



Trabajo Fin de Máster

Análisis comparativo de diferentes soluciones de aislamiento térmico en paneles prefabricados de hormigón para edificación.

Comparative analysis of different thermal insulation solutions in concrete panels for buildings.

Autor

Daniel Ariza Orquín

Director

Jesús del Val Molina

Ponente

Javier Domínguez Hernández

Máster

Ingeniería Industrial

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2022



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe cumplirse y archivarse dentro del plazo de depósito)

D./D^a. Daniel Ariza Orquin

en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de Estudios de la titulación de
Máster Universitario en Ingeniería Industrial (Título del Trabajo)

Análisis comparativo de diferentes soluciones de aislamiento térmico en paneles prefabricados de hormigón para edificación.

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 19/09/2022

Fdo:

RESUMEN.

El presente Trabajo Fin de Master trata de conocer el comportamiento térmico de los paneles prefabricados de hormigón de la empresa Pretersa-Prenavisa, la elaboración de un nuevo panel de hormigón prefabricado óptimo cuyos valores de transmitancia cumplan con las exigencias del Código Técnico de la Edificación. Así como observar los cambios térmicos que se producen en el aire interior de una estancia utilizando los paneles de los modelos generados analizando los flujos de calor que se producen en los paneles prefabricados, para saber dónde incidir en las mejoras de estos.

Los paneles prefabricados elegidos para estudiar su comportamiento térmico han sido los paneles “SPT” (Sin puente térmico) y los paneles tipo Sándwich, ambos paneles con espesores de 20 o 24 centímetros. Se desarrollan diferentes modelos de paneles prefabricados con distintos materiales y se observan las variaciones que se producen en las transmitancias térmicas y temperaturas.

Se utiliza un software de modelado 3D, software Solidworks, realizando el análisis térmico con las condiciones de contorno y las cargas térmicas necesarias. Para el tratamiento de datos y obtención de tablas y diagramas se utiliza Microsoft Excel. Los resultados se analizan comparando coste y calidad, además, se realiza un estudio de estimación de la vida útil de los modelos obtenidos.

Los resultados muestran que los paneles Sándwich tienen una transmitancia muy superior al panel “SPT” que cuenta con una rotura de puente térmico, siendo la diferencia de $1,63 \text{ W/m}^2\text{K}$. Los resultados térmicos también varían en función del espesor del panel ya que la desviación en la transmitancia térmica entre un panel de 20 cm y otro de 24 cm está en torno al 30 %. Con los resultados obtenidos se ha observado que la calidad del aislante utilizado no es tan significativa como la eliminación los puentes térmicos que se puedan generar en el interior del panel, se lleva a cabo con la introducción de una capa adicional de aislante a lo largo de todo el panel, uniendo las diferentes capas de las que está conformado el panel a través de conectores. Este elemento toma mucha relevancia ya que, a la vista de los resultados se puede conseguir una reducción de la transmitancia global del panel de alrededor del 10 % si estos elementos se colocan de un material con una conductividad baja.

ABSTRACT.

The Master Thesis focuses on knowing the thermal performance of the prefabricated concrete panels of the company Pretersa-Prenavisa, as well as to elaborate a new optimal prefabricated concrete panel whose thermal transmittance values meet the requirements of the Código Técnico de la Edificación. In order to know where to focus the improvements of the prefabricated panels, the thermal changes that take place in the interior air of a room were observed using the panels of the models generated by analyzing the heat flows that occur in the prefabricated panels.

The prefabricated panels chosen to study their thermal behavior have been the "SPT" panels (No thermal bridge) and the Sandwich panels, both panels with thicknesses of 20 or 24 centimeters. During the study, different models of prefabricated panels with different materials are developed with the aim of observing the variations that occur in thermal transmittances and temperatures.

To analyze the thermal analysis and study the necessary boundary conditions and thermal loads, a 3D modeling software called Solidworks software is used. Microsoft Excel is used to process data and obtain tables and diagrams. The results are also analyzed by comparing cost and quality, in addition, a survey is carried out to estimate the useful life of the models obtained.

The results show that the Sandwich panels have a much higher transmittance than the "SPT" panels that have a thermal bridge break, being the difference of $1.63 \text{ W / m}^2\text{K}$. The thermal results also vary depending on the thickness of the panel, with an approximate deviation of 30% in the thermal transmittance between a panel of 20 cm and another of 24 cm.

With the results obtained it has been observed that the quality of the insulation used is not as significant as the elimination of thermal bridges that can be generated inside the panel, it is carried out with the introduction of an insulating thermal layer along the entire panel, joining the different layers of which the panel is formed through connectors.

This element may be particularly relevant according to the results, when a reduction in the overall transmittance of the panel of around 10% can be achieved if these elements are placed from a material with a low conductivity.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1 Problema energético.....	6
1.2 Solución de vivienda industrializada.....	8
1.3 Eficiencia energética en viviendas.....	8
1.4 Normativa vigente y certificados	12
1.5 Objetivos.....	13
2. METODOLOGÍA.....	13
2.1. Contextualización del proyecto.....	14
2.2. Cronograma.....	14
2.3. Variables.....	25
2.4. Herramienta utilizada.....	25
3. RESULTADOS	26
3.1. Análisis estático.....	26
3.2. Análisis transitorio.....	28
4. DISCUSIÓN.....	33
5. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS.....	38
BIBLIOGRAFÍA.....	40

1. INTRODUCCIÓN.

1.1 Problema energético.

En la última década, la Unión Europea ha tomado mucha conciencia con reducir las emisiones en el sector de la construcción. No hay que olvidar que las emisiones ocasionadas por este negocio, y por su industria asociada, son muy importantes dentro de todas las emisiones de gases de efecto invernadero. Además de las emisiones, en el sector de la construcción las demandas de recursos naturales son muy elevadas, mucho mayores que en cualquier otro sector. ^{1,2}

El ritmo actual de nuestras sociedades se puede llevar a cabo gracias a la alta densidad energética de los combustibles fósiles ya que son fácilmente transportables y la obtención de electricidad puede tener una gran flexibilidad. El crecimiento demográfico y el desarrollo desregulado provoca un incremento enorme de las emisiones de gases de efecto invernadero, debido ya que se demanda un mayor uso de energía. La producción de energía aumentó un 3,2% en el año 2018 (International Energy Agency, 2020). ³

Según Statista: *“La generación de energía eléctrica en España se situó en 2021 en torno a los 259.850 gigavatios-hora. El 20,8% de la electricidad producida procedió de la energía nuclear, que deja de ser de esta forma la principal fuente energética nacional, posición que ya ocupa la energía eólica. De hecho, los aerogeneradores instalados a lo largo de todo el territorio español fueron responsables de casi el 23,5% de la electricidad producida en el país. Por su parte, el ciclo combinado completa el podio al estar detrás del 17,1% de la energía eléctrica generada en el último año.”*

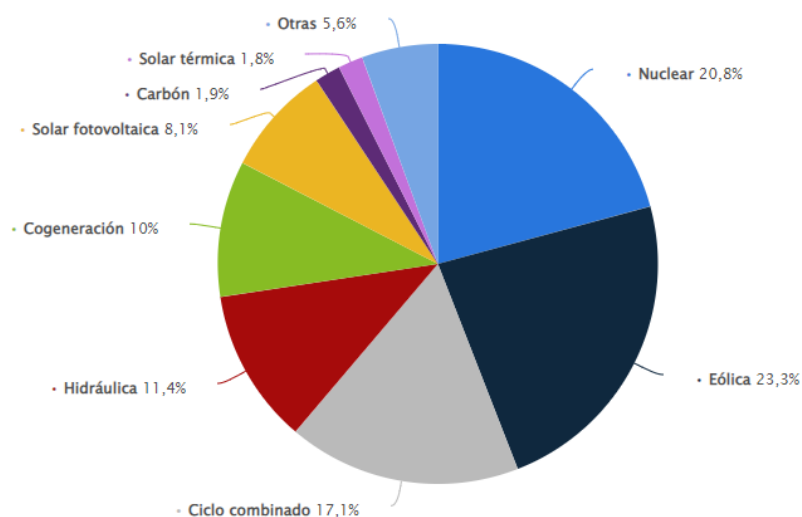


Ilustración 1. Fuentes de generación de energía. Fuente: Statista⁴

Según los informes que maneja la propia Unión Europea, los edificios consumen el 40% de los materiales, el 40 % de la energía primaria y generan el 40 % de los residuos. Conociendo estos valores, debería ser capital el intentar disminuir o mitigar el impacto ambiental que ocasiona este sector. Para ello, se deberá conocer donde se encuentran las emisiones más importantes para poder elaborar medidas correctoras⁵.

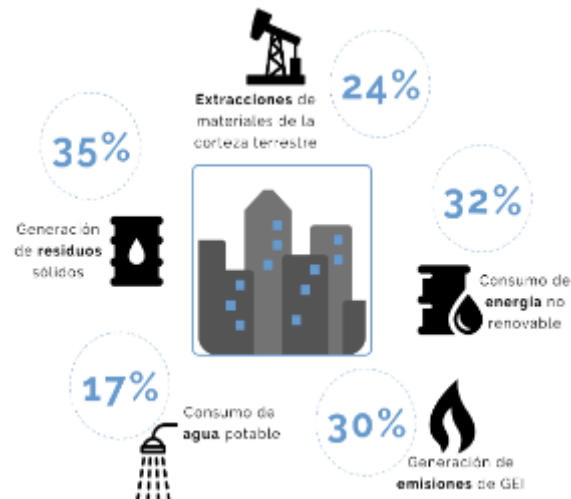


Ilustración 2. Porcentajes de consumo energético. Fuente: ACR⁵.

Como se puede observar en la, ilustración 2, una gran parte de las emisiones se producen en el mantenimiento y el uso de los edificios. Es por ello, que la Unión Europea se ha marcado diferentes objetivos para disminuir estas emisiones y mejorar la eficiencia energética. Por ejemplo, en 2012, se aprobó una Directiva de Eficiencia Energética (2012/27/UE) con lo que se fijaban una serie de medida para mejorar la eficiencia energética un 20% para 2020. Pero en 2018 se aprobó la Directiva de Eficiencia Energética la cual aumentaba el esfuerzo de reducción de emisiones. Esta directiva tiene por objetivo mejorar la eficiencia energética en un 32,5% para 2030. Esto se puede traducir en que la energía por la Unión Europea no puede superar los 1273 megatonelada equivalente de petróleo (Mtep) de energía primaria y/o 956 Mtep de energía final.⁶

Para cumplir con estas nuevas exigencias, las directivas europeas definían los edificios de “Consumo energético casi nulo” como “*un edificio con un nivel de eficiencia energética muy alto (...). La cantidad casi nula o muy baja de energía requerida debería estar cubierta, en muy amplia medida, por energía procedente de fuentes renovables, incluida la energía procedente de fuentes renovables producida in situ o en el entorno*”.⁶

1.2 Solución de vivienda industrializada.

Las viviendas con elementos de hormigón prefabricado están ganando cada vez mayor importancia. Gracias al proceso de industrialización se puede asegurar un control de calidad exhaustivo en toda su ejecución⁷. Además, los procesos de construcción de este tipo de viviendas son más sostenibles que la mayoría de las edificaciones actuales ya que los materiales empleados son de mucha mayor calidad que los que se emplean en la construcción in-situ⁸.

El sector de la vivienda industrializada en España todavía tiene un valor residual en comparación con otros países europeos. Este mercado solo supone el 1% del total frente al 9% de Alemania o Países Bajos donde representa el 50 % del total. La tendencia en España muestra un claro ascenso, ya que las administraciones están haciendo muchos esfuerzos para que esto cambie. Las empresas que se dedican a la vivienda industrializada están viendo un cambio de tendencia en el consumidor ya que este tipo de viviendas presentan muchas más ventajas frente a la construcción tradicional y el ahorro de tiempo en la entrega de la obra puede ser de hasta el 50%.⁹

Este tipo de construcción se emplea, fundamentalmente, en viviendas unifamiliares y el reto ahora es introducir esto en bloques de pisos. Para activar este sector, se ha creado la Plataforma para la Industrialización de Viviendas (PIV) con el objetivo último de colaborar con las distintas entidades del sector para dinamizarlo, fortalecerlo y promocionar la industrialización.

En cuanto a normativa¹⁰, en 2021 se han impulsados nuevos textos que dan cobertura a este nuevo sistema constructivo como por ejemplo la norma **UNE 127050** y el nuevo Código Estructural, que deroga la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08) y que contiene nueva reglamentación técnica de estructuras de hormigón.

La vivienda industrializada tiene que ser el futuro del sector de la construcción ya que la mano de obra en el sector es cada vez más escasa debido a las jubilaciones y al poco atractivo entre los jóvenes. Esta nueva industria requerirá de nuevos perfiles profesionales

1.3 Eficiencia energética en viviendas.

Según la Directiva Europea de Eficiencia Energética en Edificios, el 40% del consumo energético en la Unión Europea proviene de los edificios, aparte de generar el 36% de las emisiones contaminantes. Además, el parque inmobiliario está muy envejecido y el 35% de los edificios tiene más de 50 años.

En la actualidad, el mundo está inmerso en una crisis energética y es por eso por lo que el ahorro energético debe ser una pieza clave a la hora de construir o rehabilitar nuevos edificios. La unión europea ya viene años atrás trabajando en la elaboración de ambiciosas leyes y cambios normativas que permitan mejorar la eficiencia energética. Según la propia Unión

Europea, la eficiencia energética del edificio es “cantidad de energía calculada o medida que se necesita para satisfacer la demanda de energía asociada a un uso normal del edificio, que incluirá, entre otras cosas, la energía consumida en la calefacción, la refrigeración, la ventilación, el calentamiento del agua y la iluminación”.¹¹

Una de las claves para mejorar la eficiencia de un edificio está en su envolvente. La envolvente es un conjunto constructivo que se ubica en el exterior de la edificación y se encarga de dar protección al interior de las inclemencias meteorológicas. Es clave para el cumplimiento de las exigencias energéticas que se fijan en la normativa y certificados antes vistos. Esta envolvente debe presentar la mayor continuidad posible para evitar fugas o entradas de aire indeseadas y, además, debe tener una gran eficacia de protección térmica basada en los mejores aislamientos.

Para conseguir una buena envolvente deberemos tener algunos conceptos bastante claros. Estos términos son:

- Inercia térmica
- Puentes térmicos
- Transmitancia térmica

Si la envolvente que se construya tiene estos tres conceptos controlados se podrán conseguir unos valores de demandas energéticas no muy elevados.

- **Inercia térmica:**

Se puede definir como la cualidad que tienen los materiales de conservar la energía proveniente de la radiación solar y después irla desprendiendo poco a poco¹². Por este motivo, es un concepto que se debe tener muy en cuenta en las envolventes térmicas de los edificios ya que se puede llegar a ahorrar energía de climatización en el interior de los edificios al conseguir una temperatura mucho más constante^{13,14}.

Estas mejoras energéticas se deben al fenómeno de amortiguación de las temperaturas ya que permite que el edificio se encuentre durante más tiempo en la zona de confort sin necesidad de gasto energético adicional. Este fenómeno se explica perfectamente en el “Manual de aplicación de la Energía Térmica” de ASA (Asociación de sostenibilidad y arquitectura)¹⁵. Cuando en el exterior existe una temperatura muy elevada, la transferencia de calor se produce del exterior hacia el interior de la estancia. A lo largo del día la temperatura va ascendiendo hasta que se produce el máximo diario a una hora concreta. La inercia térmica se encarga de retrasar ese pico máximo y de atenuar la amplitud de la onda de temperatura^{16,17}.

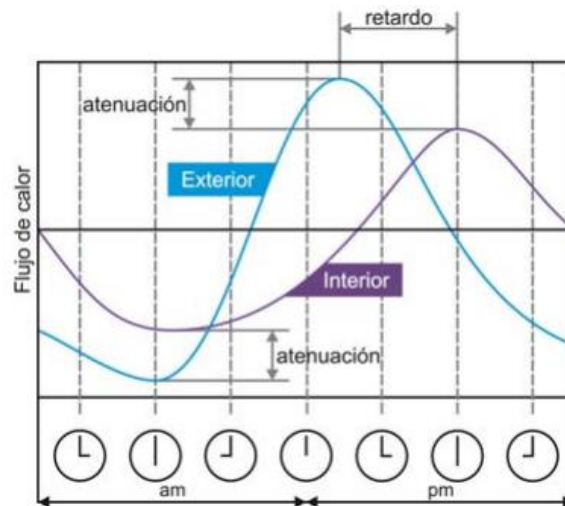


Ilustración 3. Variación de flujo de calor que atraviesa una superficie. Fuente: IECA.

- **Puentes térmicos:**

Según el **Código Técnico de la edificación**¹⁸, los puentes térmicos son zonas de las envolventes en la que hay pérdida de la uniformidad. Estos cambios aparecen en la norma **UNE-EN ISO 10211**¹⁹ la cual diferencia tres cambios en la envolvente. Estos son:

- Penetraciones completas o parciales en el cerramiento del edificio, de materiales con diferente conductividad térmica
- Un cambio en el espesor.
- Una diferencia entre las áreas internas o externas, tales como paredes, suelos o techos.

El evitar al máximo este tipo de elementos es prioritario para reducir la demanda energética del edificio. También, son causa principal de la aparición de humedades gracias a las condensaciones superficiales debidas a la disminución de la temperatura de las superficies interiores.

