UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO EVAPORATIVO
DE LOS EDIFICIOS DEL PATRIMONIO HISTÓRICO
MEDIANTE SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN HIGROTÉRMICA
TESIS DOCTORAL

RAQUEL OTERO ORTIZ DE COSCA, ARQUITECTA

2018

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍAS
ARQUITECTÓNICAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE MADRID

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO EVAPORATIVO
DE LOS EDIFICIOS DEL PATRIMONIO HISTÓRICO
MEDIANTE SISTEMAS DE MONITORIZACIÓN HIGROTÉRMICA
TESIS DOCTORAL

AUTORA: RAQUEL OTERO ORTIZ DE COSCA, ARQUITECTA

DIRECTORES:

Dr. Soledad García Morales

Doctora Arquitecta por la Universidad Politécnica de Madrid

Dr. Francisco David Sanz Aráuz

Licenciado en Ciencias Geológicas (UCM)

Doctor por la Universidad Politécnica de Madrid

POLITÉCNICA

Tribunal nombrado por el Sr. Rector Magfco. de la Universidad Politécnica de Madrid, el día.....de.....de 20....

Presidente:_____

Vocal: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Secretario:_____

Suplente: _____

Suplente: _____

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día.....de.....de 20....
en la E.T.S.I. /Facultad.....

Calificación

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

Gracias a mis directores Soledad García y David Sanz Aráuz por su ayuda en el desarrollo de esta tesis doctoral.

Gracias al Consorcio de Santiago, en especial a Lourdes Pérez Castro, por su ayuda, su amabilidad, confianza, y sobre todo por darle valor a nuestro trabajo. A Don Manuel, párroco del Monasterio de Santa María de Conxo, por su paciencia y amabilidad.

Gracias al Patronato de la Santa Vera Cruz, especialmente a Jesús Manuel Jiménez y Jorge Pato, por toda la ayuda prestada en mis múltiples visitas a la Ermita del Humilladero.

Gracias a la Dirección General del Patrimonio Cultural de la Junta de Castilla y León por permitirme realizar el estudio en la Iglesia de Santiago de Peñalba.

Gracias al Grupo de Análisis e Intervención en el Patrimonio Arquitectónico (AIPA) de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (ETSAM-UPM), en especial a Rosa Bustamante. Gracias también al Programa Geomateriales "*Durabilidad y conservación de geomateriales del patrimonio construido*" (S2009/MAT_1629)

Gracias al personal del Laboratorio de Materiales de Construcción "Juan de Villanueva" por la ayuda prestada. También a Pilar Otero, miembro del personal de la biblioteca de la Escuela de Arquitectura, y a Eva Delgado, secretaria del Departamento de Construcción, por el trato amable que siempre me han dispensado y su profesionalidad.

Gracias al laboratorio del CAI de la Facultad de Ciencias Geológicas, en especial a Sol López de Andrés, a la que agradezco toda su ayuda en los ensayos realizados en el laboratorio.

Gracias a Laura López González por su compañerismo y gran humor. También a Miguel Gómez Heras, por todos sus consejos. Tengo que agradecer también a mis amigos su paciencia y comprensión, estando ahí durante todo este tiempo, especialmente a Laura Muriel y María Redondo.

Mi infinito agradecimiento a Hugo, por toda la ayuda y los ánimos, siempre con una sonrisa, siempre acompañándome. Gracias por hacer de esta tesis la tuya.

Mi mayor agradecimiento es para mi familia, sin vosotros, nada sería posible. A María por su cariño y preocupación, a Yolanda por ser la que me levanta cuando no puedo seguir, a Alex, por ser la voz de la razón y a Ramón, por absolutamente todo.

A mi padre, Ramón

Estudio del comportamiento evaporativo de los edificios del patrimonio histórico mediante sistemas de monitorización higrotérmica.

	Nº pág.
1 RESUMEN / ABSTRACT	01
2 ANTECEDENTES Y ESTADO DE LA CUESTIÓN	09
2.1 Aclaraciones a la metodología de estudio y clasificación de los antecedentes.	11
2.2 El salto de escala entre el estudio de los materiales de construcción, el sistema constructivo y el ambiente del edificio	13
2.3 Las técnicas de monitorización higrotérmica.	38
2.4 Los sistemas de simulación por ordenador como herramienta para la conservación del patrimonio arquitectónico.	42
3 JUSTIFICACIÓN HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	64
3.1 Justificación	65
3.2 Hipótesis	71
3.3 Objetivos	71
4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	72
4.1 El movimiento del agua en los materiales de construcción	74
4.2 El comportamiento del agua en los muros históricos	90
4.3 El comportamiento higrotérmico de los edificios históricos	97
4.4 Fundamentos del clima y la relación con la ventilación natural en edificios históricos.	101
4.5 Fundamentos para la simulación ambiental por ordenador	111
5 METODOLOGÍA	120
5.1 Introducción	121
5.2 Elección de los casos de estudio	121
5.2.1 Pre-selección de casos de estudio	121
5.2.2 Selección final de casos de estudio	123
5.2.3 Condicionantes para la elección de los casos de estudio	123
5.3 Determinación de los parámetros de ensayo a estudiar	127
5.3.1 Parámetros ambientales	129
5.3.2 Parámetros materiales	145
5.4 Simulación por ordenador	160

5.4.1	Modelado para la simulación	160
5.4.2	Precisión del modelo	161
5.4.3	Introducción de materiales en el modelo	162
5.4.4	Configuración de las condiciones iniciales para la simulación	164
5.5	Metodología de análisis de datos	171
6	CASOS DE ESTUDIO	173
6.1	IGLESIA DE SANTIAGO DE PEÑALBA (LEÓN)	173
6.1.1	Estudio y descripción del caso 1	174
6.1.2	Análisis higrotérmico	233
6.1.3	Cálculo del comportamiento evaporativo	275
6.1.4	Evaluación del comportamiento evaporativo mediante simulación por ordenador	301
6.2	MONASTERIO DE SANTA MARÍA DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)	309
6.2.1	Estudio y descripción del caso 2	310
6.2.2	Análisis higrotérmico	353
6.2.3	Cálculo del comportamiento evaporativo	389
6.2.4	Evaluación del comportamiento evaporativo mediante simulación por ordenador	402
6.3	ERMITA DEL HUMILLADERO (ÁVILA)	411
6.3.1	Estudio y descripción del caso 3	412
6.3.2	Análisis higrotérmico	456
6.3.3	Cálculo del comportamiento evaporativo	476
6.3.4	Evaluación del comportamiento evaporativo mediante simulación por ordenador	487
7	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	493
8	CONCLUSIONES	501
9	NUEVAS VÍAS DE INVESTIGACIÓN	507
10	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	511
11	SIGLAS, ACRÓNIMOS Y UNIDADES	538

1 RESUMEN

Definición del objeto de estudio: el comportamiento evaporativo

Los edificios históricos se encuentran en equilibrio con el microclima que los rodea. Los materiales constructivos tradicionales que los conforman se caracterizan por ser porosos y carecen de sistemas de impermeabilización. Esto hace que, en contacto con el agua, se produzca un flujo de succión-evaporación a través de los muros. El agua evaporada pasa al ambiente interior, dónde la efectividad de la ventilación natural determina la capacidad de disipación de este vapor de agua al exterior. La acción combinada de succión-evaporación y disipación, se puede agrupar bajo la definición de *comportamiento evaporativo del edificio*¹. Para estudiar este fenómeno es necesario conocer todos los factores que lo determinan: materiales, climáticos y morfológicos. Estos parámetros intervienen de manera combinada en el comportamiento evaporativo del edificio, por lo que no se deben estudiar de manera independiente.

Utilidad del estudio del comportamiento evaporativo de los edificios históricos

Caracterizar el comportamiento evaporativo de un edificio histórico asegura un conocimiento preciso de las fluctuaciones higrotérmicas que se producen de manera natural tanto en el ambiente como a través de su envolvente. Esto resulta esencial para la conservación preventiva de este tipo de construcciones.

Se han empleado frecuentemente los cálculos de succión-evaporación en muros para evaluar la afección de lesiones por humedad. Pero, acoplando el cálculo de la disipación de la humedad al ambiente se puede evaluar con precisión la eficacia de técnicas pasivas de ventilación natural que ayudaría así a prevenir las lesiones. El control eficiente de la ventilación natural previene este tipo de daños, si se consigue mantener el edificio en un estado de equilibrio dinámico adecuado.

También la precisión en el cálculo de la ventilación natural es útil para el control ambiental en cuanto a la conservación de los bienes muebles y el confort térmico. Por tanto, teniendo en cuenta tanto el ambiente como la envolvente se puede obtener un cálculo más preciso de las condiciones higrotérmicas del interior que sea beneficioso tanto para los ocupantes, los bienes muebles y el propio edificio, que si sólo se monitorizan y registran las variables de ambiente.

Otra de las capacidades del cálculo del comportamiento evaporativo es poder prever cómo los cambios climáticos afectan al edificio. Esto resulta fundamental para la conservación de su integridad material.

¹ Los fundamentos físicos esenciales empleados en esta investigación, y que definen el comportamiento evaporativo se detallan en el capítulo 4 “Fundamentos teóricos”.

Situación actual de la investigación en este campo de estudio

Para el desarrollo de esta tesis, primero se ha llevado a cabo una revisión de las diferentes investigaciones existentes en cuanto al estudio del agua en relación con los parámetros climáticos y materiales de los edificios históricos.

Estos trabajos se han agrupado en tres ramas: estudio del comportamiento del agua en los materiales y sistemas constructivos tradicionales, monitorización higrotérmica de los edificios históricos y, por último, simulaciones por ordenador realizadas en este tipo de edificios.

Cada una de estas tres líneas ofrece un conocimiento muy amplio en su especialidad, pero se ha detectado que los trabajos que combinen las tres perspectivas y además aborden el estudio conjunto de variables materiales, morfológicas y ambientales sobre el edificio histórico son un número reducido del global.

En el estudio de los antecedentes también se ha detectado que no existe un sistema unitario de acercamiento al estudio del edificio, ya que depende de cada una de las disciplinas científicas y de los objetivos específicos con que se está estudiando.

Propuesta de una metodología para el estudio del comportamiento evaporativo de los edificios históricos

Dado que en arquitectura se estudia el edificio desde una perspectiva holística, se propone un método que combine las distintas herramientas (caracterización de materiales, monitorización higrotérmica y simulación por ordenador) que permitan obtener todos los parámetros (materiales, climáticos y morfológicos) para realizar los cálculos. De esta manera, se obtiene el conocimiento completo del comportamiento evaporativo del edificio. Para ello se han empleado: sistemas de monitorización higrotérmica, ensayos de caracterización de materiales y simulación por ordenador.

El método empleado se basa en un sistema de trabajo organizado en fases que se interconectan entre sí. Se ha buscado que sea aplicable a casos prácticos, bajo condiciones reales del edificio y útil para el análisis de este tipo de construcciones, apoyándose siempre en los antecedentes de investigación existentes.

Para la monitorización higrotérmica in-situ, se diseñó un protocolo estandarizado de colocación de aparatos. Los datos obtenidos aseguran el conocimiento del microclima exterior y el ambiente interior, y se emplean para realizar la simulación del edificio en condiciones de contorno reales. De los ensayos de laboratorio se obtienen los datos necesarios sobre los materiales para la simulación por ordenador.

El cálculo computacional que se ha empleado combina: la simulación del movimiento del aire interior-exterior (CFD) con el cálculo de transferencia de temperatura y humedad a través de los muros.

Validación de los cálculos y la metodología de trabajo mediante su puesta en práctica en casos de estudio reales

Para validar el método propuesto se ha puesto en práctica en tres diferentes casos de estudio: la Iglesia de Santiago de Peñalba (León), el Monasterio de Santa María de Conxo (Santiago de Compostela) y la ermita del Humilladero (Ávila).

Todos los edificios estudiados presentan un conjunto de características comunes esenciales: edificios muy masivos, con grandes espesores de muro, pocos huecos, contruidos en piedra, con su cimentación en contacto directo con el terreno, sin ningún tipo de impermeabilización y sin sistemas de calefacción. Esta tipología es común en la mayoría de edificios históricos como iglesias, monasterios, castillos o catedrales.

Al mismo tiempo, cada edificio presenta ciertas particularidades, lo que ha permitido hacer algunas diferenciaciones en el método y observar cómo los resultados de comportamiento evaporativo cambian a condición de las particularidades de cada caso, por lo que éstas se han tenido en cuenta, adaptando el sistema de trabajo a cada caso particular.

En este trabajo se detallan los cálculos realizados en los tres casos de estudio y se demuestra la utilidad del método. Además, se explican las dificultades que se han ido encontrado durante el desarrollo del trabajo en cada edificio. Algunas de estas dificultades son, sin duda, futuras líneas de investigación abiertas en relación directa con la investigación aquí presentada.

Por otra parte, se discuten los resultados de los tres edificios, comentando las particularidades de cada caso y las tendencias comunes entre los tres edificios. El registro de estas tendencias que se pueden repetir en diferentes casos de estudio pueden resultar de utilidad a la hora de emprender nuevos trabajos en otros edificios.

1 ABSTRACT

Subject matter. evaporative behaviour

Historic buildings are in balance with the microclimatic environment. They are characterized by their traditional building materials, which are porous and the waterproofing quality is very lacking within these type of construction system. Exposed to water, this causes a suction-evaporation flow through the walls. Water suctioned by the wall evaporates to the indoor environment. The water vapour dissipation in the building is determined by the efficiency in which natural ventilation occurs within the interior environment. The actions of both, suction-evaporation and dissipation categorized under “*building evaporative behaviour*” definition. In order to understand this phenomenon, it is necessary to know all the factors involved: material, climatic and morphological parameters. These interact in a combined way in the evaporative behaviour therefore, they should not be studied independently.

Research usefulness in historic buildings evaporative behaviour

Characterizing the evaporative behaviour of historic buildings ensures accurate knowledge of hygrothermal fluctuations that occurs both in the environment and through the envelope. This is essential for the heritage preventive conservation.

Walls suction-evaporation calculations have been frequently used to evaluate the causes of moisture damage. By coupling moisture dissipation calculations to the environment, the effectiveness of passive techniques of natural ventilation can be evaluated with major precision, which would help to prevent decay. Efficient control of natural ventilation prevents this type of damage if the building is maintained in an adequate dynamic balance state.

Precision improvements in natural ventilation calculation are also useful to ensure an adequate and controlled indoor environment, for the conservation of artworks, as well as, thermal comfort. Hence, considering both environment and envelope fluctuations, a more favourable hygrothermal may be calculated for both occupants, artworks and the building itself.

Another use of these type of calculations, is the ability to determine the evaporative behaviour capacity, in order to predict how climate change affects buildings. This is fundamental for the conservation of buildings material integrity.

Current state within this field of research

In order to being this thesis, a review of the different existing fields of research related to evaporative behaviour was carried out, focusing on the relationships between water, porous building materials and climatic conditions.

These have been grouped into three branches: Scientific research focused on the study of water behaviour on traditional building materials and systems, hygrothermal

monitoring of historic buildings and, finally, computational simulations of historic buildings.

Each of these three branches offers a very broad knowledge in its field of study. However, scientific research on historic buildings that combine these three perspectives and also address surveys on material, morphological and environmental variables constitute only a small part.

As for the methodology, there is no unitary approach in historic buildings researches, since it depends on each scientific discipline and, of course, on the specific objectives in each case study.

Methodology proposal for the study of the evaporative behaviour of historic buildings.

Since in architecture buildings are studied from a holistic perspective, a method is proposed combining different tools (materials characterization, hygrothermal monitoring and computational simulation) that allow to obtain all the parameters (material, climatic and morphological parameters) needed for these calculations. Therefore, the results obtained are a complete knowledge of evaporative behaviour of buildings.

The methodology applied is based on systematic procedure organized in interconnected stages. It has been sought to be applicable to practical cases, under real building conditions and useful for the analysis of this type of construction, always relying on the existing research background.

A standardized protocol was designed for in-situ hygrothermal monitoring. The data obtained ensures indoor and outdoor climatic knowledge, and are used to perform the building simulation in real boundary conditions. Material characteristics implemented in computer simulation are obtained from laboratory tests.

The computational calculation used combines: simulation of indoor-outdoor air movement (CFD) with temperature and humidity transfer calculations through the walls.

Validation of methodology and calculations through real case studies implementation

In order to validate the proposed method, it has been implemented in three different case studies: Santiago de Peñalba Church (León, Spain), Santa María de Conxo Monastery (Santiago de Compostela, Spain) and Humilladero Chapel (Avila).

All the studied buildings present the following a set of essential and common characteristics: massive buildings, with large wall thicknesses, few openings (windows and doors), built in stone, with their foundations in direct contact with the ground, without any type of waterproofing system and without HVAC systems. This typology is

common in most of the historic buildings such as churches, monasteries, castles or cathedrals.

At the same time, each building has certain particularities, which has allowed to make some methodological fits and observe how the results of evaporative behaviour change depending on the building particularities. Therefore, this reveals that specific details must be taken into account, adapting the system to each particular case.

The calculations made in the three case studies proves the utility of the presented method. At the same time, it is explained difficulties encountered during the development of each building survey and calculations are also explained. Some of these difficulties are future lines of research open in direct relation with the thesis presented here.

The results of the three buildings, some particularities of each case and the common trends among them are discussed in this work. The registration of these trends, that can be repeated in other cases, can be useful when undertaking new investigations in other buildings.

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DE LA CUESTIÓN

2.1 ACLARACIONES A LA METODOLOGÍA DE ESTUDIO Y CLASIFICACIÓN DE LOS ANTECEDENTES

2.2 EL SALTO DE ESCALA ENTRE EL ESTUDIO DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, EL SISTEMA CONSTRUCTIVO Y EL AMBIENTE DEL EDIFICIO.

2.2.1 El estudio del comportamiento del agua en los materiales de construcción

2.2.2 El estudio del comportamiento del agua en el muro histórico

- a) Primeros modelos del movimiento del agua (ascenso capilar) en el sistema constructivo y su evolución*
- b) Validación experimental de los modelos de ascenso capilar*
- c) Los condicionantes al modelo capilar: heterogeneidad de la construcción e interfaz entre materiales*
- d) Otros condicionantes con frecuente presencia en muros históricos: contaminación por sales*
- e) Objetivos de los trabajos que estudian el movimiento de ascenso capilar en edificios históricos*
- f) Conclusiones al estudio del comportamiento del agua en el muro*

2.2.3 Estudio del ambiente del edificio histórico

- a) Control ambiental de espacios históricos*
- b) Relación del ambiente del edificio con el deterioro de los materiales*
- c) Control ambiental de espacios en edificios históricos*
- d) El estudio del ambiente interior para la evaluación del confort térmico*
- e) Estudios previos a soluciones de rehabilitación*
- f) Conclusiones al estudio del ambiente del edificio histórico*

2.3 LAS TÉCNICAS DE MONITORIZACIÓN HIGROTÉRMICA

- 2.3.1 Marco general del uso de las técnicas de monitorización en edificios históricos
- 2.3.2 Evolución de los sistemas de monitorización higrotérmica

2.4 LOS SISTEMAS DE SIMULACIÓN POR ORDENADOR COMO HERRAMIENTA PARA LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO.

2.4.1 Marco general de la simulación por ordenador en arquitectura

2.4.2 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

- a) Aparición y desarrollo de los programas CFD*
- b) Los modelos de turbulencia*
- c) La malla de cálculo*
- d) Modelos multizona*
- e) Modelos de zona*

2.4.3 Programas de simulación de transferencia de calor, aire y humedad (HAM)

2.4.4 Estudios de transferencia de calor, aire y humedad (HAM) combinados con Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

2.4.5 Aplicaciones de la simulación en edificios históricos

- a) Estudio del impacto de los sistemas de acondicionamiento ambiental sobre el edificio histórico
- b) Estudio de la ventilación natural
- c) Las condiciones de contorno y la calibración en los modelos de simulación de edificios históricos
- d) Transferencia de calor y humedad en la simulación de edificios históricos

2.4.6 Las condiciones de contorno y la calibración en los modelos de simulación de edificios históricos

2.4.7 Transferencia de calor y humedad en la simulación de edificios históricos

2 ANTECEDENTES Y ESTADO DE LA CUESTIÓN

2.1 ACLARACIONES A LA METODOLOGÍA DE ESTUDIO Y CLASIFICACIÓN DE LOS ANTECEDENTES

Para la exploración de los antecedentes que preceden a esta investigación se ha realizado una búsqueda de todos los artículos científicos más recientes que existían en el momento en que se comenzó este trabajo. Estos, ubicaban el estado de la cuestión en su momento actual, indicando cuáles eran las tendencias hacia las que se dirigía esta línea de investigación. Esto, por ejemplo, reveló que los estudios que tienen que ver con la higrorotmia del edificio tienen cada vez más a orientarse hacia la simulación por ordenador empleando modelos de dinámica de fluidos y de transferencia de masa y calor a través de los materiales. Temas que se explicarán con detenimiento a lo largo del desarrollo de este capítulo y los siguientes.

Las publicaciones que se localizaron en esa búsqueda preliminar presentaban, a su vez, una base científica común que se ha clasificado también como fundamentos teóricos. Se trata de aquellas investigaciones previas, en muchos casos pioneras en desarrollar teorías, como Sharp Front Theory para la dinámica de succión-evaporación de agua en muros, que sientan las bases de esta línea de investigación. Por considerarlas indispensables, se recogen en un capítulo específico bajo el título de “Fundamentos teóricos”, aunque se hará mención a todas ellas cronológicamente en este capítulo.

En los apartados que siguen a continuación, se han clasificado las distintas investigaciones que conectan con esta tesis en tres grupos:

En primer lugar, aquellos trabajos que tienen que ver con la dinámica del agua en el edificio –ya sea a escala del material, del sistema constructivo o del propio ambiente del edificio-. Dentro de este primer grupo, se detallan especialmente las investigaciones a escala del edificio¹.

En un segundo grupo, se han clasificado los trabajos con monitorización higrorotmica. Dentro de este grupo hay gran cantidad de trabajos, se han dividido según el fin con el que se monitoriza el edificio².

¹ Algunos de los términos de búsqueda asociados con este primer grupo son los siguientes. En lo que respecta a la dinámica del agua en el material: *porous media, evaporation, moisture transport, drying-wetting cycles, evaporative drying*. En lo que respecta al agua en el sistema constructivo (muro histórico): *capillarity, capillary rise, building stone, masonry, moisture diffusion, moisture transfer*. En lo que respecta al ambiente del edificio: *indoor air quality, ventilation, microclimate, cultural heritage, indoor climate in historic buildings, air exchange rate*.

² Los términos de búsqueda para este grupo son, por ejemplo: *microclimate, sensors, control systems for heritage, remote control, Wireless networks, artwork preservation*.

En tercer lugar, aquellos trabajos que emplean programas de simulación por ordenador en edificios históricos³.

Aunque se han separado en tres grupos, para realizar un capítulo estructurado, existe conexión entre ellos. El conjunto de estos tres grupos conforma el ámbito general sobre el que se asienta esta tesis, que depende de los conocimientos en las tres ramas: dinámica del agua en los materiales de construcción, monitorización y simulación.

Es necesario mencionar también que, durante el transcurso de esta investigación, se ha ido revisando progresivamente las últimas aportaciones de los investigadores a la materia. Se ha considerado importante hacer este esfuerzo, dado que el campo de los sistemas de monitorización, y la simulación por ordenador, se encuentra en constante avance. Todas aquellas investigaciones que implican la utilización de herramientas tecnológicas avanzan a gran velocidad, gracias a la constante implementación de mejoras. A lo largo del desarrollo de la tesis, se verán comentarios a artículos contemporáneos a este trabajo.

³ Para este grupo, los términos más habituales son: *CFD simulation, thermodynamics, natural ventilation, simulation, surfer transfer simulations, ventilation scenarios*.

2.2 EL SALTO DE ESCALA ENTRE EL ESTUDIO DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, EL SISTEMA CONSTRUCTIVO Y EL AMBIENTE DEL EDIFICIO

La evaporación es el único modo que el agua tiene de abandonar el material (Hall, Hoff 2002), para estudiar el *comportamiento evaporativo* del edificio, es necesario conocer el movimiento del agua que se produce desde el exterior al interior a través de la envolvente. En el capítulo 4 “Fundamentos teóricos” se explican con detalle las leyes que sentaron las bases sobre el movimiento del agua en materiales porosos de construcción, que son las que dan lugar posteriormente a las teorías sobre la dinámica del agua en el sistema constructivo, y su paso al ambiente del edificio por evaporación. La interconexión entre estos tres niveles, o escalas –material, sistema constructivo, edificio- es el que nos brinda el conocimiento completo del fenómeno.

Se detalla a continuación la producción científica existente en cada uno de estos tres niveles. Finalmente se discute la posición en que se encuentra este trabajo con respecto al marco científico general.

2.2.1 El estudio del comportamiento del agua en los materiales de construcción

El campo que estudia la dinámica del agua en los materiales porosos de construcción es muy amplio. Para el ámbito de la conservación de edificios históricos, estos estudios son de especial interés por la relación fundamental del agua con los procesos de degradación de los materiales.

Para el desarrollo de esta tesis, han resultado especialmente importantes los estudios sobre *evaporación de materiales porosos tradicionales* (como piedra, ladrillo y mortero), por lo que se ha centrado el desarrollo de este capítulo en torno a esta cuestión, aunque el marco es mucho más amplio.

Uno de los autores referentes en este campo es Dario Camuffo, que definió los ciclos de condensación-evaporación en los materiales porosos en base a las ecuaciones de Kelvin⁴ (Camuffo, 1984). Camuffo expone varios modelos que se podrían considerar como “casos tipo”, para ilustrar los mecanismos que producen los ciclos de condensación-evaporación en el interior de los poros del material. El modelo de Camuffo describe un “material ideal” con unos poros con geometrías perfectamente definidas -como semiesferas, esferas o tubulares-. Como el propio autor explica, el análisis es esencialmente cualitativo, no se tienen en cuenta cuestiones como la discontinuidad del material.

