \cdot w^3}{E \cdot t \cdot \delta_{max}} \right)^{1/3} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m = \rho \cdot t \cdot w \cdot l > \rho \cdot t \cdot w \cdot \left(\frac{5}{32} \cdot \frac{F \cdot w^3}{E \cdot t \cdot \delta_{max}} \right)^{1/3} = cte \cdot \frac{\rho}{E^{1/3}}$$

Donde:

$\delta_{max} =$ flecha máxima admisible

Por lo que para minimizar la masa se debe buscar el valor más alto de:

$$M_3 = \frac{E^{1/3}}{\rho}$$

2.5.1.3 Aislamiento térmico

Para cuantificar las pérdidas calóricas de una vivienda, se tendrá en cuenta en este apartado el ciclo de calentamiento completo. Esto quiere decir que, en primer lugar, hay que aumentar la

temperatura de toda la envolvente térmica, la cual, en un primer momento, se encuentra a temperatura ambiente.

Si se toma para estudiar el perfil de una pared de espesor t (tal y como se viene haciendo hasta ahora), bajo la hipótesis de que es totalmente homogénea, si se calienta el interior de la vivienda hasta que se cree un gradiente de temperaturas, se tiene:

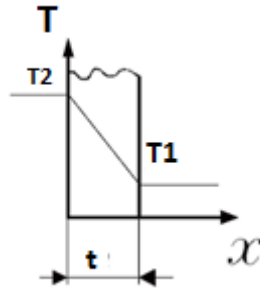


Figura 25: conceptualización del gradiente térmico alcanzado en una pared

Desde que se inició el calentamiento de la vivienda hasta que se crea ese gradiente de temperaturas, se tienen gasto de energía que se puede calcular según (tomando origen de coordenadas en T1):

$$q_1 = \int_0^t C_p \cdot \rho \cdot T(x) \cdot dx = \int_0^t C_p \cdot \rho \cdot \frac{\Delta T}{t} \cdot x \cdot dx = C_p \cdot \rho \cdot \Delta T \cdot \frac{t}{2}$$

Donde:

$q_1 =$ gasto de energía

$C_p =$ calor específico del material del cerramiento

$T(x) =$ temperatura en el punto x

$\Delta T =$ gradiente térmico alcanzado

Una vez alcanzado el gradiente de temperaturas, mientras no haya cambios en la temperatura exterior e interior (una disminución en la temperatura exterior por ejemplo supondría una mayor absorción de energía por parte de la envolvente), este valor se mantendrá constante. No obstante, en este punto, comienzan a existir pérdidas por conducción térmica (en realidad en cualquier diferencia de temperaturas exterior e interior existe conducción, pero solo se

comienza a contabilizar aquí por realizar un estudio estático y porque hasta este punto las pérdidas son relativamente pequeñas). Estas pérdidas se pueden expresar numéricamente para un gradiente de temperaturas fijo y en función del tiempo como (lógicamente a mayor tiempo mayores pérdidas):

$$q_2 = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{t} \cdot \text{tiempo}$$

Donde:

$\lambda = \text{conductividad térmica del material del sistema}$

En realidad la variable ΔT , se va modificando con el paso del tiempo, ya que, como mínimo, la temperatura exterior varía. Las anteriores expresiones son válidas por tanto para un tiempo determinado durante el cual este gradiente se mantiene constante.

Si se suman ambas pérdidas y la expresión resultante se deriva con respecto al espesor (t) y se iguala a cero, se puede encontrar un mínimo cuando el espesor es igual a $\sqrt{2 \cdot \alpha \cdot \text{tiempo}}$ tal y como se ejemplifica en la siguiente figura (donde α representa la difusividad térmica del material del cerramiento):

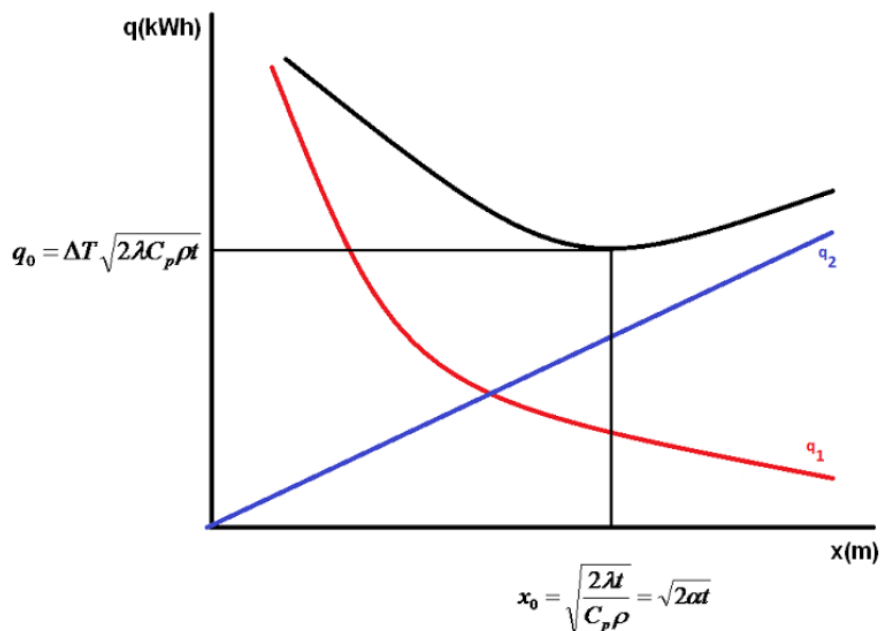


Figura 26: variación de los dos consumos considerados en función del espesor de la pared y punto de equilibrio

Sustituyendo este valor en la expresión $q = q_1 + q_2$, se tiene que:

$$q(t = \sqrt{2 \cdot \alpha \cdot tiempo}) = \Delta T \cdot \sqrt{2 \cdot \lambda \cdot C_p \cdot \rho \cdot tiempo}$$

Procediendo de manera análoga a los casos anteriores, se toman como constantes el gradiente de temperatura y el tiempo por no estar en nuestro poder establecer estas variables a voluntad. Si se pretende minimizar entonces las pérdidas energéticas, se debe maximizar el siguiente índice:

$$M_4 = \frac{1}{\sqrt{\lambda \cdot C_p \cdot \rho}}$$

Éste es además lógico desde el punto de vista físico al pensar que, por un lado, por propia definición de la conductividad térmica, cuanto menor sea ésta, menor energía cinética transmitirá el material (menos pérdidas energéticas), y por otro, cuanto menor sea el valor de calor específico, menores cantidades de calor absorberá o cederá la envolvente de un edificio cuanto se produzcan cambios de temperatura (durante el régimen de invierno, principalmente, se crean gradientes muy elevados que implican altos q_1).

2.5.1.4 Amortiguamiento térmico

Las temperaturas interior y exterior de un edificio varían cíclicamente a lo largo de las horas del día (generalmente durante el día la casa muestra ganancia calórica y durante la noche pérdida), pudiendo ser aproximadas mediante sinusoides (T_0 hace referencia a la temperatura superficial exterior y T_1 a la temperatura superficial interior):

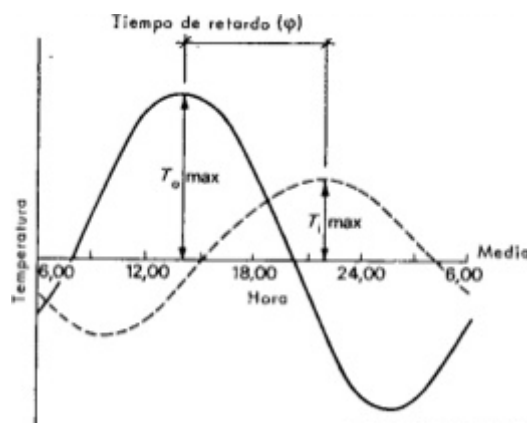


Figura 27: variación cíclica de las temperaturas interiores y exteriores de un cerramiento

De estas representaciones cartesianas se pueden extraer varias conclusiones relacionadas con el aislamiento y la inercia térmica de la envolvente (de modo genérico con sus características termo-físicas):

- i) Existe un retardo de tiempo mientras el calor pasa (hacia dentro o hacia fuera) a través de las capas de cerramiento (no es una transferencia o conducción instantánea), al que se le conoce como desfase térmico (φ) o tiempo de retardo (gráficamente crestas de ondas desfasadas). Matemáticamente, este valor se puede aproximar con:

$$\varphi = \frac{x}{2} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{\alpha \cdot \pi}}$$

- ii) Existe un decremento en la magnitud de la energía transmitida a la que se conoce como amortiguamiento térmico (gráficamente amplitud de ondas diferente) y que suele venir expresada por el factor de amortiguamiento. Matemáticamente este coeficiente se puede aproximar según:

$$\theta = \frac{T_{0,max}}{T_{1,max}} = \exp\left(-x \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\alpha \cdot T_1}}\right)$$

Se pueden observar en ambas expresiones expuestas, que la difusividad del cerramiento juega un papel fundamental.

En lo referido a nuestro clima templado, es deseable en primer lugar tener un desfase térmico elevado de entre 8 y 12h. De esta forma, los aportes de energía calórica diurna llegan al interior de la edificación durante la noche, precisamente cuando más necesarios son para contrarrestar los efectos de la bajada de temperatura exterior. Continuando con el razonamiento, tras haber cedido gran parte de su calor almacenado durante la noche, los cerramientos absorben de nuevo energía durante el día reduciendo así la temperatura interior y presentando unas condiciones mucho más confortables (ventilación natural).

Finalmente, es lógico pensar que lo más deseable es tener un factor de almacenamiento pequeño, ya que, cuanto menor sea éste, más estabilidad térmica se concentrará en los hogares y sus temperaturas se verán menos afectadas por la temperatura exterior.

De todo esto se puede extraer el quinto índice de mérito a maximizar (aumentando esto la inercia y por tanto la estabilidad térmica):

$$M_5 = \frac{1}{\alpha}$$

2.5.1.5 Condensaciones intersticiales

El flujo de vapor de agua que se produce a través de una pared mediante difusión depende del gradiente de presiones parciales del vapor de agua (relacionado con la cantidad del gas) a ambos lados de la misma (fuerza impulsora), del espesor y el área y de una propiedad física del material denominada permeabilidad, tal y como se muestra en la siguiente expresión:

$$\frac{dm}{dt} = A \cdot \delta \cdot \frac{\Delta P}{t}$$

Donde:

m = masa de vapor que atraviesa la pared en función del tiempo

A = área de pared

δ = permeabilidad del material

ΔP = gradiente de presiones de vapor creado a ambos lados de la pared

De esta ecuación, se puede extraer que la única variable dependiente del material considerado es la permeabilidad y que, si se pretende maximizar la el paso del vapor con el objetivo de minimizar las condensaciones intersticiales (si el aire de los poros de los materiales se rellenan de agua, la conductividad térmica aumenta enormemente), se deben buscar materiales que posean un alto valor.

Generalmente esta propiedad viene referida de manera relativa según el parámetro conocido como factor de resistencia a la difusión de vapor (μ), que se determina según:

$$\mu = \frac{\delta_{aire}}{\delta_{material}}$$

De donde se concluye el sexto índice de mérito:

$$M_6 = \frac{1}{\mu}$$

Este índice de mérito puede resultar confuso al principio. Se debe entender que, manteniendo un factor de resistencia bajo, se permite el paso de vapor a través de la envolvente y se mejora la transpirabilidad del edificio. Sin embargo, debe colocarse una barrera de vapor en el lado caliente del cerramiento para evitar que el vapor de agua caliente llegue a la zona fría en proporciones suficientemente grandes (humedad relativa) como para que condense.

2.5.1.6 Tiempo de construcción

Es fácil comprobar la redundancia del primer y el tercer índice de mérito. En ambos se busca maximizar el módulo de elasticidad específico con el objetivo de conseguir una máxima rigidez con un mínimo peso. Es debido a esto que se obvia el tercer índice de mérito en pro del primero.

Para contar, no obstante, con 6 índices de mérito con los que realizar la selección, se ha propuesto el empleo de manera cualitativa del tiempo de ejecución del proyecto de obra. Si bien un menor tiempo de construcción ya es de por sí un buen incentivo, lo es aún más el ahorro económico en mano de obra asociado.

Con esto, el índice de mérito a maximizar sería:

$$M_7 = \frac{1}{te}$$

Donde:

te = tiempo de ejecución de la obra

Puesto que el análisis atributivo se realiza de forma relativa al resto de materiales, se puede asignar puntuaciones cualitativas a cada sistema. Así, se ha considerado un valor de 100 para el sistema que más tiempo lleva (el de las casas pasivas), 30 para el nuevo material y 70 y 60 para los sistemas tradicionales.

2.5.2 Análisis atributivo

Deducidos los índices de mérito, y teniendo en cuenta que se desea ponderar a porcentajes equitativos las propiedades estructurales/térmicas, se propone la siguiente fórmula de análisis atributivo:

M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
$\frac{E}{\rho}$	$\frac{\sigma_{max}^{1/2}}{\rho}$	$\frac{1}{t}$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda \cdot C_p \cdot \rho}}$	$\frac{1}{\alpha}$	$\frac{1}{\mu}$
17	17	33	11	11	11

Tabla 3: resumen de los índices de mérito y pesos empleados en el análisis atributivo

De tal manera que la expresión utilizada para valorar los materiales (sobre un valor máximo de cien) consiste en:

$$K = 17 \cdot \frac{M_{1,material}}{M_{1,maximo}} + 17 \cdot \frac{M_{2,material}}{M_{2,maximo}} + 33 \cdot \frac{M_{3,material}}{M_{3,maximo}} + 11 \cdot \frac{M_{4,material}}{M_{4,maximo}} + 11 \cdot \frac{M_{5,material}}{M_{5,maximo}} + 11 \cdot \frac{M_{6,material}}{M_{6,maximo}}$$

2.5.3 Expresiones de propiedades compuestas

Para el caso que nos ocupa, los sistemas de cerramiento se pueden considerar como materiales compuestos laminados. Las propiedades físicas de éste han de tomarse por tanto como globales y expresarlas por unidades de dimensión del conjunto. La teoría que intenta aproximar estos valores se conoce comúnmente como regla de las mezclas para materiales compuestos (estructurales laminados en nuestro caso).