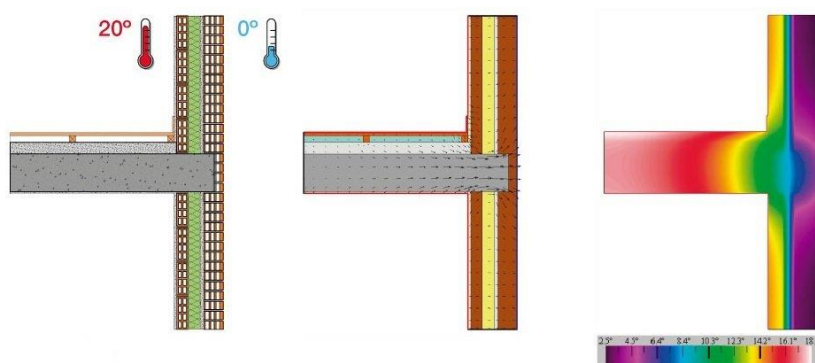


Ilustración 4. Puentes térmicos en edificación. Fuente:

- **Transmitancia térmica:**

Es uno de los conceptos más importantes a la hora de abordar la mejora de eficiencia térmica de un edificio. La transmitancia térmica es la encargada de cuantificar la cantidad de calor que fluye por unidad de tiempo y superficie entre un material que separa dos espacios con una diferencia de temperatura de más de un grado centígrado. Es por esto es fundamental conocer el valor de esta transmitancia para acometer mejoras en el aislamiento. Su unidad de medida es $W/m^2 K^{20,21}$.



Ilustración 5. Significado de la transmitancia. Fuente: María Blender. Arquitectura y energía.cl 2014

Para el cálculo de la transmitancia térmica se pueden seguir las fórmulas que están detalladas a continuación. Estas se encuentran en **CTE en el Documento Básico HE-Ahorro de Energía²²**.

Como podemos ver, la transmitancia térmica tiene una relación inversa con la resistencia térmica de los materiales. Esta fórmula la podremos utilizar tanto para el cálculo de transmitancias de cubiertas o fachadas.

$$U = \frac{1}{R_T}$$

siendo,

R_T la resistencia térmica total del componente constructivo [$m^2 \cdot K / W$].

Ilustración 6. Ecuación de transmitancia térmica. Fuente: CTE.

La resistencia térmica total R_T de un componente constituido por capas térmicamente homogéneas se calcula mediante la expresión:

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se} \quad (2)$$

siendo,

R_1, R_2, \dots, R_n las resistencias térmicas de cada capa definidas según la expresión (3) [$m^2 \cdot K / W$];

R_{si} y R_{se} las resistencias térmicas superficiales correspondientes al aire interior y exterior respectivamente, tomadas de la tabla 1 de acuerdo a la posición del cerramiento, dirección del flujo de calor y su situación en el edificio [$m^2 \cdot K / W$].

Ilustración 7. Ecuación de Resistencia térmica total. Fuente: CTE.

La resistencia térmica es la medida con la que un material se opone a ser atravesado por el calor. Esta resistencia determina la propiedad de aislamiento térmico de un material. Es decir, este valor es característico de cada material y, como se puede ver en la ilustración 7, depende de la conductividad térmica del material y del espesor.

Las resistencias térmicas superficiales en contacto con el aire exterior dependerán del tipo de cerramiento, si son verticales u horizontales, su inclinación o la dirección del flujo (ascendente o descendente).

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (3)$$

siendo,

e el espesor de la capa [m]. En caso de una capa de espesor variable se considera el espesor medio;

λ la conductividad térmica de diseño del material que compone la capa, que se puede calcular a partir de los valores térmicos declarados según la norma UNE-EN 10456:2012. En el caso de materiales heterogéneos, como las fábricas, se puede considerar la conductividad equivalente del conjunto.

Ilustración 8. Ecuación resistencia térmica. Fuente: CTE.

Tabla 1 Resistencias térmicas superficiales de cerramientos en contacto con el aire exterior [$\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$]




Posición del cerramiento y sentido del flujo de calor		R_{se}	R_{si}
Cerramientos verticales o con pendiente sobre la horizontal $>60^\circ$ y flujo horizontal		0,04	0,13
Cerramientos horizontales o con pendiente sobre la horizontal $\leq 60^\circ$ y flujo ascendente (techo)		0,04	0,10
Cerramientos horizontales y flujo descendente (suelo)		0,04	0,17

Ilustración 9. Resistencias térmicas superficiales en contacto con aire exterior e interior. Fuente: CTE.

1.4 Normativa vigente y certificados

Directivas Europeas:

Las Directivas son normas que vinculan a todo Estado miembro destinatario, en cuanto al resultado que hay que alcanzar, dejando a las instancias nacionales la facultad de escoger la forma y los medios, es decir, cada Estado miembro tiene que cumplir sus fines, pero tiene libertad para elaborar su legislación interna de desarrollo¹¹.

En los últimos años, el parlamento europeo ha aprobado varias nuevas directivas en el marco de la eficiencia energética. Estas directivas son las siguientes^{23,24,25}:

- Directiva 2010
- Directiva 2012
- Directiva 2018

CTE (Código Técnico de la Edificación):

Es el marco normativo que establece las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios en relación con los requisitos básicos de seguridad y habitabilidad. El CTE constituye un instrumento para la transposición de las directivas europeas.

Para el presente trabajo se ha estado trabajando con el **DB-H1**, el cual nos habla sobre las características térmicas que debe tener la envolvente térmica de los edificios. En este documento básico también se detallan las necesidades de energía primaria que se necesita para alcanzar el bienestar térmico en función de la zona climática de su ubicación, del régimen de verano y de invierno, del uso del edificio, y en el caso de edificios existentes, del alcance de la intervención.

RITE (Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios):

Establece las condiciones que deben cumplir las instalaciones de calefacción, climatización y agua caliente sanitaria, para conseguir un uso racional de la energía. En este sentido, podemos decir que el RITE se enmarca en el plan de ahorro y eficiencia energética de España orientado a fomentar la utilización de energías limpias.

Además de las normativas y directivas existentes, existen lo que se denominan los certificados energéticos. Estos no resultan obligatorios pero que están muy extendidos. Se pueden ver más en detalle en el **anexo 1 normativa y certificados**.

1.5 Objetivos.

Por esto, con el presente trabajo se han fijado unos objetivos con los cuales cumplir con este aumento de exigencia en los estándares normativos. El objetivo principal del trabajo es crear un panel de hormigón prefabricado eficiente en relación coste y material cumpliendo a su vez con los requisitos del código técnico de la edificación con relación a la transmitancia térmica.

- **Objetivo secundario 1º:** Elaborar un panel prefabricado de hormigón que cumpliera con las exigencias de Ahorro energético del CTE.
- **Objetivo secundario 2º:** Analizar el comportamiento térmico de los modelos y analizar los puntos débiles de los mismos.
- **Objetivo secundario 3º:** Analizar los resultados de los modelos propuestos en el proyecto realizando un estudio comparativo de los resultados entre calidad y coste económico de los paneles.

2. METODOLOGÍA.

Se lleva a cabo un estudio comparativo de diferentes modelos de panel prefabricado de hormigón. A continuación, se describe el cronograma del proyecto y las distintas fases de las que consta.

2.1. Contextualización del proyecto.

El estudio comienza en el mes de julio de 2021 en la empresa **Pretersa-Prenavisa**. Se trata de una empresa dedicada a la ingeniería, diseño, fabricación y montaje de estructuras de hormigón prefabricado, localizada en La Puebla de Híjar, con más de 30 años de experiencia en el sector, avalada por las obras y edificaciones realizadas tanto en la península, como en las islas y zona centro-sur de Francia.

Cuenta con una superficie de 700.000 m², de los que 65.000 son cubiertos, es la única empresa del sector en aglutinar en un sólo Centro de Producción la mayor superficie industrial para fabricación y estocaje de Europa. En 2017 empezó a operar una segunda fábrica en Andújar (Jaén). Este centro de producción cuenta con una superficie de más de 70.000 m², de los cuales 20.000 son cubiertos. En 2020 se incorpora la fábrica de **Forsecusa** (Segovia) al grupo industrial **Pretersa-Prenavisa**. Esta sede ocupa una superficie de 65.000 m², de ellos 12.000 son cubiertos.

En la actualidad se encuentra inmersa en un proceso de integración con la prefabricadora **PRECON** debido a la reciente compra de PRETERSA-PRENAVISA por parte de Cementos Molins.

2.2. Cronograma

En la **ilustración 10** se detallan las distintas fases que se han ido siguiendo.

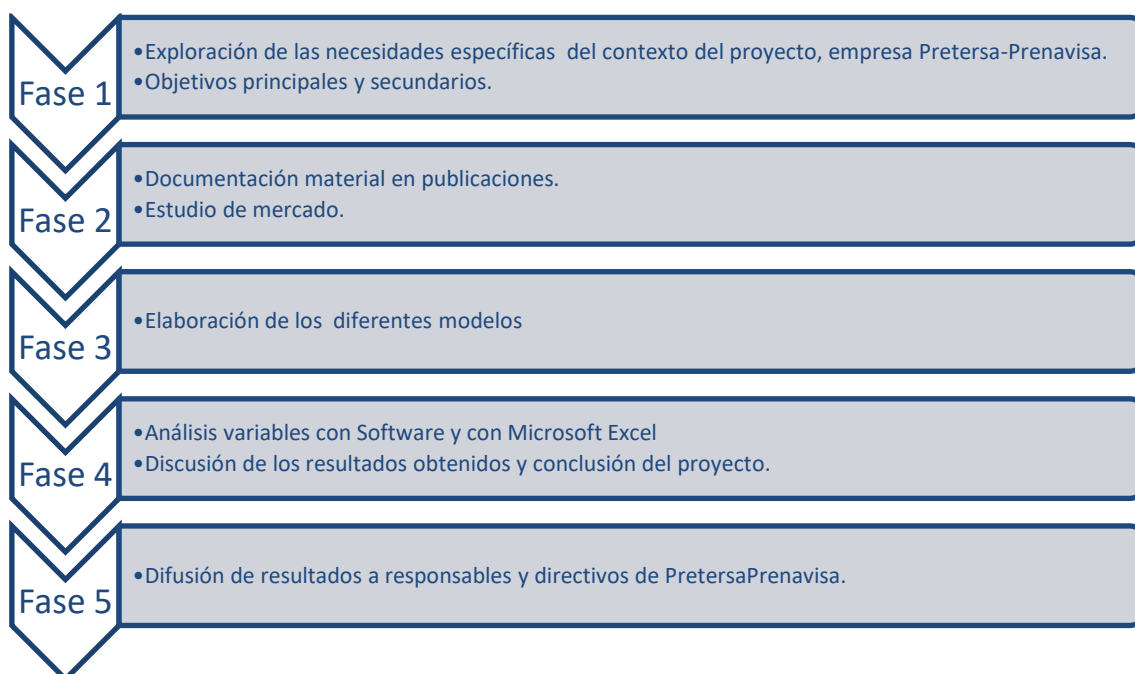


Ilustración 10. Cronograma descriptivo del proyecto.

Se comenzó a realizar el proyecto en el mes de julio de 2021 en el área de Dirección del Laboratorio central e I+D, con la búsqueda de la distinta normativa existente en España con relación a la construcción y a la eficiencia energética en vivienda.

Esta primera fase conllevó el primer mes de trabajo. Con la información encontrada, se decidió centrar el trabajo en realizar un análisis térmico a los paneles prefabricados de hormigón ya que **Pretersa- Prenavisa** no tenía ningún estudio sobre el comportamiento térmico que tenían sus cerramientos. Por esto, en la segunda fase se dedicó a la búsqueda bibliográfica con el objetivo de elaborar un modelo que pudiese mostrar el comportamiento de estos paneles.

Al mismo tiempo, se comenzó a realizar un estudio de mercado de los distintos paneles prefabricados que comercializan las marcas de la competencia y, de esta forma, poder ver las características principales de los mismos.

Paneles prefabricados de hormigón	Espesor (mm)	Material aislante	Trans. térmica (W/m ² K)
PRETERSA-PRENAVISA (C24) -SPT	240	Lana de roca	0,43
TECNYCONTA	240	EPS	0,411
PlanasArk - Panel GRC	500	poliestireno extrusionado	0,55
PREFAGAIN	250	poliestireno extrusionado	0,37
THERMOCHIP	290	poliestireno extrusionado	0,17
BAUPANEL	412	EPS	0,111
PREFABRICADOS ALVE	240	EPS	0,557
PRAINSA	240	EPS	0,61639
IBP (iberian precast) - SPT	240	EPS	0,43

Tabla 1. Características principales de paneles

Además, como se puede ver en el **anexo 2 materiales**, se hizo una búsqueda de los distintos aislantes que se pueden encontrar en el sector de la construcción en la actualidad. Se decidió consensuar junto al director de laboratorio de calidad, cuáles serían los elegidos para introducirlos en los distintos modelos que se iban a ir generando.

Orgánicos	Conductividad (W/mK)
Algodón	0,035
Celulosa	0,039
Corcho - 50mm	0,037
Fibras de madera	0,039
PUR - 10 mm	0,0285
Poliestireno expandido - EPS- 10 mm	0,034
Poliestireno extruido - XPS	0,033
Inorgánicos	Conductividad (W/mK)
Lana de roca - 10 mm	0,035
Lana de vidrio	0,03
Mortero de perlita expandida	0,05
Vidrio celular - 20 mm	0,048
Aerogel - 10 mm	0,015
Espuma fenólica - 20 mm	0,02
PIR - 10 mm	0,021
Hormigón GRC	0,75
Hormigón celular	0,1

Tabla 2. Materiales aislantes

Como se puede ver en la **tabla 2**, los materiales elegidos para la introducción en los modelos fueron los que aparecen resaltados en amarillo: Porex, aerogel, PIR y hormigón celular.³⁶

Una vez conocidos los materiales a utilizar en la generación de modelos se pasó a consensuar el software a utilizar. En un primer momento, se comenzó a realizar el modelo en 3D con el software **ABAQUS**. Al encontrar ciertas limitaciones en el modelaje, se decidió cambiar al software **SOLIDWORKS** por elección del investigador principal. Además, este software también cuenta con resolución de análisis térmicos con lo cual se decidió empezar a realizar el modelado con él.

Antes de comenzar con el modelado de los paneles se decidió hacer un pequeño estudio de las distintas tipologías de cerramiento que existen en **Pretersa-Prenavisa**. Finalmente, se decidió escoger las dos tipologías más utilizadas por la empresa para realizar el cerramiento de las edificaciones.



Ilustración 11. Modelo panel prefabricado tipo sandwich. Fuente: Catalogo Pretersa-Prenavisa

- **Panel tipo sándwich:** Este tipo de panel cuenta con aislamiento en el interior para mejorar el aislamiento térmico y hacerlo más ligero. Está configurado planchas cuadradas de Porex pan o lana de roca en el interior del panel. La unión de las capas exterior e interior del panel se realiza a través de los nervios de hormigón. Existen diferentes espesores de panel: 16, 20 o 24 cms. Para el panel de espesor 16 cms cuenta con un espesor de aislante de 4 cms, el de espesor 20 cms cuenta con un espesor de aislante de 6 cms y el de 24 cms cuenta con un espesor de aislante de 10 cms.

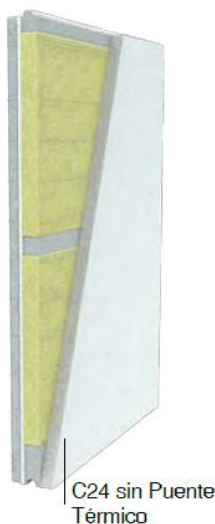


Ilustración 12. Modelo panel prefabricado tipo SPT. Fuente: Catalogo Pretersa-Prenavisa

- **Panel SPT (Sin puente térmico):** Este tipo de paneles se suele utilizar en situaciones donde el cliente busca unas condiciones de aislamiento mejores que las convencionales. La diferencia con la anterior tipología es que se introduce una plancha de aislante para eliminar el puente térmico que se produce en los nervios del panel. Está capa de aislante suele ser de unos 3 cms de espesor y se suele utilizar Porexpan como material. Los espesores con los que cuenta esta tipología son los mismos que en la tipología anterior. La unión entre la capa interior y la exterior se realiza a través de unos conectores de acero.

Vistas las dos tipologías, se decidió modelar los paneles de dos espesores distintos, es decir, un primer grupo de paneles de **20 cms** de espesor y un segundo grupo de paneles de **24 cms**. Además, en el modelado del panel SPT se introdujeron también elementos de conexión, los cuales unen las distintas capas de las que están conformados los paneles, de dos tipologías distintas: Conector **PEIKKO** y conector **CHRYSOFLEXO**.

Modelos	Aislante	Tipo de conector	Espesor (cms)
PANEL SANDWICH	Porexpan	-	20 y 24
Panel SPT (Porex)	Porexpan	Peikko	20 y 24
Panel SPT (Porex)	Porexpan	Chrysoflexo	20 y 24
Panel SPT (Aerogel - Porex)	Aeroge-Porexpan	Chrysoflexo	20 y 24
Panel SPT (Aerogel -PUR)	Aerogel-Poliuretano	Chrysoflexo	20 y 24
Panel SPT (PUR - Porex)	Poliuretano-Porexpan	Chrysoflexo	20 y 24
Panel SPT (PIR - HC)	PIR-Hormigón celular	Chrysoflexo	20 y 24
Panel SPT (AG - PIR)	Aerogel-PIR	Chrysoflexo	20 y 24

Tabla 3. Tabla de modelos realizados

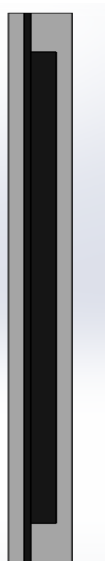


Ilustración 13.
Distribución de
capas en panel
SPT(Porex)

En primer lugar, para generar los modelos en el software SOLIDWORKS se hicieron los croquis y extrusionado de las distintas capas con las que cuentan estos paneles.