Esto lleva a que, con el tiempo, otros investigadores traten de definir el fenómeno por medio de estudios experimentales. Franzen y Mirwald demuestran que las propiedades intrínsecas inherentes al material condicionan la cantidad de agua absorbida, o que es capaz de absorber, pero también las características del clima que lo rodea (Franzen,

⁴ Las fórmulas y una breve explicación de su desarrollo se pueden ver en el capítulo 4 “Fundamentos teóricos”

Mirwald 2004). Estos autores explican que, generalmente, para caracterizar la adsorción de agua de muestras de piedra, se realizan las curvas de sorción isotérmica, pero estas condiciones no se dan normalmente en la realidad, además de resultar laborioso el proceso de ensayo. Franzen y Mirwald proponen el estudio del material sometido a un ensayo de adsorción en condiciones dinámicas, en las que la muestra está sometida a procesos monitorizados de sorción y desorción cambiante durante un mes y medio, al que denominaron “*experimento de desequilibrio*”.

Para ello se seleccionaron 6 piedras. Previamente se someten a estudios de tamaño de grano, tamaño de poro, etc.

El trabajo demuestra experimentalmente cómo la piedra interactúa con los cambios de humedad atmosférica, realizando un intercambio de humedad constante con el aire (Figura 1). Dado que la humedad relativa ambiental es cambiante durante todo día, el equilibrio nunca se alcanza, solo se aproxima. Este intercambio se produce en su capa superficial o sub-superficial, pero avanza poco a poco hacia las capas más profundas, independientemente de la humedad ambiental. La humedad a cierta profundidad depende del tamaño y distribución de los poros internos.

Figura 1. Experimento de desequilibrio realizado por Franzen y Mirwald sobre una piedra arenisca calcárea, de la región de Münsterland, en la que las condiciones de humedad relativa del ensayo eran cambiantes(Franzen, Mirwald 2004).

Pero no solo la humedad ambiental interviene en el proceso de movimiento de agua en el material. Karagiannis et al. investigan el efecto de la temperatura del aire en el coeficiente de absorción de agua capilar en diferentes materiales. Estos autores observaron una relación lineal, que definieron experimentalmente, entre los valores de coeficiente de absorción de agua capilar y temperatura(Karagiannis, Karoglou et al. 2016).

El salto del material al ambiente se produce a través del fenómeno de evaporación que se define como la transferencia del líquido contenido en los poros de un material sólido al aire que lo rodea. La evaporación desde un medio poroso incorpora la interacción entre la temperatura y la humedad, variables que son independientes y fluctúan simultáneamente (Hall & Allison, 2010a) (Hall & Allison, 2010b). La evaporación supone la transferencia de calor y masa de manera conjunta, con flujos de calor latente y/o

sensibles vinculados al cambio de fase líquido a gas, que es necesario para que el agua abandone el cuerpo poroso. La evaporación se asocia con el proceso de secado a través de la reducción del contenido de humedad en el material.

El secado normalmente incluye una serie de procesos que resultan difíciles de explicar, especialmente en las etapas de cambio de fase de líquido a gas y la transferencia de vapor desde la superficie del sólido al ambiente. Esta transferencia del vapor al ambiente está fuertemente influenciada por los flujos de aire cercanos al muro (Hall, et al., 1984). La complejidad que supone definir este flujo de aire en contacto con una superficie hace que determinar su influencia sobre el secado del material sea difícil de establecer, ya que intervienen varios parámetros. Para resolver este problema, Hall realiza una simplificación matemática suponiendo que ese movimiento de aire cercano al muro es un flujo laminar simple (Hall, et al., 1984)

Se puede afirmar, por tanto, que el proceso de evaporación, y consecuentemente el de secado, se vuelve complejo en la transición entre el material y el ambiente, siendo necesario incorporar los parámetros atmosféricos al cálculo. Precisamente las fluctuaciones estacionales del clima afectan a la absorción y a la evaporación, provocando oscilaciones en el ascenso capilar y la evaporación (Hall, Hamilton et al. 2011).

Aún a día de hoy, la complejidad del fenómeno de evaporación en los materiales porosos hace que no exista una definición clara y que sea un tema de investigación en activo (Ahrenholz, et al., 2011). Además, hay que tener en cuenta que no existe una teoría de secado universal, aplicable a todos los materiales porosos, por ello, los trabajos más actuales optan por ensayos experimentales como modo de comprobación de todos los cálculos desarrollados. Hall y Allison llevaron a cabo una serie de experimentos en laboratorio con prototipos contruidos en tierra compactada (Hall & Allison, 2010b). Las muestras fueron sometidas a ensayos de absorción de agua para estudiar cómo se produce el secado. Con este trabajo demostraron que la evaporación depende en gran medida de la distribución y tamaño de los vacíos, mientras que para la desorción no fue así. Según explican Hall y Allison, la desorción era muy probable que se viera limitada por los factores ambientales como la humedad relativa y la velocidad del aire.

Los resultados del estudio demostraron que el retroceso del frente capilar y el transporte de agua a la capa límite donde se produce la evaporación están dominados por el gradiente en potencial capilar.

En ladrillo, Martines-Lopez et al. realizan un trabajo para determinar los perfiles de humedad en el proceso de secado de muestras sometidas a diferentes temperaturas, mediante el modelo de Luikov⁵ (Martines-Lopez & Lira-Cortes, 2016). Este estudio les permitió identificar los principales factores de influencia en el proceso de secado del ladrillo (conductividad térmica en función de la humedad, conductividad térmica en función de la temperatura, densidad del material, calor latente, coeficiente convectivo de transferencia de masa, coeficiente convectivo de transferencia de calor, espesor de la muestra). Como explicaron los propios autores, el secado depende de cada material.

En el caso de la piedra como material de construcción, entre los numerosos estudios, se puede mencionar a (Karaca 2010) que estudia la absorción y deshidratación de cinco tipos diferentes de piedra (mármol, caliza, travertino, ónix y granito) comparativamente. (Ozcelik & Ozguven, 2014) realizan un trabajo experimental para determinar las características de absorción de agua de 12 piedras con diferentes propiedades de composición, estructura y textura. Eligieron rocas con diferentes propiedades – mármoles, calizas, granitos, andesitas, travertinos, ónix- para determinar los parámetros que afectan a la relación de absorción de agua y obtener características de secado de este material. Las pruebas fueron sometidas a saturación y secado, tiempo durante el cual se monitorizaron, así como a caracterización de sus propiedades físicas como densidad real, aparente, porosidad abierta y total.

Según los resultados del estudio, casi todas las piedras muestran la misma tendencia de absorción de agua, aunque con variaciones. Sin embargo, el comportamiento frente al tiempo es casi el mismo. Las propiedades de porosidad abierta y total, así como la densidad aparente parecen tener una relación directa con la absorción de agua. A medida que aumentaba la porosidad y disminuye la densidad aparente, aumenta la absorción de agua. Por otra parte, según pudieron constatar en este trabajo, los componentes químicos de todas las piedras de construcción ensayadas no tienen efectos directos sobre la absorción de agua.

Un reciente trabajo sobre evaporación en rocas (McAllister, et al., 2016), demuestra, mediante una serie de ensayos de laboratorio en probetas de piedra caliza, sometidas a diferentes condiciones⁶, que se pueden producir patrones de secado diferenciales

⁵ El modelo de Luikov se desarrolló en base a principios de termodinámica de procesos irreversibles y de las relaciones lineales de difusión de calor y humedad. El modelo de Luikov consiste en un sistema de ecuaciones diferenciales parciales de segundo orden, que describen la transferencia de calor y de humedad en materiales capilares porosos (Luikov, 1975).

⁶ En el experimento se simulan en laboratorio con probetas de piedra de Locharbriggs en tres condiciones ambientales, que habitualmente son las más frecuentes. (1) En sombra (2) sometida a un flujo de aire y (3) calor con una fuente de aire.

incluso dentro de la misma piedra. Estas variaciones se deben a las heterogeneidades del material.

El trabajo subraya la importancia de los parámetros ambientales en estrecha relación con la evaporación. A esta observación realizada por McAllister, podría añadirse (Dejian, Guilian et al. 2011), trabajo en el que se demuestra, por medio del estudio de diferentes rocas, cómo las propias características hidrófilas –la estructura y distribución de sus poros- se transforman tras haber pasado por un proceso de absorción de agua.

Además de la complejidad del propio fenómeno de evaporación, cuando hablamos de materiales en edificios históricos, uno de los principales condicionantes para que la teoría de condensación-evaporación se convierta en un tema complejo de discernir es la presencia de sales, que alteran tanto la absorción (Franzen, Mirwald 2009) y evaporación (Benavente, et al., 2003) (Diaz-Gonçalves, et al., 2015) del material. Gran parte de la investigación que trata el fenómeno del movimiento del agua en materiales porosos se centra en el estudio de la interacción de la humedad con la sal (Rodríguez-Navarro & Doehne, 1999), (Shokri-Kuehni, et al., 2017). Esto se debe a que los ciclos de humectación y secado que sufren las piedras por las variaciones higrotérmicas, provocan, en presencia de sales higroscópicas, ciclos de cristalización, que provocan a su vez la rotura de las mismas (Derluyn, Moonen et al. 2014, Koniorczyk, Gawin 2012, Koniorczyk, Gawin et al. 2018, Choo, Sun 2018).

Aún hoy en día, la complejidad del fenómeno de movimiento de agua en el material hace que sea difícil de determinar en la realidad. Como explica Franzoni, *“el hábito de establecer (de acuerdo con criterios de sentido común) en lugar de demostrar, es bastante difuso en el campo de la investigación en movimiento de agua en materiales de construcción”* (Franzoni 2014).

2.2.2 El estudio del comportamiento del agua en el muro histórico

Introducción

Si conocer el comportamiento del agua en el material resultaba complejo, el salto de escala al sistema constructivo supone contar con nuevos condicionantes como la combinación de materiales diferentes o la heterogeneidad de los sistemas constructivos tradicionales. En este apartado, se tratan los trabajos que estudian el material formando parte de una unidad más compleja.

La envolvente de un edificio está condicionada por gradientes inestables de potenciales de conducción, tales como temperatura, presión de vapor de agua, etc., que producen fenómenos de transferencia complejos. A esto se suma la geometría de los materiales, y la forma en que se ensamblan entre sí.

En la mayoría de los edificios históricos lo que encontramos son muros de fábrica⁷. Este sistema constructivo se caracteriza por su heterogeneidad material. Normalmente están compuestos por, al menos, dos materiales. El principal, piedra o ladrillo y un conglomerante. En el caso de la piedra pueden, además, no ser sillares regulares, lo que complica el reconocimiento de patrones de comportamiento. El mortero de unión tiene una composición que puede ser muy variada, tanto en agregados como en proporciones, y varía mucho de unos edificios a otros. En el caso de edificios históricos generalmente encontramos un sistema constructivo formado por dos hojas más o menos regulares y una hoja de relleno, que suele ser un material mucho más pobre, y heterogéneo. Esto dificulta el conocimiento de cómo se comporta el agua en el interior del muro, sobre todo si tenemos en cuenta que, al tratarse de edificios con valores patrimoniales, la exploración debe limitarse todo lo posible al uso de Técnicas No Destructivas (NDT).

El principal fenómeno de movimiento de agua en este tipo de sistemas constructivos – muros de fábrica – se denomina como ascenso de humedad⁸ (RD). Alfano et al. definen el ascenso de la humedad como el fenómeno que ocurre cuando el agua del terreno entra en contacto con la cimentación del edificio y asciende a través de la red porosa. (Alfano, et al., 2006). La altura que llega a alcanzar el agua en el muro depende de dos factores principalmente: la estructura porosa y la evaporación. De hecho, de acuerdo con la ley de Jurin, la altura máxima de elevación para el agua es inversamente proporcional al radio capilar. Teóricamente para un radio de poro de 1 μm (que es típico para muchos materiales de construcción), la altura máxima debe ser de aproximadamente 15 m, pero en la práctica, en los edificios, rara vez supera los 4-5 m debido al proceso de evaporación. Las observaciones de campo de algunos autores indican que el ascenso del frente capilar suele estar comprendido entre 0,5 y 1,5m (Hall, Hoff 2007), incluso

⁷ En esta tesis, todos los casos de estudio analizados están formados por muros de fábrica de piedra.

⁸ Rising Damp (RD) como se conoce el fenómeno de ascenso de la humedad capilar en inglés.

llegando a los 4m. Pero, esto depende del grosor de la pared y de las condiciones de evaporación. En la iglesia de San Bernardo (Roma), donde el espesor de las paredes es de 4m, la humedad asciende hasta los 5,3m. Mientras que en la basílica de San Marco (Venecia), donde el espesor oscila entre 0,7 y 2m, la altura de elevación es superior a los 6m (Sandrolini, Franzoni 2007, Franzoni 2014).

Existen otros fenómenos que dan lugar a la entrada de agua en las fábricas históricas, como es el efecto de la lluvia combinada con el viento (Blocken, Carmeliet 2010). Esta tesis se centra especialmente en el efecto que produce el ascenso capilar en los muros.

a) Primeros modelos del movimiento del agua (ascenso capilar) en el sistema constructivo y su evolución:

Los primeros trabajos en tratar el fenómeno del ascenso de humedad lo explicaban de una manera cualitativa, como los trabajos de Massari. Con el tiempo, se reclama la necesidad de estudios desde un punto de vista físico. La teoría del Frente capilar⁹ (SF) representa la principal definición matemática del fenómeno completo, es decir, incluyendo el ascenso capilar a través del muro y su evaporación al ambiente (Hall & Hoff, 2007).

La teoría de Hall y Hoff se basa en que el fenómeno se produce por dos fuerzas, una de succión responsable de tomar el agua del terreno y otra de evaporación, responsable de producir la evaporación. La gran aportación de Hall y Hoff es que su modelo, por medio de simplificaciones matemáticas, permite el cálculo de este proceso de absorción-evaporación, aun tratándose de geometrías complejas y con materiales compuestos. Según explican estos autores en su trabajo, dado que los condicionantes ambientales en el entorno del edificio juegan un papel fundamental en la dinámica del agua, no se necesita saber mucho del material por debajo del frente capilar, exceptuando la extensión de dicho frente. Lo que sí es necesario conocer es la capacidad de secado del “microambiente” que rodea al muro. Por ello, establecen el potencial de evaporación e como parámetro que condiciona la evaporación, sujeto a la temperatura, humedad y velocidad del aire, tanto en la superficie del muro como en su ambiente próximo¹⁰. Pero la capacidad de evaporación del ambiente, como bien es conocido en hidrología y meteorología, dependen de factores climáticos. En (Hall, et al., 2011).realizan una revisión de la Teoría del Frente capilar (SF¹¹), en la que exponen una corrección del modelo inicial teniendo en cuenta que la variable potencial de evaporación (e). En el modelo original, el potencial de evaporación se presentaba como una constante respecto al tiempo. Con la corrección reconocen que e es dependiente del micro-

⁹ Sharp Front (SF) como se conoce al Frente capilar en sus siglas en inglés

¹⁰ Todas las fórmulas a las que se refiere este párrafo se encuentran explicadas en el capítulo 4 “Fundamentos teóricos”.

¹¹ La teoría del frente capilar es acuñada originalmente como Sharp Front Theory (SF, en sus siglas en inglés).

ambiente, sujeta a las variaciones climáticas a lo largo del año. De esta forma, queda contemplado en el cálculo que las fluctuaciones estacionales del clima provocan cambios en el potencial de evaporación y, por tanto, en el ascenso capilar del muro. Se demuestran así, la estrecha relación que existe entre el potencial de evaporación y el ascenso del agua a través del muro.

b) Validación experimental de los modelos de ascenso capilar

Para validar el cálculo obtenido mediante SF se comparan con los datos obtenidos mediante las simulaciones de elementos finitos del flujo no saturado. Las simulaciones del flujo no saturado se llevan a cabo por medio del software HYDRUS (2D/3D)¹². El modelo del que parten los autores para realizar el cálculo es un “muro ideal” que se modela en dos dimensiones y compuesto por un solo material. Por tanto, aunque se tienen en cuenta las fluctuaciones estacionales del clima, siguen partiendo de un modelo ideal, al no contar con condicionantes que puedan existir en muros reales. Para comprobar la concordancia entre los cálculos y las observaciones en edificios reales, Hall y Hoff ponen como ejemplo dos casos de estudio, el primero en El Cairo (Fitzner, et al., 2002) y Oxford (Sass & Viles, 2010). Con ambos existe una buena correspondencia de resultados.

Posteriormente, diversos trabajos científicos basan sus cálculos aplicando este modelo. (Guimarães, et al., 2012) lo valida aplicándolo en un prototipo de laboratorio compuesto por diferentes materiales (granito y caliza) y en diferentes condiciones de contorno. La metodología empleada se basa en comparar los resultados que se pueden obtener del cálculo analítico –mediante la fórmula de altura del frente capilar h de SF- y compararla con los resultados obtenidos de la simulación numérica realizada en WUFI 2D v.3.3¹³. Este estudio demuestra una buena correspondencia entre los resultados obtenidos por ambos métodos. Mediante este estudio, Guimarães expone la validez de SF para calcular la altura de ascenso capilar en condiciones estacionarias.

El trabajo de Guimarães se realiza en condiciones de laboratorio, en las que, además de trabajar con prototipos de muro experimentales, no se tienen en cuenta múltiples parámetros que pueden influir sobre el edificio. Por tanto, los resultados obtenidos en laboratorio, pueden distanciarse notablemente de la realidad construida. Los propios autores señalan el problema de la definición exacta del fenómeno de evaporación a escala del edificio.

¹² El uso del programa HYDRUS para estudios sobre materiales de construcción y/o estructuras, normalmente aplicado para trabajos de hidrología y física del suelo.

¹³ El software WUFI 2D ha sido desarrollado por el Fraunhofer Institute. Se puede consultar como referencia fundamental Holm, A.; Künzle, HM. *Two-dimensional transient heat and moisture simulations of rising damp with WUFI-2D*. Proceedings of the Second International Conference on Building Physics, Leuven, Belgium; 2003. p. 363-7

No obstante, el trabajo de Guimarães es uno de los primeros en considerar el potencial de evaporación del clima en relación con la evaporación de muros. En su estudio, aplican las ecuaciones de Penman-Monteith¹⁴ al cálculo del potencial de evaporación. En este caso, emplea medias mensuales de datos climáticos de la ciudad de Porto. El propio estudio reconoce la necesidad de un cálculo del potencial de evaporación más preciso, como posteriormente realizarán otros autores (D'Agostino 2013b).

Rirsch presenta los resultados de un estudio realizado sobre prototipos de muros contruidos en el que demuestra que las características del mortero afectan significativamente a la altura de la humedad ascendente (Rirsch, 2010). Este mismo autor estudia la influencia del mortero sobre el ascenso capilar. El trabajo se lleva a cabo mediante una serie de prototipos realizados en laboratorio con diferentes tipos de mortero, variando su dosificación, para conseguir mayor o menor permeabilidad. Posteriormente, son sometidos a succión capilar durante cinco meses, colocándolos sobre unas bandejas con agua. El resultado es que el mortero resultó el elemento clave en la absorción y evaporación posterior. En la pared del mortero que tenía más permeabilidad, el ladrillo contiene más agua que el mortero, pero lo contrario es cierto en el caso de la pared de mortero de baja permeabilidad (Figura 2). Esto podría estar relacionado con las diferencias en la distribución del tamaño de poro entre el ladrillo y el mortero. Además, los valores de ascenso capilar obtenidos para estos muros, se ajustaron razonablemente bien con el modelo Sharp Front, en el que la sorptividad del mortero controla la altura de elevación.

c) Los condicionantes al modelo capilar: heterogeneidad de la construcción e interfaz entre materiales

Otro de los problemas para definir el movimiento del agua a través de los muros –aparte de los condicionantes climáticos– es la propia construcción. El transporte capilar en un material compuesto, como pueda ser una mampostería, que posee varias capas, se desvía del modelo de transporte capilar clásico de un material homogéneo. Por ejemplo, la sortividad S^{15} es una variable importante de cálculo en las ecuaciones de Hall y Hoff. Esta propiedad es conocida para todo tipo de materiales, pero al tratarse de un muro encontramos juntas entre elementos, lo que modifica esta propiedad y puede inducir a

¹⁴ En los últimos 50 años se han desarrollado numerosos métodos de cálculo para estimar la evapotranspiración en base a diferentes variables climáticas. La ecuación más conocida es la Ecuación de Penman (Penman 1948), modificada posteriormente por Monteith 1965. El empleo de estas ecuaciones proviene de los estudios del clima, con objeto de calcular la evapotranspiración (ET). Se usa comúnmente para describir dos procesos que se dan de manera combinada en la pérdida de agua de un cuerpo a la atmósfera, evaporación y transpiración. En el caso de la evaporación el agua líquida se convierte en vapor de agua, en la transpiración se produce la evaporación del agua dentro del cuerpo y la posterior pérdida del vapor a la atmósfera. Ambos procesos dependen de la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento (Zotarelli, Dukes et al.) y (Zotarelli, Dukes et al. 2013)

¹⁵ Propiedad que relaciona la absorción de agua capilar con materiales porosos, explicada extensamente en el capítulo 4 “Fundamentos teóricos”.

errores de cálculo. La mayoría de trabajos que ha abordado el movimiento del agua en materiales multicapa, lo hacen suponiendo que existe un contacto perfecto en la interfaz entre materiales. Las juntas entre capas generalmente causan aceleración en el secado. Además, retardan el proceso de imbibición al oponer resistencia al contacto entre capas. Freitas et al. demuestran este hecho por medio de una serie de simulaciones matemáticas realizadas con el software TRHUMIDADE¹⁶ (Freitas, et al., 1996). Aunque existen muchos trabajos que tratan el transporte de líquidos en materiales, hasta fechas recientes no encontramos trabajos que expliquen de manera experimental la influencia de la composición multicapa sobre la absorción de agua. Por ejemplo, Derluyin et al. explica la influencia de las condiciones de curado del mortero sobre el transporte capilar en mamposterías. Explican además que la porosidad abierta total y la porosidad efectiva dependen del proceso de curado. El mortero curado en seco muestra una porosidad efectiva menor, especialmente debido a una reducción de los poros gruesos, lo que resulta en un menor coeficiente de absorción capilar (Derluyin, et al., 2011). En un experimento similar, Janssen et al. observan el mismo fenómeno: cómo el curado del mortero de juntas afecta a las propiedades hídricas de la fábrica (Janssen, Derluyin et al. 2012).

Delgado et al. realizan varios prototipos de laboratorio, imitando la composición de varios materiales unidos entre sí por mortero que podemos encontrar en construcciones de fábrica (Delgado, de Freitas et al. 2016). Para ello realizan prototipos variados, con diferentes juntas entre materiales, de diferentes espesores, con unión entre distintos tipos de materiales etc. Las muestras son sometidas a ensayos de absorción capilar en laboratorio. Los resultados demuestran que cuando el agua llega a la interfaz de mortero, se produce desaceleración del proceso de absorción (Figura 3). Guimaraes et al. realizan una campaña experimental en la que estudian la absorción de agua de varios tipos de ladrillo con diferentes densidades y uniones con diferentes configuraciones de interfaz de contacto con el ladrillo. Los resultados demuestran una disminución del proceso de humectación debido a la resistencia de las interfaces. Las muestras con mortero de cemento presentan una absorción menor que las muestras con mortero de cal. Demuestran además cómo aquellas juntas con espacio aéreo aumentan el coeficiente capilar (Guimarães, Delgado et al. 2018).

¹⁶ Desarrollado por los investigadores de la Universidade de Porto.

Figura 2. (Izquierda) Distribución del agua en el muro construido con mortero de baja permeabilidad. Se observa más cantidad de agua en el mortero que en el ladrillo. (Derecha) Distribución de agua en el muro construido con mortero de alta permeabilidad. Hay más agua en el ladrillo que en el mortero (Rirsch 2010).

Figura 3. Diferente cinética de absorción de unas muestras de ladrillo con diferentes alturas de junta de mortero. Se ve cómo se produce la desaceleración de la absorción al contacto con la junta de mortero (Delgado, de Freitas et al. 2016).

d) Otros condicionantes con frecuente presencia en muros históricos: contaminación por sales

Además de la complejidad que supone la composición multicapa de los muros de fábrica -o la heterogeneidad del propio material, que se trataba en el apartado anterior- existe un tercer condicionante muy frecuente en edificios históricos: la contaminación por sales. Como se explicaba en el apartado anterior, estas alteran la capacidad de absorción y evaporación. Como consecuencia, convierten los muros en estructuras altamente higroscópicas. Respecto a este problema existen numerosas investigaciones que se centran en determinar el deterioro provocado por sales (Moreno, Vilela et al. 2006, Sawdy, Price 2005, Rosina, Sansonetti et al. 2017, Menéndez 2017) y sistemas de

limpieza para eliminar su presencia de las estructuras construidas (Young, Urquhart et al. 2003, Pel, Sawdy et al. 2010, Martins, Dionisio et al. 2017).

Aunque no es el objeto del presente estudio, conviene hacer referencia a estos trabajos, ya que no se pueden clasificar como trabajos aislados, sino que evolucionan en paralelo al estudio de la dinámica del agua y van dando respuesta a cuestiones de interés para este trabajo. Así, por ejemplo, es conocido que el agua que asciende puede disolver y redistribuir las sales depositadas en la fábrica o el mortero, lo que permite que se acumulen en altas concentraciones. Estas sales pueden bloquear los poros y los capilares a través de los cuales se evapora el agua, por tanto, empujar el frente capilar. Además de los consiguientes daños por recristalización de algunas sales con los cambios de humedad y temperatura (Rirsch 2010).