Siendo este el caso, las propiedades de densidad y calor específico (independientes de la dirección analizada) globales del sistema se pueden obtener con:

$$\rho_c = \sum \rho_i \cdot V_i$$

$$(C_p)_c = \sum (C_p)_i \cdot V_i$$

$$V_i = \frac{t_i}{t_c}$$

Donde:

ρ_c = densidad global del material compuesto laminado

ρ_i = densidad del material i del sistema

$(C_p)_c$ = calor específico global del material compuesto laminado

$(C_p)_i$ = calor específico del material i del sistema

V_i = fracción en volumen del material i del sistema

t_c = espesor global del material compuesto laminado

t_i = espesor del material i en el sistema

Por su parte, el módulo de elasticidad y la tensión asociada al límite elástico en la dirección paralela al laminado (ya que serán trabajados en esta) vendrán dadas por:

$$E_c = \sum E_i \cdot V_i$$

$$(\sigma_y)_c = \sum (\sigma_y)_i \cdot V_i$$

Donde:

E_c = *módulo de elasticidad global del material compuesto laminado*

E_i = *módulo de elasticidad del material i del sistema*

$(\sigma_y)_c$ = *límite elástico global del material compuesto laminado*

$(\sigma_y)_i$ = *límite elástico del material i del sistema*

Finalmente, puesto que el flujo de calor y la difusión de vapor se producen principalmente en las paredes en el sentido horizontal, la conductividad térmica global y el factor de resistencia deben estudiarse en la dirección perpendicular al laminado. Con esto (sin considerar resistencias superficiales):

$$R_i = \frac{t_i}{\lambda_i} \rightarrow C_c = \frac{1}{\sum R_i} \rightarrow \lambda_c = \frac{t_c}{C_c}$$

R_i = *resistencia del material i del sistema ofrecida al paso de calor*

λ_i = *conductividad térmica del material i del sistema*

C_c = *conductancia térmica global del material compuesto laminado*

λ_c = *conductividad térmica global del material compuesto laminado*

$$\mu_c = \frac{t_c}{\sum \frac{t_i}{\mu_i}}$$

Donde:

μ_c

= *factor de resistencia a la difusión de vapor global del material compuesto laminado*

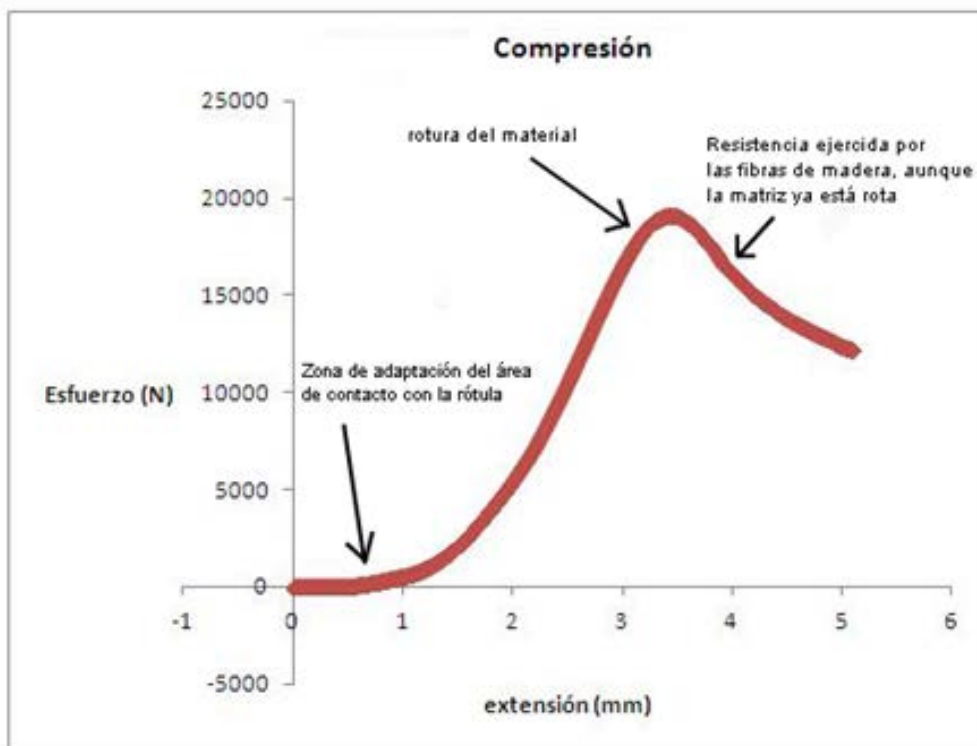
μ_i = *factor de resistencia a la difusión de vapor del material i del sistema*

3. Resultados y discusión

3.1 Resultados estructurales

3.1.1 Flexión y compresión

Los ensayos de compresión y flexión realizados sobre la máquina universal INSTRON 5582 han arrojado para cada densidad y dirección del espacio curvas tensión-deformación sobre las que trabajar para obtener propiedades importantes como el módulo de elasticidad o la tensión de rotura del material (ambas propiedades imprescindibles para el diseño de un sistema modular). Dos curvas “tipo” de las dibujadas por este dispositivo se muestran a continuación:



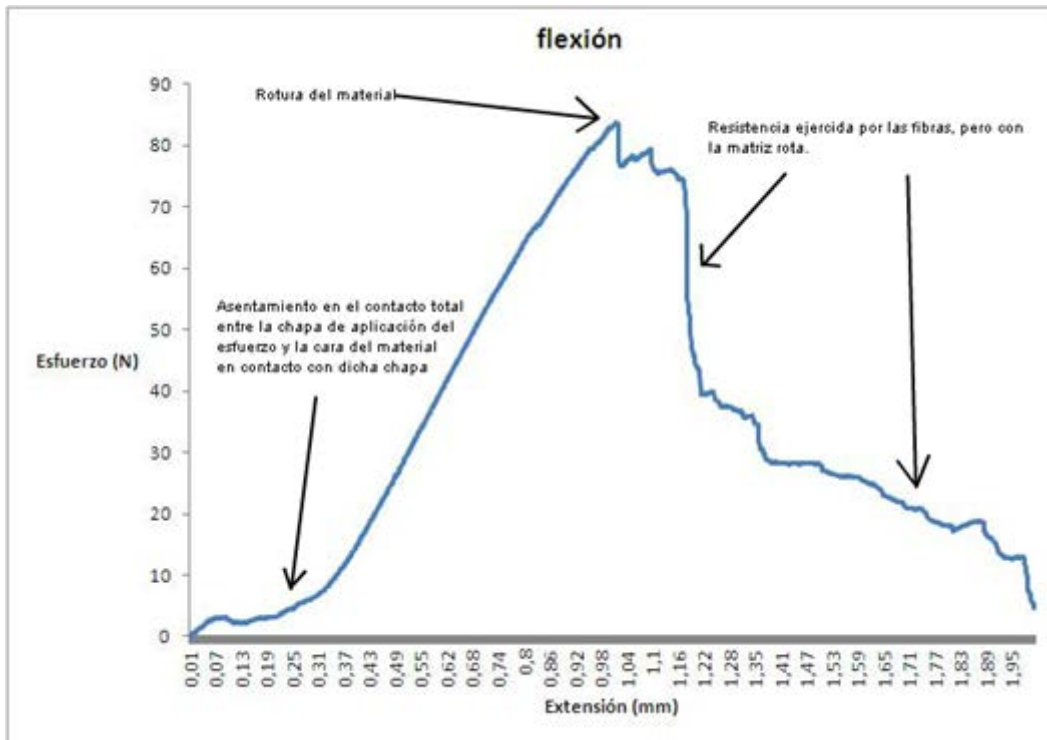


Figura 28: curvas tipo de compresión y flexión

En ambas, se pueden estudiar tres zonas claramente diferenciadas:

- i) Una primera zona de "asentamiento" de la célula de carga a la superficie del material, donde se aprecia una pendiente de muy poca inclinación en la curva. Como ya se ha comentado previamente, las probetas presentan desperfectos (leves irregularidades en las superficies) que inducen a un periodo de adaptación de la rótula (compresión) o de los cilindros (flexión) a las chapas colocadas sobre el material.
- ii) Una segunda zona donde realmente existe esfuerzo de compresión o flexión sobre el material, generando esto unas pendientes mucho más inclinadas como consecuencia de la resistencia ofrecida a la deformación. Se puede apreciar que esta región de la curva permanece con pendiente prácticamente constante, habilitando esto al cálculo del módulo de elasticidad como medida de su tangente. Alcanza el momento más álgido antes de producir descenso en el punto de rotura, de donde a su vez se obtiene la tensión de rotura del material.

- iii) Una última o tercera donde la probeta ya se considera rota. Se puede apreciar en la gráfica que la caída no es brusca, si no que adopta un descenso leve como consecuencia de una resistencia proporcionada por fibras aún sin romper.

Tomando entonces cada gráfica generada, se pueden extraer los valores de módulo de elasticidad y tensión de rotura medios, aplicando las expresiones comentadas en el apartado de parte experimental.

Los resultados finales (después de analizar cada curva por separado y calcular media y desviación típica de cada propiedad estudiada) obtenidos para el caso de los ensayos de flexión, en función de la dirección del espacio considerada, se muestran en la siguiente tabla:

<i>Variable/Dirección</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>
<i>Tensión de rotura media (kp/cm²)</i>	0,155	4,74	2,055
<i>Desviación típica</i>	0,029	0,7	0,267
<i>Módulo de elasticidad medio (MPa)</i>	0,853	17,514	3,831
<i>Desviación típica</i>	0,1	4,48	1,8

Tabla 4: resultados de los ensayos de flexión

Y para el caso de los ensayos de compresión:

<i>Variable/Dirección</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>
<i>Tensión de rotura media (kp/cm²)</i>	3,60	3,16	1,35
<i>Desviación típica</i>	0,09	0,04	0,01
<i>Módulo de elasticidad medio (MPa)</i>	31,125	21,924	5,078
<i>Desviación típica</i>	4,07	3,54	1,02

Tabla 5: resultados de los ensayos de compresión

3.1.2 Resistencia de conectores

Los ensayos realizados a tracción mediante la varilla roscada dependen, al igual que en los de flexión y tracción, de la dirección del espacio ensayada (en este caso solo dos, siempre paralelas a las fibras), pero en este caso también hay que tener en cuenta los adhesivos utilizados.

En todos los ensayos se generan sin embargo un tipo de curvas característica, en la que se pueden diferenciar tres zonas bien definidas:

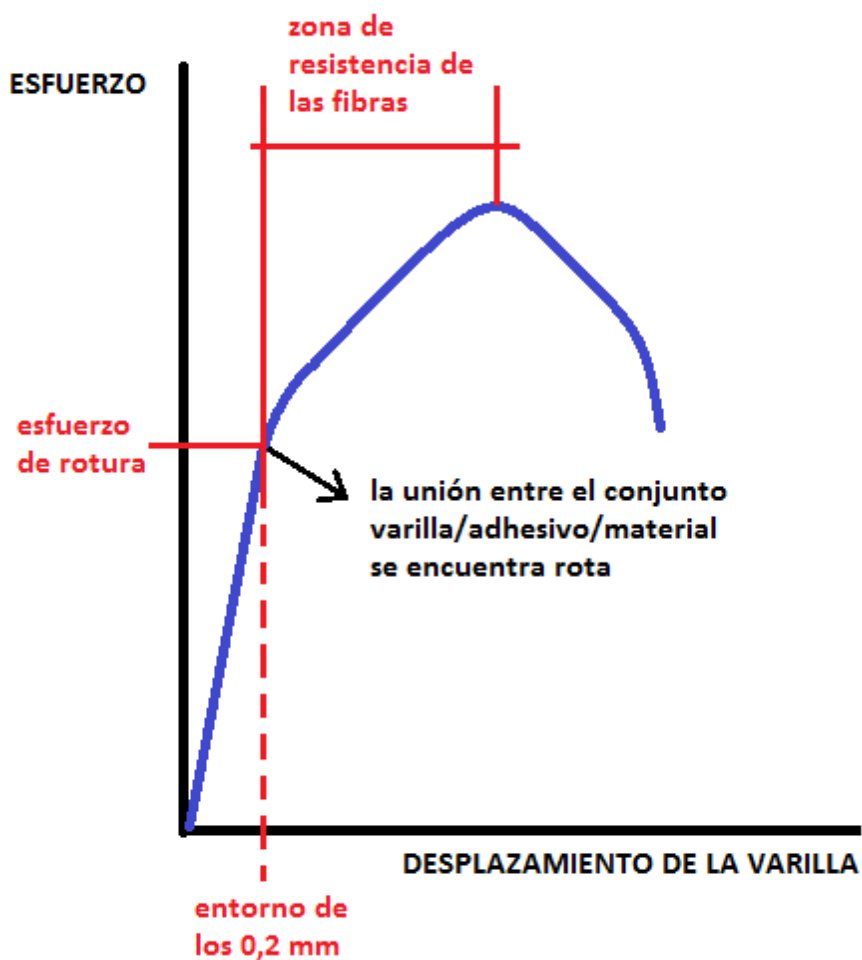


Figura 29: curva tipo de los ensayos de resistencia de conectores

- i) Una primera donde la relación esfuerzo-desplazamiento resulta constante.
- ii) Una segunda, donde la pendiente sí varía además de ser claramente inferior a la de la primera zona.
- iii) Una tercera o última donde la pendiente es negativa.

Para interpretar estas representaciones, hay que tener en cuenta que, a la hora de aplicar el adhesivo, este penetra por los poros e interespacios del material dentro de un cierto campo espacial de actuación. Una vez seco, su superficie de contacto depende de cuánto haya penetrado en el material. Puesto que la varilla está unida al material compuesto a través de este adhesivo, es precisamente esta superficie de contacto adhesivo-material la que se opone a la extracción de la varilla cuando sobre ella se le aplica el esfuerzo de tracción.

La primera de las zonas resulta por tanto de esta interacción varilla-adhesivo-material. El punto máximo alcanzado (justo antes del cambio de pendiente) es el resultado de la rotura de esta intercara, y es considerado como el punto válido de esfuerzo máximo de tracción (criterio de rotura). La varilla comienza a ser extraída entonces por la máquina, arrastrando con ella un “cono” de material (precisamente el campo hasta donde el adhesivo había conseguido penetrar).

Si bien la pendiente es claramente menor en este periodo, no llega a ser negativa debido a que las fibras y el cemento del material compuesto todavía ejercen una resistencia a la extracción del “cono” (aún existe rozamiento en la intercara a pesar de que ya está rota).

Finalmente, una vez todas las fibras se han roto, la varilla consigue ser extraída sin mayores complicaciones, cayendo la línea súbitamente.

Como comprobación de estas interpretaciones y con el fin de conocer más acerca de la interacción entre las tres partes implicadas en este proceso (varilla de acero, adhesivo y material compuesto), se realizaron dos experimentos.

En el primero de ellos, el ensayo de tracción se pausó antes de llegar al punto de rotura (trabajando por tanto dentro de la primera zona de la curva), eliminando a continuación la tensión aplicada.

El resultado, es una recuperación elástica del material, tal y como se puede observar en la siguiente imagen (cada color representa una curva tensión-deformación para la misma probeta y ensayo):

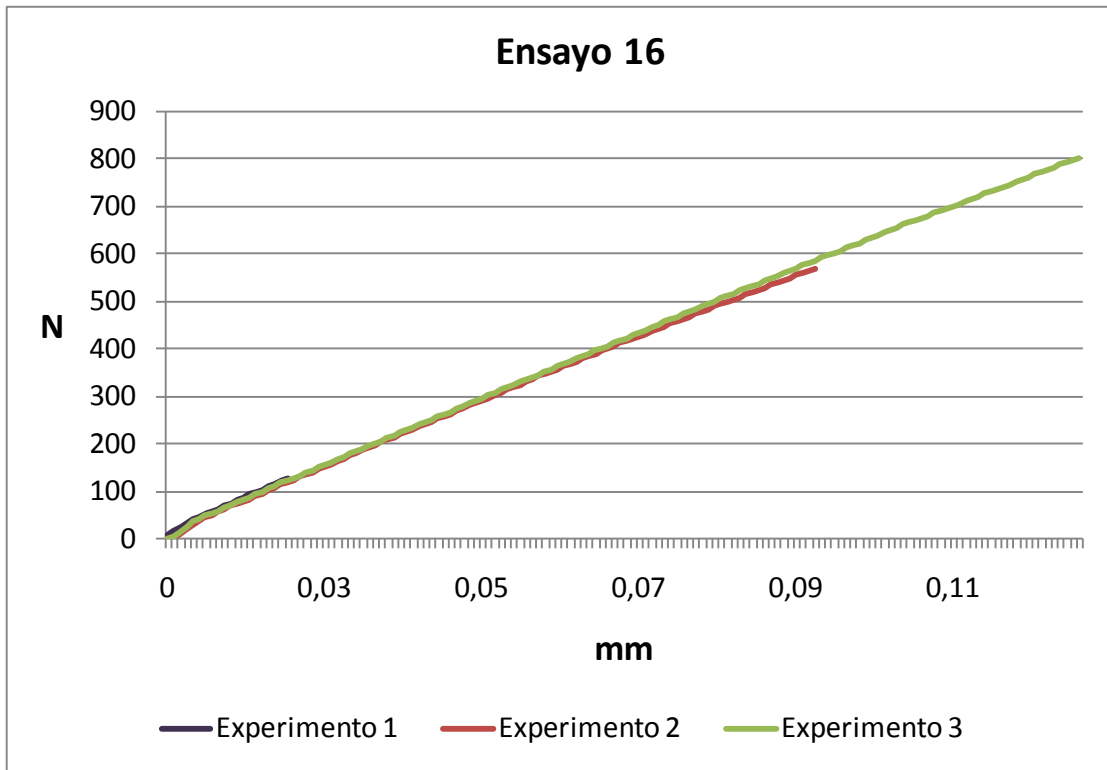


Figura 30: primera prueba de recuperación elástica en los ensayos de resistencia de conectores

La superposición de las tres líneas defiende la idea de que el material está trabajando aquí en una zona elástica, donde la recuperación de las condiciones iniciales es posible.

