

02-014

ANALYSIS OF THE EFFECTS OF THE HYGROTHERMAL CONDITIONS IN A STRUCTURAL SYSTEM WITH WOOD JOIST FLOOR SLAB AND MASONRY WALL

Torner Feltrer, María Eugenia ⁽¹⁾; Cañada Soriano, Mar ⁽¹⁾; Vivancos Bono, José Luis ⁽¹⁾; Aparicio Fernández, Carolina ⁽¹⁾; Royo Pastor, Rafael ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universitat Politècnica de València

For the energetic rehabilitation of historic public buildings, several measures have been promoted by Europe to reduce energy consumption. The installation of interior insulation in buildings where it cannot be carried out also in exterior walls because of their heritage value and their constructive typology cause a series of hygrothermal conditions that can alter the structural elements built reaching a high moisture content. The damage that this fact can produce in buildings with structural system typologies of wood joist floor slabs, can have a great repercussion in the structural elements as well as in the encounters of these with the exterior walls. The measurements of the monitoring of the hygrothermal conditions together with the study of the climatic conditions can give us a more empirical model of the reason for the situation in which the elements are found and how to solve the different encounters for better insulation.

Keywords: historic buildings; energy consumption; insulation; hygrothermal conditions; floor slab with wood joists and masonry wall

EFFECTOS DE LAS CONDICIONES HIGROTÉRMICAS EN SISTEMA ESTRUCTURAL DE FORJADO CON VIGUETAS DE MADERA Y MURO DE MAMPOSTERIA

Para la rehabilitación energética de los edificios históricos públicos diversas han sido las medidas impulsadas por Europa para que puedan llevarse a cabo con el fin de reducir el consumo energético. La instalación de aislamientos interiores en edificios donde no se puede llevar a cabo también en muros exteriores por su valor patrimonial y su tipología constructiva hacen que se produzcan una serie de condicionantes higrotérmicos que puedan alterar los elementos estructurales construidos llegando a alcanzar un alto contenido de humedad. El daño que este hecho puede producir en edificios con tipologías de sistema estructural de forjado de viguetas de madera, puede tener una gran repercusión tanto en los elementos estructurales como en los encuentros de estos con los muros exteriores. Las mediciones de las monitorizaciones de las condiciones higrotérmicas junto con el estudio de las condiciones climáticas pueden darnos un modelo más empírico del por qué de la situación en las que se encuentran los elementos y cómo poder solucionar los distintos encuentros para un mejor aislamiento.

Palabras clave: edificios históricos; consumo energético; aislamiento; condiciones higrotérmicas; forjado con viguetas de madera y muro de mampostería

Agradecimientos: Esta publicación es parte del proyecto de I+D+i PID2019-108271RB-C33, financiado por MCIN/ AEI/10.13039/501100011033



© 2023 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

Europa ha adoptado unas directrices claras para la mejora de la eficiencia energética de los edificios públicos en las que establece una serie de requisitos para edificios nuevos y ya construidos con la finalidad de reducir al máximo el consumo energético (European Commission,2014). El problema que está provocando el cambio climático está endureciendo las condiciones para que las normativas de construcción de los propios países, así como las europeas vayan dirigidas a buscar soluciones constructivas que favorezcan la reducción significativa de los edificios (European Commission,2013).

La adaptación de los edificios públicos existentes a estas nuevas normativas supone un reto para cualquier profesional dada la dificultad que representan siendo esta mucho más elevada cuando se trata de un edificio histórico. España es un país con un alto número de edificios históricos que actualmente dan uso a la administración pública (Ministerio de Fomento. Gobierno de España,2016). Centros de enseñanzas, administraciones locales y autonómicas, hospitales entre otros, donde se va a tener que intervenir para poder acoplarse a la normativa europea y reducir así las emisiones de estos.