Uno de los trabajos más recientes, explora el fenómeno de capilaridad con una perspectiva más global, realizando un trabajo sobre un conjunto de 65 edificios históricos construidos en mampostería de ladrillo con juntas de mortero de cal hidráulica, en el centro de Venecia, trabajando con una perspectiva más global, sabiendo que no se trata de un problema aislado. Las distribuciones de edificios cubren todo el centro de la ciudad. El estudio global de un conjunto tan amplio de edificios, en lugar de estudiar un solo caso, ha permitido establecer aquellas tendencias que se observan de manera general en el conjunto de edificios y aquellas que dependen de las particularidades de cada caso. Se propone un modelo empírico para la estimación de la extensión general de la humedad ascendente (Falchi, Slanzi et al. 2018). Expone varias conclusiones interesantes, como que el ascenso capilar está influenciado por factores conocidos -la estructura específica del muro y los agentes de deterioro-, pero, por otra parte, influyen factores impredecibles como: reposiciones o reparaciones de reemplazo parcial de materiales, que no se han documentado debidamente. En todos los casos observados, las mamposterías se mojan en un rango de hasta 150 o 200 cm, y poseen una zona de evaporación de entre 200 y 300 cm. En las áreas en que se observan depósitos de sales, a menudo están más bajos.

e) Objetivos de los trabajos que estudian el movimiento de ascenso capilar en edificios históricos:

Los trabajos de investigación que han dado continuidad al estudio del movimiento del agua en los muros se han orientado especialmente a la búsqueda de soluciones tecnológicas aplicadas a resolver problemas de capilaridad en fábricas históricas. La gran producción científica que existe en torno a este tema, se debe a que es una de las mayores causas de deterioro de los edificios históricos.

En muchos casos, la metodología de investigación se basa en la construcción de prototipos de laboratorio sometidos a diferentes variables –tanto climáticas, como morfológicas y constructivas- para validar las soluciones propuestas. Por ejemplo,

sistemas de ventilación en la base del muro(Figura 4 y Figura 6) (Torres & de Freitas, 2007).

Figura 4. Sistema de ventilación por canales diseñado (Torres & de Freitas, 2007).

Para evaluar la transferencia de humedad en el interior del muro, se insertaron una serie de sensores a diferentes alturas y profundidades para medir la temperatura y la humedad relativa (Figura 5). Los sensores estaban conectados a un sistema de adquisición de datos que tomaba lecturas cada hora. Estudian también la influencia del espesor de las paredes en el ascenso capilar (Torres, Freitas 2010). Los cálculos de los cambios en los contenidos de humedad y temperatura dentro del muro se realizaron de manera automatizada con el programa WUFI 2D. Los datos introducidos en el programa son, básicamente, los que son posibles determinar o medir en laboratorio: humedad, temperatura y las propiedades del material.

Figura 5. Posiciones de las sondas empleadas en el ensayo en laboratorio sobre los prototipos de muro (Torres 2018).

Figura 6. Imagen del dispositivo de ventilación de laboratorio (Torres 2018).

Posteriormente, desarrollan un modelo matemático para definir la transferencia de humedad entre el muro saturado de agua y el flujo de aire que lo rodea (Freitas, et al., 2011). Este modelo trata de definir este comportamiento para validar el sistema HUMIVENT. El sistema consiste en inducir un flujo de aire en la base del muro para evitar el ascenso capilar. La ventilación en la base aumenta la evaporación, lo que conduce a una reducción en el nivel que alcanza el frente capilar. El mecanismo se pone en práctica en varios edificios –una iglesia, un museo y un edificio residencial- los buenos resultados obtenidos por el sistema, así como los detalles y especificaciones técnicas se cuentan en una publicación reciente (Guimaraes, et al., 2017). En un artículo reciente repasan algunas modificaciones y mejoras realizadas al sistema, así como la puesta en práctica en un edificio en el norte de Portugal.

Otras soluciones habitualmente encontradas en la literatura para evitar el ascenso de humedad en muros son los campos electromagnéticos, y más habitualmente las barreras químicas. En un trabajo desarrollado sobre 20 prototipos de muro ensayados en laboratorio a lo largo de 20 años (Alfano, et al., 2006) comprueba el nivel de efectividad de estas soluciones. Algunos de los tratamientos que estudiaron resultaron ser más efectivos que otros, sin embargo, los autores exponen la necesidad de seguir investigando para conocer cómo afectan exactamente estos tratamientos a la conservación de esas fábricas. En la misma línea de productos químicos aplicados en la humedad ascendente (Hacquebord, et al., 2013) estudian varios productos –con base acuosa, o disolventes orgánicos- en varios formatos –en modo de crema o de inyección-. Aplicándolos en prototipos experimentales de laboratorio. Los resultados muestran que los productos a base de agua pueden transportarse fácilmente a través de la junta de mortero, de forma diferente a lo que ocurre con los productos en un disolvente orgánico. Esta es la consecuencia de los diferentes mecanismos de transporte de los productos. (Sardella, De Nuntiis et al. 2018) prueban sobre varios prototipos diseñados exprofeso varios tratamientos diferentes para reducir el ascenso de humedad: interrupciones químicas con siloxano líquido, en varias mezclas diferentes; o yesos “de

deshumidificación¹⁷". El estudio concluye que se obtuvieron mejores resultados con las barreras químicas que con los yesos.

f) Conclusiones al estudio del comportamiento del agua en el muro

Una de las razones de la numerosa producción científica en torno al problema del ascenso capilar es la preocupación por el deterioro que este fenómeno induce. Esto ha dado lugar a la financiación de diversos proyectos de investigación como el JPICH Project "Effectiveness of methods against rising damp in buildings: European practice and perspective – EMERISDA" (2014-2017). Este proyecto, que involucraban a varios países europeos, tuvo como objetivo una evaluación científica de la efectividad de diferentes métodos contra la humedad ascendente y la definición de métodos adecuados para la conservación de edificios (Sardella, De Nuntiis et al. 2018, Lubelli, van Hees et al. 2018). A pesar del numeroso conjunto de trabajos, aún a día de hoy no existe una tecnología efectiva para resolver los problemas derivados de la humedad de ascenso capilar. Tal como señala (Franzoni, 2014), que repasa las soluciones que se han ido adoptando para resolver el problema de la humedad ascendente por capilaridad, así como los trabajos científicos llevados a cabo: *"no existe una tecnología efectiva, capaz de proporcionar un secado completo de la mampostería en cualquier condición"*. Explica, además, que *"la razón principal de la falta de efectividad de los métodos se debe a que aún existe un conocimiento escaso de los fenómenos y mecanismos involucrados en el proceso de absorción"*. Por tanto, se podría decir que la producción científica que busca soluciones al fenómeno se ha adelantado, en algunos casos, al conocimiento preciso del fenómeno de ascenso capilar, y como consecuencia, al conocimiento de la dinámica de la posible evaporación y secado. Además de todo esto, muchos de los trabajos que se han detallado en este apartado no ponen en relación el fenómeno de deterioro con las fluctuaciones higrotérmicas del edificio, y mucho menos, se suelen estudiar en régimen dinámico.

2.2.3 El estudio del ambiente del edificio histórico.

Introducción

Para completar el estudio sobre el *comportamiento evaporativo* del edificio histórico, objetivo del presente trabajo, es necesario entender también el paso del agua del material al ambiente del edificio. Es en este salto de escala, del muro al ambiente, donde se producen las interacciones más complejas de definir, por la gran cantidad de factores que entran en juego (Karoglou, Moropoulou et al. 2007), especialmente cuando se no se trata de condiciones controladas de laboratorio, sino de la realidad del edificio. En

¹⁷ Se trata de un producto premezclado, a base de cal hidráulica natural y aditivos minerales seleccionados con una granulometría de entre 0,5 y 1mm, también reforzado con fibra de corcho, arcilla, cal hidráulica natural y diatom

este caso, los supuestos teóricos desarrollados en condiciones ideales se vuelvan más complejos.

En este apartado se detallan aquellos trabajos que han aportado conocimientos sobre el ambiente del edificio histórico, especialmente aquellos que pongan en relación el ambiente con la envolvente. El ambiente del edificio se caracteriza por los flujos dinámicos de temperatura y humedad y viento. El conjunto de estos tres parámetros define el comportamiento higrotérmico del ambiente interior. Como se va a explicar en este apartado, la mayoría de los trabajos publicados que estudian este tipo de edificios desde el punto de vista higrotérmico no tienen como objetivo poner en relación las fluctuaciones entre el ambiente y la envolvente, y por tanto, no entra dentro del ámbito de su investigación el estudio de los fenómenos de absorción y evaporación de los muros, y su relación con el clima interior. La mayoría de trabajos se pueden clasificar en dos grandes grupos, con una producción científica destacada:

- *El control ambiental de espacios históricos*
- *Estudios previos a soluciones de rehabilitación*

El primer grupo se centra más en aspectos relativos al clima para desarrollar herramientas de control ambiental, confort térmico, etc. (Kalamees, Väli et al. 2016, Muñoz-González, León-Rodríguez et al. 2016). El segundo grupo se centra en explorar si las soluciones de rehabilitación propuestas para edificios con valores patrimoniales cumplen con las directrices marcadas, por ejemplo, criterios de eficiencia energética (Becherini, Bernardi et al. 2010, Balocco, Grazzini 2007).

Existe un tercer bloque, que se podría denominar como:

- *La relación de las fluctuaciones higrotérmicas con el deterioro de los materiales*

En este, se relacionan las fluctuaciones higrotérmicas del ambiente del edificio con el deterioro de los materiales, estudiando los procesos de alteración y degradación sobre los muros (Valero, Merello et al. 2014). Como es bien conocido, esta degradación está en relación con los cambios de temperatura y humedad que se producen en el interior del edificio. Esto hace que, dentro de este grupo de investigaciones, exista un conjunto, menor dentro del total, de publicaciones que ponen en relación el ambiente con la envolvente, motivados por el estudio de lesiones patológicas. Este tercer conjunto de trabajos son los que resultan de mayor interés para esta tesis, pues necesariamente exploran las fluctuaciones entre el muro y el ambiente. Es precisamente en este ámbito, donde se produce la evaporación, objeto del presente estudio.

Se explican y discuten a continuación todos estos trabajos.

a) Control ambiental de espacios históricos

Los edificios históricos, a diferencia de los edificios contemporáneos, originalmente no disponen de sistemas de calefacción, refrigeración, y estrategias constructivas que impermeabilizan el edificio del exterior y del terreno. El ambiente interior del edificio histórico está caracterizado por sus condiciones higrotérmicas (Varas-Muriel, et al., 2014). Estas condiciones están relacionadas con el clima exterior¹⁸ que lo rodea, su ubicación geográfica y su morfología. El estudio del edificio histórico debe llevarse a cabo en relación con los condicionantes atmosféricos.

Ya desde estos primeros estudios realizados en campo, se empieza a tener en cuenta la influencia del clima exterior sobre el edificio. (Bernardi, et al., 1985) en el Palacio Ducal de Urbino, estudia la influencia de diferentes parámetros climáticos sobre el estado de deterioro de los muros del palacio. En el caso de la radiación solar, por ejemplo, explica que produce “estrés” interno sobre los muros al ser calentados. Esto produce un aumento de la temperatura que va asociado a una evaporación del contenido del agua, que modifica el ambiente del edificio. Esta radiación solar, va asociada a un problema de re-cristalización de sales contenidas en el muro. De por sí, explica, no afectan agravan el deterioro de la piedra, pero sí lo hacen en presencia de lluvia.

En (Camuffo, et al., 1999) se emplea la técnica de monitorización higrotérmica. Esta técnica permite observar variaciones diarias y estacionales en diferentes puntos del edificio, relacionarlas con el clima exterior. El objetivo final es entender la relación que estas variaciones tienen con el deterioro de frescos y mosaicos de la Basílica. Camuffo explica que el intercambio de calor entre el interior y el exterior en este tipo de edificios se produce de dos maneras: por conducción a través de los muros y por advección a través de las aberturas. La conducción diaria es relevante a través de los vidrios, el espesor de los muros “filtra” este efecto. La advección es dominante, especialmente en las estaciones cálidas, cuando las ventanas y puertas están abiertas.

Tal como identifica este autor, las variaciones diarias de calor y humedad se producen principalmente por la ventilación, lo que significa que se trata de un parámetro fundamental a la hora de definir el comportamiento ambiental de estas construcciones. Los intercambios diarios de conducción de calor se producen principalmente a través de las aberturas y fisuras, y la transferencia de vapor de agua se producen a través de los huecos, por convección y circulación. Las variaciones diarias debidas al intercambio a través de los muros –que tienen un notable espesor de 1m- son mucho menores. En cuanto a las variaciones estacionales, en invierno se observan menores variaciones higrotérmicas en el interior del edificio que en verano, a pesar de existir variaciones notables de temperatura en el exterior. En invierno, la inercia térmica del edificio juega

¹⁸ Algunos autores se refieren al clima exterior como el microclima, para hacer hincapié en el hecho del estudio indispensable de las condiciones de ambiente cercanas al edificio (D’Agostino, Freitas, Entradas Silva).

un papel importante el comportamiento ambiental del edificio. Mientras que, en verano, se producen fuertes intercambios de temperatura y humedad debidos a los intercambios advectivos entre puertas y ventanas.

Dada la importancia de los parámetros ambientales en la conservación del edificio, el interés por el conocimiento del clima interior va creciendo a lo largo de los años. La mayoría de las investigaciones **avanzan en tres líneas**:

- Relación del ambiente del edificio con el deterioro de los materiales.
- Control ambiental de espacios en edificios históricos con objeto de confort ambiental o conservación de bienes muebles.
- Estudio de soluciones constructivas para la rehabilitación en edificios históricos.

b) Relación del ambiente del edificio con el deterioro de los materiales

El deterioro en los edificios históricos viene producido por lesiones patológicas (Camuffo, et al., 1999) o por agentes contaminantes (Andretta, et al., 2016). Dentro de este grupo encontramos numerosas publicaciones a lo largo de los años.

Como ya se ha explicado, una de las mayores causas del deterioro es la humedad que se producen a través de los muros. Por esta razón, los parámetros de estudio más importantes en la conservación preventiva de este tipo de edificios son las variaciones de temperatura y humedad (Camuffo & Bertolin, 2012). Camuffo desarrolla una metodología para estudiar las interacciones entre los muros y el ambiente del edificio. Mediante instrumentación mide temperatura, humedad relativa y la velocidad del aire cercano a los muros. La toma de datos se realiza con intervalos regulares durante un año entero. De esta forma, se pueden conocer las variaciones diarias y estacionales completas. Las fluctuaciones, ya sean estacionales o diarias, se basa en la absorción o evaporación del agua contenida en el muro. Este fenómeno absorción o evaporación del agua del muro, a la que denomina “ciclos de absorción-evaporación” están relacionados con el clima que rodea al edificio y también tiene en cuenta condicionantes interiores como las luminarias o la ocupación de personas.

Los resultados de las mediciones higrotérmicas tomadas en el edificio son representadas por medio de mapas. Es un sistema de representación de datos basado en los mapas de isotermas que se emplean habitualmente en climatología, adaptándolo al caso de edificios

Figura 7. Izquierda. Planta de la Capilla de Giotto. Mapa de temperatura del aire [°C] en la mañana del día 15 de julio. Derecha. Sección longitudinal de la Capilla de Giotto.

Esta metodología llega hasta la actualidad, en que se sigue empleando con frecuencia en mediciones de humedad, tanto de ambiente como superficiales sobre los muros. El estudio de la influencia del clima exterior sobre el interior, a través de los muros, revela la relación que existe entre el deterioro y la influencia de agentes atmosféricos como el viento, la lluvia, la radiación solar, las fluctuaciones higrotérmicas o los contaminantes. Así, por ejemplo, en (D'Agostino 2013a) estudia la humedad de los muros en la Catedral de Lecce (Italia) en relación con el clima interior y exterior. En este caso, además, realiza los cálculos del potencial de evaporación que tiene el ambiente (interior y exterior) y su influencia sobre la evaporación de los muros, demostrando en un caso práctico, la influencia de las variaciones de temperatura, humedad y viento, sobre el ascenso de humedad y evaporación al interior. Los estudios sobre el ambiente interior del edificio pueden revelar también patrones de comportamiento desiguales, dependiendo del estado de conservación de los muros en las diferentes zonas del edificio. (Martínez-Garrido, et al., 2014), en un estudio realizado en la iglesia de San Juan Bautista en Talamanca del Jarama (Madrid), estudian la relación entre las zonas con mayor deterioro y la influencia de agentes atmosféricos monitorizados. La propia estabilidad del ambiente interior, se ve condicionada por los muros, dada la relación directa envolvente-ambiente. Varas-Muriel et al. estudian los factores locales que afectan a la estabilidad de la humedad relativa interna, en la misma Iglesia de Talamanca del Jarama (Varas-Muriel, Fort et al. 2014). Este trabajo concluye que, para resolver el problema de la inestabilidad ambiental en el interior de este tipo de construcciones, es necesario controlar la humedad inducida por los muros.

En algunos casos, junto con el problema inducido por humedad, se evalúa si la solución adoptada era adecuada para eliminar las lesiones existentes. Vecchiattini realizara durante tres años sobre la Abadía de San Mateo en Venecia (Italia), monitorizando el daño y a su vez el método de tratamiento adoptado (Vecchiattini 2018).

c) Control ambiental de espacios en edificios históricos:

Aunque esta tesis no está orientada a la evaluación de criterios de eficiencia energética, ni de confort del edificio, resulta de interés aquellos trabajos que tratan el edificio histórico desde la disciplina del control ambiental, porque supone el trabajo con herramientas y criterios tecnológicos como la monitorización y la simulación computacional. Gracias a estos trabajos se han desarrollado en gran medida estas técnicas, que, desde esta tesis, se tratan de aplicar con criterios de conservación del patrimonio. Por ello, se ha considerado importante incorporar este apartado al estado de la cuestión, describiendo los trabajos que existen en la línea de control ambiental en edificios históricos y enumerar las importantes aportaciones que han hecho a la monitorización higrotérmica.

El principal objetivo de las investigaciones en edificios históricos, alrededor de 72%, están orientadas a la mejora de la eficiencia energética y al confort térmico (Martínez Molina, Tort Ausina et al. 2016). Dentro de este grupo, una amplia proporción están orientadas a la mejora de las condiciones ambientales de los edificios con el objetivo concreto de mejorar la conservación de piezas de arte, por ejemplo, el caso de museos. Para este tipo de espacios, la monitorización se ha revelado como una herramienta indispensable, que permite el control de las condiciones óptimas para las obras de arte. Algunas investigaciones demostraron que las condiciones higrotérmicas de un espacio museístico son cambiantes a lo largo del tiempo, a pesar de los mecanismos de acondicionamiento ambiental, lo que confirma la necesidad de estudios de monitorización (La Gennusa, et al., 2005). Esto hizo que se desarrollasen notablemente las herramientas de monitorización en torno a la disciplina de conservación de museos. Pero, muchos de estos museos están ubicados en edificios históricos que no fueron originalmente concebidos para exigencias climáticas tan específicas. Las salas de un museo tienen que contar con unas condiciones climáticas muy concretas, que pueden no adecuarse a la conservación del bien mueble.

Con el tiempo, algunos trabajos de investigación en acondicionamiento ambiental para museos, empiezan a incorporar estudios sobre el impacto de las instalaciones sobre el edificio histórico (Fabbri, Pretelli 2014, Alterio, Barbaro et al. 2010, Balocco, Grazzini 2007) (Luciani 2013). Algunos incluso analizan la posibilidad del acondicionamiento ambiental basado en el control de las fluctuaciones naturales del clima (Vyhliđal, Broström 2012, Vyhliđal, Broström 2014). Conscientes de dicho impacto, recomiendan la revisión de los estándares de climatización, señalando la necesidad de una aproximación multidisciplinar en la que se involucre a los conservadores y restauradores del edificio para la correcta conservación del bien mueble, no solo de las obras que alberga. El diagnóstico del microclima de las salas debe partir de un enfoque integrado en el que se estudie la envolvente del edificio como parte del sistema. Dado que el deterioro físico acumulativo de la envolvente del edificio desempeña un papel relevante en la alteración del microclima interior y en el rendimiento térmico del edificio,

reconocen como esencial combinar tanto la envolvente del edificio, como la monitorización del microclima interior en el enfoque de diagnóstico integrado. Esta visión integradora es bastante reciente (Litti, Khoshdel et al. 2015, Litti, Audenaert 2018)

Como conclusión, se podría decir que, aunque el objetivo del seguimiento ambiental de museos está orientado a la conservación de obras de arte, cada vez más existe una tendencia conciliadora que pretende incorporar la envolvente como parte del conjunto a conservar. Así lo demuestran algunas de las publicaciones más recientes antes mencionadas. Por otro lado, es importante resaltar que, en gran parte, gracias al control ambiental de museos, se han estudiado y desarrollado herramientas tecnológicas, como la monitorización higrotérmica (Corgnati, et al., 2009).

Por otra parte, la proliferación de los trabajos sobre control ambiental y confort interior, ha dado lugar a la aparición de normativas europeas y proyectos para regularizarlo. En el apartado anterior se explicaba cómo el condicionante fundamental que presentan los edificios históricos, especialmente si tenemos en cuenta la influencia de la humedad de los muros, es que deben estudiarse conjuntamente con el microclima en el que se encuentran. El microclima es diferente en cada caso estudiado, por lo que la caracterización debe realizarse teniendo en cuenta las particularidades de cada edificio. En los últimos años se han definido varias metodologías y la búsqueda por valores ideales de temperatura y humedad relativa para edificios históricos, como es el caso de la normas italianas *“Condizioni ambientali di conservazione: muratura ed analisi”* (UNI 10829 , 1999), UNI 10586 o las europeas EN 15757, *“Parámetros ambientales interiores para la evaluación del desempeño energético de edificios, abordando la calidad del aire interior, el ambiente térmico, iluminación y acústica”* (Norma EN 15251, 2007) y en las especificaciones ASHRAE (Museos, Galerías, Archivos y Bibliotecas). Pero, esta estandarización ha representado un problema en paralelo, pues no es adecuada para todos los climas. Como consecuencia de estas normas, en los últimos años, han empezado a aparecer trabajos que cuestionan la adecuación de las normas a la realidad del edificio (Schellen & Martens, 2008). (Silva, Henriques 2014) compara los resultados esperados por la norma EN 15757, con lo medido en el clima interior de una iglesia del siglo XIII en Lisboa (Portugal). Los resultados muestran que la norma tiene un enfoque excesivamente rígido, que es inadecuado para todos los climas, ya que cada caso particular debe analizarse de manera individual. En (Visco, et al., 2012) plantean la pregunta ¿Qué son buenas condiciones de conservación microclimáticas?. Contamos con normas oficiales y publicaciones científicas que hablan de una serie de límites en los parámetros del microclima, pero, tal como explican Visco et. al., es necesario que los valores se deriven de un estudio experimental preciso de larga duración. Casi al mismo tiempo que algunos investigadores comienzan a cuestionarse los criterios de algunas de las normativas, comienzan a aparecer proyectos de europeos de investigación, que tienen como objetivo precisamente el estudio en detalle de las exigencias climáticas de los edificios del patrimonio histórico para su correcta conservación. Uno de estos

proyectos es “Climate for Culture¹⁹” (2010-2015), financiado por el Séptimo Programa Marco en Investigación de la Unión Europea, para el desarrollo tecnológico (nº226973), que da lugar a numerosos proyectos en busca de buenas prácticas y recomendaciones para el control climático y la conservación preventiva de edificios históricos. Este proyecto ha estado coordinado por el Instituto Fraunhofer, y han trabajado en más de 70 edificios patrimoniales, en toda Europa y África. El resultado de todo ello, han sido una serie de guías de recomendaciones para estudio e intervención en edificios históricos.

d) El estudio del ambiente interior para la evaluación del confort térmico

Existe también una rama de investigación que se ocupa de la problemática del confort térmico en edificios históricos. Este conjunto de trabajos resulta de especial interés para esta tesis. Los edificios tradicionales, que originalmente no cuentan con sistemas de calefacción, a partir del siglo XX, con el aumento de las expectativas o exigencias sobre climatización se han encontrado con requerimientos para los que no fueron originalmente concebidos (Ramsden, 2008). La mayoría de ellos, iglesias o monasterios, ha propiciado que crezca un número notable de investigaciones en torno a este tema. Al tratarse de edificios pensados como no calefactados, esto es suplido por sistemas adicionales como estufas, que en muchos casos suponen un daño para las condiciones de conservación del edificio, o los elementos con valor artístico que se conservaban en su interior (García-Diego, et al., 2013). En los años 60 crece el conocimiento sobre los efectos dañinos de la calefacción en las iglesias. Esto conduce a numerosos estudios en los años 70 y siguientes (Camuffo, 2014) que dan lugar a las guías y recomendaciones que conocemos. (Lambertus Schellen, 2002) recoge en su tesis doctoral un resumen de las recomendaciones existentes en su momento. Algunos trabajos recientes explican que ciertas rutinas de uso de los inmuebles históricos afectan a su conservación (Varas Muriel, Fort, Martínez Garrido, & Zornoza Indart, 2014) Muchos de los daños que se producen en estas construcciones se deben a la calefacción, que se emplea en momentos puntuales, y la alta ocupación de personas, también en momentos puntuales. En el caso de la calefacción, estos autores demuestran el efecto dañino para el edificio, pues supone un aumento elevado de temperatura en un período breve de tiempo, lo que a su vez reduce el nivel de humedad relativa de la iglesia, afectando a la conservación del edificio. La preocupación por el deterioro que podría venir como consecuencia de la implantación de estos sistemas de acondicionamiento artificiales, fomenta el desarrollo de trabajos comparativos entre edificios no calefactados y otros a los que se le han incorporado estos sistemas. Algunos de los autores concluyen con propuestas para la elección de los sistemas de calefacción adecuados (Camuffo &

¹⁹ Página web que describe los resultados de los trabajos llevados a cabo en este proyecto, así como el equipo de investigadores y doctorandos que han formado parte de Climate for Culture.
<https://www.climateforculture.eu/index.php?inhalt=home>

Bertolin, 2011), aboliendo algunas ideas preconcebidas sobre los efectos perjudiciales sobre calefactar, apuntando que si se realiza de manera adecuada no tiene porqué afectar a la conservación del edificio (Kalamees, et al., 2016).

Esta sigue siendo una de las vías de investigación más en activo respecto a este tipo de edificios, así lo demuestran proyectos de investigación como el European Project “Friendly Heating: comfortable to people and compatible with conservation of art works preserved in churches (2002-2005)”²⁰ coordinado por el Consejo Nacional de Investigación de Italia, en el que participaron universidades y centros de investigación de 5 países de la Unión Europea. De reciente publicación es una tesis doctoral que analiza, precisamente, el conflicto existente entre el confort térmico, la conservación de los bienes muebles y la preservación del bien inmueble, realizando estudios sobre 57 catedrales en Irlanda (Shiell 2018).