A modo de ejemplo se va a explicar la realización del modelo Panel SPT (Porex) - PEIKKO. Este panel cuenta con una capa exterior e interior de hormigón de 5 cms de espesor seguido de una capa de Porex, encargada de realizar la rotura del puente térmico entre capas, y una capa interior de material aislante. El panel cuenta con unos nervios transversales para dar rigidez al mismo, el número de estos nervios varían en función de las dimensiones del panel. En las **ilustraciones 13 y 14**, se puede observar cómo queda la distribución de capas y la cantidad de nervios que contiene el panel en estudio.

Posteriormente, se generaron los modelos en 3D de los conectores que van en el interior del panel, en este caso, los PEIKKO. La conexión se realiza con la introducción de unas celosías y unos ganchos que se colocan en el interior uniendo las dos capas de hormigón. Estos conectores se colocan cada 50 cms, aproximadamente, a lo largo de todo el panel y la anchura de los mismos varían en función del espesor total del panel.



Ilustración 14. Distribución de nervios y aislante en el panel SPT (Porex)

En la **ilustración 16** se puede ver el conector tipo celosía, PDM, y en la **ilustración 15** se puede ver el conector tipo gancho, PPI. Las larguras y anchuras varían en función de los espesores y la altura de los paneles en los que vayan a colocarse. La celosía PDM se ha modelado con dos barras longitudinales de $\varnothing 10$ mm y una barra en celosía de $\varnothing 5$ mm. El conector PPI esta formado por una barra de $\varnothing 4$ mm.

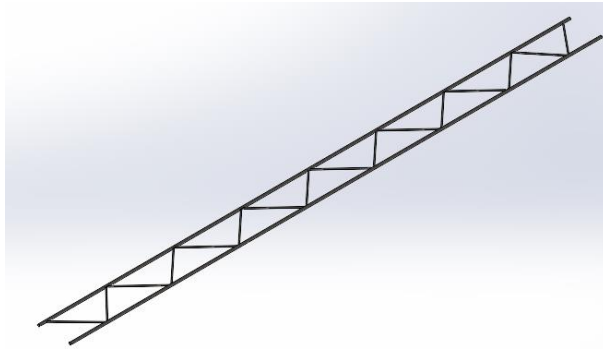


Ilustración 15. Celosía PDM de conector PEIKKO.



Ilustración 16. Conector PPI de PEIKKO.

Como se ha comentado anteriormente, los conectores se colocarán cada 50 cms a lo largo de todo el panel quedando distribuido de la forma que aparece en la ilustración 17.

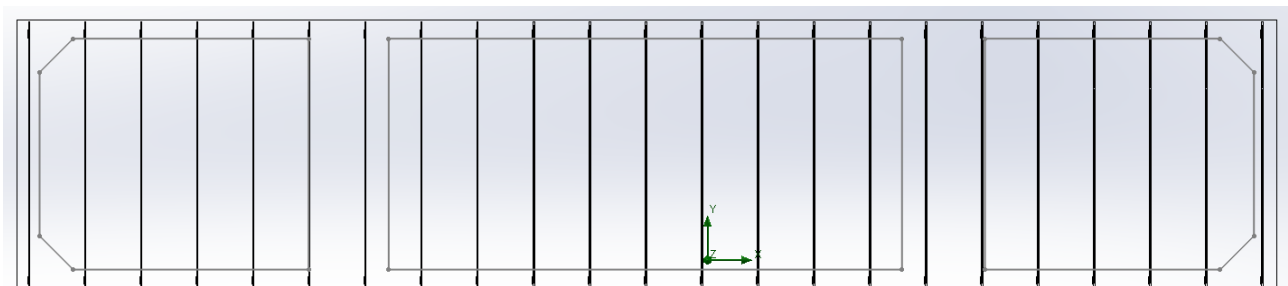


Ilustración 17. Distribución de conectores PEIKKO.

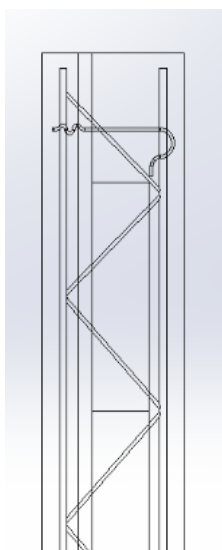


Ilustración 18. Fijación conectora Peikko entre capas.

Los conectores tipo PPI se colocarán en la zona de borde, tanto en la zona superior como inferior. Como ya se ha explicado anteriormente, este tipo de conector tiene la misión de conectar la capa interior de hormigón con la exterior debido a la presencia de la capa de aislante en la rotura de puente térmico. Los diámetros de las barras utilizadas en este tipo de conectores serán siempre los mencionados anteriormente.

En los paneles donde el conector sea de la marca Chrysoflexo el modelado se producirá de una forma similar, en este caso, bastará con la colocación de los conectores en la zona de borde y no se colocará ningún tipo de celosía. La colocación de este tipo de conector se realiza en la malla inferior del panel y queda fijado gracias al hormigón ya que es la única unión entre capas de hormigón.

A continuación, se mostrará el conector de Chrysoflexo, **ilustración 20**, y la distribución, **ilustración 19** y **21**, de los mismos. El material del que está compuesto este material son las fibras de vidrio y se puede considerar aislante.

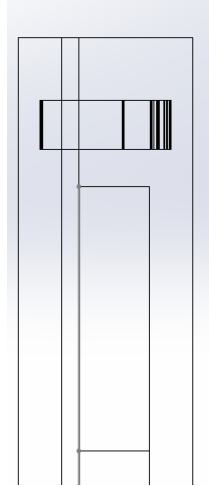


Ilustración 19. Fijación conectora Chrysoflexo entre capas.

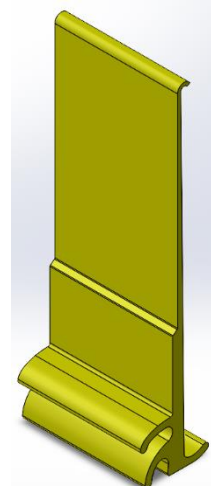


Ilustración 20. Conector Chrysoflexo.

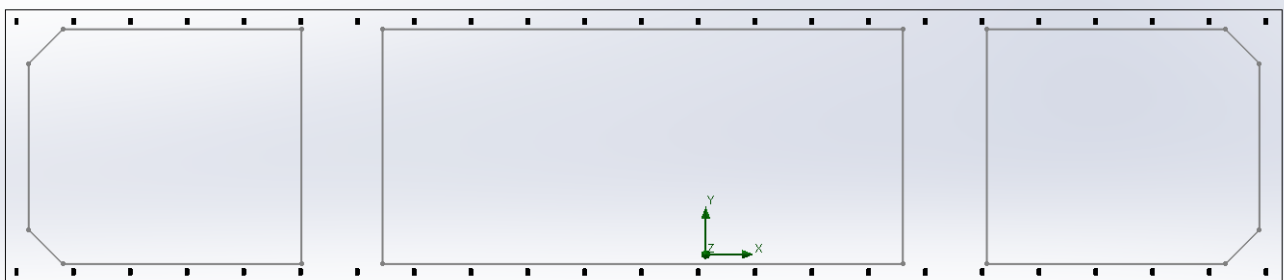


Ilustración 21. Distribución conectores Chrysoflexo.

Una vez generados los modelos 3D, se realizó un análisis térmico a los distintos elementos. En primer lugar, se comenzó por fijar las condiciones de contorno del problema, éstas fueron las temperaturas interiores y exteriores del panel. Se consideró una temperatura ideal de superficie interior de 20 °C y una exterior de 60 °C.

Para la resolución de este análisis **SOLIDWORKS** utiliza elementos finitos. Los modelos CAD preparados en el software se discretizan (malla) en elementos finitos cuyo tipo depende de la geometría que tenga el modelo generado. Para realizar este análisis se han utilizado elementos sólidos finitos de 3D de segundo orden. ²⁶

Debido a que se realizaron los modelos de paneles de 9 metros de largo y 2,4 metros de alto y a la falta de potencia de cálculo, no se pudo aplicar elementos finitos a toda la pieza por lo que se decidió dividir el modelo en tres partes más pequeñas. A continuación, se muestran las zonas a estudiar.

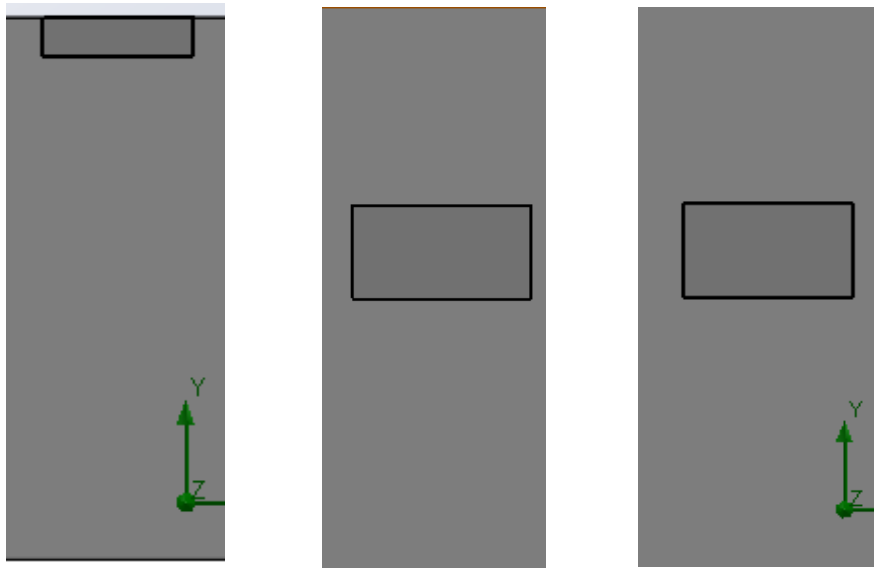


Ilustración 22. Zonas a estudiar.

Una vez decididas cuales iban a ser las zonas de estudio, se necesitaba saber cuál era el tamaño de elemento más adecuado para optimizar el cálculo así que para ello se realizó un análisis de sensibilidad.

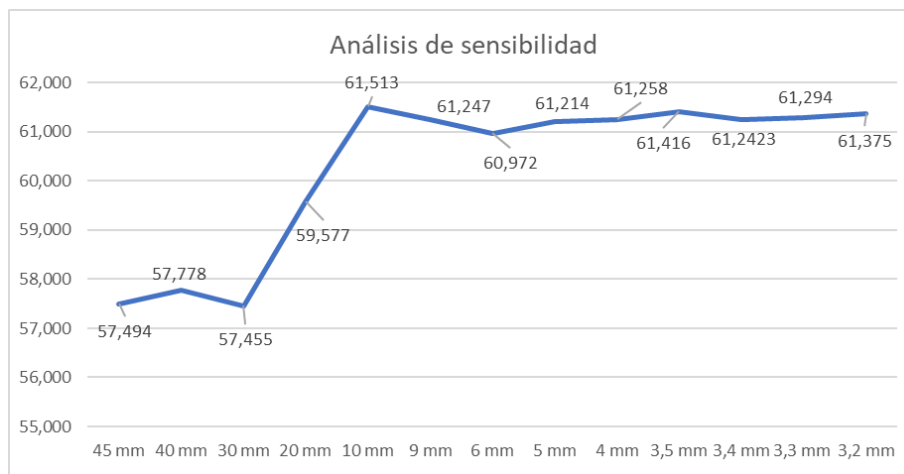


Ilustración 23. Análisis de sensibilidad.

Análisis de sensibilidad (mm)	Flujo de calor medio (W/m2)
45	57,49
40	57,78
30	57,45
20	59,58
10	61,51
9	61,25
6	60,97
5	61,21
4	61,26
3,5	61,42
3,4	61,24
3,3	61,29
3,2	61,38

Tabla 4. Tamaño de elemento y flujo de calor medio.

Al modelarse un panel de gran tamaño se decidió por centrar el estudio en tres zonas del panel prefabricado. En cada una de ellas se realizó un mallado y se introdujeron las condiciones de contorno anteriormente expuestas. Estas tres zonas fueron las siguientes.

- Zona borde
 - Volumen: 0,0212 m³
 - N.º de elementos: 499.619
 - Tamaño: 3,5 mm
- Zona con aislante
 - Volumen: 0,0502 m³
 - N.º de elementos: 1.358.473
 - Tamaño: 3,5 mm
- Zona sin aislante
 - Volumen: 0,0576 m³
 - N.º de elementos: 1.349.335
 - Tamaño: 3,5 mm

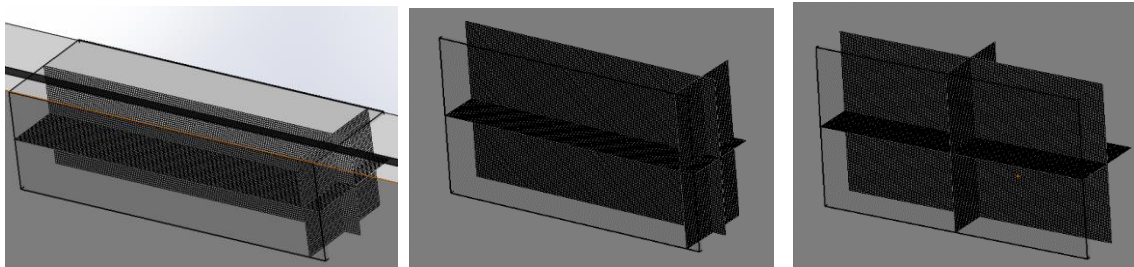


Ilustración 24. Malla en zonas de estudio. Zona borde, zona con aislante y zona sin aislante.

Para la comprobación de los modelos se realizó una comparativa entre un modelo de panel sin conector PEIKKO y los datos obtenidos a través de las ecuaciones expuestas en el apartado de normativa. Como desviación máxima se consideró admisible una de, como máximo, el 7%.

Una vez realizados los modelos, se elaboró un segundo análisis térmico, esta vez de carácter dinámico para conocer el comportamiento térmico de los modelos realizados cuando son expuestos a unas condiciones de radiación y cambio de temperaturas a lo largo de 24 horas.

Para poder llevar a cabo esto se decidió el modelado de una estancia cuadrada a modo de edificio muy simplificado cuyo cerramiento iba a estar conformado por los modelos anteriormente realizados. Se comenzó por generar una base que simulase el suelo de la estancia con los cuatro pilares que soportasen las paredes. También se decidió disminuir el tamaño de los paneles para que la estancia no fuese demasiado grande y a la hora de realizar los cálculos tener la potencia necesaria de cálculo. Esta base se hizo de 5 metros de lado por lo que los paneles se tuvieron que realizar de nuevo para ajustarse a la nueva medida.

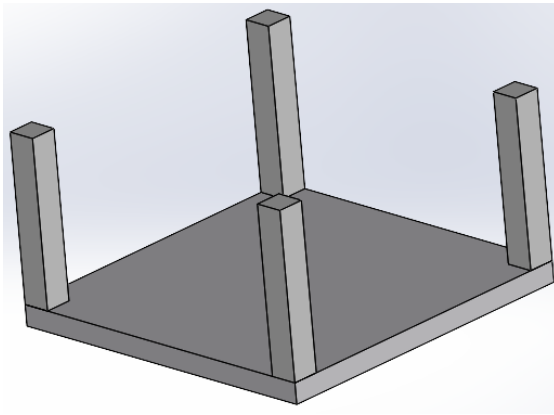


Ilustración 25. Base estancia.

A continuación, ilustración X, se puede observar la base.

Se tuvieron en cuenta las orientaciones de las fachadas y en las paredes que se encontraron en el este y oeste se colocaron huecos de ventanas modelizando también el cristal y obteniendo las propiedades del material de la biblioteca de SOLIDWORKS. En este modelo también se tiene en cuenta cierta ventilación de la estancia creándose dos aberturas de 13 cm de diámetro, una en el techo de la estancia y otra en la pared que se encuentra en la orienta oeste.

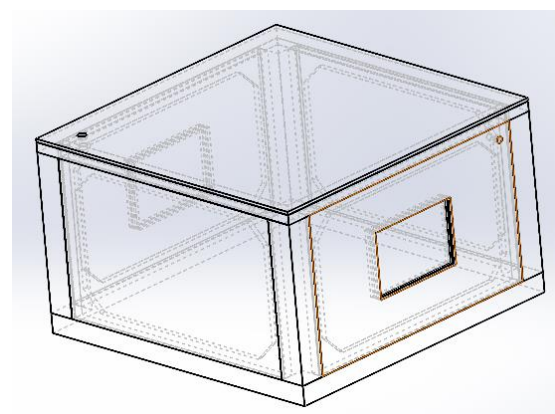
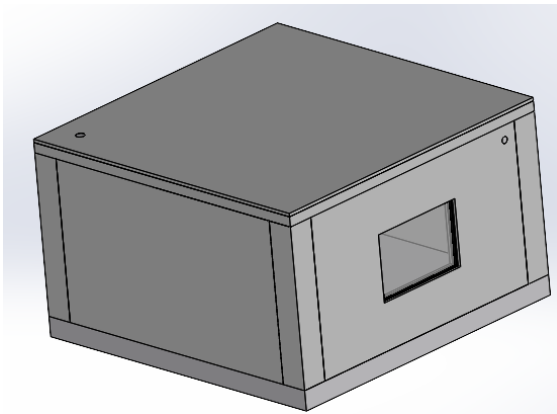


Ilustración 26. Modelo estancia.