Para reducir la pérdida energética a través de la envolvente térmica (fachada, cubierta y suelo) es necesaria la colocación de materiales aislantes. En edificios históricos con valor patrimonial es imposible utilizar el aislante exterior esto hace casi obligatorio la necesidad de aislar por el interior de la envolvente térmica (Pérez et al.,2018) (Kvist et al.,2019) (López-Ochoa et al.,2019). Es importante respetar lo ya construido (Hashempour et al.,2019), pero a su vez es necesario conocer el comportamiento de los materiales existentes y si hay una degradación de estos con el paso de los años para poder tomar medidas optimas y poder decidir qué y cómo es mejor aislar. En edificios con cerramientos de mampostería tradicional o cubiertas de madera sin aislamiento en ambas, es necesario analizar si se producen condensaciones superficiales o intersticiales en estos cerramientos ya que producirían daños sobre los elementos constructivos. A su vez, también se considera imprescindible analizar dicha envolvente cuando se añade aislamiento térmico para mejorar las condiciones higrotérmicas del edificio analizado. Las condiciones higrotérmicas son, por tanto, de gran importancia para poder conocer cómo afectan estas en las diferentes capas que comportan las soluciones constructivas de los edificios y así poder realizar una intervención satisfactoria evitando problemas que puedan surgir posteriormente (Lerma et al.,2021) (Pérez-Andreu et al.,2018) (Duanmu et al.,2018).

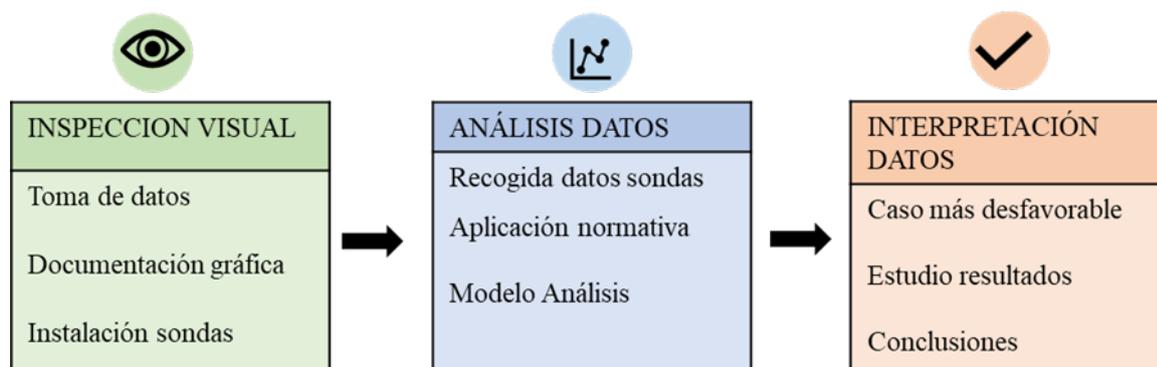
El objetivo de este estudio es el análisis del aislamiento interior de cubiertas de madera de edificios patrimoniales estableciendo un método que refleje una estimación de las condiciones previas a la puesta de materiales aislantes y cómo afecta una vez colocados estos a la estructura original. Para ello se va a realizar un estudio a través de las condensaciones intersticiales de varios casos de estudio que se producen en las cubiertas que no han sido diseñadas para este tipo de materiales. Los resultados del estudio se compararán para encontrar soluciones óptimas que protejan el patrimonio y al mismo tiempo busquen la eficiencia energética del edificio.

Para la realización de este trabajo se ha seleccionado como caso de estudio un edificio patrimonial en el que tiene lugar esta tipología constructiva y en el que a su vez presenta, dentro de la misma tipología de cubierta, dos casos distintos. Una cubierta en la que no ha tenido ninguna intervención posterior a su construcción y por tanto carece de aislamiento y otro caso de la misma cubierta donde posteriormente se ha realizado una intervención dotándola de aislamiento interior. Este hecho, junto que ambos tienen orientaciones distintas, proporciona un estudio más completo no sólo de cómo afectan a estas cubiertas la rehabilitación a través de materiales aislantes sino también de las condensaciones que se pueden producir por un mal aislamiento en las cubiertas de madera.

2. Metodología

La metodología que se ha seguido para este estudio consta principalmente de tres pilares: la inspección visual, donde se realiza todo lo que tiene que ver con la recogida de documentación y el estudio de estos junto con la instalación de las sondas para la correcta toma de datos. El segundo pilar sería el análisis de datos con la finalidad de obtener el conocimiento de las condiciones higrotérmicas de las cubiertas que se van a analizar lo más exhaustivo posible y el análisis de estos a través de crear simulaciones reales. El último paso sería la interpretación de datos con las conclusiones extraídas. A continuación, se muestra la metodología más detallada en la figura 1:

Figura 1: Metodología del estudio



Para saber las condiciones higrotérmicas se ha utilizado un equipo de monitoreo de bajo costo con la finalidad de medir los parámetros internos. El equipo está compuesto por un mini-PC de control y comunidad de almacenamiento, 2 sensores digitales inalámbricos Si7021A20 que se pueden usar para medir temperaturas oscilando entre -40 y 125 °C, con una resolución de $0,02$ °C y una precisión de $\pm 0,4$ °C, registrando valores medios cada 10 min. Los sensores han sido calibrados individualmente para la temperatura; los datos de calibración se almacenan en la memoria no volátil del dispositivo. Este asegura que los sensores sean completamente intercambiables, sin necesidad de recalibración o cambios en el sistema de software (Aparicio-Fernández et al., 2021).

Los datos meteorológicos se han obtenido de una estación meteorológica situada en la misma localidad en donde se sitúa el caso de estudio por la Agencia Española de Meteorología (© AEMET).

Para crear una simulación lo más real posible, de cómo afectan estas condiciones higrotérmicas a los materiales constructivos se ha creado una simulación a través de la formulación y los valores establecidos en la normativa vigente. El Documento de Apoyo al Documento Básico, DA DB-HE/2 Comprobación de limitación de condensaciones superficiales e intersticiales en los cerramientos y la norma española UNE-EN ISO 13788. han sido la normativa de aplicación que nos ha permitido crear una simulación real de lo que se produce en cada uno de los elementos constructivo.

En la tabla 1 se muestran los datos a tener en cuenta para generar la simulación de qué condiciones higrotérmicas tanto a nivel general de el elemento constructivo a analizar como cada capa que compone dicho elemento. Para tener una aproximación lo más real posible del análisis y los cálculos de las diferentes capas del elemento se ordenarán desde el elemento que esté más en contacto con el exterior con el que menos.

Tabla 1: Metodología para la simulación del análisis higrotérmico

Datos generales	Valores a calcular por capas materiales
Temperatura ext/int (°C)	Espesor (metros)
Humedad relativa (%)	Constante de conductividad (W//m ² ·°C)
Constantes de convección (1/he y 1/hi)	Resistencia térmica (W/(m·°C))
Presión de vapor de saturación (kPa)	Incremento de temperatura(°C)
Presión de vapor ext/int (kPa)	Temperatura por capa (°C)
	Factor de resistencia a la difusión del vapor agua (adimensional)
	Resistividad al vapor (kPa)
	Incremento de Presión (kPa)
	Presión de Vapor en cara interior de la capa correspondiente (kPa)
	Temperatura de rocío (°C)

3. Caso de estudio

Este trabajo se ha realizado sobre un caso de estudio concreto, un edificio histórico que data de 1921, situado en Carcaixent, Valencia (España). El edificio fue construido como hospital hasta que posteriormente, en 1987, el edificio cambió de uso en el que sigue hasta la actualidad como Conservatorio profesional de Música gestionado por la Conselleria de Educación de la Comunidad Valenciana. El edificio no ha sufrido cambios ni modificaciones sustanciales conservando actualmente tanto su tipología constructiva como estancias como la capilla existente del hospital e incluso puertas antiguas cómo la de la zona de los paritorios.

Figura 2: Vistas fachadas y patio interior del Conservatorio de Carcaixent, Valencia (España)

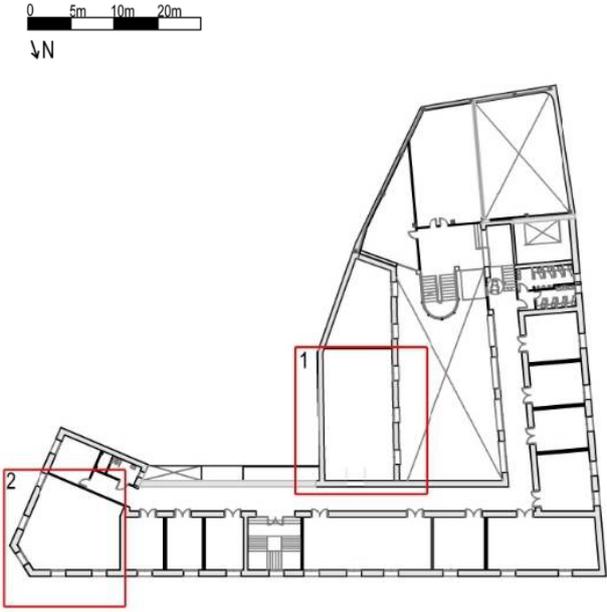


El edificio consta de tres plantas, 2 plantas más cambra, en las que se distribuyen las aulas