Como conclusión a este apartado, se podría decir que, tanto en el caso del control ambiental de museos, como en el del estudio del confort higrotérmico de iglesias, estos trabajos han dado como resultado un conocimiento mayor de los parámetros ambientales en edificios históricos, la relación de la modificación de estos parámetros con el deterioro, lo que implica un análisis de los efectos de las fluctuaciones sobre los muros, y un amplio desarrollo de herramientas tecnológicas²¹. Todo ello ha derivado en una idea mayor sobre el comportamiento higrotérmico de los edificios históricos y las herramientas adecuadas para su estudio.

e) Estudios previos a soluciones de rehabilitación:

Existe una extensa literatura en torno a la oportunidad de analizar, calcular, o simular los materiales y sistemas constructivos que han de ser utilizados en obra nueva. Este tipo de publicaciones se está extendiendo también hacia la rehabilitación de edificios patrimoniales (Brimblecombe, et al., 1999). (Balocco, Grazzini 2007). Esta rama está en estrecha relación con el apartado anterior, de confort térmico, pues, muchas veces el estudio de soluciones de rehabilitación no solo pasa por el análisis de los nuevos materiales o sistemas constructivos, sino por la incorporación de nuevos equipos de climatización. Esto se debe a la creciente demanda de ahorro energético que se deriva de las exigencias de las normas europeas (Ascione, Bianco et al. 2015), llegando incluso a la idea de la eficiencia energética como una herramienta de protección del patrimonio (Carbonara 2015). Se ha tratado de agrupar las investigaciones en dos bloques (rehabilitación de los sistemas constructivos, y estudios de climatización y confort), pues

²⁰ Página web de la Comisión Europea en la que se pueden consultar los datos del proyecto https://cordis.europa.eu/project/rcn/61586_en.html

²¹ Cuando se habla de herramientas tecnológicas, en este caso concreto se trata de la monitorización higrotérmica.

los trabajos que estudian el segundo bloque (el ambiente interior de un edificio histórico), no siempre evalúan la envolvente con detalle. Sin embargo, los del primer bloque sí analizan las implicaciones que tiene la envolvente en la optimización del ambiente interior.

f) Conclusiones al estudio del ambiente del edificio histórico

Aunque las tres líneas de investigación descritas implican el conocimiento de parámetros ambientales, ninguna de ellas estudia el ambiente del edificio con objeto de caracterizarlo en relación al ambiente que lo rodea. En unos casos, el clima interior del edificio se encuentra alterado por sistemas de climatización, y la meta principal es la conservación de las piezas muebles. En otros casos, se trata de estudios muy concretos de deterioro de materiales. Por todo ello, la línea que trata de entender cómo funciona el edificio en equilibrio con su entorno, se desdibuja en múltiples ramas de conocimiento y la visión global del edificio se pierde.

Es (D'Agostino, 2013) quien afirma que para poder caracterizar adecuadamente el ambiente del edificio es importante cuantificar la tasa de evaporación. Los modelos de dinámica del agua explicados en los capítulos anteriores encontraban su límite en el paso del material al ambiente. En este límite, la cuantificación de la evaporación se vuelve compleja. Una de las razones de que exista mayor desconocimiento en esta fase del proceso es que la medición exacta de algunos de parámetros (radiación solar, evapotranspiración, velocidad del viento, pluviometría, etc) que determinan la evaporación del edificio es muy compleja, y casi nunca se lleva a cabo en las campañas de toma de datos. Tampoco se suelen utilizar las tablas climáticas existentes, en primer lugar, porque de algunas ubicaciones no hay estación meteorológica cercana, por otra parte, cuando las hay, el número de datos es tan abundante que algunos investigadores suelen recurrir a valores medios.

Tal como menciona D'Agostino en uno de sus trabajos, para poder evaluar adecuadamente la capacidad de secado del ambiente del edificio, sería necesario tomar medidas directas e indirectas de dichos parámetros. Podrían medirse directamente y de modo fácil algunas magnitudes (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento). Las medidas indirectas serían necesarias para conocer el resto de parámetros anteriormente citados.

La cuantificación de estos valores de los que venimos hablando es necesaria porque estos intervienen en la ecuación de Penman²², que nos permite hacer el cálculo del potencial de evaporación en base a los parámetros climáticos.

Como se trata de una ecuación compleja, los investigadores suelen trabajar con simplificaciones de la misma (Valiantzas, 2006, Valiantzas 2013). En una de las adaptaciones más recientes de las fórmulas de cálculo de evaporación, Valiantzas propone una simplificación específica para climas húmedos (Valiantzas 2015). D'Agostino pone en práctica esta fórmula para el cálculo en un edificio histórico, en la Cripta de la Catedral de Lecce (Italia). Esta autora aplica las fórmulas simplificadas tanto para el exterior como para el interior del edificio. De este modo es capaz de calcular la evaporación de la Cripta, validando además las fórmulas desarrolladas por Hall y Hoff. A excepción de la investigación realizada por D'Agostino no existen más trabajos que exploren el fenómeno de la evaporación desde la escala del edificio.

²² El desarrollo de la fórmula de Penman empleada para el cálculo del potencial de evaporación, realizada por Valiantzas, se puede consultar en el capítulo 4 “Fundamentos físicos”.

2.3 LAS TÉCNICAS DE MONITORIZACIÓN HIGROTÉRMICA

Introducción

En el apartado 2.2 anterior, se explicaban los estudios sobre el ambiente interior del edificio histórico. En todos ellos, se utiliza como herramienta la monitorización. Este apartado se ha dedicado expresamente a las técnicas de monitorización, con el objetivo de explicar cómo se ha desarrollado la herramienta en su aplicación sobre los edificios históricos, cuáles son sus capacidades y para qué ha sido empleada.

Los progresos de los últimos años en cuestiones de electrónica –con la mejora del rendimiento y tamaño de los componentes- y telecomunicaciones han dado la oportunidad de monitorizar todo tipo de espacios: edificios, ciudades, cultivos etc. Además, la aparición de microprocesadores más rápidos ha supuesto la posibilidad de trabajar y almacenar grandes cantidades de datos (Fernandez-Navajas, et al., 2013).

2.3.1. Marco general del uso de las técnicas de monitorización en edificios históricos

Gracias a este progreso tecnológico, las técnicas de monitorización se han convertido en una herramienta interesante para la Conservación Preventiva, tal como ya se explicaba en los apartados anteriores. A modo de ejemplo, en el ámbito nacional encontramos documentos que lo demuestran como el “Plan Nacional de Conservación Preventiva (marzo 2011)”, coordinado por la Sección de Conservación Preventiva del Área de Investigación y Formación del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE). A raíz de éste, se han desarrollado varios documentos complementarios, que sirven a modo de guía para aquellos profesionales que se dedican a la conservación de bienes, como por ejemplo el documento de “Fundamentos de Conservación Preventiva (Noviembre 2015)”, o el “Manual de seguimiento y análisis de condiciones ambientales (2014)”. En este manual se reconoce la importancia del control de *“determinados factores del medio que, sin duda, es una de las tareas esenciales de la conservación de los bienes culturales (...) la noción del control del microclima, la iluminación y los contaminantes del aire siempre ha estado presente en el trabajo de la conservación.”*

Este manual está principalmente enfocado a la conservación de bienes muebles, por lo que las recomendaciones y pautas que ofrece sobre la toma de datos ambientales mediante monitorización está condicionada en ese sentido. El manual, que se estructura en cinco capítulos, dedica uno de ellos al seguimiento y análisis, y otro a los criterios de control de los riesgos derivados de condiciones ambientales inadecuadas.

En el estudio del Patrimonio Cultural se utilizan con frecuencia múltiples tipos de sensores: temperatura, humedad, CO₂ -muy empleado para la evaluación de los contaminantes sobre obras de arte- vibraciones y movimientos para el control de la estabilidad de las estructuras, humo, detectores de presencia, etc. (Ceriotti, et al., 2009).

Concretamente, lo que se denomina *monitorización higrotérmica* se basa en el registro de parámetros de temperatura y humedad en el edificio. Como se explicaba en los apartados anteriores, el conocimiento de las condiciones climáticas de los edificios históricos es muy importante para su conservación y para prevenir el deterioro (Camuffo, 2014). Por tanto, la monitorización es una técnica ampliamente probada en edificios históricos (Zarzo, et al., 2011). Dada la utilidad de esta técnica se ha producido un interés creciente en los últimos años.

La monitorización ha servido de artefacto para los estudios antes clasificados sobre: deterioro de los materiales en relación con su ambiente (Valero, et al., 2014), control ambiental en construcciones históricas (Becherini, et al., 2010) y evaluación de soluciones de rehabilitación (Balocco, Grazzini 2007).

El sistema se basa en el registro de datos con una frecuencia marcada por el usuario, desde intervalos de minutos, horas, días o más. Las variables que normalmente se miden para la caracterización higrotérmica de un ambiente interior son la temperatura, la humedad relativa, temperatura de rocío y velocidad del aire. El tiempo de medición que se suele emplear es de un año, con el objetivo de obtener datos en todas las estaciones para evaluar la influencia del clima exterior sobre el interior. Sahin et al, por ejemplo, gracias a la monitorización del clima interior de la biblioteca histórica de Tire-Izum (Turquía) han conseguido confirmar que la introducción de un sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado en el edificio debería ser la última opción, ya que el comportamiento higrotérmico natural de la biblioteca proporciona el ambiente necesario, a modo de solución pasiva (Sahin, et al., 2017).

Encontramos casos en los que el intervalo de tiempo puede prolongarse durante varios años, como en el caso de Camuffo et al., que para determinar la evolución del clima interior de algunas salas en la Galería Uffizi (Floencia), midieron los principales parámetros que caracterizaban los gradientes higrotérmicos del clima interior (factores de influencia como: la calefacción, el aire acondicionado, la ventilación, los visitantes o la iluminación) mediante monitorización durante varios años (Camuffo, et al., 2002).

En un trabajo reciente, Vecchiattini, realiza una campaña de monitorización la Abadía de San Matteo, que se prolongó durante 8 años (Vecchiattini 2018). Acompañando los trabajos de monitorización con otra serie de ensayos complementarios, con objeto de conocer los daños por humedad que sufría la abadía, además de monitorizar la solución adoptada contra la humedad para evaluar si funcionaba correctamente. En esta línea, de evaluación de soluciones para la conservación, podemos encontrar muchos trabajos que recurren a la monitorización como herramienta de seguimiento. Es el caso, por ejemplo, de Valero et al., que recurren a la evaluación higrotérmica para conocer la adecuación de la solución de protección del sitio arqueológico de Noheda (España) (Valero, Merello et al. 2014). Es frecuente encontrar en trabajos que evalúan soluciones de restauración o intervención períodos de recogida de datos quizá excesivamente cortos, como en este caso, en que la monitorización se extiende solamente por un período de unos meses, posteriores a la intervención.

Por otro lado, la posibilidad de tomar datos con frecuencias pequeñas, tales como 1dato/minuto ofrece la ventaja de contar con un gran número de registros. Esto mejora notablemente la precisión de los análisis estadísticos, aunque tiene el problema de la gran cantidad de datos que hay que procesar. Algunos autores han tratado de desarrollar herramientas informáticas para la gestión de datos, como ocurre por ejemplo con los trabajos de Fernandez-Navajas et al. quienes presenta un software que permite gestionar grandes cantidades de datos de monitorización ambiental (Fernandez-Navajas, et al., 2013). Además, permite la detección de datos anómalos y el trazado de gráficos y medias. La herramienta que han desarrollado tiene una interfaz gráfica entre el usuario y el motor de cálculo que impulsa la base de datos en la que se almacena la información registrada por el sistema de monitorización. El software es capaz de almacenar los registros de 32 sensores de temperatura y 32 de humedad diseñados por ellos mismos y colocados en la bóveda de la catedral de Valencia. El archivo de base de datos tiene una extensión Firebird DataBase (FDB) de código abierto que se puede leer con otros programas de uso comercial.

Algunos autores utilizan aparatos comerciales, con su propio software pero, para adaptarlo a las necesidades de cada caso de estudio particular, algunos autores han optado por el diseño de hardware y software de código abierto. Este tipo de sistemas supone una alternativa muy interesante cuando se trabaja en edificios de patrimonio histórico, para poder adaptar el sistema de monitorización que se va a usar a las necesidades específicas del objeto de estudio. Además de los software de gestión de datos, algunos investigadores han desarrollado sistemas de adquisición, por ejemplo, Lessese et al. crearon un sistema de adquisición de datos basado en una serie de microcontroladores que envían la señal a una unidad central (Leccese, et al., 2014). El objetivo, en este caso era la creación de un sistema de adquisición para el control remoto de pinturas murales. El sistema mide la temperatura y la presión atmosférica en el sitio en el que se encuentran las pinturas murales. Otro ejemplo más reciente, es el de Mesas-Carrascosa et al., que realizan la monitorización de una mezquita mediante un sistema de 15 sensores de temperatura y humedad, 14 de ellos colocados en el interior y otro en el exterior (Mesas-Carrascosa, et al., 2016). Todos los sensores empleados se basan en una plataforma de software abierto, descendiente de la plataforma de código abierto C++, que ofrece la ventaja de disponer de hardware pensado para ser de fácil de manejo. Los sensores que diseñaron para este estudio eran inalámbricos²³ (WSN). El intervalo de medición se realizó cada dos minutos. El análisis de los datos para generar mapas y gráficos se llevó a cabo mediante el software comercial Matlab.

2.3.2. Evolución de los sistemas de monitorización higrotérmica

²³ Wireless Sensor Network (WSN) en las siglas en inglés para la red de sensores inalámbricos.

Los primeros trabajos de toma de datos sobre el edificio contaban con medios manuales, de manera que los datos de temperatura, humedad, etc. se tomaban puntualmente. El avance de la tecnología, ha posibilitado el seguimiento en el tiempo de las condiciones de temperatura, humedad, velocidad del viento etc. en los edificios.

Como ya se ha explicado, la monitorización permite la recogida de datos de manera continua, pudiendo conocer en todo momento la evolución de los parámetros que entran en juego en la determinación del comportamiento ambiental del edificio.

Existen gran cantidad de métodos de monitorización, pero muchos de estos sistemas han sido concebidos para su uso en edificios modernos, agricultura, alimentos, usos comerciales o industriales. Todos estos propósitos tienen su propia estandarización. Sin embargo, no todas estas metodologías son apropiadas para el patrimonio cultural, algunos de los sistemas comercializados son invasivos o utilizan un sistema de medida “arbitrario” de difícil calibración o aplicación al patrimonio. Camuffo y Bertolin analizan los métodos más popularmente utilizados en el campo del patrimonio cultural (Camuffo & Bertolin, 2012). El objetivo es proponer un estándar de medición. La evolución de las técnicas, y el desarrollo de numerosos trabajos desarrollados en el campo del patrimonio arquitectónico, muchos de ellos enumerados en los apartados anteriores, han venido apoyados sobre todo a raíz de la aparición de las políticas de conservación preventiva (Lucchi 2017).

A pesar del avance que se ha dado en el campo de monitorización de edificios gracias a las mejoras tecnológicas, incluso los trabajos más recientes emplean los datos de monitorización para la mera observación y seguimiento de datos. No existen, al menos en el campo concreto de la monitorización higrotérmica de edificios históricos, muchos trabajos que empleen los datos registrados para realizar análisis estadísticos que relacionen los datos con otras variables observadas o conocidas de edificio. Generalmente, están orientados en dos vías: la evaluación de un daño y/o la solución adoptada, tal como se ha visto en los capítulos anteriores, o para el control, observación y seguimiento de las condiciones ambientales del edificio. Es especialmente reducida el número de trabajos que estudia edificios históricos, sin sistemas de acondicionamiento ambiental, pues, como se ha explicado, la incorporación de técnicas de confort es uno de los campos de mayor desarrollo en investigación en edificios del patrimonio. Aunque esta es la tendencia general de la mayoría de los trabajos, existen excepciones, como (D’Agostino 2013b), que además de la observación de los datos de monitorización los emplea para el cálculo de la evaporación de los muros de la Cripta y la Catedral de Lecce (Italia), o (Garcia-Diego, et al., 2013) que desarrolla un cálculo estadístico específico para el estudio de la combinación de las variables de temperatura y humedad aplicado a este tipo de edificios.

2.4. LOS SISTEMAS DE SIMULACIÓN POR ORDENADOR COMO HERRAMIENTA PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO DE EDIFICIOS HISTÓRICOS.

Introducción

En este capítulo se enmarcan bajo la misma denominación de “sistemas de simulación” a dos tipos diferentes de programas:

- Los programas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD²⁴)
- Los programas de simulación de transferencia de calor, aire y humedad (HAM²⁵)

El primero (CFD), pensado para estudiar los flujos de aire en el interior y exterior del edificio. El segundo (HAM), pensado para estudiar las transferencias a través de la envolvente del edificio. Ambos programas aparecieron con objetivos diferentes, pero terminaron por unirse posibilitando la simulación completa de los edificios simulados.

A continuación, en el apartado 2.4.1 se ofrece una visión general sobre ambos programas. En los apartados siguientes se desarrollará con detenimiento la aparición, funcionamiento, evolución y aplicación de cada uno de ellos.

2.4.1. Marco general de la simulación por ordenador en arquitectura

En paralelo al avance de las técnicas de monitorización se han ido desarrollando los sistemas de simulación CFD por ordenador. El empleo de los programas de simulación en edificación aparece en la década de los 70. Se extiende su uso en los años 90 gracias a las mejoras en rendimiento y capacidades de los equipos informáticos. Tal como explica Nielsen, la relación entre el desarrollo de los programas de Dinámica de Fluidos Computacional y el rendimiento de los ordenadores es directamente proporcional (Figura 8) (Nielsen 2015).

²⁴ Computational Fluid Dynamics (CFD) en sus siglas en inglés.

²⁵ Heat, air and Moisture (HAM) en sus siglas en inglés.

Figura 8. Desarrollo de la velocidad de cálculo frente al año de introducción de mejoras de los ordenadores

Por otro lado, su uso se ha hecho posible no solo a nivel de la industria, sino de la investigación en arquitectura gracias al desarrollo del hardware y software de ordenador personal (PC), con una interfaz gráfica de usuario (GUI) asequible (Wang & Zhai, 2016). En la actualidad existen más de 20 programas diferentes, entre los cuales está EnergyPlus, ECOTECT, ESP-r, TRNSYS, DOE-2, EQUEST, DeST, Energy-10, IDE-ICE, Bsim, IES-VE, PowerDomus, HEED, Ener-Win, SUNREL y Energy Express, etc. De todos ellos, los más empleados son EnergyPlus y TRNSYS ().

Figura 9. Porcentaje de utilización de los principales programas de simulación en la investigación de optimización de edificios. Fuente: (Nguyen, Reiter et al. 2014).

Los ámbitos de estudio en arquitectura que emplean técnicas computacionales son muy extensos, desde el análisis de la ventilación natural, al consumo energético, la eficiencia energética, el confort del ambiente interior, la calidad del aire interior, la iluminación, el entorno acústico, etc. Esto hace que exista un extenso número de publicaciones. Estos programas han ido adquiriendo cada vez mayor importancia, en parte, debido a las normativas, cada vez más restrictivas, en cuestiones de eficiencia de la obra construida.

Como ejemplo, el Estándar de energía para edificios (ASHRAE 2016) requiere la simulación energética de todo un año completo del edificio para evaluar su rendimiento energético. O las nuevas clasificaciones LEED²⁶, para edificios sostenibles.

En la última década se ha extendido el empleo de programas de simulación al ámbito de los edificios históricos. Los objetivos son diferentes, pero el uso que más se ha extendido es el del cálculo de la ventilación natural. En el apartado 2.4.5 “*Aplicaciones de la simulación en edificios históricos*”, se explican con detenimiento estos usos y las investigaciones que existen.

De manera general, se puede hablar de tres grupos que emplean simulación CFD en patrimonio:

- a) *Simulación para la validación de técnicas de intervención para la rehabilitación de edificios* (Ascione, de Rossi et al. 2011), simulación para la comprobación de sistemas de acondicionamiento ambiental del edificio (Balocco, Grazzini 2007),(Roberti, Oberegger et al. 2017). La línea de investigación con mayor número de publicaciones, por el aumento en los últimos años de la preocupación por la eficiencia energética (Mazzarella 2015, Carbonara 2015). Se estudia, principalmente, la introducción de nuevos materiales o sistemas de acondicionamiento ambiental para la mejora energética del edificio.
- b) *Simulación para estudiar la ventilación natural del edificio*(Ayad 1999), (Balocco, Grazzini 2009, Corgnati, Perino 2013, Muñoz-González, León-Rodríguez et al. 2016). El segundo grupo más extenso en aplicar la simulación al edificio histórico. Esto se debe a la complejidad que representa definir cómo se mueve el aire en un espacio interior, algo que se puede estudiar con estos programas. Como se explicará más adelante, la precisión de los resultados aún es un punto cuestionado ente los investigadores, debido a la gran cantidad de parámetros que intervienen en el cálculo, por lo que existen trabajos específicos que se dedican a mejorar la precisión de los modelos.
- c) *Simulación para estudiar qué factores provocan la aparición de lesiones debidas a humedad* (Berger, et al., 2015).

²⁶ Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), es un sistema de certificación de edificios sostenibles, desarrollado por el US Green Building Council. Se basa en un sistema de puntuación en el cual las construcciones pueden optar a cierta clasificación en función de los requisitos específicos que cumplan. <https://new.usgbc.org/leed>

Además de los programas CFD, se desarrollaron los programas HAM (Heat, Air and Moisture), capaces de simular la transferencia de calor y humedad a través de la envolvente. Estos se emplean para predecir el comportamiento combinado de ambos flujos en los sistemas constructivos, así como su incidencia sobre el edificio. A día de hoy existen gran cantidad de herramientas destinadas a este fin por la utilidad que representan para la ingeniería y la arquitectura (Woloszyn, Rode 2008). En edificios históricos existen algunos casos de estudio que emplean programas de cálculo HAM, enfocados especialmente al estudio del comportamiento de los materiales y a su degradación por fenómenos como la humedad (Guimarães, Delgado et al. 2012). Sin embargo, los trabajos más recientes, vienen tratando de combinar los programas HAM con CFD para estudiar el fenómeno de transferencia de calor y humedad con respecto al microclima que rodea al material. De esta manera, se consiguen dos mejoras en la precisión de la simulación:

- Por un lado, la simulación del ambiente del edificio es más precisa, porque cuenta con los efectos de los materiales de la envolvente (como, por ejemplo, la capacidad de amortiguación de la humedad de materiales higroscópicos)
- Por otro parte, el cálculo de transferencia de calor y humedad a través de la envolvente es más precisa.

Esto supone una doble ventaja:

- Aquellos investigadores que estudian las mejoras de eficiencia energética, o confort térmico, etc. en el interior de los edificios contarán con los efectos de los cerramientos.
- Aquellos que estudian el comportamiento de los materiales, contarán con la variable del clima.

Esta combinación de ambos programas suele denominarse como “*HAM-CFD coupled simulation*” o simulación combinada. La posibilidad de estudiar los dos fenómenos es de especial interés para este trabajo de investigación, por ello, en el apartado 2.4.4, se explica la evolución de la investigación en “*coupled simulation*”, así como el uso que se ha dado de las mismas, y la situación con respecto a la investigación en edificios históricos.

Habiendo desarrollado una visión general en este apartado, se detalla la aparición, evolución y usos de cada uno. Primero, en el apartado 2.4.2, se explican los programas CFD. A continuación, en el apartado 2.4.3, se explicarán los programas HAM, también detallando su evolución y uso. Finalmente, se explica en el apartado 2.4.4 cómo aparece el uso combinado de ambos.

2.4.2. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) ²⁷

a) Aparición y desarrollo de los programas CFD

Algunos autores enmarcan el origen de los trabajos CFD en Richardson (1910), pero debido a la falta de potencia de cálculo de los ordenadores el progreso se produce a partir de los años 70 (Granell Ruiz 2014). La disciplina investigadora dedicada al estudio del ambiente interior de los edificios ha adoptado la simulación CFD como una herramienta de demostrada utilidad para la predicción del movimiento del aire (Murakami 1997, Nielsen 2015). Esta herramienta permite estudiar el movimiento del aire en el interior de espacios ventilados.

Estos programas se basan en el conjunto de ecuaciones diferenciales de Navier-Stokes²⁸ para predecir los flujos de aire interior y exterior, la presión, la temperatura, la humedad y la distribución de contaminantes. Según Bjerg et al., el uso de CFD para el estudio de la ventilación natural viene de la mano de Awbi, que crea un programa informático para resolver problemas de ventilación en dos y tres dimensiones (Bjerg, Svidt et al. 2002) (Awbi 1989). El programa resuelve, mediante diferencia finita, las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía térmica. Para validar esta aplicación, realiza una simulación sobre una sala que al mismo tiempo está siendo monitorizada.

Existen ciertos aspectos fundamentales, explicados en el capítulo 4 “*Fundamentos teóricos*”, que forman parte de los condicionantes con los que operan los programas CFD:

- *Los modelos de turbulencia*, aspecto fundamental cuando se simula el movimiento del aire en un interior (cuestión especialmente importante para esta investigación)
- *La malla espacial*, que define la precisión en el cálculo. De ambos aspectos, existen gran cantidad de investigaciones orientadas a la mejora de los principios de cálculo que hagan que los resultados obtenidos de la simulación sean más precisos.
- *Modelos unizionales y multizionales*: se agrupan dentro de métodos nodales (Megri, Yu 2015). Sirven para estudiar la distribución del aire su temperatura en espacios interiores de edificios. Existen varios programas de cálculo en cada caso. Wang y Chen proponen el acoplamiento de un programa de simulación multizonal (CONTAM) con un programa CFD (L. Wang, Chen 2007a). Estos mismos autores validan este sistema de trabajo combinado CONTAM-CFD por medio de un trabajo experimental (L. Wang, Chen 2007b). Después de estos, vendrán muchos otros trabajos que combinen el cálculo multizonal-CFD (Dols, Wang et al. 2015). A día de hoy, los programas de simulación CFD —o que incluyen

²⁷ Computational Fluid Dynamics (CFD) en sus siglas en inglés.