Otro punto importante es la definición de la temperatura media en el interior de la estancia, e generaron nueve puntos de medida en el interior de la estancia para ser analizada. La temperatura media del espacio interior se calcula como la temperatura media de estos puntos.

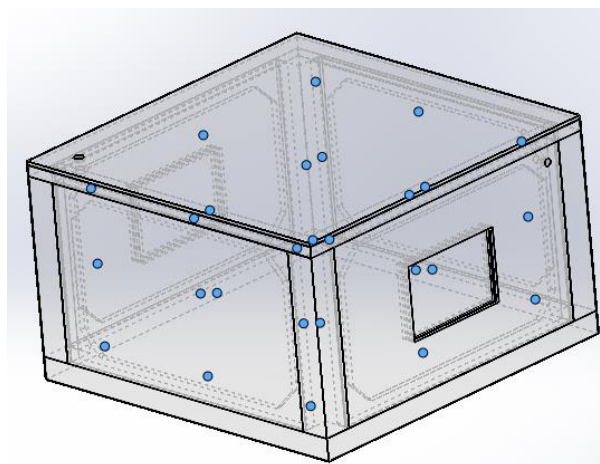
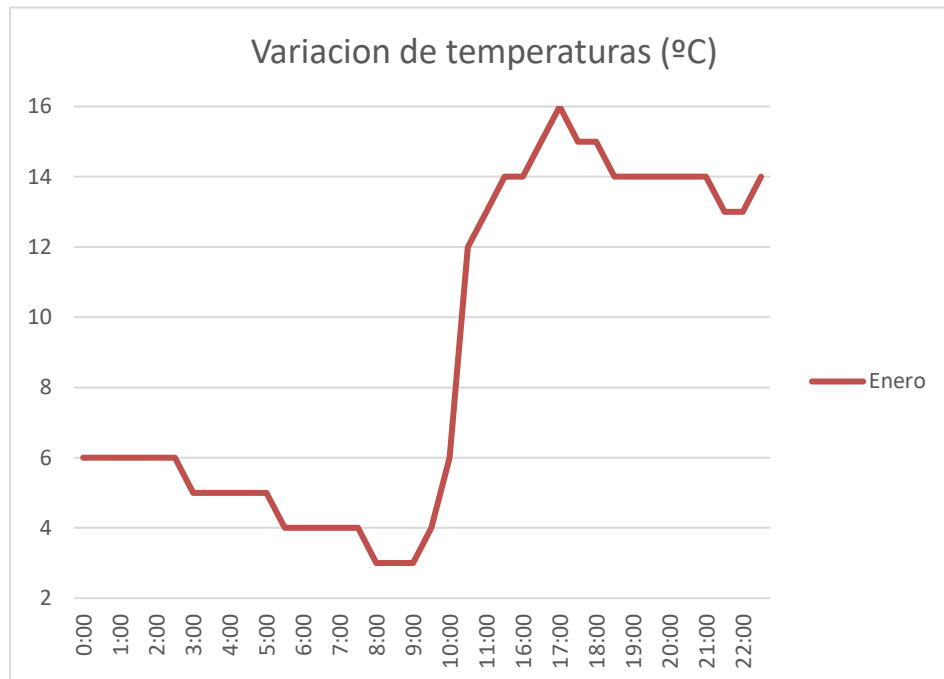


Ilustración 27. Puntos de medición de aire interior.

En esta ocasión, ya no se consideraron temperaturas de superficie constantes, sino que se consultaron diversas bases de datos para poder conocer temperaturas ambientales con el fin de obtener las variaciones de temperaturas en el interior de la estancia.

Se decidió estudiar el comportamiento del edificio en fecha de 21 de enero. Para los modelos de cerramiento no se tuvieron en cuenta los conectores para simplificar el modelo y que no conllevase demasiado tiempo realizar el cálculo. A continuación, se pueden ver las temperaturas ambientales que se dieron el día 21 de enero de 2021.²⁷



Gráfica 1. Temperaturas ambientales del día 21 de enero.

Fuente: El tiempo durante todo el año en cualquier lugar del mundo. (2021). De <https://es.weatherspark.com/>

Para la realización del modelo de análisis transitorio se utilizó otro módulo de SOLIDWORKS que se denomina **FLOWSIMULATION**. Este módulo realiza análisis de flujo de fluidos y se obtienen las soluciones a través de las ecuaciones completas de Navier-Stokes que gobiernan el movimiento de los fluidos. A este modelo se le introdujeron las condiciones de contorno del sistema y se realizó el mallado de la zona a estudiar. La zona a estudiar, **ilustración 28**, fue el interior de la estancia, por lo tanto, el mallado se realizó desde la pared exterior hacia el interior obviándose la zona exterior de la estancia.

Se introdujeron las propiedades de los materiales tanto sólidos como fluidos y se fijaron las “Goals” o metas del estudio. Posteriormente, como en el caso de este trabajo, se introduce el tiempo de simulación que se quiere alcanzar, es decir, 24 horas y se procede a la realización del cálculo.²⁸

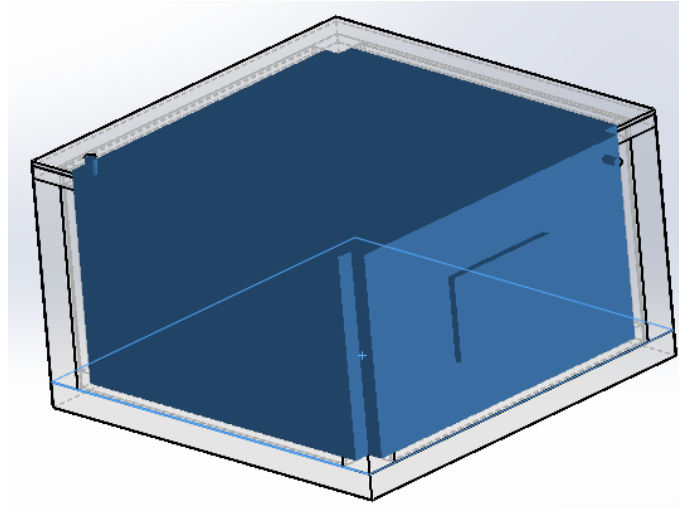


Ilustración 28. Dominio del fluido.

A continuación, se muestran las condiciones de contorno que se han tenido en cuenta para la realización de estos modelos.^{29,30,31,32}

- Caudal másico de entrada y temperatura de trabajo del fluido (aire).
- Presión estática en la abertura de entrada de aire.
- Coeficiente de convección entre la superficie externa y el ambiente.
- El suelo es considerado como adiabático.
- Las propiedades de radiación de las superficies.
- Las ventanas son consideradas como transparente a la radiación solar.

Parámetros	Valor
Renovaciones de aire	0,6 cambios aire/h
Caudal másico de aire	0,009216 m ³ /s
Presión estática de abertura	101325 Pa
Espesor cristal	5 mm
Conductividad térmica cristal	1.05 W/(m*K)
Coeficiente emisividad (ϵ)	0,88
Absorción solar (α)	0,7
Transparencia (τ)	0,9
Hout	10 W/m ² *K
Cielos despejados	20%
Latitud	41°
Suelo	Adiabático
Tiempo	Tiempo solar

Tabla 5. Parámetros utilizados en análisis dinámico.

2.3. Variables

Las variables empleadas han sido la conductividad, temperatura, flujo de calor y transmitancia térmica.

- **Conductividad térmica ($W/m \cdot K$)**: Es un tipo de variable independiente y se puede controlar a través de la modificación de los materiales aislantes. Este tipo de materiales afecta en gran medida a la facilidad que tiene el flujo de calor para trasladarse de una cara a otra del panel prefabricado de hormigón.
- **Temperatura ($^{\circ}C$)**: Este tipo de variable es también de tipo independiente ya que viene impuesta por las condiciones meteorológicas. Una mayor o menor temperatura ambiental o superficial hará que el flujo de calor que pueda atravesar el panel modelizado sea de un valor o de otro.
- **Flujo de calor (W/m^2)**: Esta variable dependerá directamente de los materiales con los que cuente el modelo que se realice. Servirá para estudiar donde se encuentran los puntos del panel donde tendremos una mayor transferencia de calor.
- **Transmitancia térmica ($W/m^2 \cdot K$)**: Esta variable también será de tipo dependiente tanto de la conductividad térmica de los materiales como del flujo de calor que atraviese el panel modelado. Servirá para tener una idea global de la facilidad que tiene la energía térmica de atravesar el panel prefabricado de hormigón.

2.4. Herramienta utilizada

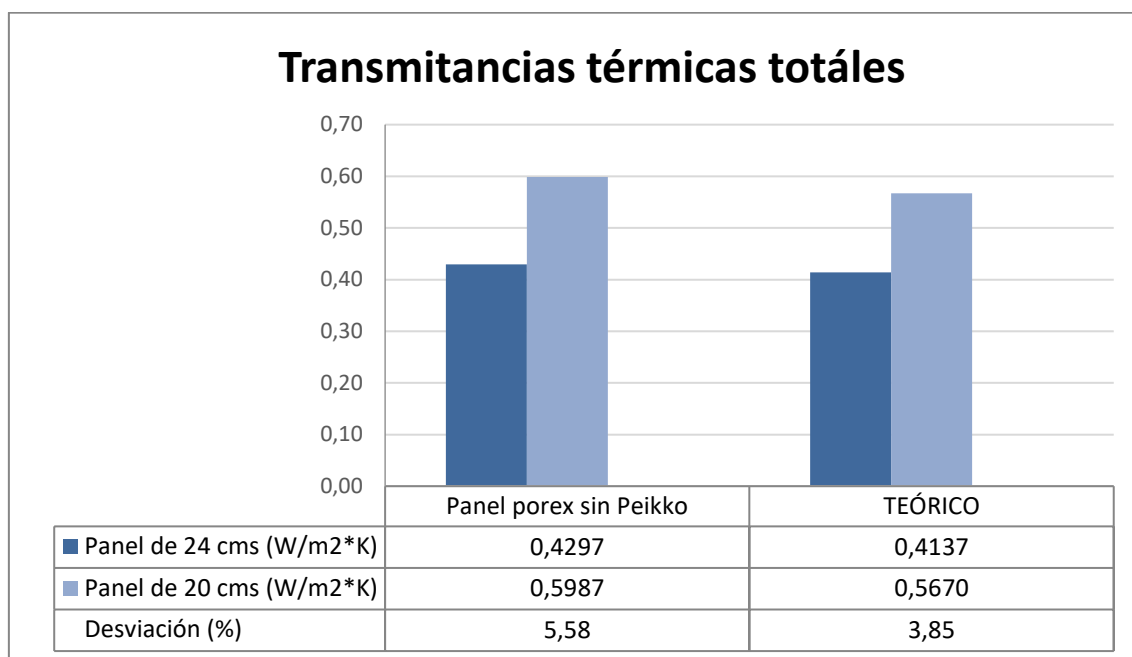
Para la realización del trabajo se apostó por la utilización del software SOLIDWORKS. Este software se emplea para la elaboración de diseño CAD 3D para el modelado de piezas y ensamblajes en 3D y planos en 2D, ofrece un abanico de soluciones para cubrir los aspectos implicados en el proceso de desarrollo del producto.

SOLIDWORKS proporciona soluciones intuitivas para cada fase de diseño, cuenta con un completo conjunto de herramientas que le ayudan a ser más eficaz y productivo en el desarrollo de sus productos en todos los pasos del proceso de diseño. Este software tiene también análisis mecánicos y térmicos. ³³

3. RESULTADOS

Tras el análisis de las variables se obtienen los siguientes resultados.

3.1. Análisis estático



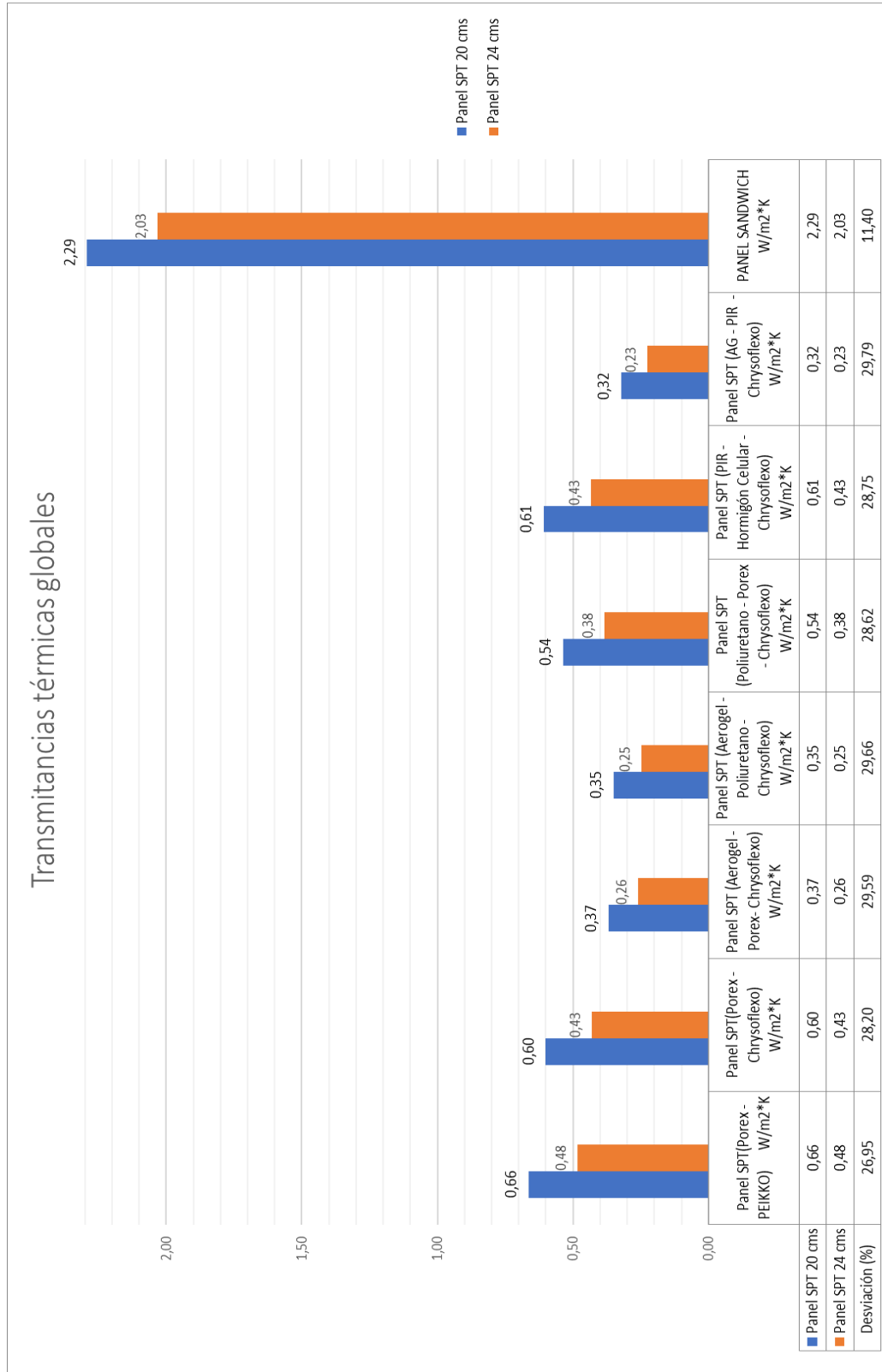
Gráfica 2. Transmitancias térmicas de panel ($W/m^2 \cdot K$)

En la gráfica 2, se reflejan los resultados de ambos paneles y las diferencias porcentuales en las transmitancias térmicas. En el panel de 20 cms la desviación que se obtiene con respecto al modelo teórico es del 5,48 % y, con respecto al panel de 24 cms, la desviación obtenida es del 3,85 %.

En la gráfica 3, se pueden observar los resultados obtenidos con relación a las transmitancias térmicas globales. Dentro de los siguientes resultados destaca la diferencia entre el panel tipo sándwich y el panel sin puente térmico, siendo ésta de $1,63 W/m^2 \cdot K$ entre el panel sin puente térmico que tiene una mayor transmitancia y el panel tipo sándwich.

En cuanto a las desviaciones, se pueden observar unos datos de transmitancias térmicas, entre un panel de 20 cm y otro de 24 cms, mayores en los paneles sin puente térmico que oscilarían en torno a un 30%. Con respecto al panel sándwich la disminución de la transmitancia con respecto al espesor no es significativa, ya que la desviación estaría en torno al 11 %.

La mayor desviación porcentual, 29,79%, se da en el panel sin puente térmico cuya rotura térmica se produce gracias al aerogel y cuyo aligeramiento se compone con aislante PIR. Así mismo encontramos que los resultados de las transmitancias térmicas son los menores.