y los espacios más polivalentes con una superficie total construida de 2305 m². Con 400 alumnos y 58 profesores, tiene una tipología constructiva propia de la época, muros de mampostería, de 50 cm de espesor, y estructura de forjado de vigas y viguetas de madera con revoltones. Las cubiertas son a dos aguas en prácticamente su totalidad y la teja utilizada es la teja tradicional utilizada en el momento.

Para este estudio se van a utilizar los dos tipos de cubiertas existentes en el edificio que se muestran en la tabla 2 y su ubicación.

Tabla 2: Vistas y ubicación de las cubiertas del caso de estudio

PLANTA TIPO	CUBIERTAS
	
	SALA 1
	
	SALA 2

Cómo se aprecia en la tabla 2, las cubiertas que se van a analizar prácticamente tienen una composición similar. A continuación, se presentan dos detalles constructivos, en la figura 3, pertenece al detalle constructivo de la sala 1 y en la figura 4, de la sala 2.

Figura 3: Detalle constructivo cubierta de la sala 1

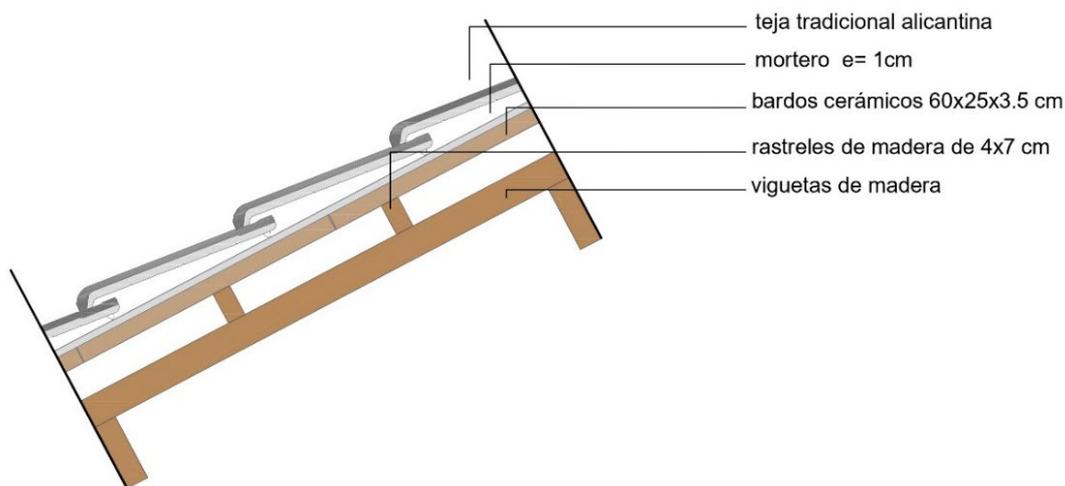
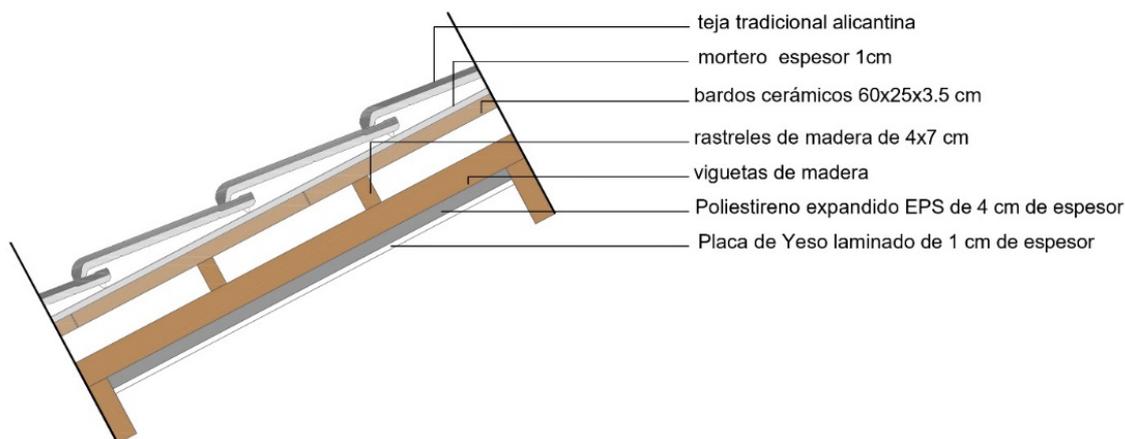