En el segundo experimento, sin embargo, se continuó hasta sobrepasar este límite de tracción máximo, saliendo por tanto de la primera zona (o zona elástica). El resultado de este experimento se puede ver en la figura siguiente:

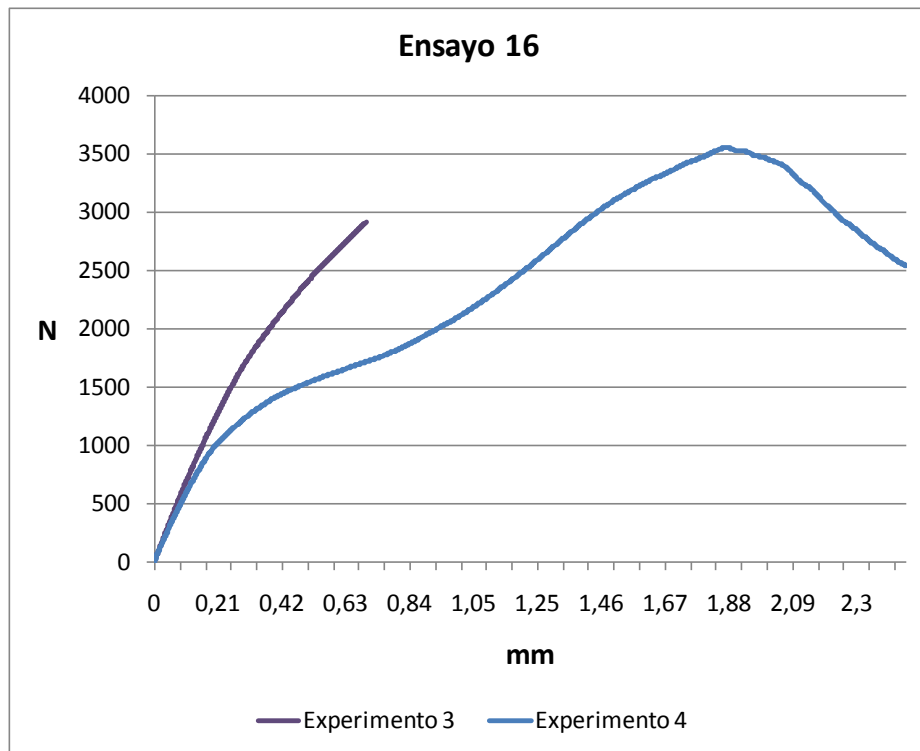


Figura 31: segunda prueba en los ensayos de resistencia de conectores

En este caso, prácticamente no existe una recuperación elástica como la mencionada en el experimento anterior. Esto es resultado de que una vez superado el punto tomado como criterio de rotura, las fibras rompen, siendo esta rotura permanente. La poca recuperación que existe es debida a las fibras que quedan sin romper, y una vez superado este límite, toda la resistencia a la tracción es proporcionada por un rozamiento en la intercara entre el cono y la probeta.

Tomando por tanto este límite (justo antes del cambio de pendiente) como el esfuerzo máximo que puede existir entre módulos y elementos estructurales interconectados, se tienen los siguientes resultados:

	<i>Adhesivo 1</i>		<i>Adhesivo 2</i>		<i>Adhesivo 3</i>		<i>Adhesivo 4</i>	
	0º	90º	0º	90º	0º	90º	0º	90º
<i>F (Kp)</i>	96.1	78.4	94.8	120.5	133.2	82.0	118.0	138.0

Tabla 6: resultados de ensayos de resistencia de concetores para las direcciones x e y y diferentes adhesivos

Dados los resultados (siempre referidos a las dos direcciones paralelas a las fibras del material), el adhesivo más adecuado para este material es el número cuatro (cemento rápido basado en

un mortero de fraguado rápido, con naturaleza del árido silico-carbonática). Además, supone el sistema de anclaje más barato, sacando en este sentido amplias ventajas al resto.

En cuanto al resto de variables analizadas en estos ensayos, los mejores resultados (correspondientes a los presentados) se han conseguido con un taladro de 12mm y una profundidad de 30mm.

Tomando estos valores, se puede garantizar un esfuerzo resistente de más de 100kp, que será suficiente para el desarrollo de los módulos estructurales objetivos del proyecto, como se verá más adelante.

3.2 Resultados funcionales

3.2.1 Caja caliente

Los valores de transmitancia y resistencia térmica, así como la conductividad térmica equivalente del cerramiento utilizando el Método de la Caja Caliente (Hot-Box) se muestran en la tabla siguiente:

RH (%)	RH_{media} (%)	ΔT (K)	q (W/m ²)	U (W/m ² ·K)	R (m ² ·K/W)	λ (W/m·K)
25	38.22	19.59	5.60	0.286	3697	0.108
45	53.58	32.72	10.01	0.306	3468	0.115
75	70.58	31.84	11.07	0.348	3078	0.130

Tabla 7: resultados del ensayo de caja caliente

Se puede observar la baja conductividad térmica del material y por tanto su elevado aislamiento térmico. El orden de magnitud de este primer valor, es generalmente conseguido sólo con materiales que conforman la envolvente térmica, pero casi en ningún caso con materiales que además tengan una función estructural.

Por otra parte, en base a estos resultados, se puede deducir (dentro del rango ensayado), la siguiente correlación (realizada por mínimos cuadrados) conductividad térmica-humedad relativa:

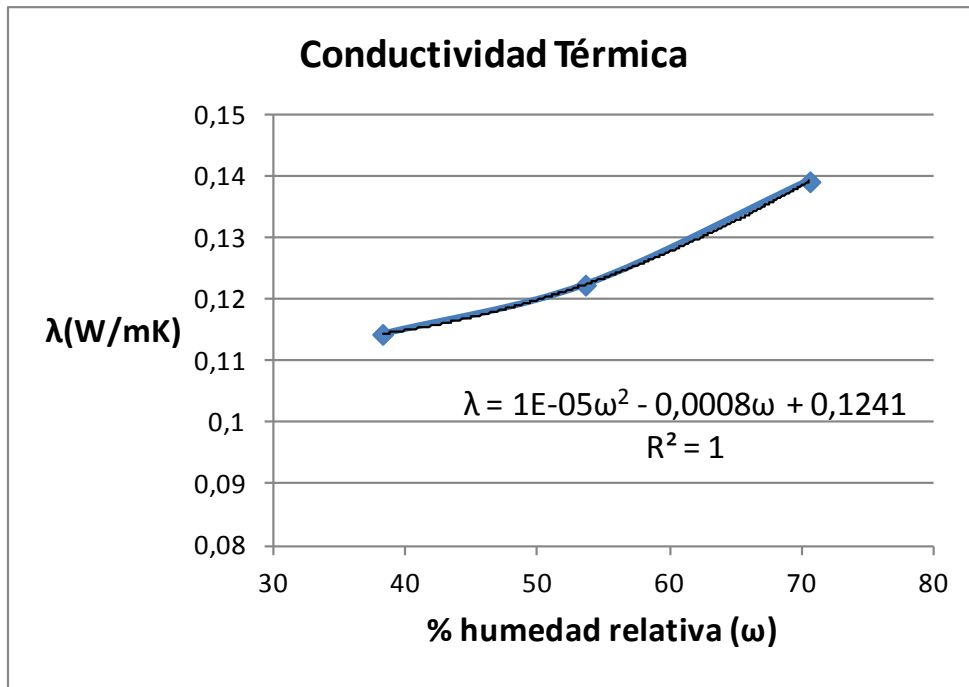


Figura 32: relación entre conductividad térmica y humedad relativa reinante

Escrita en notación científica:

$$\lambda = 10^{-3} \cdot \omega^2 - 8 \cdot 10^{-4} \cdot \omega + 0,1241$$

Donde:

$\lambda =$ conductividad térmica del material

$\omega =$ humedad relativa

3.2.2 Otros valores de interés

Los valores anteriormente obtenidos permiten correlacionar los paneles particularmente obtenidos para el estudio, con otros comúnmente utilizados para conformar la envolvente térmica de edificios. En este sentido, podemos tomar como valores aproximados de estos paneles:

Resistencia al fuego	Euroclass B-s1, d0
Resistencia a la difusión del vapor de agua (μ)	5
Calor específico (Cp)	1,8 kJ/K·kg

Tabla 8

3.3 Comparación en base a los resultados

Los sistemas sometidos a comparación son:

- i) Sistema tradicional (casi no usado en la actualidad), en el que se coloca de exterior a interior, una hoja de ladrillo macizo o perforado, una cámara de aire y otra hoja de ladrillo hueco

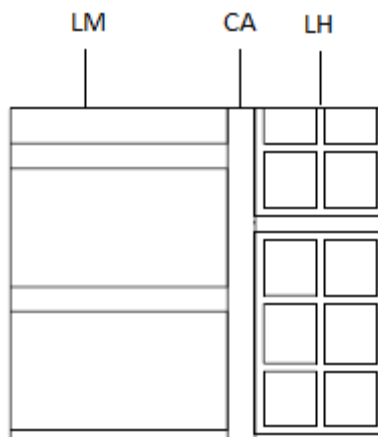


Figura 33: esquema del sistema tradicional

- ii) Sistema actual, en el que además se inyecta espuma de poliuretano en la cámara de aire para mejorar el aislamiento sin alterar el revestimiento

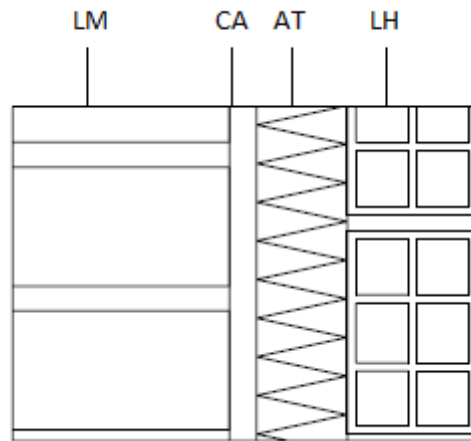


Figura 34: esquema del sistema actual

- iii) Sistema (de aislamiento por el exterior) de las casas pasivas, en las que se emplea una capa de termoarcilla (bloque aligerado) recubierta de un SATE.

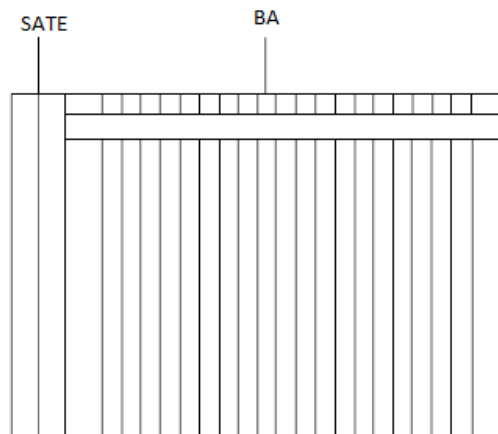


Figura 35: esquema del sistema empleado en casas pasivas

- iv) Una única capa de material WW de 30 cm de espesor

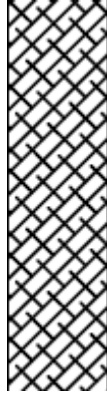


Figura 36: esquema de una monocapa de material WW

Por supuesto todas las capas mencionadas son las más genéricas y al final todos los sistemas requieren un una serie de acabados y otros enlucidos. Éstos no se tienen en cuenta en el cálculo ya que no alteran prácticamente ninguna de las propiedades analizadas principalmente por el pequeño espesor que tienen y por su colocación posterior tras realizar pruebas de carga, aislamiento o estanqueidad, por ejemplo.

También se debe tener en cuenta que este es un ejercicio teórico de comparación con varios índices de mérito y pesos escogidos a voluntad (siendo los resultados por tanto subjetivos), pero que, como es lógico, existen muchas más variables a tener en cuenta a la hora de seleccionar un método u otro. El proceso es por tanto totalmente subjetivo y puede variar de manera muy amplia en función de la persona, los objetivos que se buscan del cerramiento...

- i) Cálculo en el sistema tradicional.

Éste puede resultar muy económico, por lo que para ciertas estructuras (naves de almacenamiento de material o establos) puede posicionarse como la mejor opción.

	<i>Espesor (cm)</i>	<i>Densidad (kg/m³)</i>	<i>Calor específico (J/kg·K)</i>	<i>Módulo de elasticidad (MPa)</i>	<i>Resistencia a compresión (Mpa)</i>	<i>Conductividad térmica (W/m·K)</i>	<i>Factor de resistencia al vapor</i>
<i>Ladrillo macizo</i>	12	2300	1000	10000	10	0,85	10
<i>Cámara de aire</i>	2	1,2	1000	-	-	0,024	1
<i>Ladrillo hueco</i>	7	770	1000	4000	4	0,32	10
<i>Sistema global</i>	21	1571.07	1000	7047.62	7.05	0.18	5.38

Tabla 9: propiedades de los materiales empleados en el sistema

Se tiene operando que:

M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
4.49E+00	1.69E-03	1.67E-02	1.90E-03	8.93E+06	1.86E-01

Tabla 10: resultados del cálculo de los índices de mérito

ii) Cálculo con el sistema actual:

Éste mejora el anterior desde el punto de vista del aislamiento, pero la inyección de espuma (rígida de PUR mediante proyección con Hidrofluorocarbono) no asegura la homogeneidad y continuidad de la capa.

	<i>Espesor (cm)</i>	<i>Densidad (kg/m³)</i>	<i>Calor específico (J/kg·K)</i>	<i>Módulo de elasticidad (MPa)</i>	<i>Resistencia a compresión (Mpa)</i>	<i>Conductividad térmica (W/m·K)</i>	<i>Factor de resistencia al vapor</i>
<i>Ladrillo macizo</i>	12	2300	1000	10000	10	0,85	10
<i>Cámara de aire</i>	2	1,2	1000	-	-	0,024	1
<i>Espuma de poliuretano</i>	3	40	1674	-	-	0,03	70
<i>Ladrillo hueco</i>	4	770	1000	4000	4	0,32	10
<i>Sistema global</i>	21	1466.78	1096.29	6476.76	6.50	0,1	5.76

Tabla 11: propiedades de los materiales empleados en el sistema

Operando:

M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
4.42E+00	1.73E-03	1.43E-02	2.49E-03	1.61E+07	1.73E-01

Tabla 12: resultados del cálculo de los índices de mérito

iii) Cálculo con el sistema de las casas pasivas

El tercero de los presentados, se posiciona como el sistema más utilizado en casas pasivas (también en las certificadas Passivhaus), pero puede llegar a ser bastante más caro que los otros (además de requerir más tiempo de ejecución).