²⁸ Explicadas en el capítulo 4 “*Fundamentos teóricos*”

un módulo CFD, como Design Builder- tienen incorporado la posibilidad de operar con estos modelos.

Dada la importancia de estos condicionantes de cálculo, encontramos en la literatura, una cantidad considerable de publicaciones científicas que intentaron a través de los años, que analizan estos aspectos de cálculo, su influencia sobre los resultados de la simulación, y trataron de mejorar la precisión por medio de mejoras en el cálculo (Nguyen, Reiter et al. 2014, Crawley, Hand et al. 2008).

A continuación, se hace una descripción de cada uno de estos condicionantes, acompañado de aquellos trabajos de referencia que los acompañan.

b) Los modelos de turbulencia

El modelado de turbulencia es uno de los factores más importantes que afectan a la predicción de la ventilación. En el capítulo 4 “*Fundamentos teóricos*” se explica cómo se comporta el movimiento de aire en una habitación ventilada, y que es, a menudo, turbulento. Las técnicas de modelado de turbulencia han ido evolucionando y mejorando su rendimiento a lo largo de los años. Con el paso del tiempo, y los avances en el cálculo por ordenador, se han ido proponiendo nuevos modelos para construir simulaciones de modelos turbulento, identificando los más adecuados en función de las condiciones específicas del espacio que se simula.

El modelo de turbulencia que se emplea con mayor frecuencia en construcción es RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes). Este modelo ha sido estudiado y validado por diferentes investigadores (Murakami, Mochida 1988, Chen, Xu 1998, Kuznik, Rusaouën et al. 2007). Los primeros modelos de cálculo mediante RANS, durante los años 70 no permitían realizar cálculos precisos en las zonas de pared. Esta dificultad no podía ser ignorada. Por ello, se empezaron a emplear los modelos LES para calcular los flujos cercanos a las paredes (Moin, Mahesh 1998). No fue hasta 1987 cuando se realizó un cálculo con RANS capaz de solventar el problema de frontera. Trabajos posteriores han modificado el cálculo para incorporar factores como la transpiración (Sumitani, Kasagi 1995), la transferencia de calor (Kasagi, Tomita et al. 1992) etc.

Con las mejoras de los hardware, la simulación de remolinos más complejos y grandes LES (Large Eddy Simulation) se vuelve más factible (Kondo, Murakami et al. 1997). Como refleja la literatura más reciente, el empleo de los modelos LES se ha orientado sobre todo a simulaciones con una escala grande. Recientemente, un grupo de investigadores de la Universidad de Zhejiang (China), han probado el cálculo con LES para simular el comportamiento inestable de una cubierta abovedada de gran envergadura, simulando los remolinos mediante túnel de viento, y validando así su empleo para el cálculo de este tipo de fenómenos inestables (Ding, Uematsu 2017). Otro caso es el de Shen et al, que a diferencia de los modelos RANS, éstos no utilizan las ecuaciones de Reynolds, pero

emplea una operación de filtrado espacial²⁹ para separar remolinos grandes de pequeños . (Shen, Han et al. 2017). El problema es que las velocidades de cálculo son mucho más lentas que con los modelos RANS. Esto ha dado lugar a que se desarrollen aplicaciones nuevas que aprovechen las ventajas de ambos modelos de simulación para realizar cálculos independientes DES (Direct Numerical Simulation), (H. Wang, Zhai 2012).

Tal como explican Wang y Zhai, no existe un modelo de turbulencia que ofrezca el mejor rendimiento para todas las condiciones. Por tanto, la comprensión de la aplicabilidad de los diferentes modelos es fundamental para la selección adecuada. Chen, analizó diferentes modelos para movimiento de aire en interiores, y los resultados experimentales demostraron que el modelo RNG K- ϵ proporciona la mejor solución global (Chen 1995). Un estudio similar de Zhai et al. se revisan 18 modelos diferentes de tipo RANS, LES y DES, aplicándolos a espacios interiores (Zhai, Zhang et al. 2007). Las conclusiones a estos estudios, recogidos en un documento anexo que forma parte de la misma investigación, y que ofrece una guía para los usuarios de este tipo de programas de cuál es el modelo más adecuado para cada caso (Zhang, Zhang et al. 2007). Wang y Zhai recogen en su artículo de nuevo esta tabla, reconociendo la utilidad de la misma (Wang & Zhai, 2016).

²⁹ Existen muchos modos de realizar filtrado espacial, por ejemplo, mediante regresiones de Fourier.

Tabla 1. Resumen de los resultados de modelos de turbulencia probados para ambientes interiores en (Zhang, Zhang et al. 2007)

Cases	Compared Items	Turbulence Models							
		0- eq.	RNG k- ϵ	SST k- ω	LRN- LS	V2f- dav	RSM- IP	DES	LES
Natural convection	Mean temperature	B	A	A	C	A	A	C	A
	Mean velocity	D	B	A	B	A	B	D	B
	Turbulence	n/a	C	C	C	A	C	C	A
Forced convection	Mean velocity	C	A	C	A	A	B	C	A
	Turbulence	n/a	B	C	B	B	B	C	B
Mixed convection	Mean temperature	A	A	A	A	A	B	B	A
	Mean velocity	A	B	B	B	A	A	B	B
	Turbulence	n/a	A	D	B	A	A	B	B
Strong buoyancy flow	Mean temperature	A	A	A	A	A	n/c	n/a	B
	Mean velocity	B	A	A	A	A	n/c	n/a	A
	Turbulence	n/a	C	A	B	B	n/c	n/a	B
Computing time (unit)		1	2-4		4-8		10-20	10 ² -10 ³	

A = good, B = acceptable, C = marginal, D = poor, n/a = not applicable, and n/c = not converged.

c) La malla de cálculo

La malla condiciona significativamente los resultados de lo que se vaya a simular. Por ello, algunos autores han invertido esfuerzo en la definición de la importancia de la malla como elemento fundamental de cálculo. (H. Wang, Zhai 2012, Boz, Erdogan et al. 2014).

Boz et al, por medio de un sencillo ensayo de laboratorio, simularon y monitorizaron a la vez unos cilindros metálicos rellenos con agua destilada. Éstos se sometieron a variaciones de temperatura. El experimento demostró cómo la precisión de la malla afecta significativamente a los resultados de la simulación, afectando directamente a la distribución de la temperatura.

Se simularon diferentes configuraciones para la malla –con distintos pasos de tiempo-. En caso B (Figura 10) el resultado mostró la mejor compatibilidad con respecto a los datos experimentales. Cuando se llevó a cabo un ajuste adicional de la malla (Caso D -Figura 10), los resultados de simulación empezaron a mostrar un descenso de la compatibilidad

con los resultados de la monitorización. Esto demuestra, que la precisión de la malla no siempre es proporcional a cuanto mayor definición mejores resultados, sino que necesita de un ajuste razonable.

Figura 10. Validación de los resultados con la monitorización utilizando distintos esquemas de simulación(Boz, Erdogan et al. 2014).

Una buena práctica es que, en base a una primera simulación sencilla, se observe dónde se producen gradientes importantes y se afine posteriormente la malla en esos puntos (Bjerg, Svidt et al. 2002). De manera generalizada, la malla se suele afinar en los límites del modelo (los encuentros con paredes, ventanas, etc).

En las primeras simulaciones, las distribuciones de la cuadrícula eran cartesianas, creando celdas rectangulares. La ventaja es que las celdas uniformes permitían el uso de ecuaciones con diferencias finitas o celdas con tamaño variable para ecuaciones de volúmenes finitos.

Figura 11. Cuadrícula cartesiana para la predicción del flujo 2D en una sala con dimensiones 5x2,7m (Nielsen 2015).

Las cuadrículas adaptativas modifican su distribución en función de las variables en el dominio. Entre estas adaptaciones, por ejemplo, la que se debe a la velocidad. Suponiendo una habitación, en la que se produce un movimiento de aire, la solución modifica la cuadrícula desde la forma A1 a la A4, aumentando el refinamiento de la cuadrícula desde 57456 a 130697 celdas (Figura 12) (Bjerg, Svidt et al. 2002).

Figura 12. Adaptación de velocidad cerca de una abertura de entrada de aire (Bjerg, Svidt et al. 2002).

d) Modelos multizona

La ventaja de estos modelos es poder simular edificios completos, calculando la interacción, o tasas de intercambio de aire, entre diferentes espacios del mismo edificio, así como las distribuciones de flujo de aire, con y sin sistemas de ventilación mecánica. Estos modelos se explican en el capítulo 4 “Fundamentos teóricos”. Diversas investigaciones han demostrado una buena precisión en los resultados en arquitectura. Villi et al. lo emplean para evaluar la contribución que la infiltración tiene sobre un bloque de apartamentos en Italia (Villi, Peretti et al. 2013). Los resultados de la simulación realizada con EnergyPlus se validaron mediante una campaña de monitorización de 3 semanas en el edificio. Jareemit et al. lo emplean para cuantificar la tasa de infiltración de aire en dos tiendas (Jareemit, Srebric 2015). En ambos casos, el resultado de la simulación, con respecto a los valores medidos tiene un alto grado de correspondencia.

e) Modelos de zona

Estos modelos se emplean esencialmente para detallar la distribución de aire y la temperatura en una zona concreta del edificio (Inard, Bouia et al. 1996). Haghghat desarrolla y valida un modelo simplificado de cálculo de zona, conocido como POMA (Pressurized zonal model with air-diffuser)(Haghghat, Li et al. 2001). Este modelo es capaz de predecir el patrón de flujo de aire y las distribuciones térmicas dentro de una habitación. El modelo POMA se basa en las ecuaciones de conservación de masa y energía. Para su validación, los resultados del modelo se compararon con los experimentales y con otros modelos zonales y CFD. Este autor, clasifica los modelos de zona como el paso intermedio entre los modelos multizonales y de CFD. Otros trabajos posteriores mejoraron el modelo(Megri, Yu 2015). Como éste modelo, existen muchos otros, que dependen del modo en que se realiza el cálculo, como VEPZO (Velocity Propagating Zonal) En lugar de utilizar la ecuación de la ley de potencia o las correlaciones de chorro especializadas en modelar el flujo de aire entre dos zonas, se utiliza una ecuación derivada de las fuerzas que actúan en una trayectoria de flujo. Estas fuerzas generan una aceleración o desaceleración del flujo de aire(Norrefeldt, Grün et al. 2012).

2.4.3. Programas de simulación de transferencia de calor, aire y humedad (HAM)

No se puede entender el estudio de la transferencia de calor y humedad en los materiales o sistemas de construcción sin los programas de cálculo por ordenador. Desde los años 50 ha sido un tema de investigación activo. Künzle et al. presentan su respectivo métodos de cálculo basado en la evidencia física relativa al transporte de vapor y líquido en medios porosos (Künzle, Kiessl 1995, Pedersen 1992). Los programas HAM (Heat, Air and Moisture), capaces de simular la de transferencia de calor y humedad a través de la envolvente, se emplean para predecir este comportamiento combinado en los componentes de la construcción, y su incidencia sobre el edificio.

Además, para realizar una simulación precisa del comportamiento higrotérmico de un sistema constructivo, es necesario tener en cuenta que está sometido a la influencia de condicionantes atmosféricos. Por ello, las ecuaciones de transferencia de calor y humedad deben contar con estos condicionantes en el cálculo. Janssen et al. revisa las fórmulas clásicas de transferencia de calor y humedad incorporando los parámetros ambientales (Janssen, Blocken et al. 2007). De esta forma, se incrementa la precisión del cálculo computacional.

A día de hoy existen gran cantidad de herramientas destinadas a este fin (Woloszyn, Rode 2008), por la utilidad que representan para la ingeniería y la arquitectura.

Para predecir los efectos de HAM en los edificios, los modelos de transferencia de humedad se han integrado a principios de los años noventa en las herramientas de simulación como Delphin, MATCH, WUFI –que aparece a raíz de los trabajos de Künzle-, MOIST, Umidus, o Blast, entre las más conocidas, que sustituyen al método de H. Glaser³⁰. En el caso, por ejemplo, de Künzle, que es una de las figuras representativas en este campo, para validar el modelo que realiza, estudia el comportamiento de una fachada de prismas de piedra arenisca –diseñada en laboratorio- expuesta a lluvia y radiación solar, y compara los resultados de los cálculos con lo medido in-situ (Künzle, Kiessl 1996). Los valores de temperatura, radiación solar, pluviometría y humedad relativa se registraron durante todo el período de prueba (80 días) en que la fachada estuvo expuesta. Los cálculos obtenidos dieron buena correspondencia con las mediciones realizadas.

En las últimas dos décadas, los trabajos experimentales y los ensayos in-situ, han dado lugar a descubrimientos relevantes como la fuerte influencia de los flujos de aire en el comportamiento higrotérmico de los edificios. Al unir las transferencias higrotérmicas –temperatura y humedad- con aire, puede suponer una dificultad numérica debido a las no linealidades del fenómeno. Existen investigaciones en 1D que han logrado con éxito definir el problema de HAM en un material poroso. Tariku et al. publica un modelo transitorio que resuelve la transferencia conjunta de calor, aire y humedad a través de medios porosos multicapa (Tariku, Kumaran et al. 2010). Para comprobar la validez del modelo realizan diferentes supuestos analíticos, numéricos y experimentales. Los resultados obtenidos, prueban la validez del modelo. Gracias a este cálculo se pueden estimar los efectos de la liberación de humedad al interior de un edificio a través de las interacciones de su cerramiento. Esta medida de la humedad aportada por la envolvente resulta fundamental pues, según han demostrado algunos trabajos, da lugar a cantidades de agua en forma de vapor bastante importantes (TenWolde, Pilon 2007). Como el propio Tariku explica, normalmente los modelos de simulación de energía ignoran los efectos de la humedad en la transferencia a través de los cerramientos del edificio. Generalmente trabajan con valores de constantes de almacenamiento térmico, valores de transporte como la conductividad térmica, y la capacidad de calor (Mendes, Winkelmann et al. 2003, Al-Hazmy 2006, Boukendil, Abdelbaki et al. 2017). Todo ello a pesar de que estas propiedades pueden ser dependientes del contenido de humedad. Por ejemplo, el ladrillo puede aumentar más de dos veces su conductividad térmica a medida que el contenido de humedad aumenta hasta la saturación total (Künzle, Karagiozis et al. 2001).

La influencia de los fenómenos de transferencia de calor y humedad, y sobre todo, la posibilidad de realizar simulaciones y cálculos experimentales sobre la envolvente del edificio, aseguran poder optimizar el comportamiento de sus materiales. Esto, en relación con la creciente demanda de eficiencia energética, confort térmico y análisis

³⁰ H. Glaser establece el primer método de cálculo para el diseño de paredes a prueba de humedad basado en la difusión de calor y humedad en estado estacionario.

del deterioro en la construcción, han dado lugar al aumento de investigaciones en esta materia en los últimos años. Así, dos Santos y Mendes, realizan un modelo matemático que considera el transporte bidimensional combinando calor, aire y humedad a través de ladrillos huecos de construcción no saturados (dos Santos, Mendes 2009). Las ecuaciones algebraicas se resuelven utilizando el algoritmo MTDMA³¹. Su modelo demuestra que, si no se tiene en cuenta la humedad en el proceso de transporte combinado, se pueden obtener resultados con gran discrepancia respecto de la realidad, obteniendo valores de rendimiento de los materiales equivocados. A diferencia de los modelos de cálculo antes comentados, el modelo de dos Santos y Mendes tiene en cuenta no solo las cavidades del material poroso en sí, sino la influencia de las cavidades de estos elementos huecos, que pueden presentarse con frecuencia en estructuras construidas, jugando un papel muy importante en el rendimiento higrotérmico. Hou et al. realizan una serie de ensayos en laboratorio sobre bloques de hormigón hueco rellenos de paja comprimida (Hou, Liu et al. 2017). El objetivo es estudiar el flujo de calor y humedad combinados y relacionarlos con posibles optimizaciones en ahorro de energía en paredes. Los ensayos consistían en evaluar la transferencia de calor y humedad en relación con las condiciones de contorno. Los perfiles de temperatura y humedad se monitorizaron durante las pruebas. Los resultados revelaron la importante influencia de la temperatura y el gradiente de humedad relativa sobre las propiedades higrotérmicas de la pared multicapa formada por los bloques.

Algunos trabajos están especialmente orientados hacia el estudio de los posibles daños que puedan producirse en la envolvente por la transferencia de humedad (B. Van Belleghem, Montoya et al. 2016, M. Van Belleghem, Steeman et al. 2014, Li, Rao et al. 2009).

Respecto a cómo se realiza el análisis, existen numerosos modelos en una, dos y tres dimensiones, tanto para uso comercial como para investigación científica. (Kalagasidis, et al., 2007) desarrollan la International Building Physics Toolbox (IBPT), una caja de herramientas y biblioteca de simulación para el diseño de procesos físicos como HAM en edificios, apoyándose en el lenguaje de programación gráfica de Simulink³². Esta herramienta de modelado integral permite fácilmente incluir elementos de construcción, incluso instalaciones del edificio, que no tienen por qué ser los estandarizados que vienen implementados en los programas comerciales. De esta manera, la simulación no está limitada a la biblioteca de mecanismos que incluya el programa, pudiendo hacer una simulación mucho más libre. La aplicación del IBPT para el cálculo de HAM a través de muros ha sido validado por medio de varias pruebas comparativas.

³¹ MultiTriDiagonal-Matrix Algorithm (MTDMA)

³² Simulink es un lenguaje de programación gráfica desarrollado apoyándose en el programa matemático Matlab, para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos.

A pesar de las ventajas de la simulación de HAM, se trata de una vía de investigación abierta, dada la complejidad del fenómeno, encontramos trabajos recientes que cuestionan la precisión de los resultados de simulación en comparación con los resultados experimentales (Berger, et al., 2017). Un material con un contenido de humedad inicial ω_0 se somete a una fase de adsorción ϕ_1 y posteriormente de desorción ϕ_2 . Los resultados de la simulación subestiman el proceso de adsorción o sobreestiman el proceso de desorción (Figura 13).

Figura 13. Diferencia entre los resultados de la simulación y el cálculo de las fases de adsorción y desorción del contenido de agua en un material poroso. (Berger, et al., 2017)

Los ensayos se realizaron utilizando el programa WUFI, basado en el modelo de difusión de (Berger, Gasparin et al. 2017, Künzle, Kiessl 1995) afirman que parte del problema de la discrepancia de resultados que existe se puede deberá factores como la anisotropía de los materiales, la histéresis o el desconocimiento preciso de fenómenos como el almacenamiento de humedad o coeficientes de transporte. Según Berger, la transferencia de humedad advectiva puede jugar un papel importante a la hora de proporcionar resultados más fiables. Johannesson y Janz afirman que, si no se tiene en cuenta la histéresis de sorción, el error en la determinación del contenido de agua puede llegar a ser de entre el 30 y el 35%, que es un valor considerablemente alto (Johannesson, Janz 2009).

2.4.4. Estudios de transferencia de calor, aire y humedad (HAM) combinados con Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

Los modelos HAM se han ido combinando con otros modelos para mejorar su rendimiento y capacidades. Algunos de estos ejemplos son BES -HAM, o los modelos CFD-HAM (B. Van Belleghem, Montoya et al. 2016).

En los modelos BES-HAM se combina para mejorar la predicción del rendimiento energético del edificio al incluir el comportamiento higroscópico de los materiales de construcción. Steeman et al. emplean BES-HAM para evaluar el fenómeno de amortiguación de la humedad que producen los materiales higroscópicos en el interior del edificio. El desarrollo se lleva a cabo mediante el programa comercial de simulación TRNSYS y HAM (M. Steeman, Janssens et al. 2010). La validación del modelo se realizó por medio de experimentos en laboratorio con una cámara climática (M. Van Belleghem, Steeman et al. 2011).

El estudio de la transferencia de calor, aire y humedad a través de la envolvente (HAM)³³, y la simulación ambiental del edificio (CFD), han sido disciplinas separadas durante muchos años. En los modelos combinados CFD-HAM, se combina con la dinámica de fluidos computacional para incorporar mejor el efecto conjunto del transporte convectivo de calor y humedad en el aire y en el material poroso. Capaces de simular todo el edificio, incluyendo la transferencia unidimensional (1D y/o 2D) a través de la envolvente. Este paso permitía relacionar la ventilación con el consumo energético y afinar los cálculos de los equilibrios de humedad en el interior del edificio (Hens 2009). Dentro de este grupo ha habido un desarrollo notable en los últimos años. En 2003 se puso en marcha el proyecto IEA-ECBCS Annex 41³⁴, con dos objetivos fundamentales: por un lado, el estudio de toda la física que involucra el fenómeno de HAM; por otra parte, los efectos de HAM sobre el confort, el ambiente interior, el consumo energético y la durabilidad de la envolvente. Algunos de los trabajos más recientes, emplean el método de co-simulación, que consiste en acoplar dos aplicaciones de software existentes, una para la construcción de la simulación dinámica (CFD) y otra para estudiar el comportamiento higrorotérmico de la envolvente. Este enfoque permite una mejor descripción de la transferencia de calor y humedad cuando encontramos paredes higroscópicas, resolviendo globalmente el comportamiento ambiental del edificio con mayor precisión. Uno de los ejemplos de co-simulación más reseñables es el de van Schijndel, Tariku y Kumaran que desarrollaron un entorno de simulación propio mediante la herramienta Simulink de Matlab en combinación con COMSOL Multiphysics, al que denominaron HAMFitPlus. Este modelo integra transferencia de calor, aire y humedad junto con la simulación del ambiente interior (Tariku, Kumaran et al. 2010, A.W.M. van Schijndel 2009).

La Agencia Internacional de la Energía (IEA) ha publicado los resultados del proyecto de investigación anterior, en el que se detallan los programas de cálculo más importantes, las capacidades de cada uno de ellos y qué son y no son capaces de calcular. Woloszyn y Rode afirman que el objetivo de los programas de simulación HAM completa del edificio tienen como principal reto ser capaces de lidiar con todos los fenómenos físicos que se encuentran involucrados en los múltiples procesos que se dan en el edificio, en

³³ El cálculo combinado de la transferencia de calor, aire y humedad a través de un material o un sistema constructivo recibe, en inglés el nombre “Heat Air and Moisture”, por lo que es comúnmente conocido con las siglas HAM.

³⁴ International Energy Agency (IEA) en sus siglas en inglés.

lugar de centrarse demasiado en un solo fenómeno, y así poder dar una respuesta global (Woloszyn, Rode 2008). En muchos de los programas, si el fenómeno de humedad está bien modelado no lo están otros fenómenos, o si el modelo energético está bien modelado, el comportamiento de la humedad entonces está simplificado. Tal como concluyen estos autores, aún es necesario trabajar mucho en este campo, tanto en la comprensión del fenómeno de HAM, como en el desarrollo de herramientas de software que sean capaces de modelar el fenómeno completo en el edificio de manera precisa.

Las aplicaciones de estos programas, desde que se han empezado a emplear de manera combinada, son múltiples. Steeman et al. emplean el software CFD comercial Fluent para integrar el cálculo de los daños relacionados con humedad que se producen en materiales porosos, a través del estudio del transporte de calor y vapor de agua, con los datos de microclima interior simulados gracias a CFD (H. Steeman, Van Belleghem et al. 2009). La combinación de los dos cálculos fue capaz de explicar las razones del deterioro que se observaba en la práctica.

También con objeto de estudiar las propiedades de amortiguación de la humedad de los materiales porosos, Zhan et al. proponen un modelo que conjuga CFD con HAM. Empleando el software comercial STREAM v.8. Para validar el cálculo, realizan un ensayo de laboratorio en el que construyen una habitación climatizada, en condiciones constantes, en la que hay una entrada de aire controlada. La humidificación de ésta se lleva a cabo con una bandeja de agua que se calienta de manera controlada. La distribución de la temperatura y la humedad de esta habitación se monitoriza con sensores de temperatura y humedad relativa (T y HR). Esta misma habitación se simula con CFD (H. Zhang, Yoshino et al. 2015).

En una investigación más reciente, Furqan Ahmad Khan desarrollan un modelo de cálculo combinado con CFD para simular el enfriamiento evaporativo en medios porosos. El problema del secado inestable o irregular de un material poroso, inicialmente saturado, también se simula para demostrar la característica de transferencia de masa sin equilibrio. Los resultados muestran las tendencias correctas en el tiempo de secado con respecto al número de Reynolds de flujo y la humedad relativa de la mezcla de entrada de aire y vapor de agua (Khan, Fischer et al. 2015).

En ambos casos, BES o CFD existen trabajos de investigación que han validado su utilidad. En este trabajo de investigación, como se verá más adelante, se ha trabajado con un modelo acoplado de CFD-HAM implementado de manera conjunta en una de las versiones más modernas del software Design Builder.

Modelos zonales y multizonales

Como se ha explicado anteriormente, la simulación CFD a día de hoy cuenta con la posibilidad de realizar cálculos zonales, o multizonales. Dependiendo de lo que se quiera calcular, se puede operar en una u otra manera. A raíz de la aparición de estas dos posibilidades, algunos trabajos revisan la precisión en el cálculo, debido a la incorporación de nuevas variables. Berger et al., en un trabajo reciente, afirman que los modelos en los que se usaba CFD para construir un volumen de aire interior con modelos 2D o 3D de transferencia HAM en paredes porosas solo se pueden usar para evaluar el comportamiento higrotérmico en una habitación individual, como una sala de un museo, por ejemplo (Berger, et al., 2016). Su uso en una construcción completa sigue siendo impreciso. El trabajo de Berger et al. se centra en reducir la complejidad del modelo de cálculo para el muro, con objeto de poder integrar una herramienta de cálculo bidimensional o tridimensional del muro dentro de un programa que simule todo el edificio. Para integrar el cálculo que se hizo del muro dentro de un modelo completo del edificio, se apoyan en el software Domus, obteniendo buenos resultados.