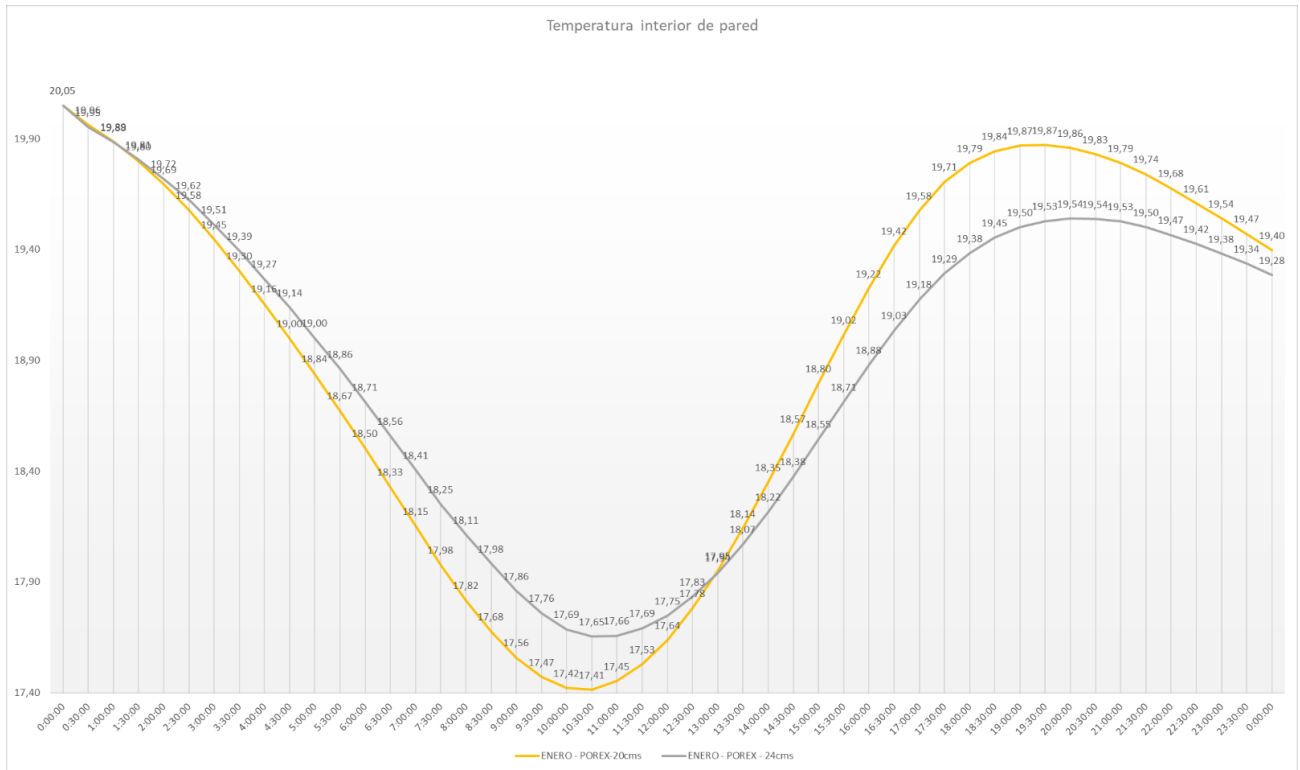


Gráfica 3. Transmitancias térmicas de los distintos modelos

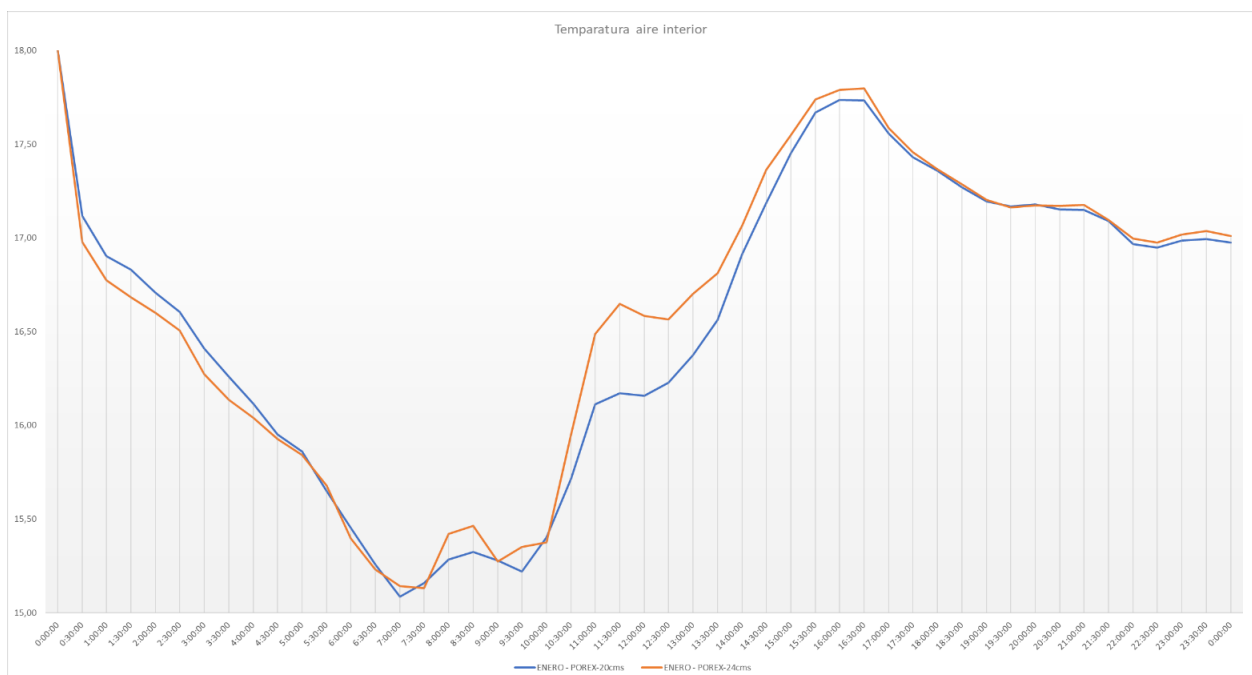
3.2. Análisis transitorio

➤ Modelo con paneles SPT-Porex

Temperatura superficial interior



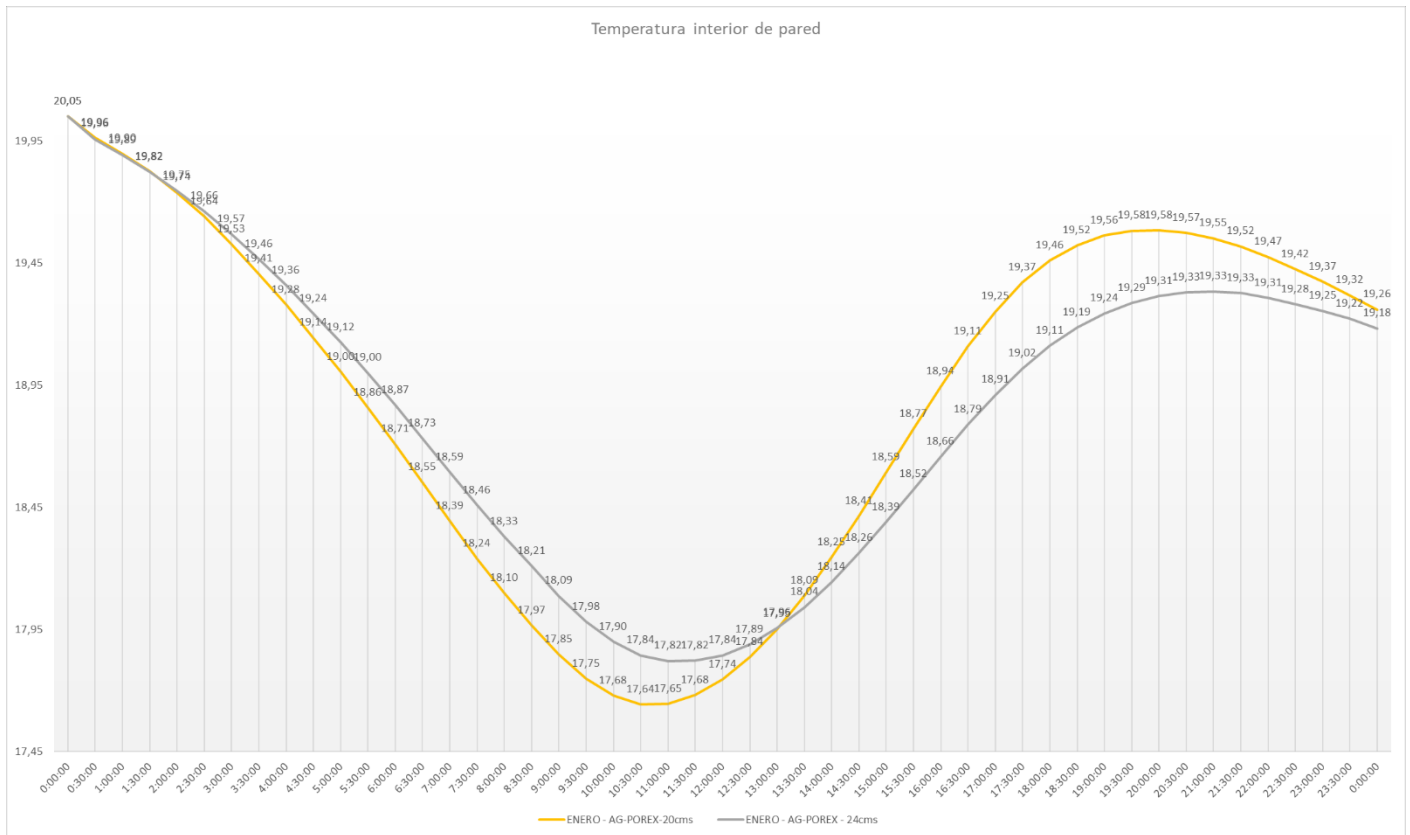
Gráfica 5. Temperatura pared interior. Panel SPT - Porex



Gráfica 4. Temperatura ambiental interior. Panel SPT - Porex

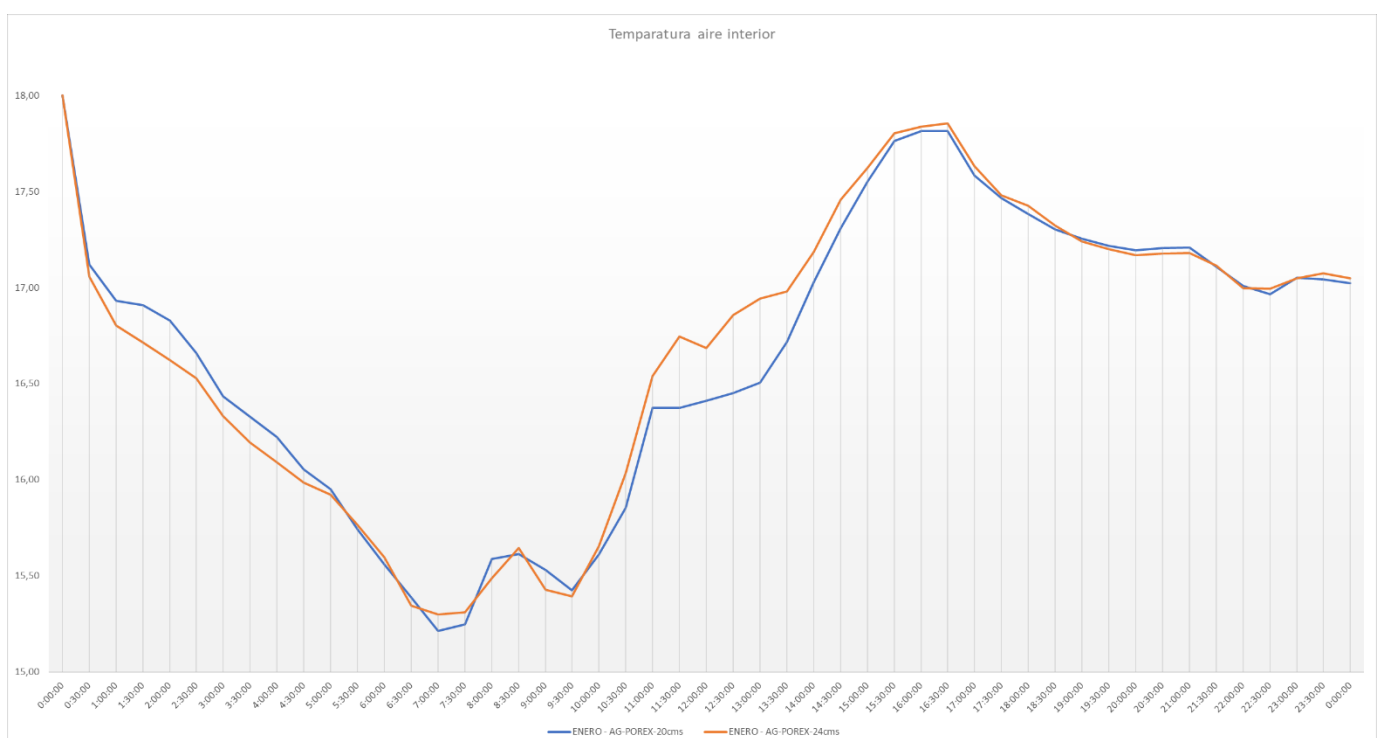
➤ Modelo con paneles SPT-AG-Porex

Temperatura superficial interior



Gráfica 6. Temperatura pared interior. Panel SPT - AG - Porex

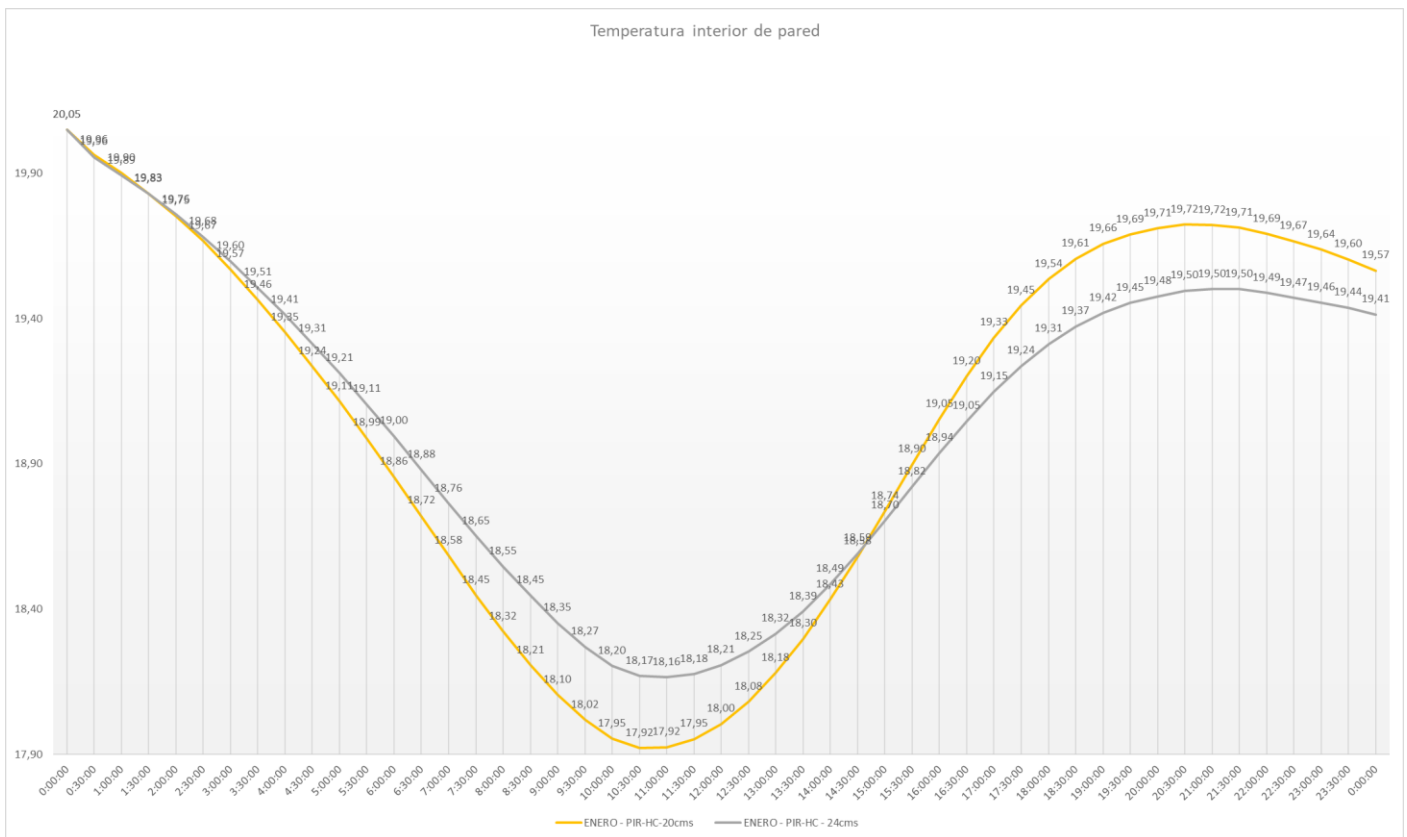
Temperatura ambiental interior



Gráfica 7. Temperatura ambiental interior. Panel SPT - AG - Porex

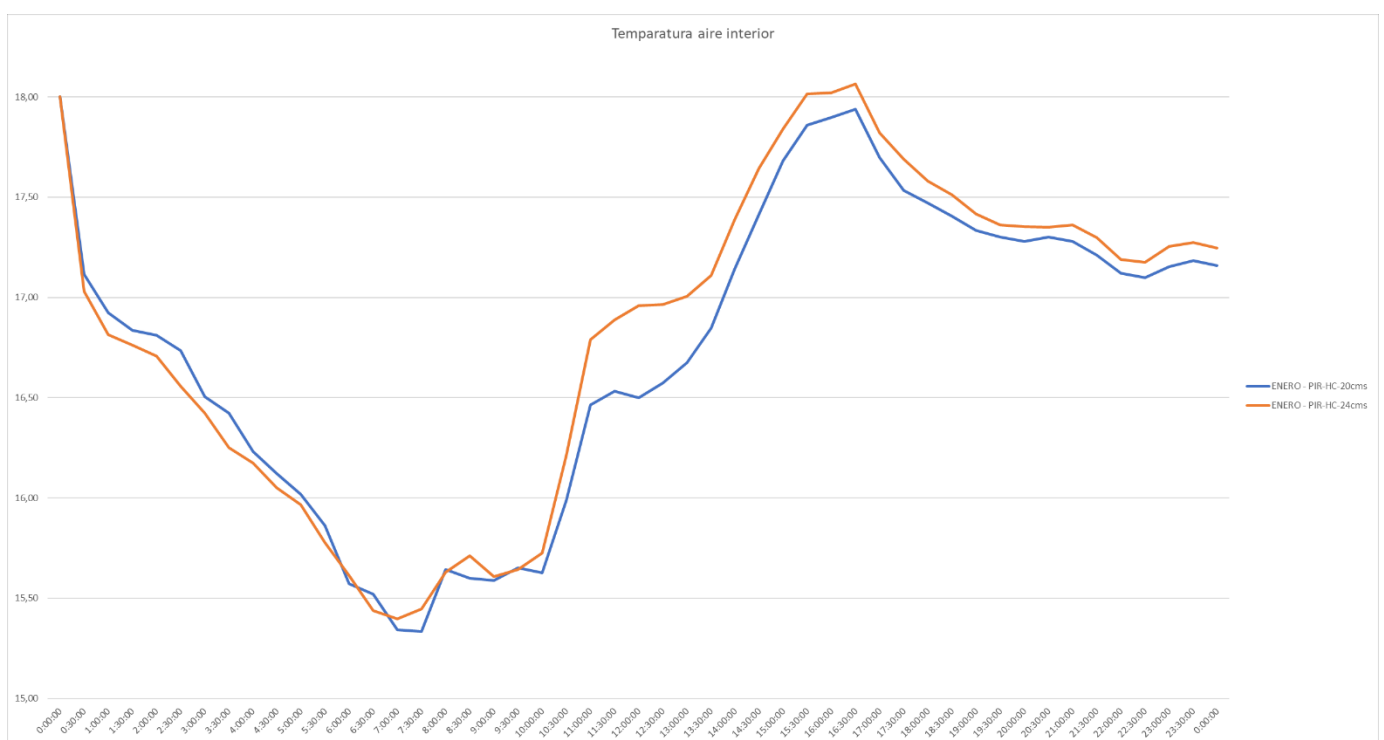
➤ Modelo con paneles SPT-AG-PIR

Temperatura superficial interior



Gráfica 8. Temperatura superficial interior. Panel SPT - AG - PIR.