	Espesor (cm)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg·K)	Módulo de elasticidad (MPa)	Resistencia a compresión (Mpa)	Conductividad térmica (W/m·K)	Factor de resistencia al vapor
SATE	9	50	800	-	-	0,03	100
Bloque aligerado	21	1090	1000	9200	12,5	0,42	10
Sistema global	30	778.00	940.00	6440.90	8.78	0.09	13.70

Tabla 13: propiedades de los materiales empleados en el sistema

Operando:

M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
8.28E+00	3.80E-03	1.00E-02	3.99E-03	8.53E+06	7.30E-02

Tabla 14: resultados del cálculo de los índices de mérito

iv) Cálculo con una capa de WW:

Finalmente, como comentario del sistema que emplea el material estudiado, hay que tener en cuenta que la construcción con módulos resulta económico en mano de obra y corto en duración de ejecución.

	Espesor (cm)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/kg·K)	Módulo de elasticidad (MPa)	Tensión de rotura (Mpa)	Conductividad térmica (W/m·K)	Factor de resistencia al vapor
WW	30	400	1800	31,125	0,3	0,115	5

Tabla 15: propiedades de los materiales empleados en el sistema

Operando:

M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
7.78E-02	1.37E-03	3.33E-02	3.48E-03	6.26E+06	2.00E-01

Tabla 16: resultados del cálculo de los índices de mérito

Resumiendo todos los resultados obtenidos y hallando el valor máximo de cada índice de mérito deducido:

	M_1 $\left(\frac{E}{\rho}\right)$	M_2 $\left(\frac{\sigma_{max}^{1/2}}{\rho}\right)$	M_3 $\left(\frac{1}{t}\right)$	M_4 $\left(\frac{1}{\sqrt{\lambda \cdot C_p \cdot \rho}}\right)$	M_5 $\left(\frac{1}{\alpha}\right)$	M_6 $\left(\frac{1}{\mu}\right)$
SISTEMA TRADICIONAL	4.49E+00	1.69E-03	1.67E-02	1.90E-03	8.93E+06	1.86E-01
SISTEMA CONVENCIONAL	4.42E+00	1.73E-03	1.43E-02	2.49E-03	1.61E+07	1.73E-01
SISTEMA PASIVO	8.28E+00	3.80E-03	1.00E-02	3.99E-03	8.53E+06	7.30E-02
SISTEMA WWW	7.78E-02	1.37E-03	3.33E-02	3.48E-03	6.26E+06	2.00E-01
MAX (M _i)	8.28E+00	3.80E-03	3.33E-02	3.99E-03	1.61E+07	2.00E-01

Tabla 17: resumen de los cálculos

Ahora, aplicando (con el conocimiento de los valores máximos) la fórmula del análisis atributivo (K viene dado sobre cien):

	M_1 / $(M_1)max$	M_2 / $(M_2)max$	M_3 / $(M_3)max$	M_4 / $(M_4)max$	M_5 / $(M_5)max$	M_6 / $(M_6)max$	K
SISTEMA TRADICIONAL	0.54	0.44	0.50	0.48	0.56	0.93	54.83
SISTEMA CONVENCIONAL	0.53	0.46	0.43	0.62	1.00	0.87	58.38
SISTEMA PASIVO	1.00	1.00	0.30	1.00	0.53	0.37	64.75
SISTEMA WWW	0.01	0.36	1.00	0.87	0.39	1.00	64.14

Tabla 18: valores de K

Se extraen como conclusiones de este ejercicio, que el mejor sistema es el empleado en las casas pasivas (gana en todos los apartados estructurales y en el de pérdidas térmicas) pero que, debido al tercer (y sexto) índice de mérito (relacionado con el tiempo de construcción), el sistema basado en WWW se queda a muy poca distancia.

Por su parte, el segundo sistema tiene la ventaja de una enorme masa térmica, lo que le hace ganar puntuación en relación en el índice número cinco.

Finalmente, el sistema más tradicional se queda en último lugar solo ganando algo de ventaja en las condensaciones intersticiales o en el tiempo de ejecución.

3.4 Posibilidades constructivas

A partir de la caracterización desarrollada, se estudia en este subapartado la capacidad de este material para ser utilizado como cerramiento autoportante de edificios mediante el formato de paneles modulares.

Como ya se ha comentado anteriormente el equilibrio entre propiedades funcionales y propiedades mecánicas del material se encuentran en la densidad 400, por lo que se hará referencia exclusiva a ésta en todo este apartado.

La norma seguida en lo relativo a los anclajes y fijaciones de los paneles al resto de elementos estructurales fue la UNE-EN 1504. Por su parte, el desarrollo del sistema modular toma en consideración todos los siguientes documentos:

- DB HE Ahorro de energía, con el objetivo de conseguir una envolvente térmica que minimice la demanda energética a la hora de establecer en el interior una temperatura

cómoda a la vez que se evita la aparición de condensaciones superficiales e intersticiales, se consigue una adecuada inercia térmica y una suficiente impermeabilidad al aire. Aquí resulta interesante todo lo mencionado a propósito de la envolvente en el apartado de la introducción de los estándares de construcción pasivos.

- DB HR Protección frente al ruido, en el que se establecen unas propiedades mínimas que reduzcan suficientemente el ruido aéreo proveniente del exterior del edificio y el transmitido entre habitaciones.
- DB HS Salubridad, que básicamente obliga a establecer en las fachadas cierta estanqueidad de tal manera que se evite la entrada de agua de lluvia.
- DB SE Seguridad estructural, siendo este quizás el más importante por la naturaleza de este proyecto de investigación, la estabilidad estructural debe evitar la aparición de deformaciones y degradaciones inadmisibles con una holgada resistencia mecánica a las acciones externas.
- DB SI Seguridad frente al fuego, con el que se establecen unos niveles mínimos para evitar la fácil transmisión de fuego por la estructura y a otras contiguas en caso de incendio.

Y como se verá a continuación, los resultados obtenidos permiten superar con cierta seguridad los límites establecidos por los mismos.

3.4.1 Sistema base utilizado

El sistema constructivo modular, consta, como es evidente, de un núcleo de material compuesto WW de un espesor de 300 mm. El resto de dimensiones (alto y ancho) son variables que deberán ser determinadas para cada proyecto en particular, aunque a efectos de cálculo, se tomarán machones de 100 cm de base. Se debe considerar también lo mencionado a propósito de las dimensiones demasiado grandes de los paneles en los apartados anteriores, que producen dificultades a la hora de cargar, transportar y descargar el material, así como desperfectos de compactación en zonas periféricas de los mismos.

El sistema deberá ser completado a su vez con otros materiales con el objetivo de obtener una buena estética en paredes y fachadas, así como mejorar la estanqueidad al aire y al agua de la envolvente de la vivienda construida. De exterior a interior, estos sistemas y materiales serían:

- Recubrimiento continuo a base de mortero de cemento y arena, de 20 mm de espesor total, aplicado sobre la cara exterior del panel en dos capas sucesivas de 10 mm de espesor cada una de ellas, entre las cuales se dispondrán mallas de fibra de vidrio o poliéster para armar las uniones y puntos singulares donde se puedan concentrar las tensiones. Su principal objetivo es dotar al muro de impermeabilidad al agua y estanquidad al aire.
- Panel base de WW, de 300 mm de espesor.
- Enlucido continuo de mortero de yeso de 10 mm de espesor, aplicado sobre la cara interior del panel. Su principal objetivo es complementar la estanquidad al aire.
- Sistema de trasdosado a base de entramado autoportante, compuesto por perfiles ligeros de 70 mm de anchura, relleno de lana mineral de 70 mm de espesor, y paneles de yeso laminado de 15 mm de espesor atornillados a la perfilería, para constituir la cara interior del conjunto y propiciar las uniones y encuentros con las divisiones interiores verticales del edificio.

El conjunto así constituido tiene un espesor total de 415 mm, y reúne todas las condiciones pretendidas de impermeabilidad, estanquidad, aislamiento térmico, aislamiento acústico, resistencia mecánica, estabilidad, protección frente al fuego y capacidad para resolver las uniones con otros paneles y con las divisiones interiores del edificio, en especial cuando éstas se llevan a cabo mediante sistemas de entramado autoportante.

3.4.2 Cálculos en base a los resultados estructurales obtenidos

Se intenta en este apartado realizar una serie de cálculos que permitan conocer las posibilidades y limitaciones de construir con paneles basados en el sistema comentado en el anterior apartado, orientando la edificación de manera particular a las viviendas unifamiliares.

Estos análisis se basan principalmente en los resultados obtenidos en los ensayos de flexión, compresión y resistencia de anclajes. Conviene comentar que, si bien las propiedades del material dependen de la dirección espacial considerada, los paneles están convenientemente colocados de tal manera que las fibras de madera queden siempre paralelas a la dirección vertical del edificio. En este sentido los cálculos se facilitan en cierta manera al solo tener que tomar un valor para cada esfuerzo considerado.

Las hipótesis tomadas en estos cálculos son:

- i) Los paneles son de una única densidad y, si bien las dimensiones dependerán de las características particulares de cada proyecto, en éstos se toma un espesor de 30 cm y una altura de 300 cm, estando articulados en ambos extremos.
- ii) Dado que la esbeltez de los paneles es muy baja ($\lambda \leq 10$), no se consideran efectos de pandeo.
- iii) En consecuencia de la no existencia de una norma específica para este material, se toma para el coeficiente parcial de seguridad, el valor de 2,20, siendo este un valor medio empleado en el DB SE-F (referido a fábricas).

El proceso de cálculo seguido es el de “Estados Límite”, en el que se intenta reducir al mínimo la probabilidad de que se produzcan daños en la estructura que incurrirían en las prestaciones para las que ésta fue diseñada. Así se analizan los estados límite de servicio (aquellos que afectan al confort y bienestar de las personas, al correcto funcionamiento del edificio, a la apariencia de la construcción y/o a la durabilidad de la misma) y los estados límite últimos (cuando ya suponen un riesgo para las personas).

3.4.2.1 Capacidad mecánica a compresión de un panel estructural de fachada

Hipótesis adicionales:

- i) El panel dispone de un porcentaje de huecos del 50% (ventanas y puertas)
- ii) Se toma como elemento a analizar un machón de 100 cm de anchura sobre el que se dispone un zuncho de coronación de 200 cm tal y como muestra la imagen siguiente:

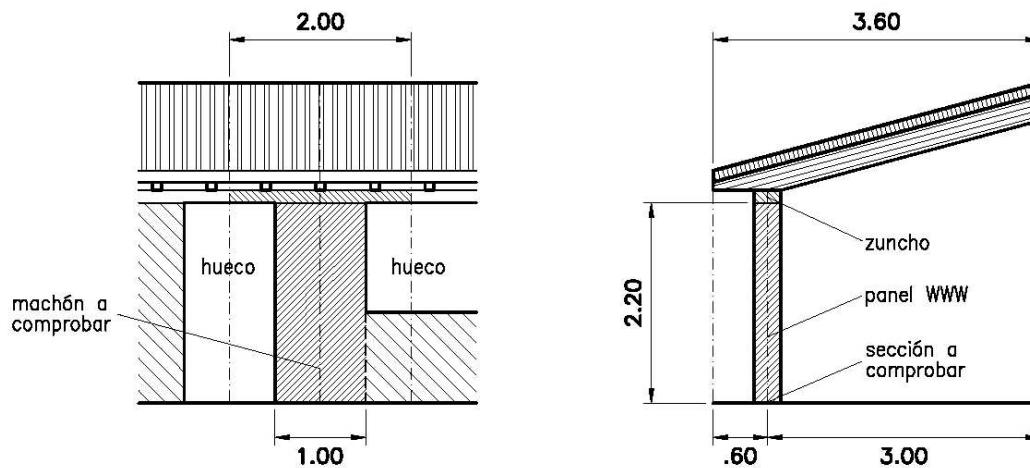


Figura 37: conceptualización del machón de fachada estudiado y esquema dimensional

La base del machón estará sometida al esfuerzo del propio peso del panel más su revestimiento, además del correspondiente al aplicado sobre su coronación (incógnita a determinar). Se tiene entonces que:

Resistencia normal máxima de cálculo:

Tensión media de rotura a compresión según eje Z (ensayos eje X) → $f_{wz} = 0,36 \text{ N/mm}^2$

Resistencia característica estimada (aproximación segura) → $f_{wzk} = 0,30 \text{ N/mm}^2$

Coefficiente parcial de seguridad del material (DB SE-F) → $\gamma_w = 2,20$

Resistencia de cálculo a compresión del material ($f_{wzd} = f_{wzk} / \gamma_w$) → $f_{wzd} = 0,136 \text{ N/mm}^2$

Esfuerzo normal máximo que puede soportar el panel en su coronación:

Área de la base del machón (1.000 mm x 300 mm) → $A = 3 \cdot 10^5 \text{ mm}^2$

Esfuerzo límite de cálculo en la base del machón ($N_d = A \cdot f_{wzd}$) → $N_d = 40,80 \text{ kN}$

Esfuerzo debido al peso de WW $G_w = 3 \times 1 \times 0,3 \times 4$ → $G_w = 3,60 \text{ kN}$

Esfuerzo debido al peso de los revestimientos $G_r = 3 \times 0,03 \times 20$ → $G_r = 1,80 \text{ kN}$

Esfuerzo normal debido al peso propio total $G = G_w + G_r$ → $G = 5,40 \text{ kN}$

Esfuerzo normal de cálculo debido al peso propio ($G_d = G \times 1,35$) → $G_d = 7,30 \text{ kN}$

Esfuerzo normal de cálculo debido a otras acciones ($Z_d = N_d - G_d$) → $Z_d = 33,50 \text{ kN}$

Longitud de aplicación del esfuerzo normal de cálculo debido a otras acciones: $L = 2 \text{ m}$

Máximo esfuerzo normal unitario de cálculo sobre la coronación: $z_d = 33,50 / 2 = 16,75 \text{ kN/m}$

Tenemos por lo tanto un esfuerzo vertical máximo de 16,75 kN que podemos aplicar sobre el zuncho de coronación del muro por cada metro de apoyo. Este se corresponde con la banda de forjado de cubierta (ya sea esta plana o inclinada).

Tomando una longitud de vano de 6m (dimensión raramente superada) más un vuelo (alero) de 0,6 m, se tiene una longitud de 3,6 m (repartiendo el vano entre dos bloques). Con esto se puede calcular la carga máxima de forjado:

Esfuerzo vertical máximo unitario de cálculo sobre la coronación: $z_d = 16,75 \text{ kN/m}$

Acción vertical unitaria total de cálculo sobre el forjado ($F_d = z_d / 3,60$) **$F_d = 4,65 \text{ kN/m}^2$**

Esta acción gravitatoria total máxima se atribuye así a cada metro cuadrado de forjado. Por otra parte, ésta debe estar repartida en peso propio, carga permanente y sobrecarga siendo la última muy similar en cubiertas planas o inclinadas (DB SE-AE). Despejando el peso propio se obtiene la incógnita buscada tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Cubierta inclinada con tejado, o Cubierta plana con azotea	Acción de cálculo (kN/m ²)	Coefficiente parcial de seguridad	Acción característica (kN/m ²)
Carga permanente (tejado o azotea)	1,35	1,35	1
Sobrecarga (uso privado o nieve)	1,50	1,50	1
Peso propio máximo del forjado	1,80	1,35	1,33
TOTALES	4,65	---	3,33

Tabla 19: resultados finales de cálculo del peso de forjado máximo

Resultado por tanto un peso máximo del forjado de 1,33 kN por cada metro cuadrado de superficie de cubierta.