Como conclusión, los avances en simulación por ordenador resultan una herramienta de gran utilidad. Se ha extendido espacialmente su uso para estudiar nuevas construcciones (Yutaka, et al., 2016), lo que ha permitido un desarrollo en paralelo encaminado a su uso en edificios históricos. En la mayoría de los casos en que se usa para patrimonio, se tiende a separar la investigación en cálculos del ambiente mediante CFD o cálculos de la envolvente, sin consideraciones a escala del edificio, por lo que falta una perspectiva integradora. Esto sucede no por error en el planteamiento del trabajo o del modelo, sino por la gran cantidad de variables que intervienen y la complejidad que el estudio combinado de las dos perspectivas que añade al cálculo. Esto hace que las herramientas de simulación no estén integradas todavía como un análisis rutinario cuando se estudian edificios históricos.

2.4.5. Aplicaciones de la simulación en edificios históricos

La aplicación de programas de simulación en edificios patrimoniales es compleja, ya que la mayoría de los programas están diseñados para su uso en edificios contemporáneos (Muñoz-González, León-Rodríguez et al. 2015).

Por el momento, el uso de esta herramienta dentro del ámbito de la conservación preventiva está aún poco extendida. Uno de los campos donde se desarrollan y aplican más rápidamente herramientas novedosas para la conservación preventiva son los museos. Tal como explica Elena Lucchi en una reciente publicación, en ese campo, la simulación tiene un rol pequeño (6,3%) dentro de los elementos técnicos empleados para la conservación, lo que es realmente significativo (Lucchi 2017).

Al igual que pasaba con la monitorización en edificios históricos, los trabajos que emplean herramientas de simulación, generalmente lo hacen como medio para analizar la influencia de los sistemas de acondicionamiento ambiental (Corgnati, Perino 2013). También existe otro grupo de trabajos que se centran en el estudio de la ventilación natural y su influencia sobre el ambiente interior, ya sea en combinación con sistemas HVAC³⁵, o sin ellos (Muñoz-González, León-Rodríguez et al. 2016). Dentro de este grupo, se reducen aún más los trabajos a unos pocos que estudian edificios históricos no calefactados³⁶ con objeto de conocer la influencia de la ventilación natural sobre el ambiente interior del mismo (D'Agostino, Congedo 2014).

Por tanto, se pueden dividir los trabajos de investigación que emplean sistemas de simulación por ordenador en dos grupos:

- Estudio del impacto de los sistemas de acondicionamiento ambiental sobre el edificio histórico
- Estudios sobre la ventilación natural

Estos dos grupos se desarrollan con detenimiento a continuación.

a) Estudio del impacto de los sistemas de acondicionamiento ambiental sobre el edificio histórico

Como se explicaba anteriormente, el acondicionamiento ambiental de los edificios se ha convertido en una parte esencial en arquitectura, llegando también a los edificios históricos. El interés por la renovación energética de los edificios históricos se ha ido implantando en los últimos años, tanto es así que, revistas de alto impacto como Energy and Buildings han dedicado un número completo (d'Ambrosio, et al., 2015). Dentro de este ámbito de estudio, existen multitud de casos de estudio en edificios históricos.

Precisamente, algunos de los software de simulación se han empleado con el objetivo de analizar estrategias de rehabilitación energética, usándose en algunos casos en edificios antiguos (Ma, et al., 2012). Algunos de estos programas cuentan con paquetes específicos para el estudio de medidas de mejora de eficiencia energética. (De Berardinis, et al., 2014) estudia un conjunto de edificios en la ciudad de Abruzzo (Italia), caracterizando el comportamiento térmico de los muros de mampostería para la propuesta de un sistema de rehabilitación térmicamente eficiente. (Franco, et al., 2015) estudian la renovación energética del complejo del siglo XVII Albergo dei Poveri (Génova). Se propone un método de estudio sistemático. Este método se basa en conseguir reducir el consumo de energía respetando las limitaciones debidas a los

³⁵ HVAC son las siglas en inglés de Heat, Ventilation and Air Conditioning, que se emplean para referirse a sistemas de acondicionamiento ambiental en edificios.

³⁶ Se prestará especial atención al conjunto de investigaciones que no trabajan sobre edificios calefactados, o con sistemas HVAC en general, dado el interés particular de esta tesis por las interacciones entre el ambiente interior-exterior del edificio histórico a través de la envolvente, sin la influencia de sistemas artificiales de acondicionamiento que alteren los valores de equilibrio ambiental naturales.

valores histórico-arquitectónicos combinado con la aplicación de sistemas de envolvente y de calefacción adecuadas.

Cuando se trata de una construcción con valores patrimoniales, no solo se deben tener en cuenta aspectos de eficiencia energética de la instalación que se propone, sino el impacto higrotérmico de la instalación propuesta sobre la envolvente (Balocco & Grazzini, 2007). La aparición de los programas CFD ha permitido estudiar las posibles técnicas de acondicionamiento que se pueden usar en un edificio y simular por ordenador qué impacto tendrán sobre el clima interior de éste. (Cornaro, et al., 2016) presentan un método que involucra medidas in-situ con simulación dinámica para evaluar soluciones de restauración en Villa Mondragone, un edificio histórico de importantes dimensiones en Roma.

b) Estudio de la ventilación natural

La ventilación natural se produce por un flujo de aire que es conducido a través de las aberturas de ventilación por la fuerza natural del viento y la temperatura. Los complejos patrones de flujo de aire que se producen necesitan de una comprensión integral (Liu, Lin et al. 2009). Esta interpretación no siempre es sencilla. Los programas de CFD ofrecen una gran ayuda para simular estos movimientos complejos.

La mayoría de los trabajos que estudian ventilación natural en este tipo de edificios es lo hacen para averiguar la influencia de esta ventilación sobre lesiones patológicas concretas como la difusión de la contaminación por sales (D'Agostino, Congedo et al. 2014), o las condensaciones en zonas concretas del edificio (Albero, et al., 2004) que dan lugar a deterioros localizados. Apenas existen referencias que relacionen la humedad de la envolvente, con su difusión al ambiente a escala global del edificio (D'Agostino, Congedo 2014).

El trabajo de investigación que ofrece una visión más completa del edificio es el realizado por D'Agostino y Congedo en la cripta de la catedral de Lecce (Italia). En este caso, estudian el edificio, por medio de la simulación mediante Fluent, para encontrar una solución de ventilación natural capaz de proporcionar un microclima interior adecuado.

2.4.6. Las condiciones de contorno y la calibración en los modelos de simulación de edificios históricos:

Se considera conveniente dedicar un apartado a la calibración de los modelos de simulación debido a la importancia que esto tiene para la obtención de resultados fiables. Precisamente por su relevancia, existe toda una vía de investigación dedicada a la optimización de los sistemas de simulación, y al estudio de la adecuada calibración de los modelos (Oberkampff, Trucano 2002). En la simulación de la ventilación natural tiene especial importancia. Hajdukiewicz et al. desarrollan una metodología de calibración para el desarrollo de modelos CFD orientados al estudio de ambientes interiores con ventilación natural en edificios contemporáneos (Hajdukiewicz, Geron et al. 2013). Hajdukiewicz et al. señalan en su artículo la importancia de establecer unas condiciones de contorno precisas para la simulación, así como validar los resultados obtenidos. Con este fin, el proceso de calibración que emplean está respaldado por las mediciones de parámetros climáticos realizadas, tanto en interior como en el exterior, en el edificio empleado como caso de estudio. Ramponi y Blocken estudian el impacto del viento exterior sobre la simulación de la ventilación cruzada en un espacio interior (Ramponi, Blocken 2012).

En el estudio de la literatura científica existente sobre simulación en edificios históricos, se ha detectado que el procedimiento de trabajo con simulación está aún madurando y adaptándose a las posibilidades de estos programas, puesto que, como ya ha sido comentado, no están pensados para el comportamiento de este tipo de construcciones, sino para otras más modernas. Dentro de las investigaciones en edificios patrimoniales, el procedimiento de simulación es diferente entre unas investigaciones y otras. Aunque en todos los casos la simulación por ordenador se realiza acompañada de una campaña de toma de datos higrotérmicos (T y HR) mediante monitorización, la ubicación y cantidad de equipos depende de cada autor y no responde a un método estandarizado. Los datos de monitorización son empleados para establecer las condiciones de contorno para la simulación, por lo que cabe pensar que, si no existe un número diferente de data-loggers, las condiciones de contorno son imprecisas. En ninguno de los casos de estudio se justifica el método de colocación de los equipos.

Respecto al dato concreto de la velocidad del aire, que es de gran importancia para este tipo de modelos, no todos los autores emplean anemómetros para tomar esta medida. En la mayoría de los estudios se emplea un valor promedio anual o estacional obtenido de los registros meteorológicos, o incluso, en algunos trabajos, se supone un valor aproximado (Gangliano, et al., 2017).

Es frecuente que la colocación de los equipos empleados se limite a una zona muy concreta de estudio (Balocco & Grazzini, 2009), sin tener en cuenta la influencia de todo el edificio en su conjunto. En todos los casos, los valores medios registrados mediante

monitorización se emplean como condiciones de partida para la simulación (Albero, Giavarini et al. 2004, D'Agostino, Congedo 2014).

Existe algún estudio en el que la simulación se realiza sobre edificios históricos que ya no existen, como única vía para comprender cómo era su funcionamiento. Se trata de casos como Oetelaar et. al, que estudian mediante Fluent, unas termas romanas por medio de un levantamiento virtual para analizar su comportamiento térmico (Oetelaar, et al., 2013). Gangliano et. al estudian el sistema de calefacción tradicional en los baños romanos de "Indirizzo" Sicilia (Italia). con el software Ansys Fluent. (Gangliano, et al., 2017).

2.4.7 Transferencia de calor y humedad en la simulación de edificios históricos

En los apartados 2.2.2 a 2.2.4, los programas de simulación que incorporen el cálculo conjunto de la transferencia de calor y humedad junto con el modelado del ambiente interior son de reciente aparición. Su aplicación en edificios históricos es todavía muy reducida, o prácticamente inexistente, especialmente como herramienta de conservación preventiva para el análisis de casos reales. Esto se debe en parte a la evolución que habitualmente encontramos cuando se trata de herramientas tecnológicas, que pasan primero por el desarrollo para edificación contemporánea, antes de llegar a su uso en edificios patrimoniales.

Woubishet Zewdu Taffese presentaba en *"Proceedings of eSim 2012: The Canadian Conference on Building Simulation"* que poder conocer la implicación exacta que tiene el clima sobre un edificio de patrimonio podría ser muy beneficioso para su conservación. Emplea para realizar su trabajo los programas Delphin y Design Builder. Este último no contaba en ese momento con la posibilidad de simular la transferencia de calor y humedad a través de la envolvente, por lo que es necesario el empleo de los dos programas. El método de trabajo, acoplando el uso conjunto de ambos programas es validado mostrando una buena precisión en la simulación (Woubishet Zewdu Taffese 2012).

A pesar de este antecedente claro, otros investigadores que posteriormente emplean la simulación para el estudio de edificios históricos se limitan, en la mayoría de los casos al estudio de la ventilación natural sin consideraciones sobre la envolvente. Entre todos los mencionados ya en los apartados anteriores, Oetelaar et. al, por ejemplo, estudia la transferencia de calor por convección, sin tratar el intercambio a través de los cerramientos (Oetelaar, et al., 2013).

Entre los primeros trabajos que tratan este ámbito encontramos a Mendes et al., desarrollan un programa llamado Domus 2.0 capaz de realizar una simulación higrotérmica completa del edificio, desarrollado para tener en cuenta las interacciones combinadas de transferencia de humedad y calor en los edificios, sometidos a cualquier tipo de condiciones climáticas, considerando la difusión de vapor y la migración capilar.

(Mendes, Winkelmann et al. 2003). Abuku et al. representan uno de los primeros estudios en los que se calcula, por medio de simulación, las interacciones higrotérmicas completas de un edificio histórico –teniendo en cuenta transferencia de calor, humedad y aire- con el impacto de la lluvia, para evaluar cómo afecta al comportamiento general del edificio. Aunque los resultados de este trabajo se centran en el impacto de las cargas de lluvia sobre la respuesta higrotérmica de los muros del edificio, se detalla también un comportamiento general del edificio (Abuku, Janssen et al. 2009). Uno de los trabajos más recientes en estudiar ambas fluctuaciones de manera conjunta es Khalil, que modela el flujo de aire, junto con la transferencia de calor y humedad para estudiar el sistema de ventilación óptimo para las tumbas del Valle de los Reyes en Luxor (Egipto), para poder mantener las condiciones higrotérmicas adecuadas para el bien teniendo en cuenta la gran afluencia de visitantes. El artículo no explica que se haya realizado monitorización del viento, sí higrotérmica.

Otra vertiente habitual es que el estudio de la envolvente se limite a la transferencia de calor, sin tener en cuenta la influencia de la humedad, lo cual induce imprecisión en los resultados de la simulación (Gangliano, Liuzzo et al. 2017).

Es necesario recordar que este tipo de construcciones están formadas habitualmente por materiales muy heterogéneos, lo que dificulta que se pueda modelar correctamente, y que los resultados sean precisos. Si tenemos en cuenta esto, junto con que el empleo de programas de simulación requiere un nivel de especialización y conocimiento considerable, parece lógico que el empleo de estos programas no esté muy extendido.

De este último apartado 2.4 se pueden extraer dos conclusiones importantes. Primero, la utilidad de estos programas para poder realizar cálculos complejos que no serían posibles sin ayuda del cálculo computacional. En segundo lugar, se evidencia la importancia de estos programas para la conservación preventiva del patrimonio, entre otras razones, por la posibilidad de idear distintos escenarios de simulación que permitan adelantarse a los cambios que pueda sufrir el edificio. Por último, se ha podido ver que su aplicación en edificios históricos aún es escasa, pero que se trata de una rama emergente, como demuestran las publicaciones más recientes.

3. JUSTIFICACIÓN HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1 JUSTIFICACIÓN

- 3.1.1. El cálculo del comportamiento evaporativo desde la perspectiva global del edificio.
- 3.1.2. El papel de la monitorización higratérmica en la caracterización del ambiente interior del edificio histórico.
- 3.1.3. Los sistemas de simulación por ordenador como herramienta para el cálculo y la evaluación del comportamiento evaporativo del edificio histórico.

3.2 HIPÓTESIS

3.3 OBJETIVOS

- 3.3.1. Objetivo general
- 3.3.2. Objetivos específicos

3 JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1 JUSTIFICACIÓN

En el capítulo 2 *Antecedentes y estado de la cuestión*, se detallaron todos los estudios existentes que tienen relación con esta investigación. En base a todo lo expuesto en el capítulo anterior, se resumen a continuación aquellos puntos esenciales que se han detectado como vías de investigación abiertas, sobre los cuales se asienta esta investigación y que justifican la existencia de esta tesis.

3.1.1 El cálculo del comportamiento evaporativo desde la perspectiva global del edificio.

Las tres líneas de investigación descritas en el apartado 2.1 *“El salto de escala entre el estudio de los materiales de construcción, el sistema constructivo y el ambiente del edificio”* del capítulo 2 *“Antecedentes y estado de la cuestión”* implican el conocimiento de parámetros ambientales en relación a alguna de las partes del edificio, ya sea el material, el sistema constructivo (que serán muros históricos, en este caso), o el ambiente. Se ha detectado que existe cierta desconexión en el salto de escala entre cada uno de estos tres ámbitos de conocimiento.

Aquellas investigaciones que estudian el movimiento del agua en el material, han llegado a un nivel de conocimiento elevado, estableciendo leyes matemáticas que simplifican la complejidad del fenómeno y que permiten así su cálculo (Camuffo 1984, C. Hall, Hoff et al. 1984, C. Hall, Kam-Ming Tse 1986, Franzen, Mirwald 2004, M. R. Hall, Allison 2010a, M. R. Hall, Allison 2010b, C. Hall, Hamilton et al. 2011, Camuffo 2014). El fenómeno se vuelve complejo en el salto de escala del material al ambiente, y en la interacción entre materiales, es decir, en el sistema constructivo.

Del mismo modo que en el caso del material, en el sistema constructivo existen las correspondientes teorías del movimiento del agua (Rising Damp, Sharp Front, etc.), que tratan de definir el problema por medio de simplificaciones o modelos matemáticos (Alfano, Chiancarella et al. 2006, C. Hall, Hoff 2007, C. Hall, Hamilton et al. 2011). Al llegar a esta escala del conocimiento encontramos que la investigación se empieza a orientar hacia la rama de la patología en edificación, viendo el fenómeno del movimiento del agua en el muro desde el punto de vista de la lesión. De esta forma, la caracterización del movimiento del agua, y especialmente su evaporación, pasa de ser un fenómeno de estudio que se debe caracterizar y entender a ser una lesión patológica a resolver (Rirsch 2010, Guimarães, Delgado et al. 2012, Guimarães, Delgado et al. 2016, M. I. M. Torres, de Freitas 2007, I. Torres, Freitas 2010, Freitas, Guimaraes et al. 2011, I. Torres 2018, Alfano, Chiancarella et al. 2006).

Por último, los trabajos que estudian el ambiente, generalmente se preocupan de cuestiones de confort o de control ambiental para la conservación de bienes muebles.

El número de trabajos dedicados al control ambiental con la intención de la preservación de la envolvente es mucho más reducido, aunque cada vez es mayor, por la preocupación en la conservación del patrimonio que ha venido fomentada por las políticas en conservación preventiva.

En la confluencia entre aquellos que se decidan a la caracterización del fenómeno de ascenso de humedad en los muros y evaporación en relación con el ambiente, y aquellos que estudian la relación de la envolvente con el ambiente del edificio, el número de publicaciones se reduce considerablemente. Solo existen unos pocos trabajos que estudien el fenómeno de evaporación y disipación en relación a una visión global que abarque ambiente y sistema construido. Precisamente es en este punto, entre el conocimiento de la evaporación desde el sistema constructivo al ambiente, y el movimiento de ese aire en el edificio, donde se sitúa este trabajo de investigación. Se busca, desde una perspectiva global, entender el fenómeno de evaporación, desde el punto de vista del edificio, lo que se ha optado por definir como “comportamiento evaporativo del edificio histórico”.

3.1.2 El papel de la monitorización higrotérmica en la caracterización del ambiente interior del edificio histórico.

Respecto a la monitorización, ya (Visco, et al., 2012) planteaban que *“Muchos de los artículos sobre estudios microclimáticos en ambientes interiores, especialmente en el campo de la conservación del patrimonio cultural, podrían discutirse de manera crítica, ya que no establecen el tipo, número o posición de los sensores utilizados. A menudo, el diseño experimental, el resultado y la validación del instrumento no se describen. Generalmente se aplican pocos sensores, o solo uno, y obtienen series temporales que luego analizan mediante gráficos univariados, pero hay relación entre la temperatura y la humedad, por lo que es necesario un enfoque multivariado”*.

Esto sigue siendo la tendencia en muchos de los trabajos científicos desarrollados hasta la fecha, a pesar de los esfuerzos por establecer unos estándares que se han llevado a cabo en los últimos años (Camuffo 2018). En el campo del control ambiental de museos, por ejemplo, los criterios para la monitorización están más claros, pues, como se ha explicado en el apartado 2.3 *“Las técnicas de monitorización higrotérmica”*, del capítulo 2 *“Antecedentes y estado de la cuestión”* existen normas que han estandarizado los valores de temperatura y humedad adecuados que se deben encontrar en estos espacios. En el caso de sistemas de calefacción, existen también normas y recomendaciones, como la norma UNE-EN 15759-1 Conservación del patrimonio cultural. Clima interior. Recomendaciones para la calefacción de iglesias, capillas y otros lugares de culto.

También existe normativa a nivel estatal que recoge el instrumental que se debe usar para el estudio de los parámetros ambientales (temperatura y humedad relativa) (UNE-EN 15758 2011, UNE-EN 16242 2014) y algunas recomendaciones. Encontramos

también guías de recomendaciones del uso de la instrumentación, como la del Instituto del Patrimonio Cultural de España (Herraez, de Salamanca et al. 2014). A pesar de todo, se puede ver en la literatura científica que la metodología de trabajo es diversa dependiendo de los objetivos particulares de cada investigador. Esto viene motivado por la falta de definición que tienen las normativas en algunos aspectos, antes comentados en el capítulo 2. Todo ello deriva en que no exista un método de monitorización que, independientemente del caso de estudio, ofrezca ciertas pautas metodológicas estandarizadas. Si se quiere comparar los datos obtenidos por unos investigadores y otros, no siempre sabemos si los resultados son comparables, pues los criterios son dispares. De hecho, las investigaciones más recientes siguen apostando por la necesidad de estandarizar las mediciones (Camuffo 2018).

Como ya se explicaba en el capítulo 2, en este trabajo se ha detectado que el uso de las técnicas de monitorización higrotérmica se ha extendido en tres ámbitos:

a) *El control ambiental de museos*: Dentro de este grupo, todos los trabajos científicos tienen como objetivo principal la salvaguarda de los bienes muebles, por tanto, dentro de este conjunto, tan solo una parte estudian el impacto de los sistemas de control ambiental sobre el propio edificio (La Gennusa, Rizzo et al. 2005, Luciani 2013, Fabbri, Pretelli 2014).

b) *El estudio de sistemas que aseguren la eficiencia energética*: dentro de este grupo, la mayoría de trabajos tienen como objetivo el confort térmico interior para los usuarios del edificio, muchas veces sin criterios de conservación del inmueble, o con un análisis muy escueto del impacto de los sistemas de acondicionamiento ambiental pueden suponer sobre este tipo de edificios (Carbonara 2015). Aunque existe un conjunto de trabajos que estudia la relación de la calefacción en iglesias con el deterioro de la envolvente y los bienes muebles.

De estos dos primeros grupos, se puede extraer un conjunto de trabajos que relaciona la envolvente con el ambiente, pero siempre condicionado a la existencia de los sistemas de climatización, por tanto, ninguno de estos trabajos analiza el ambiente del edificio con objeto de caracterizarlo sin sistemas de calefacción y en relación con el clima exterior, que es el que, de manera natural induce las fluctuaciones a través de la envolvente. Esto lleva a reducir el número de investigaciones que pueden tener relación con el estudio del comportamiento evaporativo del edificio a un último conjunto de trabajos:

c) *El análisis de la relación del ambiente del edificio con el deterioro*: El conjunto de trabajos que monitorizan, con objeto de estudiar la relación del ambiente del edificio con la envolvente, lo hacen sobretodo orientados hacia el estudio del deterioro (humedad en muros, condensaciones, sales higroscópicas, etc.) (Camuffo, Bertolin 2012, Vecchiattini 2018). Este grupo de trabajos, es el que ahonda más en el fenómeno de evaporación pues se trata, en muchos casos, de trabajos de grupos de investigación que

vienen heredando la línea de aquellos que fueron pioneros en establecer las teorías del movimiento del agua en los muros. La ventaja de estos trabajos, es que limitan el uso de la monitorización al seguimiento de las lesiones encontradas en el edificio. En la inmensa mayoría de los casos, no hay un estudio global de la higrrotermia del edificio que acompañe al estudio de la lesión. Y, en los trabajos en que se analiza el ambiente del edificio se hace de manera muy superficial, lo cual es lógico en cierto modo, porque no es el objeto principal de estudio. No obstante, esta tesis defiende la necesidad de una perspectiva global, pues, como se verá en los resultados de los estudios llevados a cabo en este trabajo, el análisis completo del edificio da lugar a la comprensión del fenómeno en su conjunto, viendo que, ciertos comportamientos desiguales dentro del mismo edificio, tienen una razón de conjunto detrás.

3.1.3 Los sistemas de simulación por ordenador como herramienta para el cálculo y la evaluación del comportamiento evaporativo del edificio histórico.

Esta herramienta, que se ha desarrollado en paralelo a los sistemas de monitorización, ha supuesto un gran avance en la investigación, tanto de la envolvente de los edificios, como del ambiente interior de los mismos. La posibilidad de calcular la transferencia de calor y humedad a través de la envolvente en combinación con el ambiente del edificio aparece como una herramienta de gran utilidad para este trabajo de investigación, pues permite simular de manera conjunta la influencia de los materiales en las fluctuaciones interior-exterior de la envolvente, condicionadas por el clima y la morfología del edificio.

Por ello, se ha analizado en el capítulo 2 los antecedentes que existen en su aplicación en el campo del patrimonio arquitectónico. Como se ha podido ver, su uso está poco extendido. Hasta la fecha, la mayoría de los trabajos que emplean técnicas de simulación se pueden agrupar en tres vías. En ninguno de los casos en que se ha usado simulación se realiza un estudio completo que abarque el cálculo de transferencias a través de la envolvente con el estudio del ambiente interior.

Se recuerdan a continuación cuáles eran estas tres vías y las diferencias y similitudes con el trabajo que se pretende desarrollar en esta tesis:

- a) *Recreaciones virtuales de edificios históricos para su estudio*: Este conjunto de trabajos, no están, hoy por hoy, en la línea del estudio de los fenómenos de transferencia de agua a través de la envolvente. Aunque gracias a las herramientas computacionales se ha podido estudiar cómo era el funcionamiento de los sistemas pasivos de muchas arquitecturas tradicionales.
- b) *Análisis de la capacidad de ventilación natural de edificios históricos*: La mayor parte de los trabajos que se deciden por el uso de herramientas CFD aplicadas a edificios históricos, lo hacen por la gran ventaja que supone poder modelar los flujos de ventilación del interior del edificio. Esta posibilidad simplifica enormemente las tareas de monitorización de estos edificios. Dentro de este

conjunto de investigaciones, existen tan solo unos pocos que estudien casos en los que no exista calefacción (Albero, Giavarini et al. 2004, D'Agostino, Congedo 2014, D'Agostino, Congedo et al. 2014, Balocco, Grazzini 2009). Estos pocos lo hacen con objeto de relacionar el deterioro de los materiales de la envolvente con la hipótesis de que el deterioro se debe a una inadecuada ventilación, al tratarse de edificios muy masivos y con pocos huecos. Esto resulta de interés para esta investigación, porque uno de los factores de mayor influencia en el fenómeno de evaporación y secado de los muros son los flujos de aire cercanos al entorno de los muros. Pero, la perspectiva que ofrecen estos trabajos es la de la relación deterioro-ambiente, por lo que, rara vez vemos que se trabaje desde una perspectiva global. A pesar de las posibilidades que ofrece el modelado 3D completo del edificio y el análisis mediante CFD, estos trabajos suelen estar enfocados en la averiguación de las causas de un problema concreto, por lo que, no suelen profundizar en el análisis completo del edificio. No es así en estudios sobre edificios de nueva construcción, o de obra reciente, en que el uso de programas de simulación está más extendido. No obstante, dadas las posibilidades que ofrecen estos programas, es cuestión de tiempo que se extienda más su uso en patrimonio, especialmente si tenemos en cuenta que se trata de una herramienta más que puede formar parte de la Conservación Preventiva.