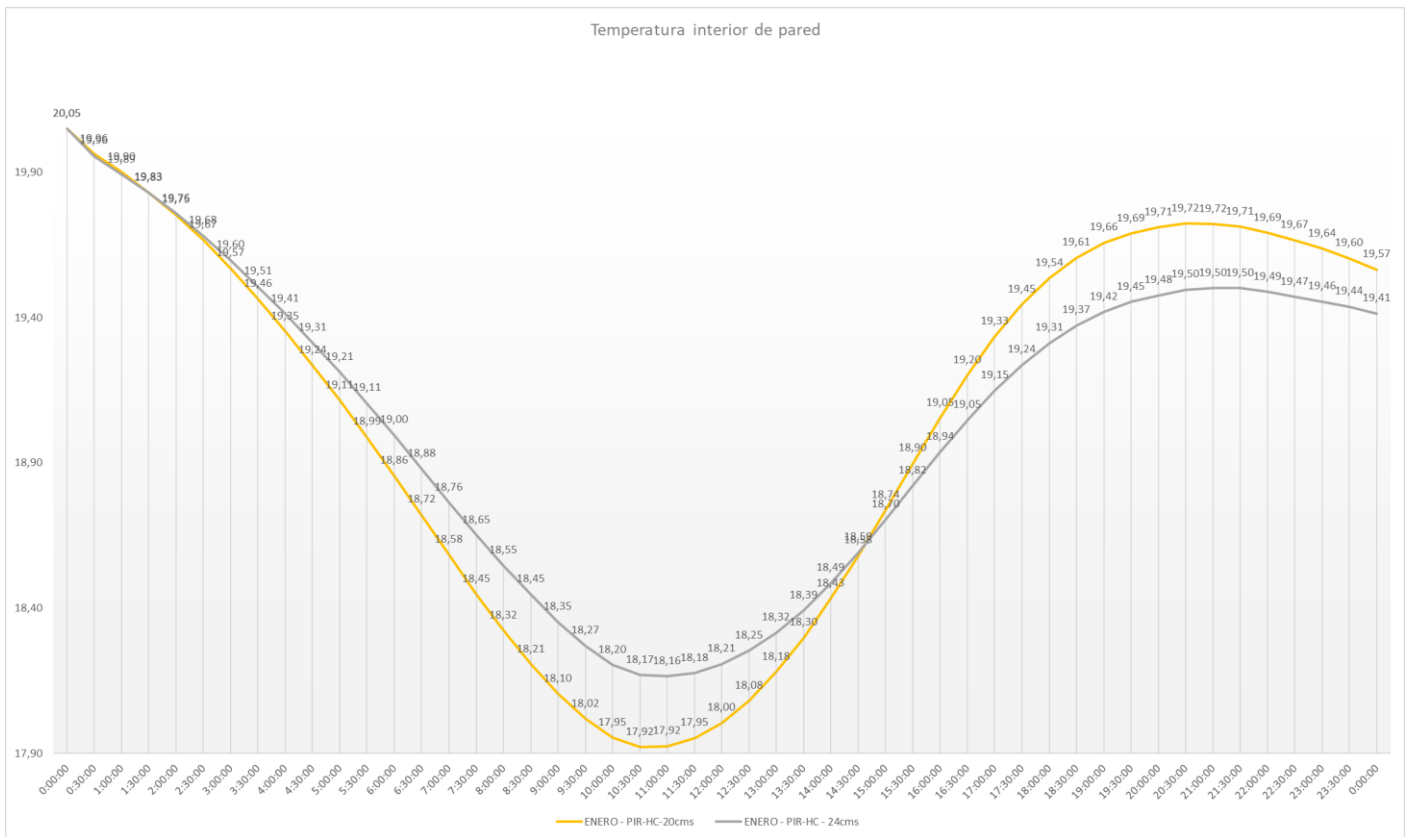
Temperatura ambiental interior



Gráfica 9. Temperatura ambiental interior. Panel SPT - AG - PIR.

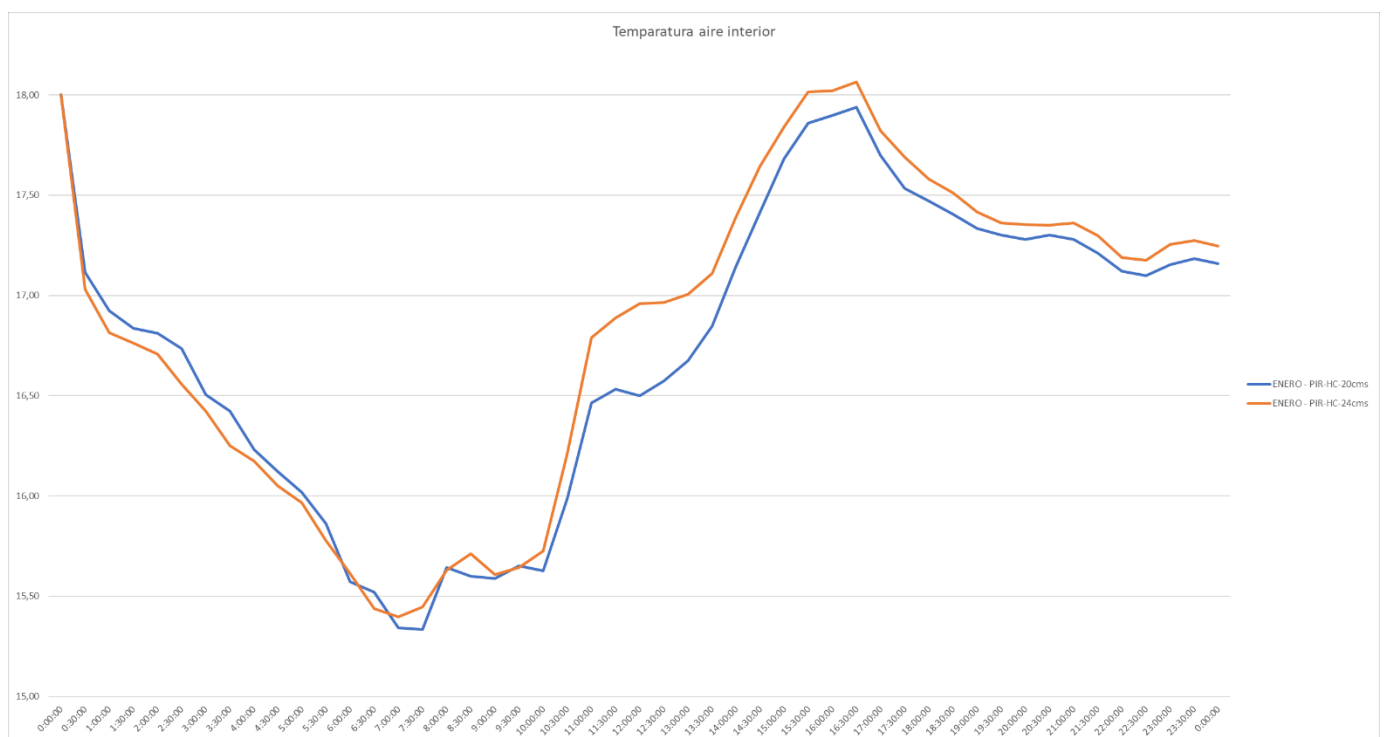
➤ Modelo con paneles SPT-PIR-Hormigón celular

Temperatura superficial interior



Gráfica 10. Temperatura superficial interior. Panel SPT - PIR - Hormigón celular

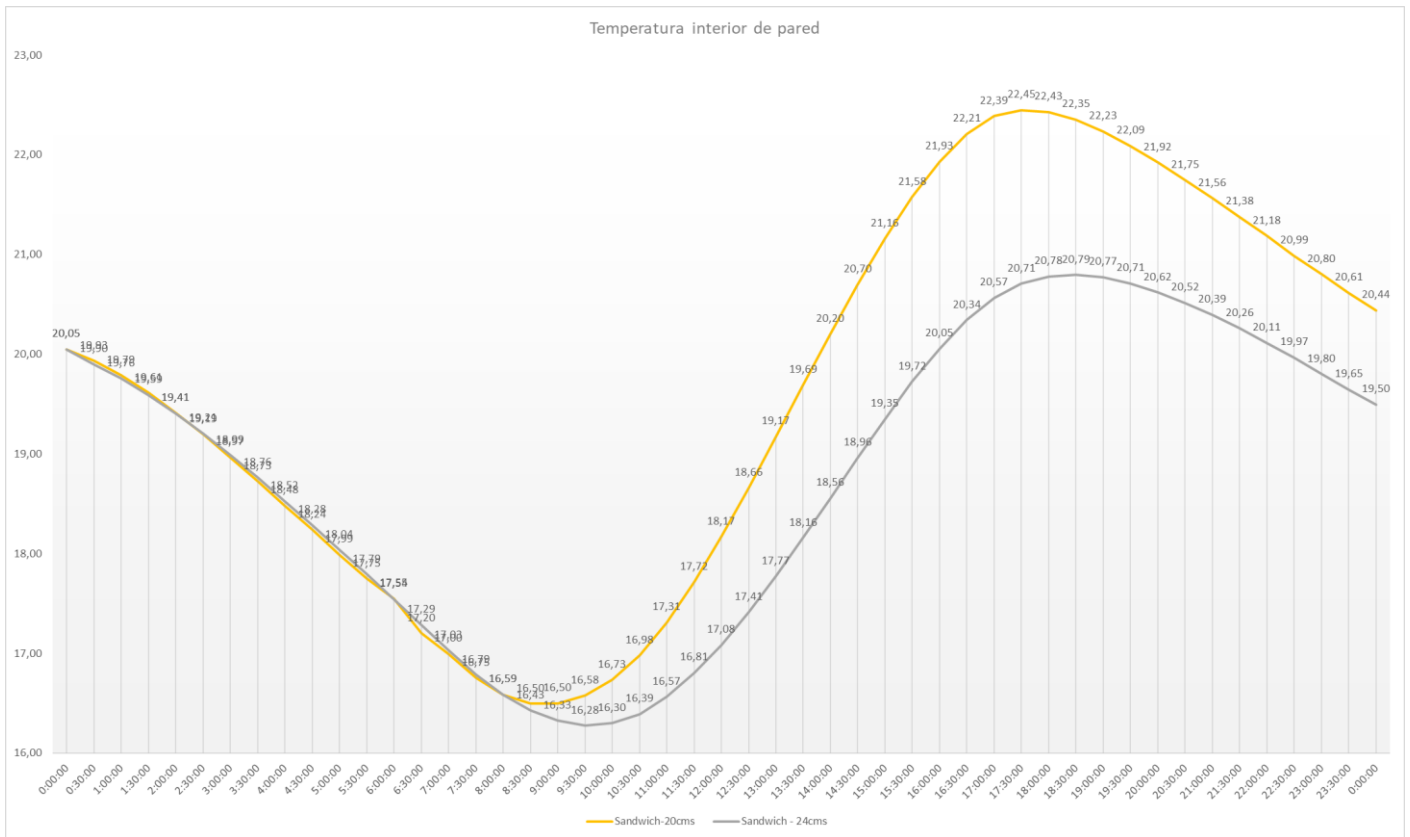
Temperatura ambiental interior



Gráfica 11. Temperatura ambiental interior. Panel SPT - PIR - Hormigón celular.

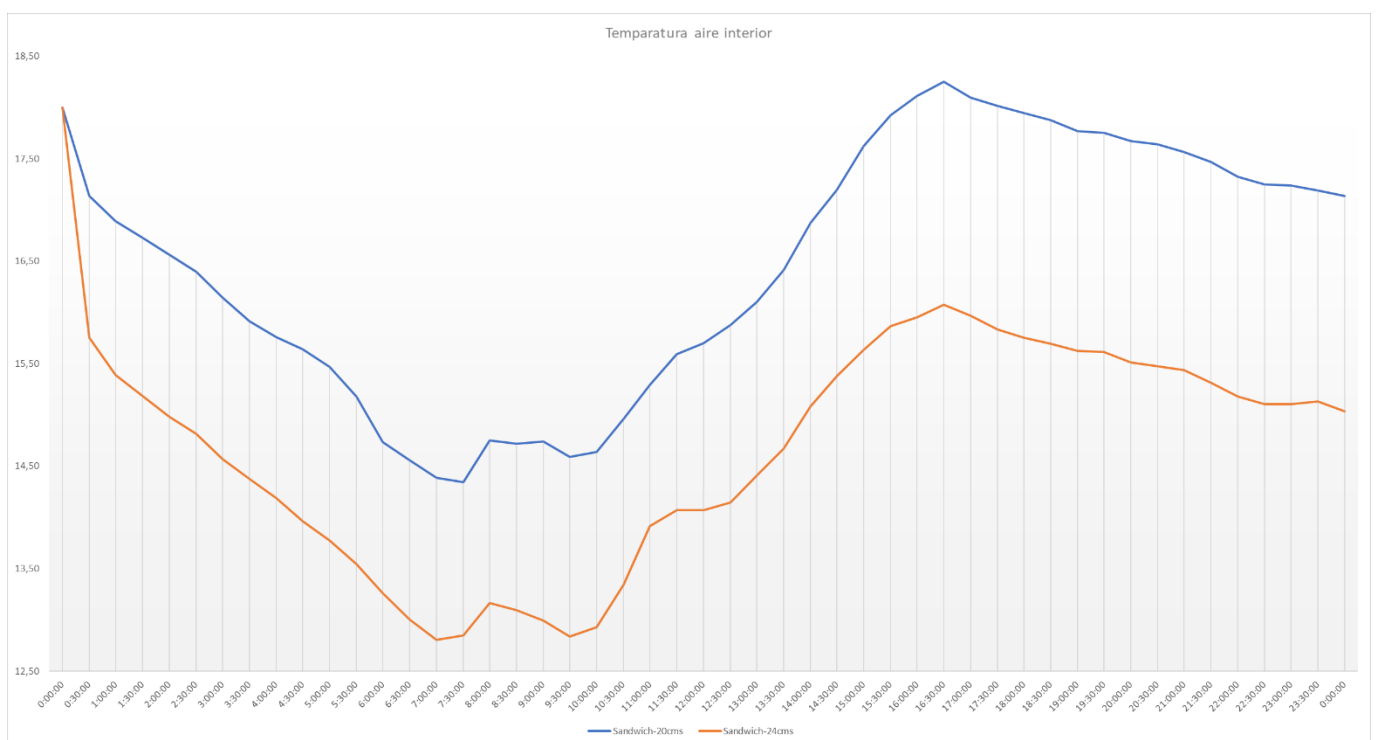
➤ Modelo con panel Sándwich

Temperatura superficial interior



Gráfica 12. Temperatura superficial interior. Panel Sándwich.

Temperatura ambiental interior



Gráfica 13. Temperatura ambiental interior. Panel Sándwich.

A continuación, en la **tabla 6** se refleja el resumen de los datos más importantes obtenidos con los cálculos realizados.

Modelo	Espesor (cm)	Temp. Interior max (°C)	Temp. Interior min (°C)	Amplitud temp. (°C)
Panel SPT- POREX	20	19,87	17,41	2,46
	24	19,54	17,66	1,88
Panel SPT - AG - POREX	20	19,58	17,64	1,94
	24	19,39	17,82	1,57
Panel SPT - AG - PIR	20	19,46	17,73	1,73
	24	19,22	17,92	1,30
Panel SPT - PIR - Hormigón celular	20	19,72	17,92	1,80
	24	19,50	18,16	1,34
Panel Sándwich	20	22,45	16,50	5,95
	24	20,79	16,33	4,46

Tabla 6. Temperaturas interiores de pared.