3.4.2.2 Capacidad mecánica a compresión de un panel estructural interior

Hipótesis particulares de este caso:

- i) El panel dispone de un 20% de huecos (puertas interiores)
- ii) El elemento de estudio será un machón de 100cm de base sobre el que gravitan 120cm de zuncho de coronación tal y como muestra la siguiente figura:

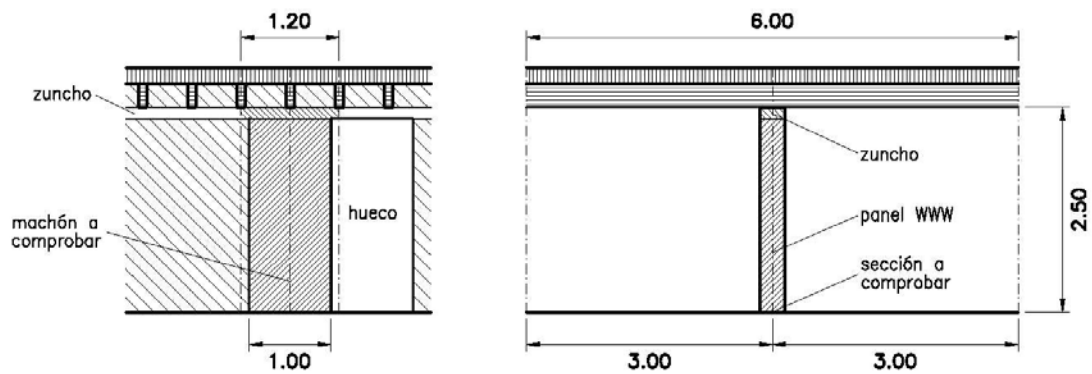


Figura 38: conceptualización del machón interior estudiado y esquema dimensional

Procediendo análogamente al caso anterior:

Resistencia normal máxima de cálculo:

Tensión media de rotura a compresión según eje Z (ensayos eje X) → $f_{wz} = 0,36 \text{ N/mm}^2$

Resistencia característica estimada (aproximación segura) → $f_{wzk} = 0,30 \text{ N/mm}^2$

Coefficiente parcial de seguridad del material (DB SE-F) → $\gamma_w = 2,20$

Resistencia de cálculo a compresión del material ($f_{wzd} = f_{wzk} / \gamma_w$) → $f_{wzd} = 0,136 \text{ N/mm}^2$

Esfuerzo normal máximo que soporta la coronación del panel:

Área de la base del machón (1.000 mm x 300 mm) → $A = 3 \cdot 10^5 \text{ mm}^2$

Esfuerzo límite de cálculo en la base del machón ($N_d = A \cdot f_{wzd}$) → $N_d = 40,80 \text{ kN}$

Esfuerzo debido al peso de WW $G_w = 3 \times 1 \times 0,3 \times 4$ → $G_w = 3,60 \text{ kN}$

Esfuerzo debido al peso de los revestimientos $G_r = 3 \times 0,03 \times 20 \rightarrow G_r = 1,80 \text{ kN}$

Esfuerzo normal debido al peso propio total $G = G_w + G_r \rightarrow G = 5,40 \text{ kN}$

Esfuerzo normal de cálculo debido al peso propio $(G_d = G \times 1,35) \rightarrow G_d = 7,30 \text{ kN}$

Esfuerzo normal de cálculo debido a otras acciones $(Z_d = N_d - G_d) \rightarrow Z_d = 33,50 \text{ kN}$

Longitud de aplicación del esfuerzo normal de cálculo debido a otras acciones: $L = 1,2 \text{ m}$

Máximo esfuerzo normal unitario de cálculo sobre la coronación: $z_d = 33,50 / 1,2 \cong 28 \text{ kN/m}$

Se sigue tomando un vano de 6m, pero en este caso no hay alero y se toma que cada pared interior debe aguantar la mitad de los dos vanos que apoyan sobre ella. La longitud total será entonces de 6m. Esto equivale a 6 m^2 de superficie tributaria del zuncho, por lo que:

Esfuerzo vertical máximo unitario de cálculo sobre la coronación: $z_d = 28 \text{ kN/m}$

Acción vertical unitaria total de cálculo sobre el forjado ($F_d = z_d / 6$): $F_d = 4,67 \text{ kN/m}^2$

Cubierta inclinada con tejado, o Cubierta plana con azotea	Acción de cálculo (kN/m ²)	Coeficiente parcial de seguridad	Acción característica (kN/m ²)
Carga permanente (tejado o azotea)	1,35	1,35	1
Sobrecarga (uso privado o nieve)	1,50	1,50	1
Peso propio máximo del forjado	1,82	1,35	1,35
TOTALES	4,67	---	3,35

Tabla 20: resultados finales de cálculo del peso de forjado máximo

Resulta en este caso un valor mayor de 1,35 kN por metro cuadrado de cubierta.

3.4.2.3 Capacidad mecánica de los anclajes que fijan el zuncho de coronación a los paneles

Las hipótesis adicionales tomadas para este cálculo son (véase siguiente apartado para conocer en más detalle los esquemas constructivos analizados en este):

1. El zuncho más desfavorable (a efectos de succión de viento) es el anclado en el borde superior de un panel de fachada sobre el que descansa una cubierta inclinada.
2. El borde inferior del panel se sujeta a la estructura del edificio mediante un perfil de acero L100.10 fijado mecánicamente, más un tendel de mortero de cemento.
3. Se supone que el forjado tiene un vano de 6 m, más un vuelo exterior (alero) de 1m.
4. El panel de fachada WWW tiene una proporción de huecos (puertas y ventanas) del 50%.
5. Los elementos de fijación mecánica (bridas) que sujetan el zuncho al panel WWW están dispuestos verticalmente, con distancias de 50 cm entre ellos.
6. Debido al porcentaje de huecos de fachada (puertas y ventanas), cada una de las bridas debe soportar el efecto de la succión de viento producida sobre una franja de cubierta de 100 cm de anchura.
7. Para el cálculo de la acción de viento, se considerarán las hipótesis de geometría y exposición más desfavorables de acuerdo con el DB SE-AE.
8. Cada brida está constituida por una varilla roscada de acero de $\varnothing 10$ mm, anclada en un taladro vertical realizado en la cara superior del panel de $\varnothing 40$ mm y una profundidad de 500 mm, relleno con mortero especial de fraguado rápido.

Con esto debe verificarse que tanto la resistencia a tracción de las varillas como la resistencia al arrancamiento del material ensayado sean superiores al esfuerzo solicitado. Para calcular este último se tendrán en cuenta tanto las acciones gravitatorias permanentes (con carácter estabilizador) como las producidas por la acción del viento (carácter desestabilizador). Según la expresión combinatoria siguiente (DB SE):

$$E_d = 0,80 G + 1,50 V$$

Donde:

G es la suma de las acciones gravitatorias permanentes

V es la relacionada con la acción del viento

Procediendo con los cálculos:

Acción gravitatoria permanente (estabilizadora)

Superficie tributaria $S = 4 \times 1 = 4 \text{ m}^2$ (valor del lado de la seguridad)

Peso del forjado	$G_f = 1 \text{ kN/m}^2 \times 4 \text{ m}^2 = 4 \text{ kN}$	(valor del lado de la seguridad)
Peso del tejado	$G_t = 1 \text{ kN/m}^2 \times 4 \text{ m}^2 = 4 \text{ kN}$	
Acción total gravitatoria	$G = G_f + G_t = 8 \text{ kN}$	

Acción de viento (desestabilizadora)

Superficie tributaria	$S = 4 \times 1 = 4 \text{ m}^2$
Presión dinámica de viento	$q_b = 0,5 \text{ kN/m}^2$
Grado de aspereza del entorno	I
Altura del punto considerado	5 m
Coefficiente de exposición	$C_e = 2,6$ (valor extremo, del lado de la seguridad)
Coefficiente eólico de succión	$C_s = -1$
Presión estática de viento	$q_e = q_b \times C_e \times C_s = 0,5 \times 2,6 \times (-1) = -1,30 \text{ kN/m}^2$
Acción total de viento	$V = -1,30 \text{ kN/m}^2 \times 4 \text{ m}^2 \times \cos 15^\circ = 5 \text{ kN}$

Efecto de cálculo de las acciones

$$E_d = (0,80 \times 8) - (1,50 \times 5) = -1,1 \text{ kN (esfuerzo de cálculo de arrancamiento en cada brida).}$$

3.4.2.3.1 Verificación de la tensión de tracción en la varilla de acero

Sección resistente de la varilla $\varnothing 10 \text{ mm}$ (área nominal):	$A_{s,nom} = 58 \text{ mm}^2$
Límite elástico inferior del acero de calidad 3.6 (mínima):	$L_e = 180 \text{ N/mm}^2$
Resistencia de cálculo a tracción de acero:	$f_{sd} = L_e / 1,25 \rightarrow f_{sd} = 144 \text{ N/mm}^2$
Esfuerzo de cálculo (tracción en la varilla):	$E_d = 1.100 \text{ N}$
Tensión de tracción de cálculo en la varilla:	$\sigma_{sd} = E_d / A_{s,nom} \rightarrow \sigma_{sd} = 18,97 \text{ N/mm}^2$

Por lo tanto, se verifica que la tensión de tracción de cálculo en la varilla de acero (σ_{sd}), es muy inferior a la resistencia de cálculo a tracción del acero (f_{sd}), incluso cuando este material es de una calidad mínima.

3.4.2.3.2 Verificación de la resistencia del anclaje al arrancamiento

De acuerdo con los resultados de los ensayos realizados en el material WW, el valor medio de la carga de tracción que resiste (en periodo elástico) un anclaje constituido por una varilla roscada de acero $\varnothing 10$ mm, cementada en un taladro de $\varnothing 40$ mm y 300 mm de profundidad, siendo la carga de tracción aplicada según el eje Z del material, es de 1.600 N.

Dado que la resistencia es función lineal de la profundidad del anclaje, podemos deducir el esfuerzo de tracción que resiste (en régimen elástico) un anclaje de 500 mm de profundidad:

$$F = 1.600 \text{ N} \times (500/300) = 2.667 \text{ N}$$

Teniendo en cuenta que aplicamos al material WW un coeficiente de seguridad $\gamma_w = 2,20$

La resistencia de cálculo será: $F_d = F / \gamma_w = 2.667 \text{ N} / 2,20 = \mathbf{1.212 \text{ N}}$ > $E_d = 1.100 \text{ N}$

Por lo tanto, se verifica que el esfuerzo de cálculo del arrancamiento de cada brida (E_d), es inferior a la resistencia de cálculo (F_d) del anclaje de la brida en el material WW.

3.4.2.4 Capacidades del material extraídas

Se puede observar en base a los resultados que, si bien el arrancamiento de la cubierta no debería producirse independientemente de la altura del edificio, se tiene una limitación en cuanto al esfuerzo vertical que se puede solicitar en la coronación de los bloques, siendo el valor mínimo de 1,33 kNm². Este valor, permite trabajar con edificios de una sola planta situada sobre el rasante del suelo (si se desea hacerlo con más, deben contemplarse calidades de material mayores). Debe tenerse en cuenta aquí, sin embargo, que este valor podría resultar más favorable si se buscan condiciones más favorables (si se reducen el porcentaje de huecos en fachada o las longitudes de vano, por ejemplo).

El forjado entonces empleado debería ser ligero evitando el fabricado con hormigón armado o pretensado, que a pesar de ser usado comúnmente en la construcción, superan el rango de peso calculado anteriormente.

Una buena solución sería la de utilizar elementos estructurales de madera, lo cual favorece la compatibilidad con este material (ya que está formado en gran proporción por virutas de madera) y facilita la construcción y la solvatación de aislamiento térmico en los apoyos.

Los forjados estarían formados por viguetas paralelas y apoyadas sobre los zunchos de coronación de los paneles (de madera también como se verá a continuación), sobre las que se colocarían tableros para salvar los entrepaños y el resto de materiales de la cubierta (plana o inclinada).

A modo de ejemplo, tomando de nuevo mismas longitudes de vanos y porcentajes de huecos, el forjado podría resolverse empleando viguetas de madera encolada coníferas, de la clase resistente GL24h, con dimensiones 10x28 cm colocadas cada 60 cm, estando su peso dentro del rango estimado.

3.4.3 Sistemas de unión propuestos

En base a las posibilidades tecnológicas del material extraídas (se contempla viviendas de una única planta) hasta aquí, se exponen ahora las resoluciones con las que llevar a cabo la construcción en obra.

3.4.3.1 Solución a la coronación de los paneles

Se propone el empleo de zunchos como elementos estructurales de coronación sobre los paneles con la misión de:

- Repartir de manera uniforme sobre los paneles las cargas puntuales de vigas y viguetas (compresión o tracción) originadas en la cubierta por el peso propio, la carga permanente, la carga variable y el viento.
- Constituir una continuidad firme y sólida en la parte superior de los muros, para neutralizar los posibles esfuerzos de tracción y compresión generados por los efectos térmicos cíclicos sobre la cubierta y los propios muros, creando una trabazón unitaria.
- Constituir dinteles para puertas y ventanas, con o sin la ayuda de otros elementos estructurales verticales en función de la luz de flexión de los huecos de fachada.

Estos zunchos estarían fabricados de madera laminada encolada (MLE) con dimensiones 440 x 140 mm y se unirían a los bloques del material compuesto mediante el empleo de unos anclajes verticales (a modo de los ensayados) constituidos por varillas roscadas de acero cincado de 10mm de diámetro que penetran sobre el material, estando los taladros realizados para disponer un diámetro de 40mm y rellenos de un mortero de fraguado rápido. A continuación, el apriete de los zunchos con los paneles de material compuesto se realizaría con tuercas y arandelas que a su vez quedarían embebidas en la madera.

Se propone en este diseño (y en los cálculos realizados) una separación entre anclajes de 50cm y una penetración de las varillas de la misma longitud, siendo no obstante estas dos variables particulares de cada diseño de construcción. A continuación, se muestra un esquema que resume el sistema expuesto anteriormente:

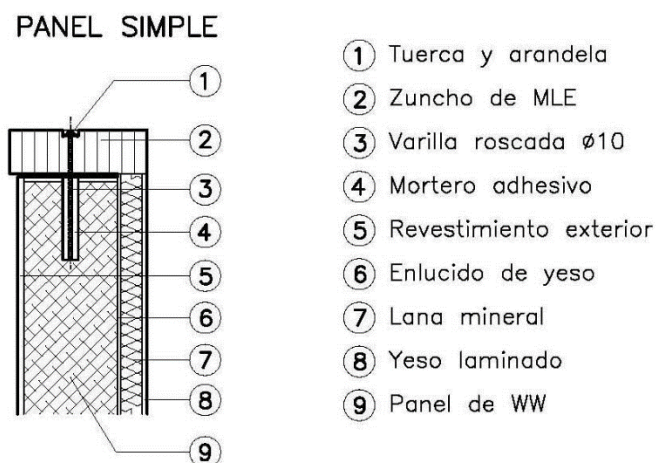


Figura 39: esquema de anclaje entre zuncho y panel

3.4.3.2 Solución a la base de los paneles

Los paneles se encontrarán en su base con elementos estructurales tales como zapatas o muros de sótano. Para sellar estos encuentros, se debe extender un tendel de mortero de cemento y arena, lo que confiere a la unión cierta rigidez, y un rozamiento importante a la hora de resolver el empuje y la succión del viento.