Figura 4: Detalle constructivo cubierta de la sala 2



La cubierta de la figura 3 está compuesta de una cercha y viguetas de madera de mobila, propio de las construcciones de la época, por su alta resistencia y durabilidad en el tiempo. A continuación, descansan sobre las viguetas rastreles de 4cmx 7cm de alto sobre los que descansan los bardos cerámicos que se utilizaban a modo tablero. Tradicionalmente se ponía una capa de mortero que servía como una capa de nivelación para directamente poner la teja, en este caso alicantina.

Cómo se puede apreciar prácticamente la descomposición es la misma en las dos cubiertas, a diferencia de que posteriormente en la cubierta de la sala 2 se realizó una intervención por la cara interna de la cubierta en la que se le añadió un aislante debido a las temperaturas que se alcanzaban en esa sala. Esto no ha solucionado estos problemas y en la actualidad siguen teniendo los mismos problemas.

Las cubiertas del edificio conservan su estado original lo que produce un valor arquitectónico muy grande, pero al mismo tiempo va a tener un gran problema para poder llegar a cumplir

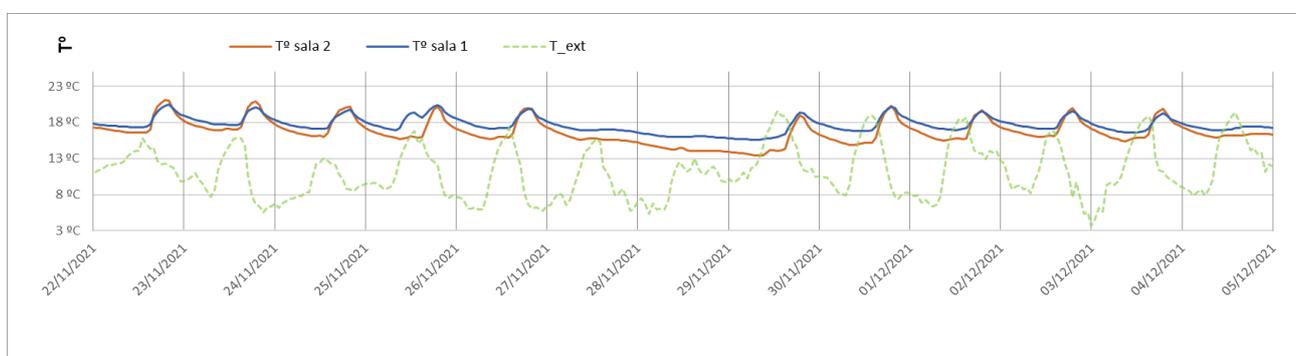
con las exigencias de eficiencia energética intervenido lo menos posible para conservación de su estética.

4. Resultados

Los datos que se han recogido para la motorización de este estudio han sido desde el 21 de noviembre de 2021 hasta 5 de diciembre de 2021, para poder tener un conocimiento completo de temperaturas en todas sus variaciones climatológicas buscando las condiciones meteorológicas más desfavorables.

A continuación, se presentan las gráficas obtenidas de las medidas de las sondas y de los datos de las estaciones meteorológicas. Las temperaturas han sido medidas durante las 24 horas en periodos de 1 hora para poder obtener un conocimiento completo.