La amplitud de temperatura se puede definir como la diferencia de temperatura máxima que se alcanza en la pared interior y la temperatura mínima. Este valor nos proporciona información para conocer la transferencia de calor que existe entre exterior e interior de la estancia.

De estos valores se puede resaltar que las mayores amplitudes de temperatura se producen en los paneles donde la rotura de puente térmico no existe o es de peor calidad, como ocurre en el Panel Sándwich con valores de amplitud de 5,95 °C y 4,46 °C. Otro valor que resaltar es la amplitud de temperatura en el panel SPT – PIR – Hormigón celular, con un valor de 1,34 °C, el cual con un espesor de 24 cm es muy cercana a la del panel que teóricamente está mejor aislado que sería de 1,30 °C.

4. DISCUSIÓN.

En la primera fase de este estudio se ha tratado de observar el funcionamiento térmico de los paneles y, para ello, se buscaron las zonas más comprometidas térmicamente. Estas zonas, como se ha explicado en apartados anteriores, son la zona de borde, la zona central donde se encuentra el aislante y las zonas de nervios donde no hay presencia de aislante. De estas zonas se han obtenido los flujos de calor que atraviesan cada una de ellas para posteriormente obtenerse la transmitancia térmica global. La transmitancia térmica global se ha obtenido gracias a la ponderación en función de las áreas estudiadas en los modelos. De esta forma, se puede obtener un flujo de calor global de los paneles estudiados.

A continuación, se pueden ver los flujos de calor obtenidos en las distintas zonas de estudio en los paneles de espesor 20 cms.

Panel Sandwich:

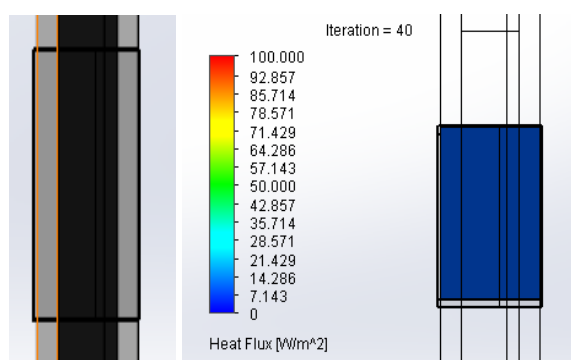


Ilustración 29. Panel Sándwich. Flujo de calor zona aislante.

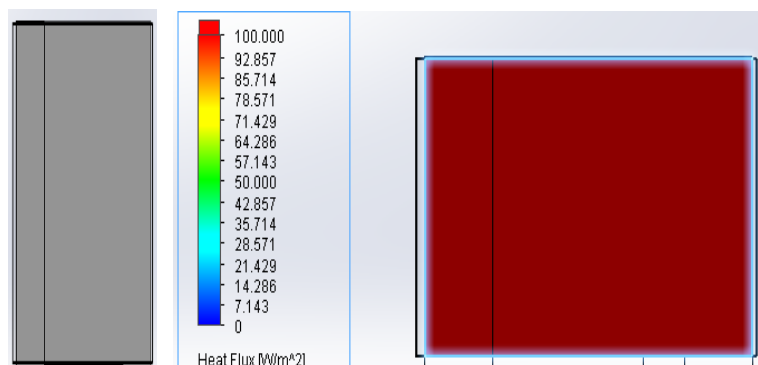


Ilustración 30. Panel sándwich. Flujo de calor zona sin aislante.

Panel SPT – Pórex – Peikko:

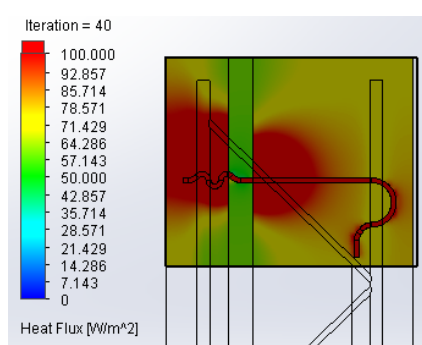


Ilustración 31. Panel SPT - Porex - Peikko. Zona con aislante.

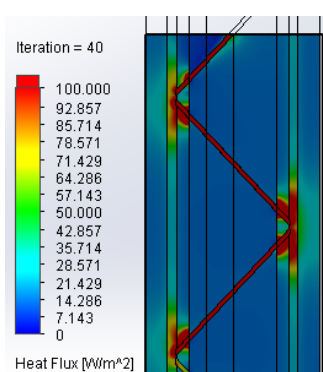


Ilustración 32. Panel SPT - Porex - Peikko. Zona con aislante.

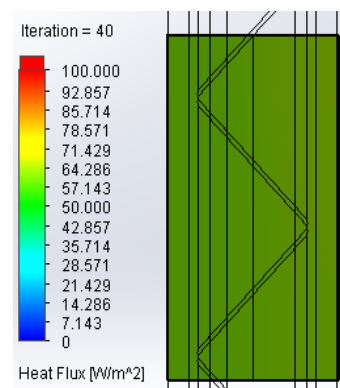


Ilustración 33. Panel SPT - Porex - Peikko. Zona con aislante.

Panel SPT – Pórex – Chrysoflexo:

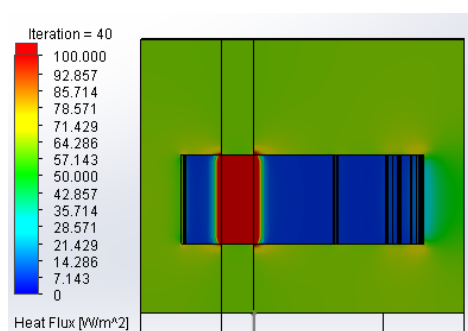


Ilustración 34. Panel SPT - Porex - Chrysoflexo. Zona con aislante.

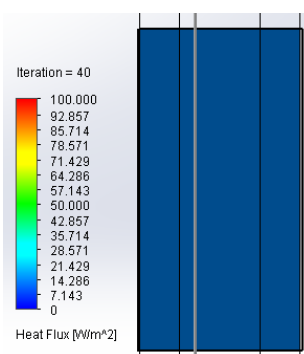


Ilustración 35. Panel SPT - Porex - Chrysoflexo. Zona con aislante.

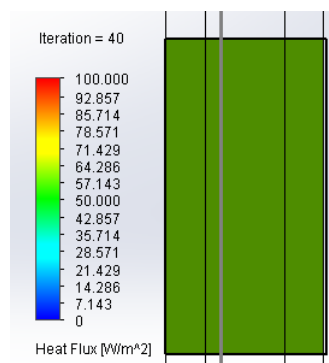


Ilustración 36. Panel SPT - Porex - Chrysoflexo. Zona con aislante.

A continuación, **tabla 7**, se muestra una tabla resumen de los flujos de calor medios que atraviesan las zonas de estudio en los distintos modelos generados.

	Flujos de calor (W/m ²)					
	Zona borde		Zona sin aislante		Zona con aislante	
	20 cm	24 cm	20 cm	24 cm	20 cm	24 cm
Panel SPT- POREX - PEIKKO	69,54	48,54	66,47	44,84	14,80	10,91
Panel SPT- POREX - CHYRSO	60,97	41,71	60,51	41,34	13,40	9,61
Panel SPT - PIR - Hormigón celular	39,57	26,84	39,00	26,41	22,29	15,55
Panel SPT - AG - PIR	29,04	19,63	28,43	19,17	7,71	5,49
Panel SPT - AG - POREX	29,04	19,63	28,43	19,17	10,72	7,57
Panel Sándwich	499,38	416,15	499,38	416,15	13,40	9,61

Tabla 7. Flujos de calor de los modelos en discusión.

Los flujos de calor serán mayores en la zona donde no se encuentra el aislante, lo que hace que el panel Sándwich tenga un mayor tránsito energético que en los paneles donde se coloca una rotura de puente térmico. En este tipo de panel las transmitancias térmicas globales seguirán siendo altas, aunque se utilicen aislantes de alta calidad ya que no se produce ninguna rotura del puente térmico en la zona de borde y en la zona de nervios. Este tipo de panel se desechará como opción ya que no cumple con los requerimientos del CTE (Código Técnico de la Edificación) con relación a las transmitancias permitidas en las envolventes de cerramiento.

De los resultados obtenidos se puede deducir que para un mejor comportamiento térmico la fabricación de los paneles se deberá realizar con unos aislantes de buena calidad, pero mucho más importante que esto será introducir una rotura de puente térmico clave para reducir los flujos de calor que se producen entre capas interiores y exteriores. Al disminuir el flujo de calor que atraviesa el panel, la transmitancia global del panel disminuye de forma significativa. Esto se realiza introduciendo en los paneles una capa de aislante, entre la capa exterior de hormigón y la capa de aislante. Es el mismo principio de rotura de puente térmico que existe en la perfilaría de aluminio de las ventanas. Al introducir una capa de aislante adicional se deberán conectar ambas capas, esto se realiza través de unos conectores que, como se explicaron en apartados anteriores, suelen ser de dos marcas: Peikko (acero) y ChrysoFlexo (fibra de vidrio). Estos conectores hacen de conexión entre capas de hormigón y, por lo tanto, pueden transmitir calor entre capas y generar puentes térmicos. El material del que están hechos este tipo de elementos es clave para disminuir transmitancias globales de los paneles.

En este estudio se ha podido observar su influencia ya que, en el caso de los conectores Peikko de acero, funcionan como unos focos conductores muy importantes para el flujo de calor debido a que la conductividad del acero es mucho mayor que la del hormigón. En los resultados se ha podido observar que hay una reducción en la transmitancia térmica del **10 %** cuando se utiliza un conector de fibra de vidrio.

Además, se ha observado que no es tan importante la calidad del aislante empleado, ya que donde se colocan las planchas de material aislante, para el aligeramiento, el espesor es lo suficientemente grande como para alcanzar buenas resistencias térmicas, sino que la importancia reside en escoger y colocar un aislante de gran calidad en la rotura de puente térmico entre capas. De esta forma, el flujo global total que atravesará el panel será menor y las transmitancias térmicas globales serán mucho menores que en el caso del panel sándwich el cual no tiene ningún tipo de rotura de puente térmico. La disminución en la transmitancia

térmica, como se ha podido ver en el apartado de resultados, al colocar esta rotura será de un **70%.**

En la segunda parte del estudio se ha obtenido el comportamiento térmico de una estancia sometida a un cambio de temperaturas a lo largo de un día. De esta forma, se ha visto que los modelos que están compuestos por los paneles que tienen una mayor calidad en los aislantes tienen una menor variación de temperaturas en el interior de la estancia. El modelo compuesto por panel sándwich tiene una gran variación en la temperatura interior, por lo que serán necesario un mayor consumo energético para conseguir que esa temperatura interior esté dentro de los umbrales de confort, tanto en época de verano como de invierno.

Panel Sándwich

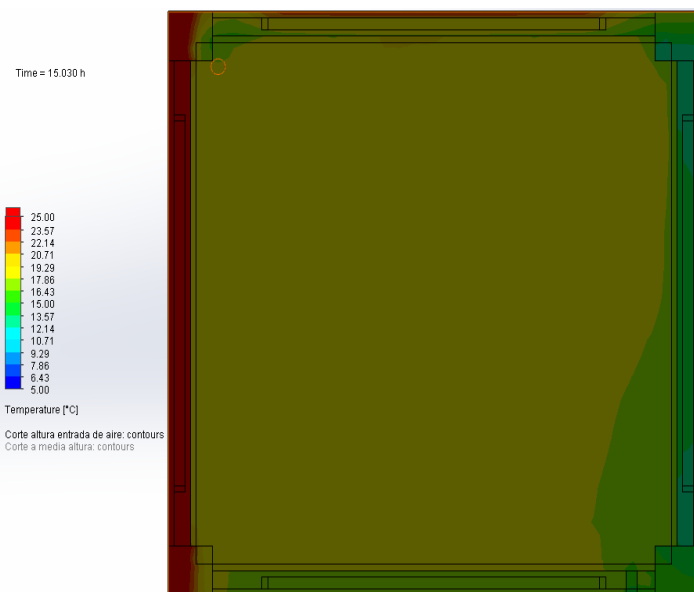


Ilustración 37. Temperatura aire interior Panel Sándwich.

Panel SPT – Porex – Chrysoflexo

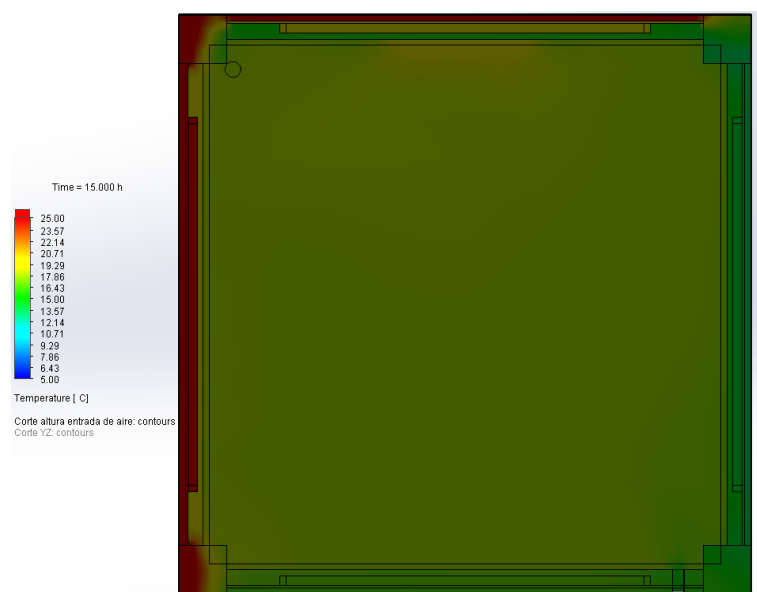


Ilustración 38. Temperatura aire interior Panel SPT - Porex - Chrysoflexo

Panel SPT – AG - Porex –Chrysoflexo



Ilustración 39. Temperatura aire interior panel SPT – Porex - Chrysoflexo

Panel SPT – AG – PIR – Chrysoflexo

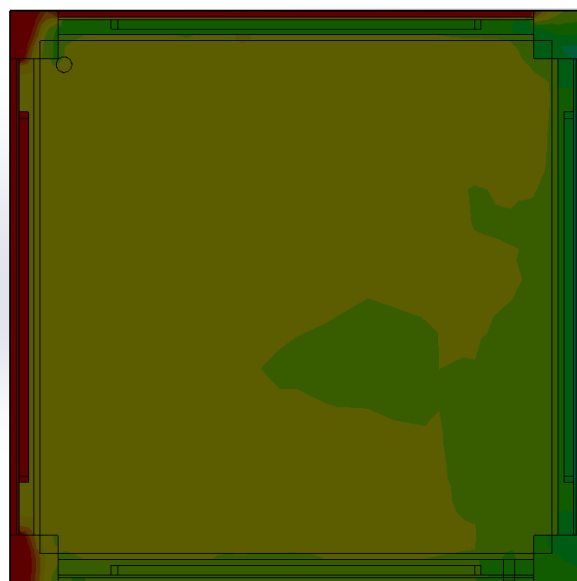


Ilustración 40. Temperatura aire interior panel SPT - AG - PIR - Chrysoflexo

Panel SPT – PIR – HC- Chrysoflexo

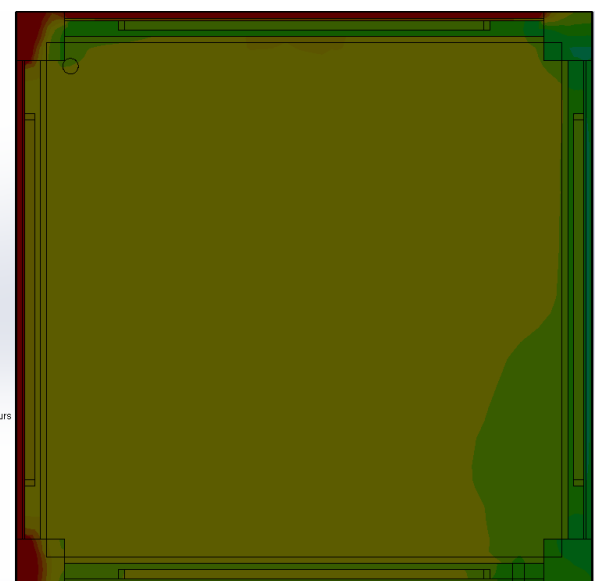
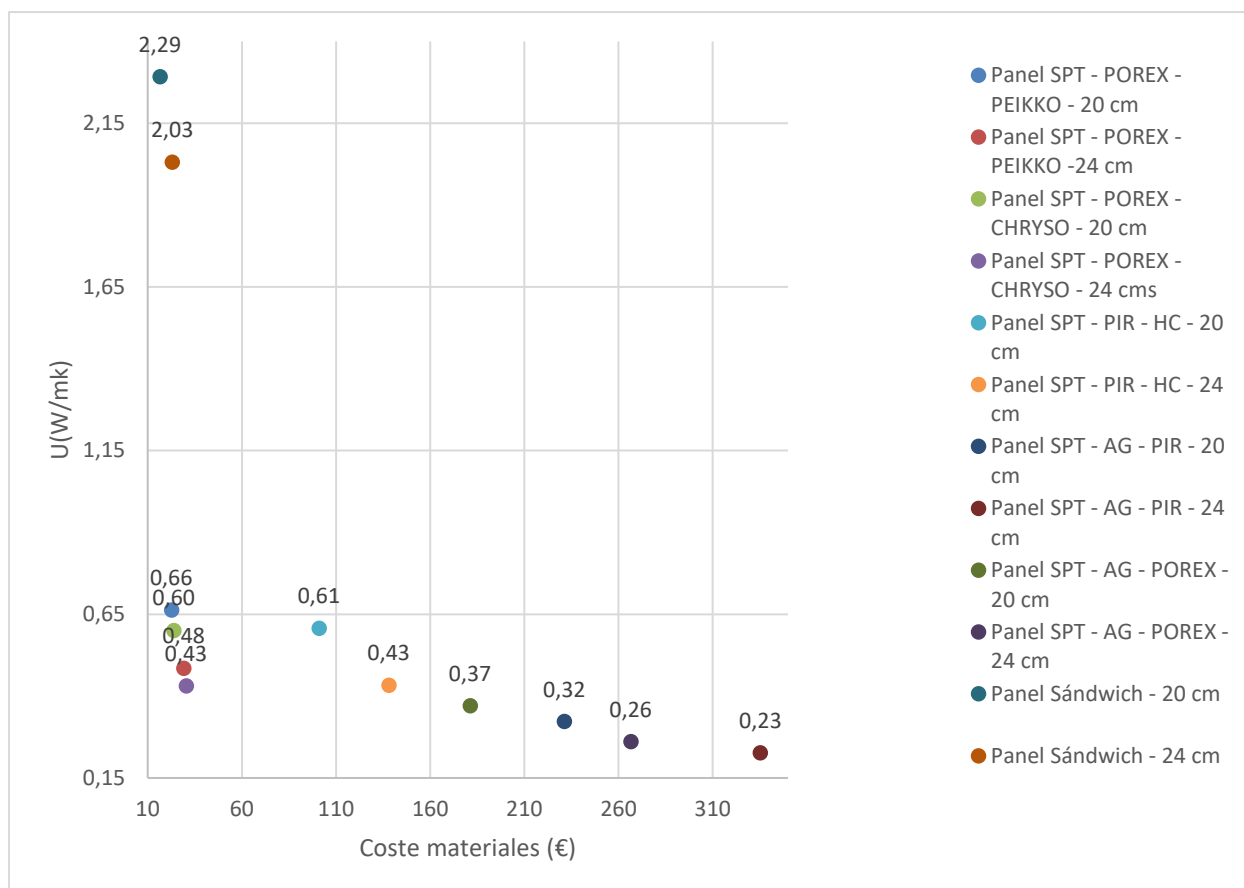