No obstante, teniendo en cuenta que el apoyo se produce sobre una banda de 15 cm de anchura, se considera apropiado, y muy especialmente cuando los paneles de cerramiento se colocan a cierta altura, complementar esta sujeción con un anclaje mecánico sólido, fiable y de fácil colocación. Esto se ha resuelto mediante un perfil de acero L100.10, cuya ala inferior (horizontal) se ancla a la estructura mediante tacos de fijación mecánica o química, mientras que el otro ala (dispuesta verticalmente) se embute en la cara inferior del panel.

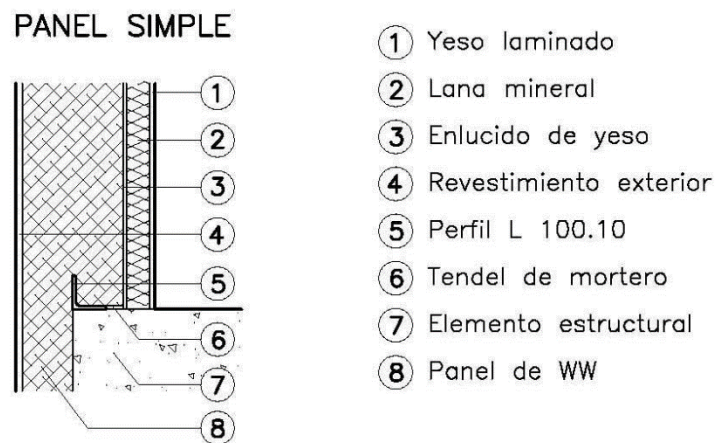


Figura 40: esquema de anclaje entre panel y elementos de base

3.4.3.3 Solución a las juntas verticales

La colocación de los paneles como método constructivo de viviendas de una planta sobre la rasante del suelo exige la resolución de las juntas verticales que se originarán entre ellos evitando la disminución de sus prestaciones y de la estanqueidad al aire y al agua.

Se toma como valor límite una longitud de 12 m de fachada, a partir del cual es necesario emplear juntas de dilatación y retracción para evitar tensiones y fisuras como consecuencia de las contracciones o expansiones sufridas por el material a causa de los cambios de temperatura y humedad.

Se tiene por tanto dos sistemas que permiten solventar las juntas formadas entre los distintos paneles dispuestos de manera adyacente:

- i) En las caras verticales adyacentes de paneles contiguos en fachadas de tamaño pequeño de menos de 12m, antes de su aproximación completa, se colocará una

banda de espuma de poliuretano, para llenar y sellar el interior de la junta. Antes de aplicar los revestimientos (exterior e interior) de la fachada, se rellenan las oquedades del borde de la junta con el mismo mortero que se aplicará más tarde a la totalidad del paño.

En la cara exterior, y a lo largo de toda la junta, se dispondrá una banda vertical de malla de fibra de vidrio de 50 cm de anchura colocada, situada entre capa y capa de mortero. También se colocará otra banda de malla en el enlucido interior de yeso.

- ii) La junta de fachadas de más de doce metros se resuelve mediante el encaje, a lo largo de su borde externo, de un perfil de chapa plegada de aluminio como el que se muestra en la figura 41.

El perfil tiene la elasticidad necesaria para adaptarse al movimiento de los paneles durante la construcción y la vida útil de la fachada sin perder su estanquidad. Permite rematar limpiamente los bordes de la junta al adherirse al revestimiento exterior, que se coloca más tarde a ambos lados. Dispone de una “cámara de descompresión” interna, cuya forma angulada le permite conseguir buen anclaje mecánico en el panel. En la parte interna de la junta se aplicará una banda selladora de espuma de poliuretano, y el revestimiento interior de yeso se complementará con una banda de malla de fibra de vidrio.

Las juntas verticales deben ser continuas en toda la altura de la fachada, para conducir el agua de escorrentía y evitar fugas puntuales incontroladas. Para ello, las distintas piezas de perfil en que se subdivide cada junta (que dependerá de la altura del edificio) se solaparán entre sí, encajándose (mediante recorte) las superiores dentro de las inferiores, no menos de 5 cm.

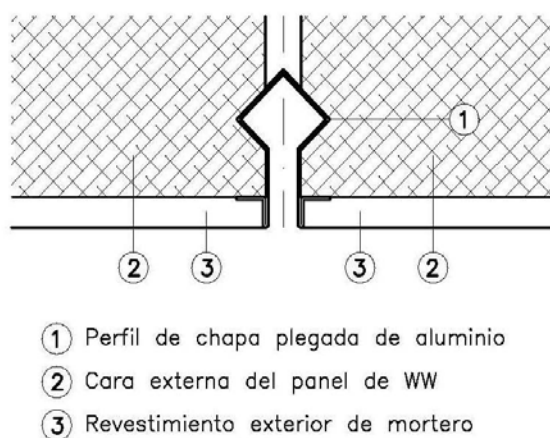


Figura 41: esquema de junta entre paneles de fachada de tamaño grande

3.4.3.4 Solución a las juntas horizontales

Las juntas horizontales formadas en el tipo de construcciones descritas, son las resultantes del apoyo de los forjados de cubierta sobre los zunchos de coronación de los paneles de material compuesto. La discontinuidad puede resolverse en estos casos de la siguiente manera:

- La cara superior de los paneles se regulariza y nivela mediante la aplicación de un tendel de mortero de cemento y arena, interrumpido en el eje para evitar el puente térmico.
- A cada lado de la discontinuidad central del tendel se adhiere una banda plana de espuma de polietileno reticulado autoadhesiva, de 100 mm de anchura y 10 mm de espesor.
- El zuncho de madera se coloca apoyado sobre las bandas de polietileno, y se fija al panel mediante anclajes.

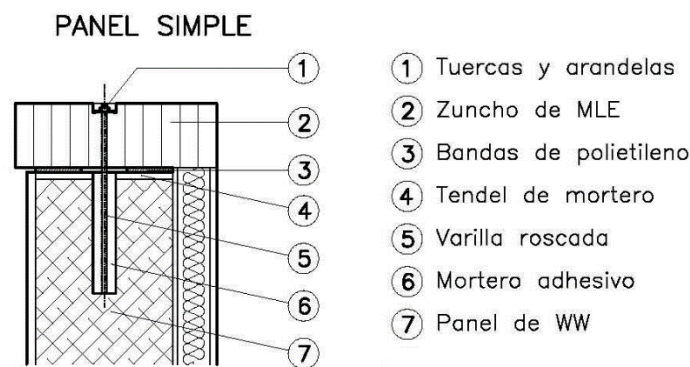


Figura 42: esquema del relleno de juntas horizontales

3.5 Detalles constructivos

En base a los sistemas calculados y desarrollados en los anteriores puntos, se muestran a continuación los detalles de los elementos constructivos más interesantes de una vivienda proyectada para ser construida con este material.

Se ha de notar que se emplean otros acompañantes, tales como la lana mineral (ya mencionada), con el objetivo de (y en base a los resultados de los ensayos) obtener resultados positivos a la hora de introducirlos en las listas de elementos estructurales Passivhaus.

CÓDIGO UTILIZADO	MATERIAL
CA	Cámara de aire no ventilada
CA'	Cámara de aire ligeramente ventilada
CH	Chapa plegada de acero galvanizado
EG	Enganchado de grava
EM	Enfoscado de mortero de cemento y arena
EY	Enlucido de yeso
FH	Forjado de hormigón
FP	Formación de pendientes con árido ligero
JH	Junta horizontal entre paneles de fachada (PUR)
LF	Losa flotante de mortero (u hormigón ligero)
U	Lámina impermeabilizante (genérica)
MA	Mortero de asiento
MB	Muro de bloques huecos de hormigón
MH	Muro de contención de hormigón armado
ML	Madera laminada encolada
,W	Lana mineral (manta de fibra de vidrio)
PC	Pavimento cerámico
PE	Poliestireno elastificado (EEPS)
PM	Premarco de madera
PO	Persiana exterior orientable
PP	Pavimento pétreo de exteriors
PT	Puerta
PX	Poliestireno extruído (XPS)
RM	Rastreles de madera tratada (dos familias)
SH	Solera de hormigón armado
TC	Tablero contrachapado
TJ	Tejas
TM	Tapajuntas de madera
TR	Terreno natural (genérico)
VA	Vierteaguas cerámico o de piedra artificial
VH	Voladizo de losa maciza de hormigón armado
VT	Ventana

WW	Material composite (virutas de madera y cemento)
YL	Placa de yeso laminado
ZH	Zapata continua de hormigón armado
ZP	Zócalo de piedra