- c) *Transferencia de calor a través de la envolvente*: La mayor parte de los trabajos que emplean herramientas de simulación para estudiar la envolvente, en relación o no con el ambiente del edificio, lo hace simulando solamente la transferencia de calor (Oetelaar, Johnston et al. 2013). Esto se debe a dos factores fundamentales: En primer lugar, el cálculo de los dos factores combinados es reciente. A esto se añade la complejidad de la simulación combinada. Además, sucede como en el caso de la monitorización, el fin de la investigación determina el uso de las técnicas. Por ello, no siempre se recurre a la combinación de calor y humedad. Pero, como han demostrado algunos de los trabajos presentados en el capítulo de antecedentes, aunque calor y temperatura se pueden calcular como variables independientes, la humedad tiene una influencia notable sobre la transferencia de la temperatura.

Esta tesis, considera necesario, explorar las posibilidades del cálculo combinado, dada la existencia de las herramientas necesarias, y la ausencia de trabajos que lo hagan en edificios históricos. Como se verá en el cálculo de los casos de estudio presentados en este trabajo (capítulo 6), si se comparan los resultados de la simulación de un edificio con los datos medidos mediante monitorización, hay una gran diferencia en los datos, si no se ha empleado en el cálculo la transferencia de humedad y calor combinada en la simulación. Esto corrobora la necesidad de un apropiado uso de la herramienta, especialmente en el tipo de

edificios que aquí se estudian, que carecen de sistemas de acondicionamiento ambiental activos.

3.2 HIPÓTESIS

La hipótesis que se plantea en esta investigación es que, se puede establecer una metodología de trabajo que combine las técnicas de monitorización higrotérmica, con las herramientas de simulación, para el estudio completo del comportamiento evaporativo del edificio histórico. Se cree, que no solo se puede calcular la evaporación de los muros, sino poner en relación de esta evaporación con el comportamiento higrotérmico del edificio en su conjunto, implicando los parámetros de:

- Características de los materiales, mediante caracterización y ensayos.
- Características de los sistemas constructivos y su incidencia sobre el fenómeno.
- Características del microclima del lugar y el ambiente interior del edificio.

3.3 OBJETIVOS

3.3.1 Objetivo general

El objetivo general de la presente investigación es la propuesta de un método de trabajo que sirva para determinar el comportamiento evaporativo de los edificios históricos, combinando, tanto los parámetros de los materiales, como la instrumentación in-situ (basada en la monitorización higrotérmica) y modelos de simulación por ordenador.

3.3.2 Objetivos específicos

Dado que el objetivo general pasa por la elaboración de un método que combine varios niveles de conocimiento, y distintos tipos de herramientas, es necesario establecer tres puntos concretos, o sub-objetivos, subordinados al general.

1. Establecer un protocolo de monitorización higrotérmica adecuado para trabajar en este tipo de edificios.
2. Adaptar el programa de simulación, para utilizarlo en este tipo de edificios.
3. Combinar las teorías de cálculo sobre la dinámica de la evaporación del muro con los datos de monitorización y la simulación por ordenador.

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1 EL MOVIMIENTO DEL AGUA EN LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

- 4.1.1. Conceptos generales
- 4.1.2. La sortividad
- 4.1.3. Los ciclos de condensación-evaporación en el interior de los materiales
- 4.1.4. La evaporación y secado del agua en los materiales porosos

4.2 EL COMPORTAMIENTO DEL AGUA EN LOS MUROS HISTÓRICOS

- 4.2.1. El fenómeno del ascenso capilar o “Rising damp”
- 4.2.2. Desarrollo de Sharp Front Theory
- 4.2.3. Aclaraciones sobre la sorptividad en muros
- 4.2.4. El potencial de evaporación (PE) en el cálculo de la evaporación de los muros

4.3 COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO DE LOS EDIFICIOS HISTÓRICO

- 4.3.1. El cálculo de la evaporación potencial (PE) según las ecuaciones de Penman

4.4 FUNDAMENTOS DEL CLIMA Y LA RELACIÓN CON LA VENTILACIÓN NATURAL EN EDIFICIOS HISTÓRICOS

- 4.4.1. Conceptos generales
- 4.4.2. Movimiento del aire en el entorno del edificio
 - a) *Corrección por efecto de la rugosidad*
 - b) *Corrección por altura*
 - c) *Determinación de las zonas de turbulencia*
- 4.4.3. Conceptos para el cálculo de la ventilación natural en el interior del edificio
 - a) *Ventilación debida a la presión del viento*
 - b) *Ventilación debida a diferencias térmicas*
- 4.4.4. Fundamentos de la ventilación natural calculada con Design Builder

4.5 FUNDAMENTOS PARA LA SIMULACIÓN AMBIENTAL POR ORDENADOR

- 4.5.1. Estudio del movimiento del aire mediante programas CFD
 - a) *Conceptos previos: Flujo laminar y flujo turbulento*
 - b) *Fundamentos de cálculo de los programas CFD*
 - c) *La definición de la cuadrícula de cálculo*
 - d) *Modelos zonales y multizonales*
 - e) *Fundamentos en Design Builder para la simulación*
- 4.5.2. Estudio de la transferencia de calor y humedad a través de la envolvente
 - a) *Aspectos generales*
 - b) *Fundamentos en Design Builder para el cálculo de HAM*

4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Introducción

En este capítulo se detallan los principios físicos en los que se apoyan las investigaciones tratadas en el capítulo 2 “Antecedentes y estado de la cuestión” y que, a su vez, constituyen el marco teórico fundamental para la realización de los cálculos que se desarrollan en esta tesis. El objetivo es que exista un capítulo específico que recoja las fórmulas empleadas a lo largo de la investigación, acompañadas por una breve explicación de su desarrollo, de manera que sea más fácil el seguimiento de los cálculos.

El capítulo se estructura en cuatro apartados. En primer lugar, se tratan los fenómenos del movimiento del agua en los materiales de construcción (apartado 4.1). Estos principios dan lugar a las teorías del movimiento del agua en los sistemas constructivos, en este caso, en el muro histórico (apartado 4.2). A continuación, se tratan los conceptos fundamentales sobre el ambiente del edificio (apartado 4.3)¹. En el apartado siguiente se definen los parámetros esenciales sobre el clima y su relación con la ventilación natural del edificio (apartado 4.4). Por último, se tratan los principios esenciales sobre la simulación por ordenador (apartado 4.5).

4.1 EL MOVIMIENTO DEL AGUA EN LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

4.1.1 Conceptos generales

Se puede definir la relación del agua con un material poroso en función del estado en que se encuentre el agua (líquido o gaseoso). El estado del agua supondrá un modo determinado de interactuar con el material y, por tanto, se rige por diferentes leyes físicas.

Kumaran et. al. clasificaron el transporte de agua en los materiales de construcción mediante la fase en que se encuentra el agua, los procesos a los que da lugar y los parámetros de dominio de éstos (Kumaran 1996).

¹ Teniendo en cuenta que el objetivo de este trabajo es el estudio de la evaporación, se va a centrar especialmente la explicación de los conceptos en todo aquello que tenga que ver con este fenómeno concreto.

Figura 14. Transporte de agua en los materiales de edificación (Kumar et. al. 1994)

A continuación, se explican las principales leyes que definen el movimiento del agua dentro de un material, en cada uno de sus estados.

La circulación del agua en modo líquido, si existe presión o carga, se puede definir por medio de la **Ley de Darcy**. Esto es porque, en los materiales de construcción, el sistema poroso por el que circula el agua está formado por conductos pequeños y tortuosos. Esto hace que la velocidad de movimiento del agua sea pequeña, por lo que es más habitual medir el caudal (Martinez Marin 2000).

$$V = \frac{Q}{A} = \kappa \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (1)$$

Donde:

Q	Caudal de agua	[m ³ /s]
A	Área	[m ²]
V	Velocidad del agua	[m/s]
κ	Coefficiente de permeabilidad	

$h_1 - h_2$ Gradiente hidráulico entre dos puntos
 L Longitud [m]

Esta fórmula puede simplificarse de la siguiente manera:

$$V = \kappa i \quad (2)$$

Donde:

i Gradiente hidráulico [m]

La velocidad del líquido en un medio poroso es la velocidad aparente (V_R), ya que en el interior del medio existen granos y huecos.

$$V_R = \frac{V}{n} \quad (3)$$

Donde, el índice de poros (n) es:

$$n = \frac{\text{volumen de poros}}{\text{volumen total}} \quad (4)$$

La ley de Darcy es aplicable cuando el movimiento es laminar, que corresponde a valores del número de Reynolds² del orden de 1.

$$R = \frac{Vd}{\nu} \quad (5)$$

Donde:

d Tamaño medio del material que forma el sistema poroso [m]

En ausencia de presión, el agua se mueve por succión, que es un mecanismo de atracción superficial entre sólido y líquido. Es el fenómeno habitual por el que los materiales de construcción absorben agua del medio en el que se encuentran en contacto (C. Hall, Hoff 2009). Este fenómeno es especialmente importante en los edificios históricos, ya que carecen de sistemas de impermeabilización frente al agua del terreno, estando su cimentación en contacto directo con las posibles fuentes de agua.

Para que se produzca la succión, el sólido en contacto con el líquido –en este caso agua– debe vencer la tensión superficial del líquido. En términos generales, el aumento capilar del agua es un fenómeno debido a la prevalencia de las fuerzas de adhesión en

² El número de Reynolds viene a definir la relación entre las fuerzas intersticiales de un fluido (viscosidad, densidad, velocidad, etc). Se trata de una expresión adimensional. Determina si un fluido es laminar, si tiene un número de Reynolds pequeño, o si es turbulento, con un número de Reynolds elevado.

comparación con las fuerzas de cohesión de esta. Esto fue estudiado primero por Laplace, y más tarde por Jurin.

La **Ley de Jurin**, define este fenómeno de ascenso capilar en un poro ideal. Se trata de una simplificación en la que el capilar es un cilindro perfecto. En el caso de un material de construcción los capilares forman una red compleja y tortuosa. Esto ha llevado a que hayan aparecido trabajos de investigación que han buscado definir el fenómeno de la succión capilar y la difusión del agua líquida por la red porosa de los materiales de manera empírica. Algunas de estas investigaciones que derivan en la teoría de ascenso capilar en estructuras más complejas como los muros históricos, que se explicará en los apartados 4.2.1 y 4.2.2 (C. Hall 1977) (Gummerson, Hall et al. 1980).

La ley de Jurin describe la relación entre el tamaño del poro y la altura de ascenso capilar (6). En el caso del agua, se ha demostrado que cuando el tamaño del poro es de 0,1mm, el aumento es de 14cm, pero cuando el tamaño es de 0,01mm, el aumento puede ser de 1,4m. El tamaño del poro en ladrillos y mortero puede ser tan pequeño como 0,001mm, por lo que existe un gran potencial de humedad ascendente (Raimondo, Dondi et al. 2009).

$$h = \frac{2\gamma \cos \beta}{\rho g r} \quad (6)$$

Donde:

γ	Tensión superficial	[N/m]
β	Ángulo de contacto	°
r	Radio del capilar	mm
ρ	Densidad del líquido	kg/m ³
g	Aceleración debida a la gravedad	m/s ²

Para los materiales como ladrillo, mortero o piedra, $\beta \approx 0^\circ$, de forma que la ecuación anterior (6) se puede simplificar como:

$$h \approx \frac{15}{r} \quad (7)^3$$

Otro de los parámetros físicos que se deben considerar es la fricción experimentada por el ascenso del líquido en el poro. Esta se define por medio de la **Ley de Poiseuille**, mediante el cálculo del flujo laminar estacionario del líquido (Φ_v).

³ Según los autores, r en [μm], y h en [m].

$$\Phi_v = \frac{dV_l}{dt} = \frac{(P_1 - P_2)(\pi r^4)}{8L\eta} \quad (8)$$

Donde:

V_l	Volumen del líquido	[m ³]
t	Tiempo	[s]
$(P_1 - P_2)$	Gradiente de presión	[Pa]
η	Coeficiente de viscosidad	[Ns/m ²]

El agua tiene gran capacidad para desplazarse por los capilares de materiales como el ladrillo, el mortero y la piedra. Esta capacidad provoca el aumento de agua en la estructura construida. Partiendo de estas leyes básicas, se desarrollan estudios encaminados a entender estos procesos de transporte líquido. Se trata de procesos muy complejos, por lo que existen múltiples estudios que exploran el fenómeno desde diferentes ángulos. En.(Gummerson, Hall et al. 1980) se describen qué ocurren durante el aumento capilar de agua, y se verifican de manera experimental, poniendo como caso un ladrillo que, en un principio parte de un estado seco.

4.1.2 La sortividad

Esta fórmula representa la cinética básica del proceso de succión: el agua absorbida por un sólido poroso por unidad de superficie aumenta la raíz cuadrada del tiempo transcurrido. Los principios de sortividad se han aplicado ampliamente a diferentes materiales porosos las últimas dos décadas, especialmente en hormigón y mampostería (Anand, Vasudevan et al. 2003), (Wilson, Hoff et al. 1995b), (Wilson, Hoff et al. 1995a), (M. Hall, Djerbib 2004), (Smiles 1998). (Raimondo, Dondi et al. 2007), (Vos, Tammes 1969). Gummerson et al. (1980) mostró que la sortividad puede describir con precisión el rendimiento de absorción de agua del hormigón y la mampostería. Gummerson et al. sugirieron, aunque no se demuestra en su trabajo, que existe cierta dependencia del avance del menisco en un capilar cilíndrico en su radio. Kelham (1988), Hall (1989), Hooton et al. (1993) y Hooton y El-Dieb (1994) examinaron la sortividad del hormigón y demostraron que la sortividad se correlacionaba muy bien con mediciones de permeabilidad al agua en hormigón. Groot (1991) mostró que existía una relación lineal entre la raíz cuadrada del tiempo y la tasa de absorción de agua de ladrillos. Shaker et al. (1997) mostró la sortividad para poder representar la durabilidad del hormigón modificado con látex (LMC). A pesar de su amplia aceptación como una medida reproducible con una base teórica confiable, sortividad aún no se ha propuesto como una medida para la absorción de mampostería como especificación estandarizada (Reda Taha, et al., 2001).

Por tanto, la sortividad resulta un parámetro característico de la relación del agua con el material poroso. Esta propiedad del material describe la tendencia de este a absorber y transmitir agua a través de su red porosa, por succión capilar. Su cálculo se realiza de manera sencilla por medio de un ensayo de absorción capilar en el laboratorio. Esta ecuación (18) se empleará más adelante durante el cálculo del proceso de succión-evaporación de los muros de los casos de estudio analizados en este trabajo. En este proceso, es fundamental conocer esta propiedad del material, como se explicará en los apartados siguientes.

Cualquier flujo saturado se rige por la siguiente ecuación:

$$\Psi_t = \Psi + Z \quad (9)$$

Donde:

Ψ_t	Potencial hidráulico total	Pa
Ψ	Potencial hídrico no gravitacional	Pa
Z	Potencial gravitacional	Pa

Conociendo que la conductividad hidráulica es:

$$u = K \nabla \Psi_t \quad (10)$$

Omitiendo el efecto del potencial gravitacional, se puede reescribir la ecuación como:

$$u = -K \nabla \Psi \quad (11)$$

La forma extendida de la ley de Darcy para flujo no saturado considerando que el contenido en humedad depende de la conductividad hidráulica $K(\theta_w)$, nos ofrece la siguiente relación:

$$U = -K(\theta_w) \nabla \quad (12)$$

La difusividad hidráulica:

$$D(\theta_w) = K(\theta_w) \left(\frac{d\Psi(\theta_w)}{d\theta_w} \right) \quad (13)$$

Simplificando la ecuación de Darcy se obtiene:

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-D(\theta_w) \frac{\partial \theta_w}{\partial x} \right) \quad (14)$$

La ecuación se resuelve utilizando la transformación de Boltzmann (Reda Taha, El-Dieb et al. 2001)

$$x = \phi(\theta_w) t^{-1/2} \quad (15)$$

La ecuación diferencial del flujo no saturado se convierte en función del tiempo $\phi(\theta_w)$. El desarrollo a dicha ecuación diferencial, da como resultado (Reda Taha, El-Dieb et al. 2001):

$$i = t^{1/2} \int_{\theta_i}^{\theta_1} \phi(\theta_w) d\theta_w \quad (16)$$

Donde i es el agua absorbida acumulada por unidad de volumen.

$$i = \frac{\Delta M}{A \rho_{rh}} \quad (17)$$

Donde:

ρ_{rh}	Densidad del agua	
ΔM	Incremento de la masa de agua absorbida	[g]
A	Área expuesta a la absorción de agua	[mm ²]

Definiendo θ_1 como el nivel de saturación y θ_i como el nivel en que la muestra de material seco –mediante secado en estufa-, el valor de la integral se puede derivar de manera simple para un tiempo cualquiera t . Es el resultado de esta integral la que se ha definido como sortividad:

$$i = S t^{1/2} \quad (18)$$

Donde:

i	Cantidad acumulativa de agua absorbida por la superficie expuesta al agua	[g/mm ²]
$t^{1/2}$	es el tiempo transcurrido	[min]

Esta fórmula termina por derivar en la ecuación de Lucas-Washburn, que describe el movimiento horizontal del menisco en un sistema capilar, y puede aplicarse al movimiento vertical en materiales de construcción en las primeras etapas de ascenso capilar, cuando no se considera la fuerza de la gravedad. El fenómeno que describe esta ecuación es lo que se suele encontrar en todos los casos, con la excepción de materiales que presentan una estructura capilar marcadamente heterogénea (Raimondo, Dondi et al. 2009).

4.1.3 Los ciclos de condensación – evaporación en el interior de los materiales

En este apartado se recoge la teoría fundamental sobre los ciclos de condensación-evaporación que se producen en el interior de los materiales porosos de construcción. Se ha considerado importante exponer esta parte de la dinámica del agua en los materiales. Aunque no es el objetivo principal de la tesis el estudio de lo que sucede en el interior de los muros, es importante dejar reflejadas las nociones más elementales, ya que el movimiento del agua en el interior de los materiales –y posteriormente de los muros- forma parte del conjunto de fenómenos que dan lugar al proceso que sí es objeto

de estudio: la evaporación del agua del muro al exterior del material, y la relación de ésta con el ambiente del edificio.

El comportamiento de un cuerpo poroso frente a un ciclo de condensación- evaporación es un fenómeno perfectamente conocido. Suponiendo un cuerpo poroso completamente seco sufre un ciclo de adsorción al aumentar la presión relativa de vapor de agua. Se produce una adsorción isotérmica característica seguida por una desorción isotérmica. Ambos flujos no coinciden, produciendo un bucle de histéresis.

Figura 15. El eje de ordenadas indica la cantidad de agua adsorbida (A) frente a la humedad relativa (RH) para el caso más común de adsorción-desorción isotérmico. La curva (a) muestra el proceso de adsorción, la curva (b) muestra el proceso de desorción. En el centro de la gráfica se puede ver cómo se produce una diferencia en el comportamiento de ambas partes del ciclo. (Brunauer, Emmet y Teller) mencionados en (Camuffo, D. 1982)

Según explica Camuffo (1982) se podrían dividir el proceso en tres fases:

- Un primer momento correspondiente con los valores más bajos de humedad relativa y adsorción. La adsorción tiene lugar en una monocapa en la superficie de los poros y la desorción puede ocurrir, por lo que es un proceso reversible.
- Un segundo momento, cuando la primera monocapa está completa, comienza el bucle de histéresis. La condensación provoca el crecimiento de múltiples capas, de esta forma el llenado de los poros se empieza a producir de manera progresiva hasta que todos están llenos.
- Por último, una pequeña franja que termina en el punto de saturación. Cuando el sistema poroso está completo, el proceso de absorción se detiene.

Para entender el fenómeno de condensación, se pueden aplicar algunos conceptos de la ciencia del clima. **La ecuación de Kelvin**, la misma ecuación que explica la formación de gotas en la atmósfera, explica la condensación en los poros de un material. Su extrapolación a la ciencia de los materiales supone tener en cuenta algunos parámetros diferentes a su aplicación en el ámbito del clima.

En la atmósfera, el vapor de agua se vuelve saturado a humedad relativa del 100%, cuando la temperatura del aire – y por lo tanto la humedad dispersa en el aire- alcanza el punto de rocío. Sin embargo, es útil distinguir entre la formación de gotas en la atmósfera libre y la condensación que se pueda producir en una superficie, o dentro de los poros de un material. (Camuffo, 2014)

La tensión de vapor en equilibrio varía con la curvatura -concavidad o convexidad- de la superficie líquida. La tensión de vapor es mayor con el aumento de la convexidad del líquido. Con el aumento de la concavidad, la tensión de vapor es menor.

Para una superficie cóncava, el radio de curvatura del menisco de agua en el poro es negativo $r < 0$, el centro de la curvatura está fuera del líquido, se trata de un poro que se puede mojar. En el caso de una superficie del líquido convexa, el radio de curvatura del líquido es positivo $r > 0$, el centro de la curvatura está en el líquido, se trata de un poro que no se puede mojar.

Figura 16. (a) Menisco convexo en un poro, con radio positivo. (b) Menisco cóncavo con radio de curvatura negativo (Camuffo 1982). Esquema redibujado por la autora de esta tesis.

Por tanto, podemos relacionar la presión de vapor en un poro con el radio de curvatura de un líquido. La presión de vapor en equilibrio con el radio de curvatura r de un menisco de líquido dado se expresa en función de ese radio (r). Esta relación se calcula mediante la ecuación de Kelvin.

$$\ln(p - p_0) = \frac{-2\gamma V \cos\beta}{rRT} \quad (19)$$

Donde:

γ	Tensión superficial ⁽⁴⁾	[erg/cm ²]
V	Volumen molar del agua	[cm ³]

⁴ Suponiendo agua pura en contacto con aire, en un rango de temperaturas del agua de entre 0 y 100°C la tensión superficial es $\gamma = 75.6 \text{ erg cm}^{-2}$ con $T=273\text{K}$ y $\gamma = 72.2 \text{ erg cm}^{-2}$ con $T= 293\text{K}$ (Camuffo 2014).

β	Ángulo de contacto entre el menisco de agua líquida y la parte sumergida del capilar	°
r	Radio del poro	[μm]
R	Constante de los gases	
T	Temperatura	[K]

Es importante tener en cuenta que se trata de una ecuación que solamente es aplicable en un supuesto de agua pura. Cuando el material contiene sales solubles, el comportamiento del agua en su sistema poroso se ve alterado. En este caso, es necesario añadir un término que lo contemple en la ecuación anterior.

$$-\nu\phi m' M / m M' \quad (20)$$

Donde:

ν	Número de iones en los cuales una molécula de sal se disocia en el agua
ϕ	Función del potencial termodinámico
M	Peso molecular del agua pura; 18,01528 g/mol
M'	Peso molecular de la sal
m	Masa del agua pura
m'	Masa de la sal depositada

En este caso, para el desarrollo de estas fórmulas, se tiene en cuenta solamente el supuesto de producirse en agua pura. Para calcular el aumento de energía libre durante la condensación, se puede aplicar la relación dV/dS entre los aumentos en el volumen y en la superficie del líquido condensado en los poros.

De esta forma, la ecuación de Kelvin queda descrita del siguiente modo:

$$\frac{dV}{dA} = \frac{-\gamma V \cos \beta}{RT \ln(p - p_0)} \quad (21)$$

Donde:

$\frac{dV}{dA}$	Tasa entre los aumentos en el volumen y en la superficie del líquido condensado en los poros
-----------------	--

Se puede aplicar esta fórmula para calcular las condiciones de equilibrio para cualquier forma de menisco, determinada por geometrías particulares de poros en los muros.

Además, si el sistema está en equilibrio termodinámico con el aire que lo rodea, entonces $100(p - p_0)$ es la humedad relativa (HR) del aire, así las ecuaciones (19) y (21) pueden escribirse del siguiente modo:

$$HR = 100 \exp\left(-\frac{2\gamma V \cos \beta}{rRT}\right) \quad (22)$$

$$HR = 100 \exp\left(-\frac{\gamma V \cos\beta \left(\frac{dS}{dA}\right)}{RT}\right) \quad (23)$$

Según explica Camuffo, el llenado de los poros durante el aumento de la humedad relativa (HR), no es simétrico a la fase de desorción durante el descenso de HR. Esto se debe a la histéresis. el proceso se vuelve irreversible al “activarse” un valor de humedad relativa que Camuffo denomina como valor crítico.

El fenómeno se ha tratado de relacionar con diferentes factores desde las primeras investigaciones llevadas a cabo sobre el movimiento del agua en los poros de los materiales de una manera más bien cualitativa, hasta la actualidad, donde los actuales intentos tratan de definirlo cuantitativamente, por medio de relaciones matemáticas más complejas (Johannesson, Janz 2009, Johannesson, Nyman 2010, Zhang, Thiery et al. 2015).

Camuffo simplifica el problema del agua en el interior del material, exponiéndolo de una manera clara y que resulta ilustrativa. Se presentan dos casos diferentes: una cavidad con forma de semiesfera y otra casi completamente esférica. Según se describe a continuación, el agua se comporta de forma diferente en cada uno de los casos.

Figura 17. Suponiendo una cavidad semiesférica, con un radio r_s enfrentada con otra cavidad mayor o con el ambiente exterior, la cavidad pequeña se mantendrá llena excepto por una pequeña capa de moléculas de agua, hasta que la humedad relativa alcance el valor crítico RH_s .