Ilustración 41. Temperatura aire interior panel SPT - AG - PIR - Chrysoflexo

Pero no solo es importante que los paneles estén compuestos por buenos aislantes, sino que también se ha observado que el panel conformado por PIR y hormigón celular tiene un buen comportamiento dinámico. Esto es debido a que los elementos masivos, como el hormigón, tienen una gran inercia térmica y puede favorecer al retardo del aumento o disminución de la temperatura en el interior de la estancia. Se ha podido observar que el panel SPT – AG – PIR de 24 cms tiene una amplitud de temperaturas de 1,30 °C pero el panel del mismo espesor pero de PIR-HC (hormigón celular) tiene un comportamiento similar ya que se ha obtenido una amplitud de temperaturas de 1,34 °C

Por norma general, esta amplitud de temperaturas disminuye a medida que el espesor de los paneles aumenta ya que la resistencia térmica de los paneles y, como consecuencia de esto, las transmitancias térmicas de los mismos disminuyen. Desde el punto de vista ingenieril, los modelos tienen un mejor comportamiento térmico cuando la transmitancia y la amplitud de temperaturas son bajas ya que los requerimientos energéticos para acondicionar la estancia serán menores pudiendo obtener una mejor eficiencia energética del edificio.

Otro detalle para tener en cuenta sería la parte económica. Como cabría esperar, cuanto mejor es la calidad del aislante el valor de la transmitancia disminuye y el comportamiento térmico del panel prefabricado es mejor, pero esto conlleva un incremento del coste de materiales. A continuación, se puede observar una comparativa entre las transmitancias térmicas y el coste de materiales.



Gráfica 14. Comparativa Transmitancias térmicas y coste de materiales de los modelos.

Como se puede observar en la **gráfica 14**, el panel que tiene una menor transmitancia térmica global sería el de sin puente térmico de 24 cms de espesor y cuyo aislante principal sería el PIR y la rotura de puente térmico se realiza con aerogel. La transmitancia de este panel cumpliría con los requerimientos térmicos marcados por el CTE y, además, esta transmitancia estaría dentro del orden de magnitud de los cerramientos utilizados en los edificios que tienen certificaciones Passivhauss.

5. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS.

La finalidad de este estudio era poder conocer el comportamiento térmico de los distintos paneles que ofrece Pretersa-Prenavisa. Se ha podido comprobar que el cerramiento de edificaciones realizadas con paneles sándwich no cumplen con los requerimientos térmicos que vienen en el CTE, por lo que este tipo de cerramiento se debe desechar para futuros usos residenciales.

Los paneles “SPT” (Sin puente térmico) serían los adecuados para ese futuro uso residencial ya que los valores de transmitancias que se obtienen en los modelos entrarían dentro de los márgenes marcados por el CTE. Se ha visto una notable diferencia entre el panel sándwich y los paneles “SPT”, lo cual pone de manifiesto la importancia de eliminar cualquier puente

térmico entre capas ya que puede afectar a la transmitancia global del panel. Tanto esa rotura de puente térmico como la colocación de unos conectores adecuados, con una conductividad baja, son claves para poder desarrollar un panel prefabricado de hormigón con una transmitancia térmica baja.

Como conclusión se puede decir que por los datos obtenidos de transmitancia y por el coste de los materiales empleados y el resultado de su transmitancia, el panel que sería más óptimo sería el panel "SPT" de 24 cms, cuyo aislante es el porex y los conectores empleados son marca chryso. Este panel cumple los requisitos en cuanto a transmitancias térmicas del CTE y el coste de este varía muy poco de los paneles que se están realizando ahora en fábrica.

Limitaciones del estudio:

Debido a la falta de tiempo, de recursos y de financiación económica, el estudio se ha llevado a cabo de manera hipotética, ya que no se ha podido implantar en materiales ni fabricado los modelos en la vida real.

En cuanto a la capacidad de cálculo el proyecto ha estado limitado, se podrían haber realizado los cálculos con una mayor potencia de cálculo, pero por falta de medios y tiempo se han realizado de una manera optimizada.

La durabilidad y las resistencias mecánicas de los materiales y los modelos escogidos no se han podido comprobar debido a falta de financiación y tiempo, por lo que no se puede aportar información sobre ello.

El estudio económico y los costes no son reales si no estimaciones, ya que llevar a cabo un estudio económico involucraría más factores a parte de los costes materiales de fabricación.

Líneas futuras:

Como posibles mejoras o continuación a este trabajo, serían la de introducir los dos siguientes elementos a los nuevos paneles prefabricados.

- **Activación térmica:** El sistema es una evolución avanzada de sistemas radiantes de bajo espesor que no se instalan en el interior sino en el exterior del edificio y tiene un gran potencial de aplicación en muchas situaciones en las que la renovación sería demasiado cara de diferentes formas.³⁴
- **Materiales PCMs:** Son materiales que almacenan energía gracias al calor latente. Estos materiales se podrían utilizar en las paredes y techos ya que ofrecen grandes áreas de transferencia pasiva de calor. Estos materiales deben estar encapsulados para que no afecte a las propiedades estructurales de los materiales de construcción.³⁵
- **Análisis de estanqueidad al aire** en las construcciones industrializadas y materiales a emplear.

BIBLIOGRAFÍA.

Artículos y normativa utilizada:

- [1] Maggi Madrid, Yokasta García Frómeta, Jesús Cuadrado, Jesús María Blanco (2022). Análisis de ciclo de vida en bloques de hormigón: comparación del impacto producido entre bloques tradicionales y con subproductos. Informes de la Construcción, 74(566): e438.
<https://doi.org/10.3989/ic.88125> ([Emisiones sector de la construcción.pdf](#))

- [2] Buenaño Mariño, Cristina del Pilar ; Esteban Altabella, Joan ; Sánchez Collado, Paula ; Colomer Mendoza, Francisco J. ; Gallardo Izquierdo, Antonio (2021). Reducción de impactos en la gestión de RCD en las obras de construcción y demolición. ([Reduccion de impacto en la gestión de RCD en las obras de construccion y demolición.pdf](#))

- [3] Medina, Maribel; Kaiser, Evelina; López, Raúl; Domizio, Carolina; Santillán, Lautaro (2021). Aprovechamiento de la inercia térmica del hormigón para el ahorro energético de los edificios. <http://portal.amelica.org/ameli/journal/266/2662024006/> ([Aprovechamiento de la inercia térmica del hormigon para el ahorro energético de los edificios.pdf](#))

- [4] *Producción eléctrica en España por tipo en 2021* | Statista. Statista. (2022). De <https://es.statista.com/estadisticas/993747/porcentaje-de-la-produccion-de-energia-electrica-por-fuentes-energeticas-en-espana/>.

- [5] *Menos de un 1% de las constructoras mide su huella de carbono* - ACR. ACR. (2021). De <https://acr.es/noticias/actualidad-acr/menos-de-un-1-de-las-constructoras-mide-su-huella-de-carbono/>.

- [6] Sean Kelly. Parlamento Europeo. (2021). *PROYECTO DE INFORME*. Bruselas: Comisión de Industria, Investigación y Energía. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/ITRE-PR-695323_ES.pdf [Informe UE consumo energético.pdf](#)

- [7] Tapia, A. (2016): *Programa estratégico nacional productividad y construcción sustentable. Profundización de iniciativas de la hoja de ruta para su implementación iniciativa industrialización y prefabricación*, Informe, Construye 2025.
<https://construye2025.cl/2017/12/11/inf-ind-prefab/> ([Informe-Final-Industrialización-y-Prefabricación.pdf](#))

- [8] ¿Qué representa en la actualidad la construcción industrializada? (2016). De <https://entreplanos.com.ar/que-representa-en-la-actualidad-la-construccion-industrializada/>

- [9] Aumenta la demanda de viviendas industrializadas por su coste y rapidez. (2021). De <https://www.lainformacion.com/vivienda-inmobiliario/demanda-vivienda-industrializada-coste-rapidez-pandemia/2839309/>

- [10] El Ayuntamiento de Madrid primará la construcción industrializada en concursos y licitaciones | Habitissimo. (2021). De <https://procenter.habitissimo.es/el-ayuntamiento-de-madrid-primara-la-construccion-industrializada-en-concursos-y-licitaciones/>

- [11] Las Directivas y Los Reglamentos Europeos. Caracteres Distintivos. De <https://www.afec.es/es/directivas-reglamentos-caracteres-distintivos>

- [12] Horrillo, A. (2017): “Metodología de diseño y análisis de soluciones de eficiencia energética para la consecución de edificios de consumo casi nulo (nzeb)”, Tesis doctoral, Universidad de Extremadura. ([TDUEX 2017 Horrillo Horrillo \(1\).pdf](#))
- [13] López, A. y Tenorio, J.A. (2015): “Una característica no aprovechada en los elementos prefabricados de hormigón: la masa térmica”, Revista técnica CEMENTO HORMIGÓN, Nº970, pp 36-41. ([inercia termica cemento hormigon.pdf](#))
- [14] Bannier E., Cantavella V., Bou E., Castellano J. (2011): “Inercia térmica de la envolvente de edificios y su influencia en la demanda energética”. Instituto de Tecnología Cerámica (ITC). Asociación de Investigación de las Industrias Cerámicas (AICE). Universitat Jaume I (UJI). Castellón, España. ([25.-Inercia-térmica-encolvente-de-edificios-y-su-influencia-en-la-demanda-energética.pdf](#))
- [15] Instituto Español del cemento y sus aplicaciones (2019). “Manual de Aplicación de la Inercia Térmica”. <https://www.sostenibilidadarquitectura.com/wp-content/uploads/2020/03/2020-IECA-ASA-Manual-de-la-aplicación-de-la-inercia-térmica.pdf>
- [16] De Ignacio Vivens, G., Soutullo Castro, S., López-Zaldivar, O., Lozano-Diez, R., & Verdú Vázquez, A. (2018). Sobre inercia térmica y aislamiento de viviendas en clima cálido-húmedo = On thermal inertia and insulation of buildings in warm-humid climate. Anales De Edificación, 4(1), 14. doi: 10.20868/ade.2018.3730 ([Sobre inercia térmica de viviendas en clima cálido-humedo.pdf](#))
- [17] Hernández, M., Turegano, J., & García, F. (2003). “La inercia térmica de los edificios y su incidencia en las condiciones de confort como refuerzo de los aportes solares de carácter pasivo”. Conarquitectura, Nº 8, pp. 65-80 ([inercia-termica-de-los-edificios.pdf](#))
- [18] Ministerio de Fomento. Documento Básico HE: Ahorro de energía (2019). <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html> (DBHE.pdf)
- [19] AENOR (2007). “Puentes térmicos en edificación. Flujos de calor y temperaturas superficiales. Cálculos detallados.” UNE-EN ISO 10211.
- [20] Calculo de transmitancias De [Presentación de PowerPoint \(serviu.cl\)](#)
- [21] Pastor, R.M. (2018). Cálculo de la transmitancia térmica de un muro de fachada. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/103422/Pastor%20-%20CÁLCULO%20DE%20LA%20TRANSMITANCIA%20TÉRMICA%20DE%20UN%20MURO%20DE%20FACHADA.pdf?sequence=1> Pastor - CÁLCULO DE LA TRANSMITANCIA TÉRMICA DE UN MURO DE FACHADA.pdf
- [22] Ministerio de Fomento. Documento Básico HE/1: Cálculo de parámetros característicos de la envolvente. (2020). https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DA_DB-HE-1_Calculo_de_parametros_caracteristicos_de_la_envolvente.pdf (DA_DB-HE-1_Calculo_de_parametros_caracteristicos_de_la_envolvente.pdf)

- [23] EL PARLAMENTO EUROPEO Y EL CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA. DIRECTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO (2010). Bruselas. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:095:0001:0024:ES:PDF> (Directiva 2010.pdf)
- [24] EL PARLAMENTO EUROPEO Y EL CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA. DIRECTIVA 2012/27/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO (2012). Bruselas. [EUR-Lex - 32012L0027 - EN - EUR-Lex \(europa.eu\)](https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:0027:EN:PDF) Directiva 2012.pdf
- [25] EL PARLAMENTO EUROPEO Y EL CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA. DIRECTIVA 2018/2002 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO (2018). Bruselas. [DIRECTIVA \(UE\) 2018/ 2002 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO - de 11 de diciembre de 2018 - por la que se modifica la Directiva 2012/ 27/ UE relativa a la eficiencia energética \(europa.eu\)](https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2018:0002:EN:PDF) (Directiva 2018.pdf)
- [26] Kurowski, P. *Thermal analysis with SOLIDWORKS Simulation 2018 AND Flow Simulation 2018*. SDCpublications.
- [27] El tiempo durante todo el año en cualquier lugar del mundo. (2021). De <https://es.weatherspark.com/>
- [28] Matsson, J. (2021). *An introduction to Solidworks® flow simulation 2021*. SDCpublications.
- [29] Tzivanidis, C., Bellos, E., Korres, D., Antonopoulos, K., & Mitsopoulos, G. (2015). Thermal and optical efficiency investigation of a parabolic trough collector. *Case Studies In Thermal Engineering*, 6, 226-237. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2015.10.005> 1-s2.0-S2214157X15300198-main.pdf
- [30] El khattabi, E., Mharzi, M., Raefat, S., Garoum, M., Valančius, K., & Meghari, Z. (2019). A thermal diagnostic method based on a new approach of wall discretization in dynamic state. *Journal Of Cleaner Production*, 226, 493-502. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.064> 1-s2.0-S0959652619311412-main.pdf
- [31] Bellos, E., Tzivanidis, C., Antonopoulos, K., & Gkinis, G. (2016). Thermal enhancement of solar parabolic trough collectors by using nanofluids and converging-diverging absorber tube. *Renewable Energy*, 94, 213-222. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.062> 1-s2.0-S0960148116302464-main.pdf
- [32] Bellos, E., Tzivanidis, C., Zisopoulou, E., Mitsopoulos, G., Antonopoulos, K. (2016). An innovative Trombe wall as a passive heating system for a building in Athens – A comparison with the conventional Trombe wall and the insulated wall. *Energy and Buildings*. 133. 10.1016/j.enbuild.2016.10.035. [AninnovativeTrombewallasapassiveheatingsystemforAthens.pdf](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.035)
- [33] SOLIDWORKS - Qué es y para qué sirve. SolidBI. De <https://solid-bi.es/solidworks/>.
- [34] Spa, T. (2021). *Il sistema a Facciata Attiva per la riqualificazione energetica degli edifici: applicazioni e vantaggi*. Ingenio-web.it. Retrieved 7 June 2021, from <https://www.ingenio-web.it/30995-il-sistema-a-facciata-attiva-per-la-riqualificazione-energetica-degli-edifici-applicazioni-e-vantaggi>.

- [35] Cabeza, L., Castellón, C., Nogués, M., Medrano, M., Leppers, R., & Zubillaga, O. (2007). Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. *Energy And Buildings*, 39(2), 113-119. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.03.030>
- [36] AENOR (2007). “*Materiales y productos para la edificación. Propiedades higrotérmicas. Valores tabulados de diseño y procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados y de diseño.*” UNE-EN ISO 10456.