Tabla 21: leyenda de elementos utilizados

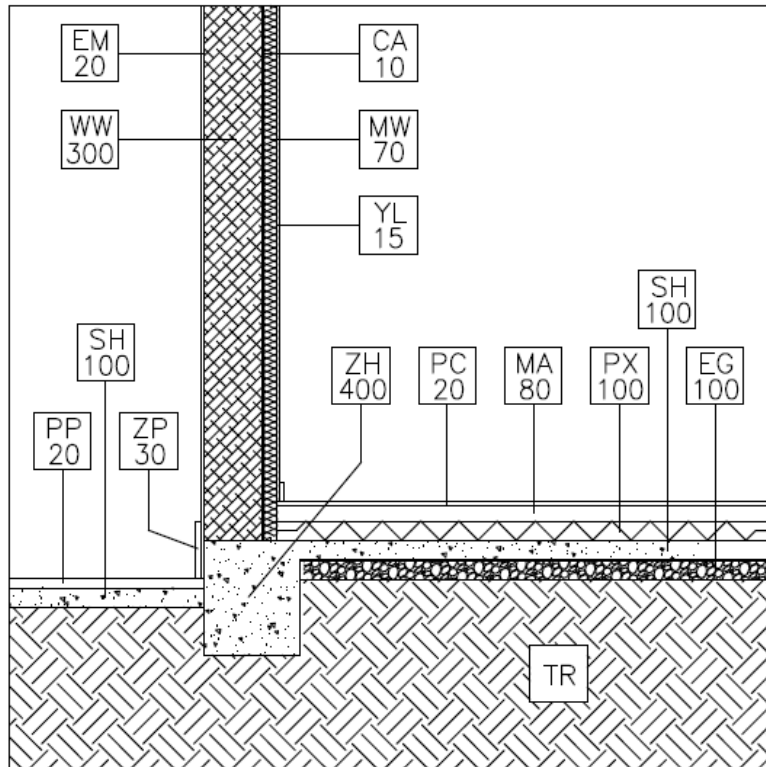


Figura 43: pared exterior con solera

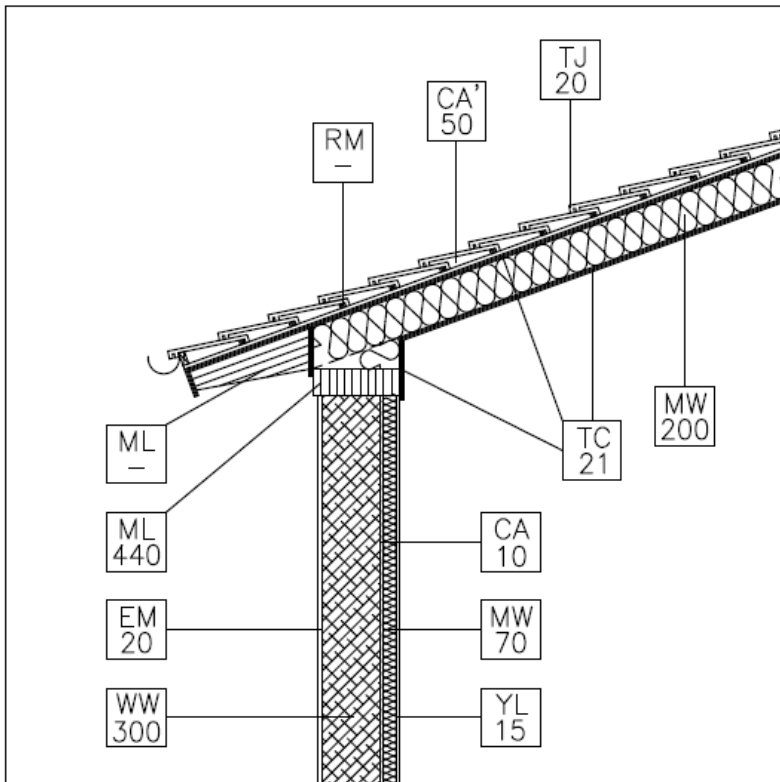


Figura 44: peto de cubierta inclinada

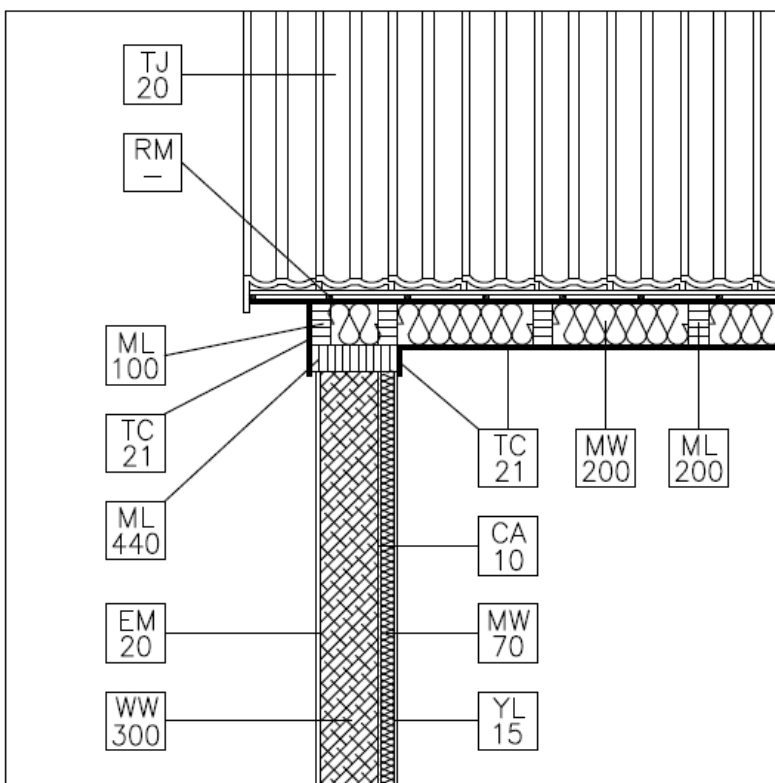


Figura 45: sección opuesta

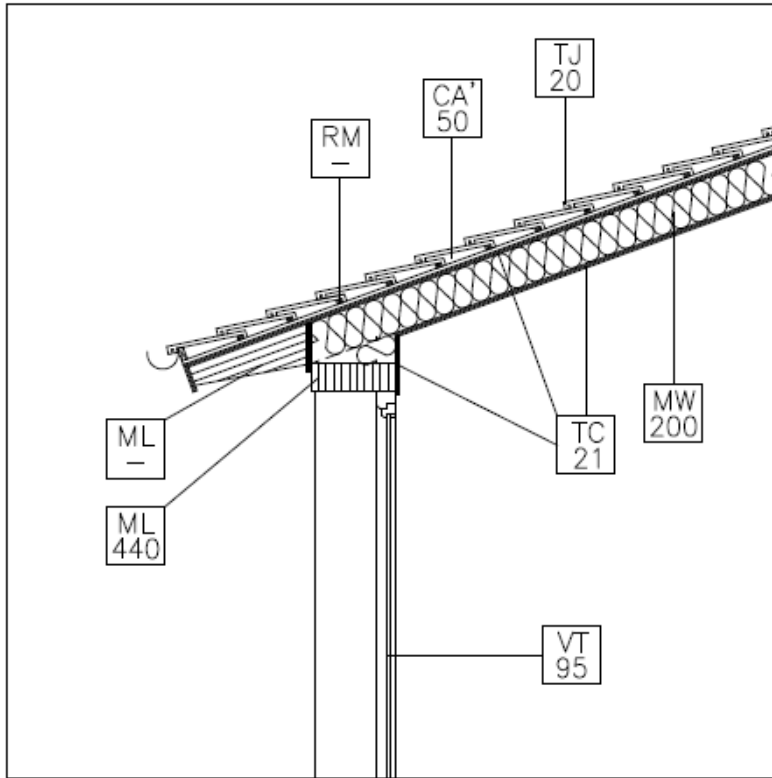


Figura 46: sección superior ventana

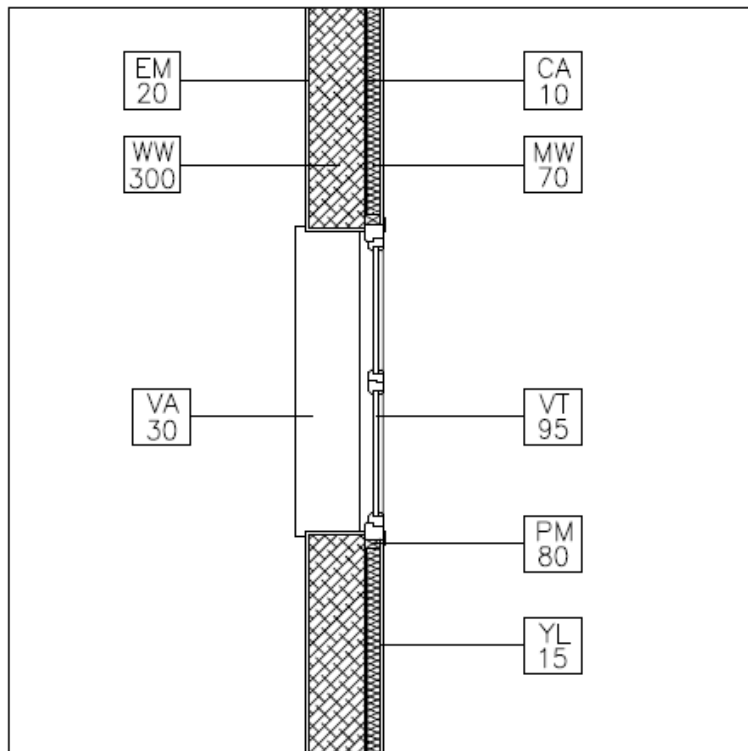


Figura 47: sección lateral ventana

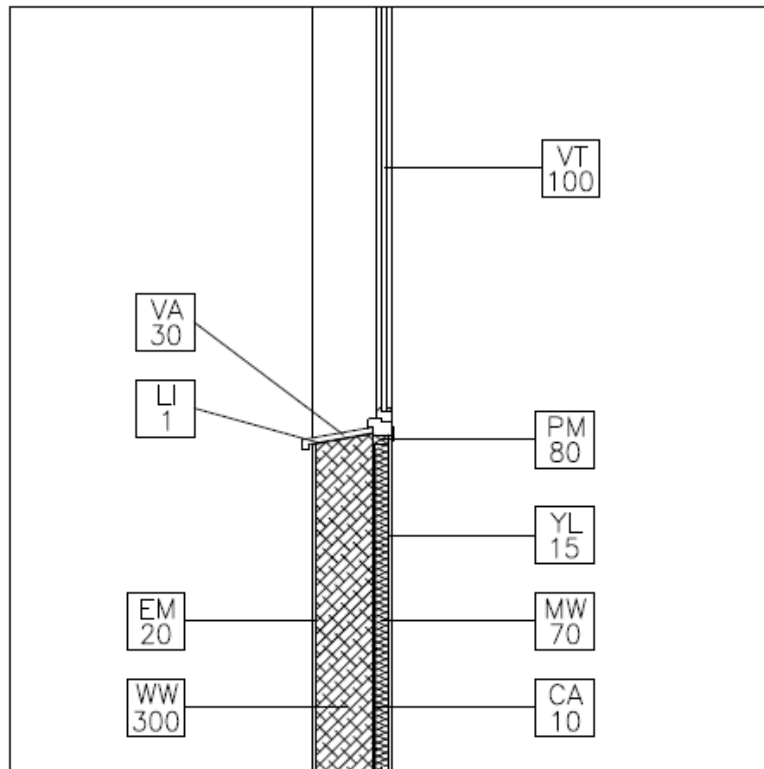


Figura 48: sección inferior ventana

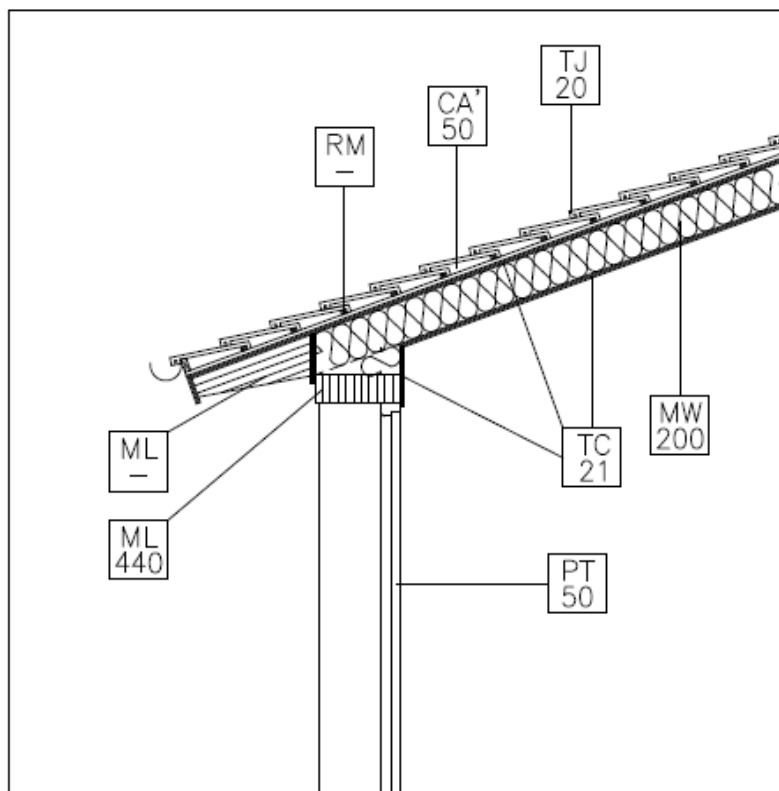


Figura 49: sección superior puerta de entrada

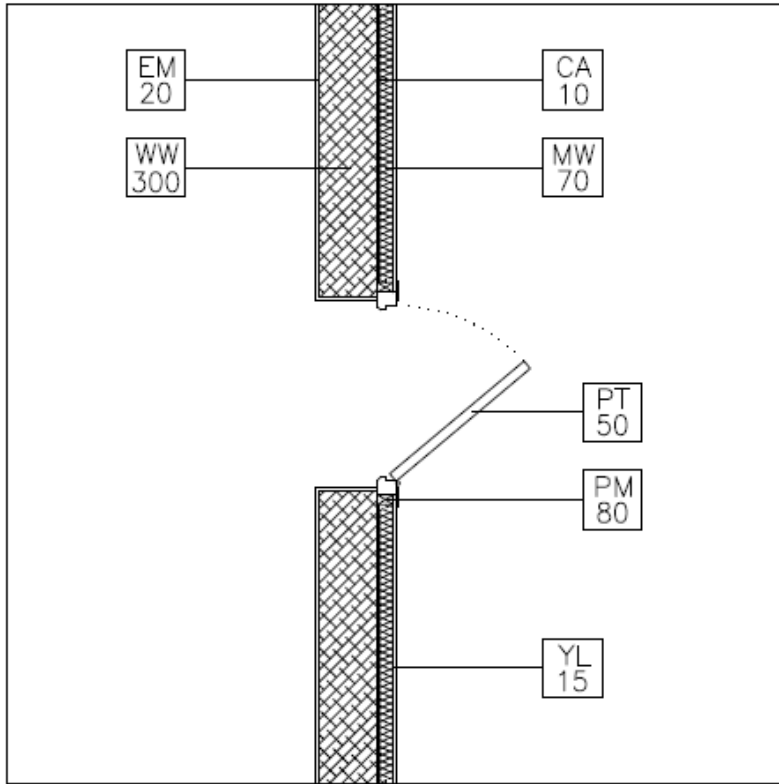


Figura 50: vista en planta puerta de entrada

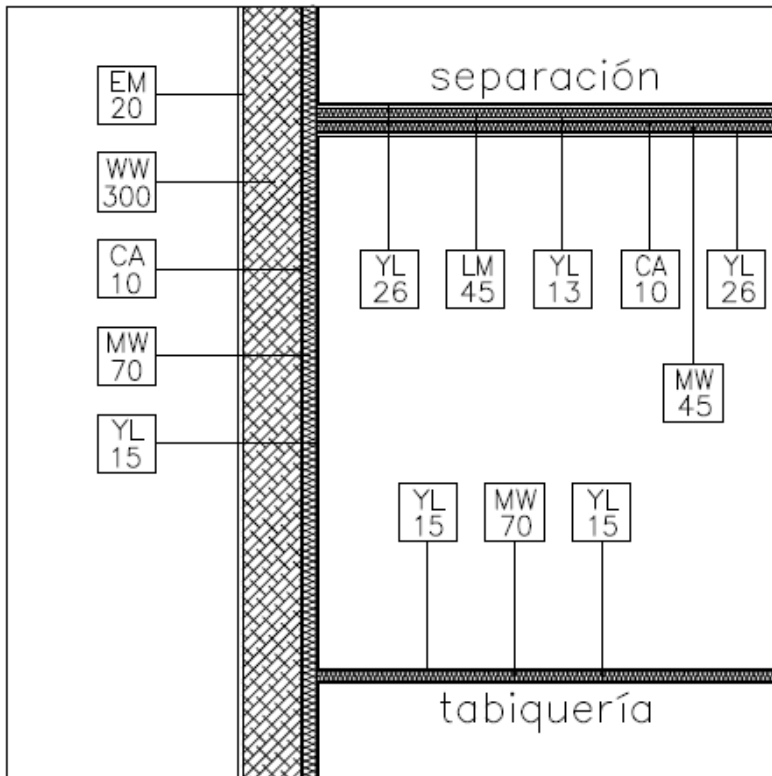


Figura 51: pared exterior con interior

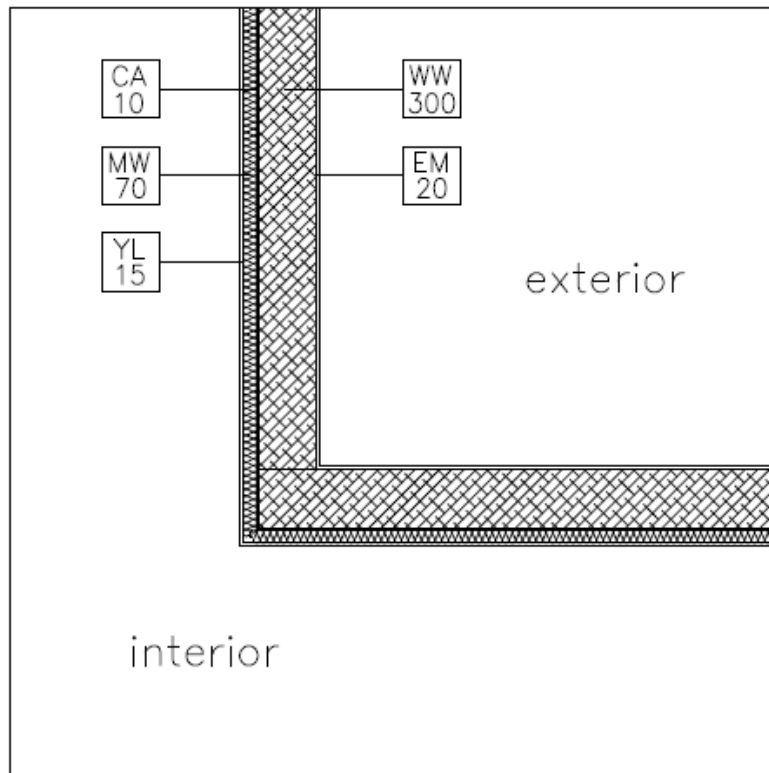


Figura 52: planta de esquina entrante

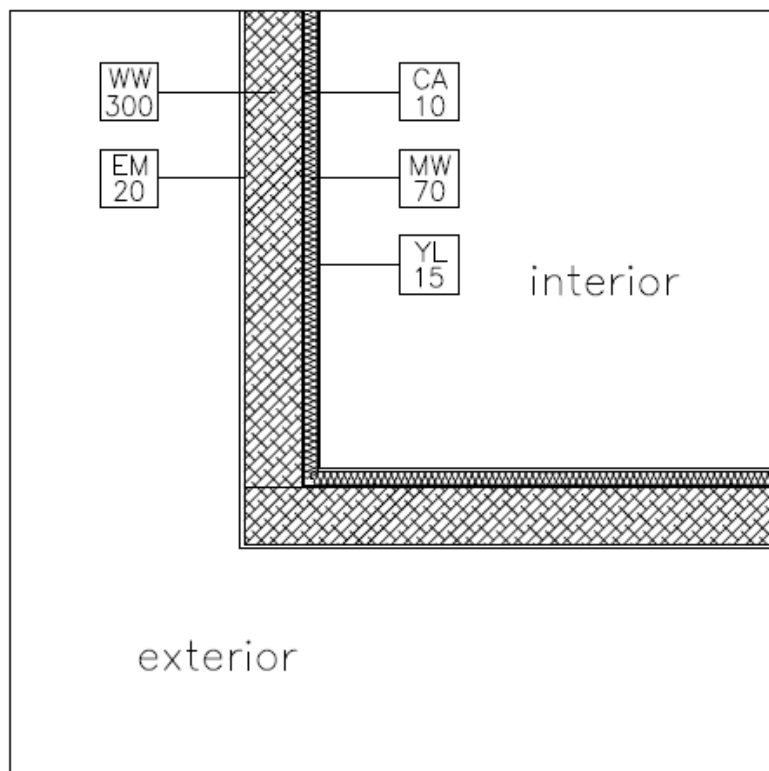


Figura 53: planta de esquina saliente

3.6 Análisis con software y encaje en el modelo Passivhaus

Los diseños constructivos desarrollados hasta aquí, son objeto de estudio en este subapartado mediante la aplicación del software FLIXO. Este programa, permite analizar modelos bidimensionales y simular unas condiciones de temperaturas interior y exterior, a partir de lo cual y mediante el empleo de los métodos numéricos (con el objetivo de resolver problemas de contorno), se puede obtener el valor de flujo de calor que se está perdiendo a través del cerramiento contemplado.

Se debe mencionar que, puesto que se trabaja con modelos bidimensionales, los valores quedan expresados por unidad de longitud en el sentido perpendicular de éste.

El estudio de esta variable nos permite cuantificar no sólo las pérdidas producidas por conducción, las cuales se pueden extraer como resultado de operar con las conductividades térmicas de los materiales que forman el sistema, sino también las producidas en consecuencia de la existencia de puentes térmicos.