Figura 5: Temperaturas de las salas y exterior en período estudiado

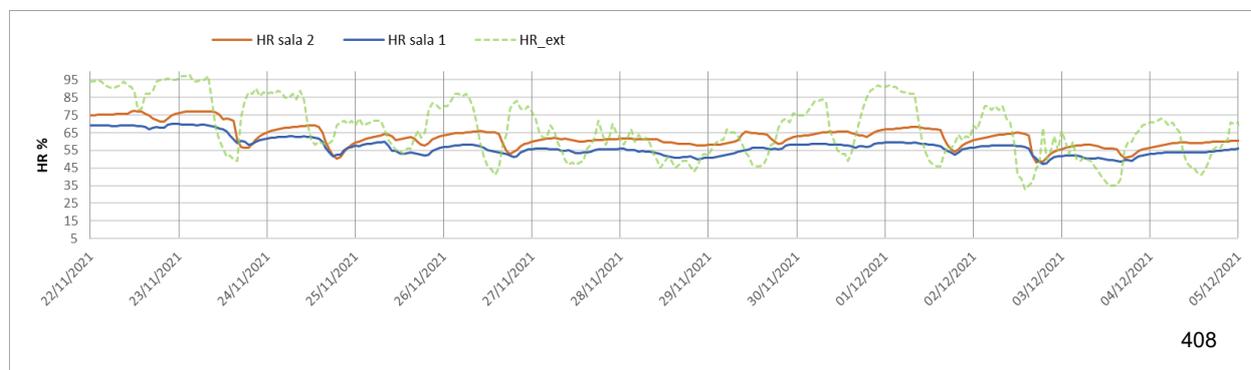


En la gráfica se puede observar cómo prácticamente la temperatura de las dos salas es muy similar, siendo en la mayoría de los días la temperatura de la sala 1 superior a la sala 2. Resulta curioso que esto suceda ya que la sala 1 está orientada a Sureste y la sala 2 a noreste. Además, la sala 2 también tiene una parte de aislante que la sala 1 carece. Hay que tener en cuenta que las dos salas tienen una altura y una ventilación muy diferente. La sala 2 tiene una tipología de cambrá, ventanas de pequeñas dimensiones a ras del suelo y zonas donde la altura máxima está en torno 1,60 m. En la sala 1, es una zona de altura considerable donde el punto más bajo está en torno a 3 m y los huecos de ventilación natural están compuestos por grandes ventanales que vuelvan a un patio interior.

Por franjas horarias tendríamos que de 00:00-07:00 la temperatura interior de la sala 2 es superior a la sala 1. Al estar aislada pierde menos en calor que la cubierta de la sala 1.

De 7:00-16:00 sigue teniendo más temperatura interior la sala 2 que la sala 1, Siendo la orientación de la sala 2 noreste y contando que la ocupación de esta sala por parte del alumnado es mayor que en la sala 1 parece razonable. La temperatura de la sala 1 sólo es mayor de 16:00-23:00 dada la orientación de esta a suroeste.

Figura 6: Humedad relativa de las salas y exterior en período estudio



En la gráfica de la humedad relativa es mucho más alta en la mayoría de los periodos en el exterior que en el interior. Sin embargo, la humedad más baja se sitúa en la sala 1. Esto puede deberse a que, pese a que esta cubierta no está aislada, la cubierta de la sala 2 tiene una mala solución de aislamiento junto con una falta de ventilación.

El estudio de este periodo de tiempo nos sirva para poder tomar las temperaturas del caso más desfavorable y poder realizar así el modelo de análisis. Para ello se ha tomado una temperatura exterior ponderada de 4,5°C y temperatura interior de 21°C. La Humedad relativa exterior del 85% y la interior del 60%. La Presión de vapor de saturación exterior es de 784,68 Pa y la interior de 2.485,58 Pa. La Presión de saturación exterior 666,98 Pa y la interior 1491,35 Pa.

Realizado los cálculos con los parámetros mencionados en la metodología y siguiendo la normativa vigente se muestran los resultados en las figuras 7 y 8.

Figura 7: Análisis de las condensaciones cubierta sala 1

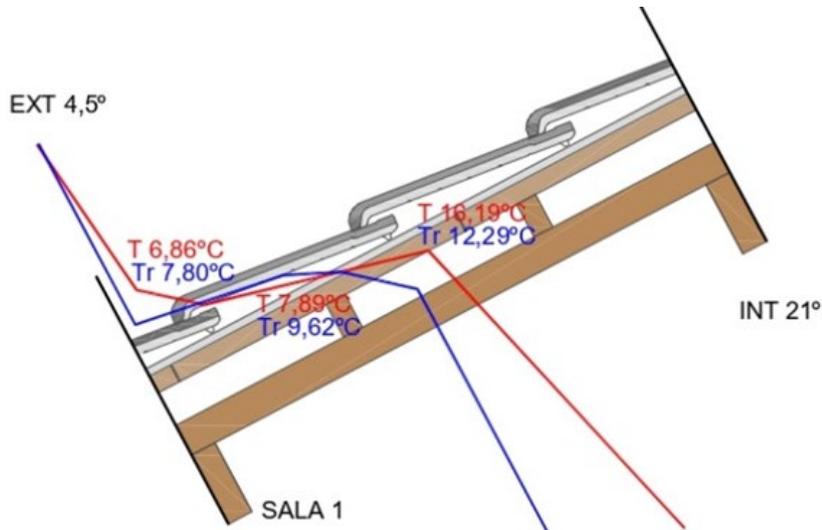
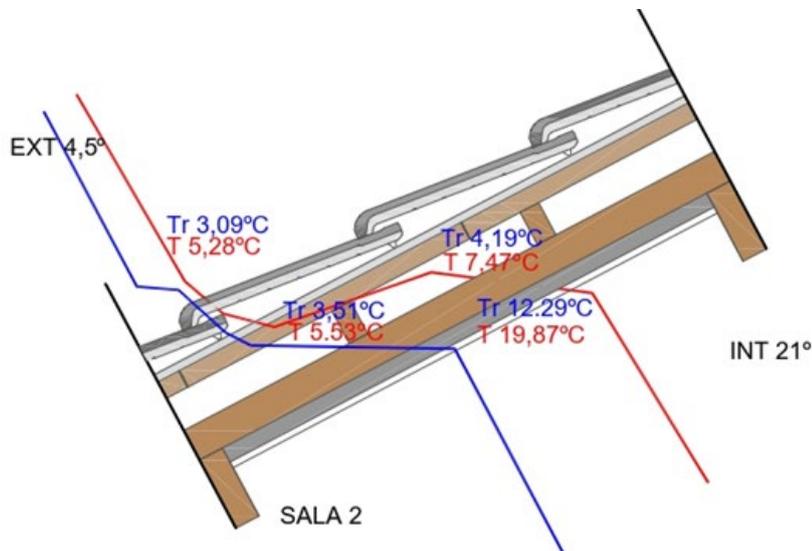


Figura 8: Análisis de las condensaciones cubierta sala 2



En la figura 7, sala 1, se puede observar que se produce una condensación entre la teja y la capa de mortero. Esto tiene sentido dada la tipología constructiva en la que carece de impermeabilización bajo de la teja dada su fecha de construcción. Al ser una cubierta que no contiene aislante térmico lo que provoca es son humedades filtraciones a la estructura de madera. Esta condensación se remite ya en la capa de los bardos cerámicos donde aumenta la temperatura por encima de la temperatura de rocío.

En la figura 8, se puede observar que al tener una capa de aislamiento hace que evite la condensación que se genera en la sala 1 reduciendo la temperatura de rocío en esas mismas capas. Se puede apreciar que la temperatura de rocío es mucho más baja en todas las capas ya que permite que no traspase y la temperatura por capa sea inferior que en la sala 1.

La ubicación del aislamiento en el lado externo de la envolvente térmica hubiera sido más eficiente y más seguro en lo que respecta a términos de condensación, pero incumpliríamos con las normas de conservación del edificio. Al colocar el aislamiento en el interior, aunque puede aumentar la condensación de vapor, con esta disposición constructiva produce un riesgo menor de condensación. Hay que tener en cuenta la ausencia de sombras de edificios colindantes por lo que existe un aumento de radiación solar a la cubierta y pese a la falta de aislamiento ayuda a la evaporación de las condensaciones existentes.

5. Conclusiones

En este estudio se han buscado dos cubiertas con soluciones constructivas prácticamente iguales en las que una lleva aislamiento y la otra no para poder analizar simulaciones higrotérmicas y así averiguar la influencia de estas condiciones. El estudio de temperaturas y humedades permitieron conocer que pese que la sala 2 que está mejor orientada y tiene un mejor aislamiento tenía unas temperaturas superiores que la sala 1. Pone de manifiesto este estudio la importancia de la ventilación y la necesidad de conocer el uso para poner tener un mejor conocimiento.

Las simulaciones higrotérmicas indicaron el punto crítico dónde se produce condensación con los materiales estudiados se ha producido en los puntos representados obteniendo así los daños constructivos que no se ven pero que están produciendo un deterioro en la cubierta.

La evaluación de estas condiciones por capas, materiales y grosores ayudan a construir una radiografía completa y a optimizar soluciones más adaptadas a la envolvente actual del edificio a intervenir.