Como base teórica para los cálculos (se puede tomar como referencia el documento de apoyo DA DB HE 3), se puede decir que, partiendo de un valor de flujo de calor para unas temperaturas particulares (se toma generalmente una temperatura interior de 20°C y una exterior de 0°C) de un modelo bidimensional (expresado en W/m), que es el obtenido mediante aplicación del software de caracterización térmica, y de unas conductividades térmicas conocidas de los elementos que conforman el detalle contemplado, la transmitancia térmica lineal puede obtenerse según:

$$\Psi = \frac{\phi}{(\theta_i - \theta_e)} - \sum U_i \cdot t_i$$

Donde:

Ψ = transmitancia térmica lineal (describe el puente térmico)

θ_i = temperatura interior

θ_e = temperatura exterior

U_i = transmitancia térmica del elemento adyacente i

t_i = espesor del elemento adyacente i

Además, el programa también permite obtener otros valores que permiten caracterizar el puente térmico como la mínima temperatura superficial interior (θ_{si-min}), que por razones ya

comentadas a propósito del estándar Passivhaus en la introducción, es importante en relación al confort, y el factor de temperatura (f_{Rsi}) que permite conocer el riesgo de que se produzcan condensaciones (ya que a causa de los puentes se pueden producir zonas superficiales interiores de muy baja temperatura) y que viene expresada según la relación:

$$f_{Rsi} = \frac{(\theta_{si} - \theta_e)}{(\theta_i - \theta_e)}$$

El objetivo de obtener estos tres valores, así como las transmitancias de los elementos adyacentes, es, además de poder caracterizar y mejorar los sistemas constructivos desarrollados, explorar la posibilidad de introducir estos como componentes estructurales certificados Passivhaus.

El criterio para poder realizar tal certificación queda resumido en la tabla siguiente publicada por el PHI:

Climate zone	Hygiene criterion	Comfort criterion	Efficiency criteria		
			U-value of the exterior building component $U_{opaque} * f_{PHI}^2 \leq$	Purely opaque details $f_{Rsi=0.25 m^2KW} \geq^3$	Absence of thermal bridges $\Psi_a \leq^4$
	$f_{Rsi=0.25 m^2KW} \geq^3$	U-value of the installed window ¹ \leq			
	[-]	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	[-]	[W/(mK)]
1 Arctic	0.80	0.45 (0.35)	0.09	0.90	0.01
2 Cold	0.75	0.65 (0.52)	0.12	0.88	
3 Cool, temperate	0.70	0.85 (0.70)	0.15	0.86	
4 Warm, temperate	0.65	1.05 (0.90)	0.25	0.82	
5 Warm	0.55	1.25 (1.10)	0.50	0.74	
6 Hot	None	1.25 (1.10)	0.50	0.74	
7 Very hot	None	1.05 (0.90)	0.25	0.82	

1 applies for vertical windows with a test size of 1.23*1.48 m. The criteria for other transparent building components can be taken from the relevant certification criteria. Value in brackets: respective reference glazing.
2 $f_{R, PHI}$: Reduction factor: always 1, exception: areas in contact with the ground and towards the unheated basement: 0.6
3 $f_{Rsi=0.25 m^2KW} \geq$ see Section 3.8
4 as a thermal bridge loss coefficient based on external dimensions and length. Specific constructions such as inner edges are exempted from this criterion.

Figura 54: resumen de las exigencias numéricas para certificar sistemas constructivos por el PHI

Los objetivos por tanto son:

- i) Cumplir el criterio de higiene, en todos los casos (componentes puramente opacos o no), que se resume en una regulación del factor de temperatura.
- ii) Cumplir el criterio de confort en aquellos elementos que incluyan huecos. Este punto viene influenciado por la idea de que, los huecos (ventanas, lucernarios...) tienen una transmitancia mayor que las partes opacas y que ésta debe ser regulada para evitar el flujo de calor masivo tanto en invierno (pérdidas) como en verano (ganancias).

Esta transmitancia no es equivalente a la calculada de fábrica de la ventana u objeto contemplado (a no ser que se cumplan las especificaciones en 1) y en cada caso deben tomarse expresiones diferentes (reguladas por el PHI) que dependen de la inclinación, del área, de los elementos que la envuelven, o, por supuesto, de la U de la ventana instalada.
- iii) Cumplir el criterio de eficiencia, en el que se debe tener en cuenta:
 - a) La transmitancia de los componentes puramente opacos está regulada, y, como es lógico, con un valor más pequeño (más riguroso) que en el caso de los componentes con huecos.
 - b) El factor de temperatura, al igual que en el apartado anterior, debe estar regulado con un factor de temperatura más riguroso que en el caso general de componentes que presenten hueco.
 - c) Un valor máximo de transmitancia térmica lineal, lo que equivale a decir unas pérdidas máximas producidas por el puente térmico del componente.

También se ha de comentar que, el valor de Ψ debe ser menor a 0,04 en el caso de que el componente analizado tenga huecos y menor a 0,01 en el resto de componentes.

Si hablamos de la zona de Asturias y alrededores, los valores más interesantes son los de las zonas climáticas 4 y 5 enmarcados en rojo. Cumplir los objetivos de estos climas implica cumplir los de los climas 6 y 7.

Pueden observarse las figuras tratadas con el software así como los cálculos y resultados arrojados en el anexo 1. Ha de tenerse en cuenta que a pesar de que las partes estudiadas son las encuadradas en el epígrafe anterior, algunas de ellas no están incluidas o pueden presentar ciertas simplificaciones debido a que ciertos elementos influyen poco o nada en la ganancia o pérdida de energía térmica.

Los resultados obtenidos con este tratamiento se resumen a continuación:

Detalle	Criterio de higiene	Criterio de confort	Criterio energético		
	f_{Rsi}	U ($W/m^2 \cdot K$)	U ($W/m^2 \cdot K$)	f_{Rsi}	Ψ ($W/m \cdot K$)
Peto de cubierta inclinada	0.877	-	0,218	0.877	-0.04
Peto de cubierta inclinada (sección opuesta)	0.773	-	0,218	0.773	0.078
Ventana superior	0.837	1.78	-	-	0.287
Ventana (sección lateral)	0.796	1.2	-	-	0.091
Esquina entrante	0.951	-	0.199	0.951	0.064
Esquina saliente	0.886	-	0.199	0.886	-0.132

Tabla 22: resultados del tratamiento con FLIXO de los esquemas propuestos

Se puede observar el no cumplimiento de algunas de exigencias para certificar estos elementos estructurales. El programa FLIXO permite no obstante cierta flexibilidad y modificar los dibujos CAD.

Las modificaciones realizadas, el tratamiento con el software y los resultados arrojados se pueden observar en el anexo 2. Un resumen de estos últimos valores se muestra a continuación:

Detalle	Criterio de higiene	Criterio de confort	Criterio energético		
	f_{Rsi}	U ($W/m^2 \cdot K$)	U ($W/m^2 \cdot K$)	f_{Rsi}	Ψ ($W/m \cdot K$)
Peto de cubierta inclinada	0.927	-	0,223	0.927	-0.109
Peto de cubierta inclinada (sección opuesta)	0.824	-	0,223	0.824	-0,009
Ventana superior	0.817	0,65	-	-	-0,093
Ventana (sección lateral)	0.796	0,73	-	-	-0,068
Esquina entrante	0.964	-	0.223	0.891	0,048
Esquina saliente	0.886	-	0.223	0.886	-0.164

Tabla 23: resultados del tratamiento con FLIXO de los esquemas mejorados

Se puede observar como ahora todos (excepto uno) los sistemas podrían ser certificados cumpliendo todas las exigencias. Básicamente, se han sustituido algunas cámaras de aire sin ventilación por capas de yeso termoaislante y se han configurado algunos bloques de espesor importante de yeso laminado para cerrar zonas que aumentaban el valor de Ψ calculado.

Se pretende mostrar así que con algo de esfuerzo, es posible desarrollar sistemas constructivos en base al material WW que son capaces de cumplir especificaciones tan rigurosas como las del PHI.

3.7 Futuro del material

A pesar de que las conclusiones extraídas en este documento en base a los cálculos realizados con los paneles de densidad 400 suponen la limitación (en principio) a la construcción de una sola planta sobre la rasante, el material WW presenta un gran potencial si se sigue documentando y estudiando en el futuro. Ya se ha justificado en varias ocasiones el motivo de centrarse en esta densidad, pero, pensando en el material de forma genérica, las posibilidades que presenta en otras densidades y calidades son enormes. Como comentarios de las conclusiones que se han obtenido en el estudio de las otras dos densidades disponibles en el proyecto de investigación se tiene que:

- En primer lugar, los paneles de densidad 300, a pesar de no presentar propiedades mecánicas suficientemente altas como para construir con ellos, podrían ser usados para crear la envolvente térmica de edificios convencionales de la misma manera que otros sistemas de aislamiento por el interior o el exterior. Ésta opción hace no obstante necesario que el edificio disponga de una estructura específica realizada con otros materiales (hormigón armado, acero laminado, madera, etc.).
- El material de densidad 500, por su parte, permite la fabricación de módulos suficientemente competentes como para edificar más de una planta con ellos, pero la reducción de las propiedades de aislamiento térmico hace preciso la utilización de otros elementos que permitan alcanzar los objetivos planteados de equilibrio estructural-térmico. Los materiales sándwich suponen una salida a este problema.

Este concepto es fácilmente adaptable a los paneles estudiados, configurando dos hojas de WW de 150 mm de espesor, y encolándolas a una hoja intermedia de poliestireno extruido (XPS) de 100 mm de espesor, formando así un prefabricado unitario de 400 mm de espesor total.

Los paneles así adaptados, una vez colocados en su posición definitiva en obra con ayuda de los elementos de fijación, se complementarían de modo similar a los paneles simples, con otros materiales. De exterior a interior se propone:

- i. Recubrimiento continuo a base de mortero de cemento y arena, de 20 mm de espesor total, aplicado sobre la cara exterior del panel en dos capas sucesivas de 10 mm de espesor cada una de ellas, entre las cuales se disponen mallas de fibra de vidrio o poliéster para armar las uniones y puntos singulares donde se puedan concentrar las tensiones (lo cual permite dotar al muro de impermeabilidad al agua y estanquidad al aire).
- ii. Panel base WW + XPS, de 400 mm de espesor (tres capas).
- iii. Enlucido continuo de mortero de yeso de 15 mm de espesor, aplicado sobre la cara interior del panel (para complementar la estanquidad al aire).

El conjunto así constituido tiene un espesor total de 435 mm, y también reúne todas las condiciones pretendidas de impermeabilidad, estanquidad, aislamiento térmico, aislamiento acústico, resistencia mecánica, estabilidad, protección frente al fuego y capacidad para resolver las uniones con otros paneles y con las divisiones interiores del edificio.

Hasta aquí se cubren las posibilidades de las tres densidades de las que se tiene conocimiento en el proyecto. Se deduce la enorme interdependencia de las propiedades físicas del material con el proceso de fabricación seguido y, de manera equivalente, de las particularidades del mismo (porcentaje de aglomerante y de disperso, longitud de fibras, etc).

Dado el enorme potencial que parece presentar, el futuro podría recaer en el desarrollo de un modelo matemático que permitiera correlacionar, al menos dentro de ciertos rangos lógicos, las propiedades físicas con el proceso de fabricación. Con este conocimiento, se podrían explorar las posibilidades constructivas de otros paneles más allá de los contemplados en este proyecto.

Esto sin embargo es difícil de llevar a cabo debido a la gran cantidad de variables existentes y al amplio abanico de posibilidades de fabricación (maderas o cementos diferentes, procesos de mineralización distintos...) y por tanto, sería difícil de resolver sin el desarrollo de normas que regularicen los procesos y exijan niveles de calidad mínimos.

4. Conclusiones

En la actualidad el mundo entero se enfrenta a una problemática energética mundial para reducir por un lado el consumo y por otro la producción de gases y partículas contaminantes. Su solución no es sencilla, pero con mucha probabilidad pasa por hacer cotidiano el concepto de eficiencia energética.

Aplicar esta idea al caso particular de construcciones donde se desarrollen actividades humanas (viviendas, oficinas, hoteles, etc) implica hablar de edificios pasivos, cuya mayor particularidad reside en reducir la demanda térmica (y energética) de éstos sin afectar al grado de confort albergado en su interior.

De ello se entiende que las áreas de ciencia e ingeniería de los materiales y sostenibilidad y eficiencia energética, dediquen gran parte de sus investigaciones a la búsqueda de nuevos materiales o sistemas constructivos que permitan crear una envolvente térmica con buenas propiedades aislantes y de estanqueidad.

Bajo estas premisas, se ha buscado arrojar conocimiento sobre un material poco conocido y estudiado hasta la fecha que promete reunir las ya mencionadas propiedades de aislamiento y estanqueidad, además de otras tan interesantes como la capacidad estructural, la resistencia al fuego o el aislamiento acústico, todas ellas difíciles de concentrar en uno solo. Dicho material se trata de un “composite”, conocido de manera genérica con el nombre de Wood Wool Wall y que se puede describir de manera sencilla como fibras de madera aglomeradas con cemento.

Con este objetivo, se han adquirido seis paneles de tres densidades diferentes sobre los que se han realizado ensayos de compresión, flexión a tres puntos, resistencia de conectores y caja caliente. Los resultados muestran un mayor equilibrio entre propiedades funcionales y estructurales en la densidad 400, por lo que los mayores esfuerzos investigadores se han centrado sobre esta.

Los resultados del ensayo de caja caliente sobre los paneles de dicha densidad muestran una conductividad térmica suficientemente baja ($\sim 0,1 \frac{W}{m \cdot K}$) como para ser utilizada en casas pasivas, mientras que los ensayos estructurales arrojan valores suficientemente altos como para construir viviendas de hasta un piso sobre la rasante del suelo (resistencia a compresión según el eje Z de aplicación de la fuerza $\sim 0,3MPa$).

En base a esto, se ha desarrollado un sistema constructivo modular (con las ventajas que ello implica) cuyos esquemas estructurales han sido analizados con el software térmico FLIXO. Los

resultados de dicho análisis muestran la posibilidad de que los componentes sean certificados según las exigencias del PHI (lo cual supone un valor añadido para el material).

El análisis atributivo, en líneas generales, deja al material en muy buena posición mostrando sus mayores bondades (tiempo de ejecución y condensaciones superficiales) así como sus peores propiedades (temas estructurales) y sólo es sobrepasado por el sistema empleado en las viviendas pasivas.

De la densidad más baja, por su parte, se extrae la posibilidad de aplicar los paneles a sistemas de envolvente térmica sin capacidad portante, mientras que la más alta, con la ayuda de materiales típicamente usados como aislantes en sistemas sándwich, muestra propiedades incluso superiores a la estudiada.

En definitiva, el material WW permite construir viviendas de una sola planta con muros autoportantes basadas en un sistema modular, con los beneficios económicos y de tiempo de ejecución asociados, y con unas buenas propiedades de permeabilidad al vapor, resistencia al fuego y aislamiento al ruido aéreo entre otras. Además, la vivienda resultante ha de suponer un ahorro importante en la factura energética del propietario debido a la baja conductividad térmica del conjunto en comparación con las convencionales.

El proyecto supone un primer acercamiento a sus posibilidades, pero la inexistencia de normas de fabricación o de ensayo, por ejemplo, hace que sea realmente difícil generalizar sus propiedades para cualquier tipo de compuesto basado en virutas de madera y cemento. No obstante, los resultados son suficientemente tentadores como para continuar la investigación en el futuro.

5. Bibliografía

Pero-Sanz Elorz, J. A. Ciencia e Ingeniería de Materiales. Estructura, transformaciones, propiedades y selección. 4ª edición. Dossat 2000. Madrid. 2000.