Para líneas futuras se debería complementar con el estudio de la influencia de la lluvia impulsada por el viento (WDR) siendo un factor importante de penetración de agua y que afectan a la humedad relativa interior de la madera.

En conclusión, las cubiertas de edificios históricos para convertirlas en nZEB necesita un diseño higrotérmico que tenga en cuenta las diferentes propiedades térmicas de los materiales construidos, así como se ha podido comprobar que, aunque se aisle por el interior la cubierta, muchas veces no soluciona el problema de confort energético del edificio y si no se realiza un estudio higrotérmico previo.

6. Referencias

- Aparicio-Fernández, C., Vivancos, J.L., Pérez-Andreu, V. & Molines-Cano, J.M. (2021) Impact of human activity on the thermal behaviour of an unheated church. Case studies in THERMAL ENGINEERING, vol. 28, no. October, p. 101599. doi: 10.1016/j.csite.2021.101599
- Duanmu, Y., Ji, L., Liu, Y. & Dong, H. (2020) Air infiltration rate of typical zones of public buildings under natural conditions, *Sustain. Cities Soc.*, vol. 61, no. May, doi:10.1016/j.scs.2020.102290.
- European Commission (2013). Report to the European Parliament: Progress by member States towards nearly zero-energy buildings Retrieved from <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2013:0483:REV1:EN:PDF>
- European Commission. (2014). Climate Action. EU Action. Strategies. 2030 climate & energy framework. Retrieved February 13, 2016, from http://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030/index_en.htm.
- Hashempour, N., Taherkhani, R. & Mahdikhani, M. (2019). Energy performance optimization of existing buildings: A literature review. *Sustain. Cities Soc.*, vol. 54, no. July, p. 101967, 2020, doi: 10.1016/j.scs.2019.101967.
- Kvist Hansen, T., Peter Bjarløv, S. & Peuhkuri, R. (2019). The effects of wind-driven rain on the hygrothermal conditions behind wooden beam ends and at the interfaces between internal insulation and existing. *Energy and Buildings.*, vol. 196, pp. 225–268, doi:10.1016/j.enbuild.2019.05.020
- Lerma, C., Borràs J.G, Mas, Á., Torner, M.E., Vercher, J., & Gil, E. (2021) Evaluation of hygrothermal behaviour in heritage buildings through sensors, CFD modelling and IRT. *Sensors (Switzerland)*, vol. 21, no. 2, pp. 1–19, doi: 10.3390/s21020566.
- López-Ochoa, L.M., Bobadilla-Martínez D., Las-Heras-Casas J., & López-González, L.M. (2019) Towards nearly zero-energy educational buildings with the implementation of the Energy Performance of Buildings Directive via energy rehabilitation in cold Mediterranean zones: The case of Spain. *Elsevier Ltd.*, vol 5, pp 1488-1508, doi: 10.1016/j.egy.2019.10.008.
- Ministerio de Fomento (2013). Gobierno de España. Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HE. Retrieved from Spain: Ahorro de Energía. http://www.codigotecnico.org/cte/export/sites/default/web/galerias/archivos/DB_HE_septiembre_2013.pdf.
- Ministerio de Industria Energía y Turismo. (2016). Procedimientos para la certificación de edificios. Energía y desarrollo sostenible. Retrieved April 20, 2016, from <http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/Paginas/procedimientoscertificacion-proyecto-terminados.aspx>.
- Norma Europea EN ISO 13788, julio 2001, Características higrotérmicas de los elementos y componentes de edificación. Temperatura superficial interior para evitar la humedad superficial crítica y la condensación intersticial. Métodos de cálculo. (ISO 13788:2012)
- Pérez-Andreu, V., Aparicio-Fernández, C., Martínez-Ibernón A. & Vivancos J.L. (2018) Impact of climate change on heating and cooling energy demand in a residential building in a Mediterranean climate. *Energy*, vol. 165, pp. 63–74, doi: 10.1016/j.energy.2018.09.015.
- García, A., Guardiola, A.P, Gómez-Martínez, F. & Guardiola-Villora, A. (2018). Energy-saving potential of large housing stocks of listed buildings, case study: l'Eixample of Valencia. *Sustain. Cities Soc.*, vol. 42, pp. 59–81, doi: 10.1016/j.scs.2018.06.018.

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