Figura 18. En el caso de una cavidad esférica, con radio r_s , abierta al ambiente a través de un pequeño agujero de radio r_0 , la cavidad se mantendrá vacía hasta que la humedad relativa HR alcance el valor crítico HR_s y se llene completamente sin aumentar más la humedad relativa. En este caso la condensación ocurre causando una reducción del radio r del menisco, que está en equilibrio con los valores más bajos de humedad relativa. Del mismo modo, durante el descenso de la humedad relativa, la cavidad se mantiene llena y solo se puede vaciar cuando la humedad relativa HR alcance el valor de HR_0 dada por la ecuación

(22 para $r=r_0$. Dado que, en ese momento, el menisco de radio r está en equilibrio con HR , más que con HR_0 , el último valor alcanzado constituye otra vez un valor de límite crítico inestable del sistema y desencadena la evaporación en la cavidad.

En el caso de tener un poro esférico conectado con el ambiente a través de un capilar, Camuffo distingue entre tres posibles casos, dependiendo del radio del capilar r_c y el de la esfera r_s :

- En caso de que $2r_c > r_s$, la condensación se desencadena primero en la esfera con HR_s y después en el capilar con HR_c . La evaporación comienza en el final del capilar, donde se encuentra abierto en contacto con el ambiente, en condiciones de equilibrio. Cuando todo el capilar se encuentra completamente vacío, la misma humedad relativa HR_e crítica del capilar –en la que se produce la evaporación– sirve para que el agua contenida en el poro evapore.
- Cuando se produce $2r_c = r_s$ la condensación se desencadena con un valor $HR_s = HR_c$, y ocurre de manera homogénea en las paredes de la esfera y del capilar hasta que el sistema está lleno. La evaporación ocurre como en el caso anterior, con HR_e .
- Un tercer caso es $2r_c < r_s$, la condensación se desencadena con HR_c dentro del capilar, de manera que la cavidad esférica se mantiene aislada del ambiente exterior y llena de aire. Por tanto, cuando se alcanza HR_s , o una humedad relativa superior, el aire contenido en la esfera impide que se llene de agua, hasta que la reducción del volumen hace que la presión de aire atrapado en el poro detenga el proceso. La evaporación sucede cuando se alcanza HR_e , empezando como antes por la base del capilar que comunica con el exterior.

a

b

c

Si consideramos ahora dos poros conectados entre ellos, podemos suponer las siguientes situaciones:

- d) La condensación se lleva a cabo en dos pasos motivado por el tamaño de los poros y la evaporación por el tamaño de los orificios que los conectan. Cuando los poros son iguales, la condensación ocurre de manera simultánea en las dos esferas por la HRs. La evaporación se produce primero en el poro externo y posteriormente en el interno.
- e) Cuando tenemos un poro mayor unido a otro menor, la condensación se produce en el poro de menor tamaño aislando al mayor del ambiente exterior al llenarse de agua.

Además, pueden producirse migraciones de agua en los cuerpos porosos inducidas por las mismas variaciones de temperatura y presión que provocan los ciclos de condensación- evaporación. Cuando las cavidades internas se mantienen llenas de aire y aisladas del entorno exterior, un aumento de la temperatura puede causar que la presión del aire en los poros del interior expulse el agua fuera del poro pequeño o del capilar, es decir, según explica Camuffo, podría producirse un vaciado que no fuese por evaporación.

Este último fenómeno que describe este autor resulta interesante, dado que supone la combinación de transporte líquido y evaporación superficial, lo que es responsable de eflorescencias en muchos edificios históricos.

4.1.4 La evaporación y secado del agua en los materiales porosos

En este apartado se detalla la teoría fundamental de la evaporación del agua en los materiales porosos. Al producirse la evaporación, el material se seca y el agua contenida en el interior pasa en forma de vapor al ambiente que lo rodea. Este apartado es importante para esta investigación, pues sienta las bases del funcionamiento de la evaporación, que posteriormente se complementará a escala de sistema constructivo (muro), para relacionarlo con el ambiente del edificio. Es precisamente en esta “interfaz” entre el material y el ambiente donde se centra esta investigación, para relacionar las transferencias que aquí se producen, y tratar de comprender el comportamiento evaporativo global del edificio histórico.

En términos generales, la evaporación es un fenómeno que involucra la transferencia de calor y masa con flujos de calor latente relacionados con el cambio de fase de líquido a gas necesario para que el agua abandone el material (Brüggerhoff, Wange et al. 2001).

La evaporación en un material poroso viene determinada por las condiciones ambientales que rodean a dicho material, las características del mismo y las propiedades del líquido, que en este caso es agua. Hay que tener en cuenta también que, en algunos casos, los materiales pueden encontrarse contaminados por la presencia de sales que alteran la capacidad de evaporación y secado del elemento. Entender el fenómeno de la evaporación es fundamental, dado que se trata de la única manera que tiene el agua que se encuentra en el material de abandonar el cuerpo (M. R. Hall, Allison 2010b).

El secado -y consiguiente evaporación- pasa por dos fases. La primera de ellas, condicionada por las características del ambiente en el que se encuentre el material. La segunda, en la que se produce el descenso de la velocidad de secado, involucra las propiedades del material (Hall, et al., 1984). La segunda etapa de secado representa *“el equilibrio hídrico entre el ambiente y el material”* con una menor repercusión en el proceso de evaporación. Del desarrollo matemático de la fase de secado que realizan combinando las ecuaciones de Darcy (para el estado II) con la segunda Ley de Fick (para el estado I), se deduce la siguiente ecuación (24):

$$\ln(\bar{r}_1/H) = \ln A' - \frac{C}{T} + \frac{1}{2} \ln u_* \quad (24)$$

Donde:

$\frac{C}{T}$	Término calor	
A'	Geometría de la muestra, que se traduce en $A'=A/l^{1/2}$	
H	Factor humedad, que se traduce en $H=(1-HR/100)$	
$\bar{r}_1$	Tasa de secado en el estado 1	
u_*	Velocidad de flujo laminar de aire	m/s

Esta ecuación demuestra que, en el proceso de secado, y por tanto de evaporación, los parámetros que influyen son: la temperatura, la humedad y la velocidad del aire.

Hall y Hoff describen el proceso de flujo a través del material mediante la ecuación de Darcy para el flujo insaturado (Estado II de secado), y el paso al ambiente en fase vapor, por medio de la segunda ley de Fick (Estado I de secado).

Hall y Hoff realizaron una serie de ensayos en los que sometieron varias probetas de materiales porosos, con distintos porcentajes de porosidad, a saturación y posteriormente a secado. En las gráficas se observaba una curva que presenta dos momentos de secado (Figura 19). Se observa con claridad **la primera etapa de secado**

en la que la velocidad de secado es igual a la tasa de evaporación de una superficie de agua libre bajo las mismas condiciones⁵.

Figura 19. Secado de tres tipos de ladrillos cerámicos, a temperatura de bulbo seco $=23,5^{\circ}\text{C}$, con una humedad relativa $HR=55\%$. La evaporación acumulativa (i_d) de ladrillos inicialmente saturados al vacío, con secado del agua a través de todas las caras. Contenido máximo de agua en cada caso mostrado con línea discontinua. La curva (a) muestra los resultados para un ladrillo de revestimiento sólido clasificado como no apto para condiciones extremas de exposición. Curvas (b) y (c) muestran los resultados para dos tipos de ladrillo común (C. Hall, Hoff et al. 1984).

Por tanto, parece que la primera fase del secado del material no está influenciada por las propiedades del mismo sino por el ambiente, aceptando que la evaporación se está produciendo en la superficie del material. Las propiedades de secado están controladas por las propiedades de vapor de la sustancia que se evapora, junto con factores ambientales.

La transición entre el estado I y II viene marcada por la pérdida del agua contenida en el material debido a la evaporación. Esto produce un flujo de calor debido a la evaporación(6). Por tanto, considerando un estado estacionario de flujo de calor en el que la evaporación constituye un disipador de calor uniformemente distribuido por la superficie:

$$Q_1 - Q_e = Q_2 \quad (25)$$

Donde:

- Q_e Tasa de calor removido por evaporación
- Q_1 Flujo de calor a través del material
- Q_2 Flujo de calor de la superficie al ambiente

⁵ Según explican los autores, esto se produce en “una amplia gama de materiales” porosos.

Figura 20. Modelo de flujo de calor en estado estacionario. La distribución de la temperatura es: línea superior, no existe evaporación; (1) ligera evaporación; (2) evaporación fuerte (C. Hall, Hoff et al. 1984).

Hall y Hoff identifican la **segunda etapa de secado** cuando se produce un cambio en la curva y el secado comienza a decrecer. Este momento es cuando la tasa de flujo insaturado dentro del sólido poroso limita el secado. En este momento, la evaporación del líquido no saturado está determinado por las propiedades del material.

Al igual que existe un parámetro para la absorción de agua en materiales porosos, como es la sortividad (utilizada en este trabajo para el cálculo de evaporación de los tres casos de estudio, capítulo 6), definen el parámetro contrario R como “desortividad”. De éste dicen que, así como la S era sencilla de medir de forma directa, no está tan claro para la desortividad. Al comienzo de la etapa II, al haber secado el agua inicial que dependía de parámetros conocidos (ambientales y propiedades del líquido) la distribución del contenido de humedad está lejos de ser uniforme. Por tanto, la tasa de secado no se puede esperar que dependa solamente de R , pero puede haber una dependencia entre R y el tiempo de secado si se consideran ciclos largos, a medida que disminuye el contenido de agua no uniforme. El modelo de secado en condiciones isotérmicas toma el potencial hidráulico σ como una variable dependiente del proceso, tanto en la fase del líquido en el medio poroso, como en la fase de vapor. Con esto, σ varía de manera continua desde el interior del sólido al aire que corre distante a la superficie (Figura 21).

Figura 21. Modelo que muestra el secado isotérmico en un material poroso C. Hall, Hoff et al. 1984).

De los ensayos se derivan conclusiones interesantes como que la HR en la primera etapa de secado influye en el mismo, pero en la segunda etapa, el secado es muy similar independientemente de la humedad relativa a la que sea sometido el material. El aumento de la temperatura del material húmedo en 10°C duplica la velocidad de secado. Cuadruplicando la velocidad del aire, se consigue un aumento similar también en la velocidad de secado. La reducción de la HR, aumenta de manera directamente proporcional la velocidad de secado.

4.2 EL COMPORTAMIENTO DEL AGUA EN LOS MUROS HISTÓRICOS

Introducción

La complejidad que adquiere el fenómeno del movimiento del agua cuando se trata de un elemento heterogéneo y compuesto como es el muro histórico conlleva la aparición de nuevos estudios, que parten de las leyes explicadas en el apartado anterior (Ley de Darcy, Ley de Jurin, etc.) y que establecen las teorías que explican el movimiento del agua en este tipo de sistemas constructivos tradicionales.

En este apartado se explican estas teorías, así como las principales variables que deben ser tenidas en cuenta. Estas sientan las bases de las investigaciones que se explican en el capítulo 2 “Estado del arte”.

4.2.1 El fenómeno del ascenso capilar o “Rising damp”

La altura máxima de ascenso capilar es mucho menor en una mampostería que en un capilar ideal como el que se calcula con la Ley de Jurin. Esto se debe a la complejidad que incorpora la tortuosidad de los poros de los materiales, además de la heterogeneidad de la estructura construida. En el caso de edificios históricos, esta heterogeneidad es más que notable.

La altura máxima que alcanza el agua en un muro resulta de la interacción entre la tasa de entrada y la tasa de evaporación. La evaporación es un factor importante en el aumento de la humedad. La superficie de una pared afectada por humedad está, a su vez, sujeta a evaporación. Los factores que controlan la evaporación son: temperatura (T), humedad relativa (HR), movimiento del aire (v) y las condiciones del material (l'Anson, Hoff 1986).

Figura 22, izquierda, altura h de aumento de agua en un tubo capilar ideal de radio r ; y a la derecha, representación esquemática del aumento del capilar de agua en la mampostería.

Mason desarrolló un modelo, Rising Damp, en el que la evaporación superficial y el ascenso capilar coexisten en equilibrio (Mason 1974).

Algo más recientemente, Hall y Hoff, exponen el modelo de Sharp Front, para la humedad ascendente (C. Hall, Hoff 2007).

La ecuación con que describen el ascenso capilar en muros es:

$$h = S \left[\frac{b}{Ne\theta_w} \right]^2 \quad (26)$$

El desarrollo de esta fórmula se explica más abajo.

Donde:

h	Altura del frente capilar	[m]
S	Succión de agua	
b	Espesor del muro	[m]
e	Tasa de evaporación	[kg/m ³]
θ_w	Contenido de humedad de la región mojada	[m/s ²]
N	Número de caras de la absorción (generalmente N=2)	

La fórmula demuestra la gran influencia de la sortividad sobre el ascenso del frente capilar. Este parámetro es fácil de determinar por medio de ensayos con muestras.

Además, demuestran que el efecto de la gravedad sobre la dinámica de la humedad es despreciable para las estructuras construidas con materiales comunes como ladrillo y piedra. Observaron que, en ausencia de evaporación, el resultado de Sharp Front proporciona una solución analítica del problema de Lucas-Washburn⁶ para el ascenso capilar simple con la gravedad.

Este artículo trata solo casos en los que la evaporación potencial (e) en la superficie de la pared es constante con el tiempo. Sin embargo, en la práctica, (e) es una propiedad variable del microambiente, sujeta a variaciones diarias, anuales y seculares. En un artículo posterior, modifican las fórmulas en base a la incorporación de este parámetro.

A continuación, se explica brevemente cuál es el desarrollo de la Teoría del Frente capilar, o Sharp Front Theory (SF), según su nombre original en inglés. Estas fórmulas resultan de interés, pues se aplicarán de manera práctica para calcular la evaporación de los muros de los casos de estudio analizados en esta investigación.

4.2.2 Desarrollo de Sharp Front Theory

Cuando la altura del ascenso de la humedad (h) se estabiliza, en algún valor que los autores denominan como h_{ee} , nos encontramos en un estado de **equilibrio dinámico** en el que:

$$U_{ee} = E_{ee} \quad (27)$$

Donde:

⁶ La ecuación de Lucas-Washburn describe la tasa de flujo de un fluido a través de un capilar cilíndrico de radio " r " en función de la presión de conducción. La ausencia de campo gravitacional hace que la fórmula sea poco precisa para el cálculo de materiales porosos. Es válida siempre que la fuerza capilar sea mayor que la gravitacional.

U^7	Tasa de absorción a través de la cara de acceso del agua	[L/m.s]
E^8	Tasa de evaporación a través de la superficie expuesta	[L/m.s]

Suponiendo esta situación de equilibrio, se puede suponer que el flujo de agua es estable, tal que:

$$F_{ee} = E_{ee} = eh_{ee} \quad (28)$$

Donde:

F_{ee}	Flujo estable	[L/m.s]
E_{ee}	Caudal de evaporación estable	[L/m.s]
e	Tasa de evaporación	mmd
h_{ee}	Altura de equilibrio alcanzada por la región húmeda	[m]

Figura 23 Izquierda (a):Esquema del fenómeno de humedad ascendente (Rising Damp) en un material poroso, con un espesor (b) en contacto hidráulico con tierra saturada en su base AA'. El agua se absorbe a una velocidad (u) por unidad del ancho de la pared. Una o ambas caras mojadas BB', están sujetas a evaporación. La altura mojada (h) se mide desde la base de referenica hasta el frente capilar (Sharp Front). Derecha (b): representa el modelo simplificado. La influencia total de $U=bu$ está controlada por las propiedades de transporte de humedad del muro y la pérdida por evaporación total, que depende solamente de la altura de la región húmeda. (C. Hall, Hoff 2007)

Establecen, además, una relación entre la cantidad de agua almacenada en el muro (C) y la altura a la que asciende la región húmeda.

$$C = \theta_w bh \quad (29)$$

⁷ En los cálculos realizados en esta investigación, la tasa de succión se ha denominado como U_{in}

⁸ En los cálculos realizados en esta investigación, la tasa de evaporación se ha denominado como E_{out}

Donde:

C	Cantidad de agua retenida en el muro	[L/m]
θ_w	Contenido de humedad del material(en la región húmeda)	

Existe una relación entre la porosidad del material (f) y el contenido de humedad (θ_w), por lo cual, los autores establecen la siguiente relación:

$$\theta_w = 0,85f \quad (30)$$

Donde:

f	Porosidad del material	[%]
-----	------------------------	-----

El agua que penetra en la estructura porosa a través de la sección AA' (Figura 23) depende de las propiedades de absorción capilar de los materiales que constituyen el muro. Para casi cualquier material de construcción, la succión capilar:

$$i = St^{1/2} = \theta_w h \quad (31)$$

Donde:

i	Volumen de agua absorbida acumulada	[m ³ /m ²]
S	Sortividad	[mm/min ^{1/2}]
t	Tiempo	min

Para el cálculo de la absorción, omitiendo las fuerzas de la gravedad, escriben:

$$U = b \frac{di}{dt} = \frac{1}{2} b S t^{-1/2} = \frac{b S^2}{2i} \quad (32)$$

Teniendo en cuenta la ecuación (31) se obtiene la tasa a la que absorbe agua la base de un muro (U):

$$U = \frac{b S^2}{2 \theta_w h} \quad (33)$$

Vemos que la tasa de absorción (U) es inversamente proporcional a la altura de elevación (h)

Tal como explican los propios autores, lo que se entiende por "material seco" varía bastante dependiendo del material, por tanto, no se considera importante conocer este parámetro del material, tanto como conocer las condiciones del ambiente que rodean al muro. Con ello, el componente de la evaporación se puede definir como:

$$E = e h \quad (34)$$

La tasa total de evaporación depende de la altura de mojado, y la tasa de evaporación (por unidad de área) esta última, establecida por las condiciones del microambiente.

Tal como se exponía en la ecuación (27) al principio del apartado, en estado estacionario, la absorción es igual a la evaporación, de manera que se puede establecer la siguiente relación:

$$\frac{bS^2}{2\theta_w h_{ee}} = e h_{ee} \quad (35)$$

Por tanto, finalmente se obtiene la altura de ascenso capilar estabilizada (h_{ss}) como:

$$h_{ee} = S \left[\frac{b}{2e\theta_w} \right]^2 \quad (36)$$

Tal como se adelantaba en la ecuación (26). Vemos que la altura varía en proporción directa con la sortividad, e inversamente a la raíz cuadrada de la tasa de evaporación.

Estas fórmulas se aplicarán en los capítulos dedicados al cálculo de la evaporación, en los diferentes casos de estudio analizados en este trabajo.

Es necesario tener en cuenta que este estado estacionario “ideal” es un supuesto que sirve para simplificar el cálculo. Pero, en la realidad, la influencia de las fluctuaciones climáticas, hacen estas tasas de flujo varíen constantemente, lo que nos obliga a calcular la absorción y evaporación de los muros en régimen dinámico. Considerando la variación de la altura capilar, en relación con el tiempo, Hall y Hoff establecen la siguiente ecuación:

$$h \frac{dh}{dt} = -ah^2 + c \quad (37)$$

Donde: $a = e/\theta_w b$ y $c = S^2/2\theta_w^2$

Para un valor inicial $h=0$ y $t=0$, se obtiene la ecuación para todo el proceso capilar $h(t)$:

$$h^2 = \frac{c}{a} [1 - \exp(-2at)] \quad (38)$$

4.2.3 Aclaraciones sobre la sortividad en muros

Tal como se ha explicado en el apartado anterior, la sortividad es un parámetro fácilmente calculable mediante ensayos de laboratorio con muestras de material. Pero, cuando se trata de estudiar la sortividad en elementos compuestos, como es el caso de los muros, la sortividad efectiva puede ser menor que la sortividad de las unidades de la mampostería sueltas, debido a las interfaces entre materiales. Algunos trabajos experimentales demostraron que, aquellos materiales sometidos a largos períodos de absorción capilar, llegan a alcanzar la saturación completa (C. Hall 2007). Por tanto, es probable que, en muros históricos, que sin duda han estado sometidos a largos períodos de absorción, el contenido de agua de la región mojada se acerque a la saturación total. La consecuencia de esto es que, podemos esperar que los valores de θ_w y S

determinados en pruebas a corto plazo subestimen los verdaderos valores. Por tanto, puede que θ_w se acerque más a la porosidad abierta f_0 que al valor de la ecuación (30); y que la sortividad S puede ser hasta un 50% mayor que el valor estándar.

4.2.4 El potencial de evaporación (PE) en el cálculo de la evaporación de los muros

El microambiente que rodea al muro influyen en la capacidad de evaporación de éste, como ya se ha mencionado. Es por esto, que Hall y Hoff, en un trabajo posterior, realizan ciertas matizaciones en las fórmulas originales para tener en cuenta este factor. Esto les permite vincular la dinámica de la humedad en el muro con los datos meteorológicos (C. Hall, Hamilton et al. 2011)

La modificación consiste en considerar la tasa de evaporación potencial (e) como el potencial de evaporación PE. Esta es una variable meteorológica que describe la velocidad a la que el agua evapora en una superficie libre. De las diversas fórmulas para el cálculo, la más empleada es la de Penman.

Al considerar ahora que el agua absorbida por el muro se pierde uniformemente en la región húmeda por evaporación. Incluyen el siguiente cambio en la ecuación original:

$$U_0 = \frac{bS^2}{2\theta_w h} + \frac{eh}{2} \quad (39)$$

En estado estacionario, donde $U(h)=0$, la altura de ascenso estable es:

$$h_{ee} = \left(\frac{bS^2}{e\theta_w} \right)^{1/2} \quad (40)$$

Lo que difiere ligeramente de la ecuación original en $1/\sqrt{2}$

Por tanto, la ecuación diferencial del sistema es:

$$h \frac{dh}{dt} = -a'h^2 + c \quad (41)$$

Como en la ecuación (37), solo que ahora la constante $a' = e/(2\theta_w b)$ en lugar de $e/(\theta_w b)$

4.3 COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO DE LOS EDIFICIOS HISTÓRICOS

Introducción

Como se desprende de los apartados anteriores, los mecanismos de transferencia de humedad en los edificios son complejos. En los apartados anteriores se han explicado las principales leyes y teorías que explican este movimiento, pero, en la realidad, el transporte de humedad ocurre simultáneamente en fases líquida y vapor en la frontera entre el material y el ambiente. Esto depende de varios parámetros como la temperatura, la humedad relativa, precipitación, radiación solar, efecto del viento y presión atmosférica, además de las características de los materiales de construcción.

Por tanto, cuando se trata de calcular la evaporación de un material, o de un muro, deben tenerse en cuenta los parámetros climáticos. Las fórmulas que permiten el cálculo de la evaporación a través de parámetros climáticos parten del campo de la hidrología. En este apartado se van a explicar cuáles son y cómo se aplican al cálculo en edificios históricos.

4.3.1 El cálculo de la evaporación potencial (PE) según las ecuaciones de Penman

Charles Thornthwaite definió la evapotranspiración potencial como la máxima cantidad de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación, que se desarrolla en óptimas condiciones, y sin limitaciones en la disponibilidad de agua. Este concepto ha sido empleado ampliamente en hidrología y posteriormente en la ciencia de los materiales para el estudio de la evaporación.

Los métodos de estimación de la evaporación basados en datos climáticos son de uso común en aplicaciones hidrológicas y de riego. La técnica de la medición directa de la evaporación no se recomienda, ya que implica un procedimiento de toma de datos lento y costoso. Por ello, algunos autores han desarrollado modelos de estimación de la evaporación basados en datos climáticos que se recogen de manera rutinaria por las estaciones meteorológicas. Uno de estos métodos es el de (Penman 1948), que ha tenido múltiples variantes a lo largo de los años. La ecuación original es:

$$E_{PEN} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times \frac{R_{nt}}{\Lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \times \frac{6,43(f_v)D}{\Lambda} \quad (42)$$

Donde:

E_{PEN}	Potencial de evaporación o evapotranspiración	[mm/d]
R_{nt}	Radiación neta en la superficie	[MJ/m ² /d]
Δ	Pendiente de la curva de presión de vapor de saturación	[kPa/°C]
γ	Coeficiente psicrométrico	[kPa/°C]

Λ	Calor latente de evaporación	[MJ/kg]
f_v	Función del viento	-
D	Déficit de presión de vapor	[kPa]

La función del viento (f_v) se calcula como:

$$f_v = a_v + b_v v \quad (43)$$

Donde:

a_v	Coeficiente de corrección del viento	1
b_v	Coeficiente de corrección del viento	0,536
v	Velocidad del viento a 2 metros de altura	[m/s]

La desventaja de la ecuación de Penman es que las principales variables meteorológicas que aparecen son la temperatura del aire (T), la radiación neta (R_{nt}), el déficit de presión de vapor (D) y la velocidad del viento (v). Los registros meteorológicos generalmente disponibles en estaciones meteorológicas estándar en todo el mundo miden temperatura del aire (T), humedad relativa (HR), velocidad del viento (v) radiación solar (R_s), o número de horas de sol (n) -de las cuales R_s se estima indirectamente-. Además, aparecen otros parámetros en la aplicación de la ecuación de Penman, como el calor latente de vaporización, la presión de vapor de saturación, la presión de vapor real, la curva de presión de vapor de pendiente, la presión atmosférica, la emisividad de la superficie, la radiación solar de cielo despejado, la constante de Stephan-Boltzman, el factor de nubosidad y muchos otros. La complejidad de los cálculos aumenta con todos estos parámetros, sobre todo teniendo en cuenta que muchos de ellos se pueden expresar con diferentes unidades, lo que puede inducir errores en el cálculo (Valiantzas 2006) y (Valiantzas 2013).

Valiantzas desarrolla una simplificación utilizando las variables T , R_s , HR y v , equivalente en precisión a la ecuación original de Penman. En su trabajo también proporciona expresiones simplificadas para estimar la radiación extraterrestre y las horas diurnas para las estimaciones mensuales de evaporación.

Para el desarrollo de la versión simplificada de las fórmulas de Penman, Valiantzas supone que la elevación del sitio es $Z=0m$. El coeficiente γ toma un único valor constante de $\gamma_0 = 0,0671 \text{ KPa}$. Además, como el valor de Λ varía solo ligeramente en un rango de temperatura normal, un único valor constante (para $T=20^\circ\text{C}$) se considera $\Lambda_0=2,45 \text{ MJ/kg}$. Luego, la forma estandarizada de la ecuación de Penman, se simplifica de la siguiente manera:

$$E_{PEN} = E_{radS} - E_{radL} + E_{aero} \quad (44)$$

Donde, cada uno de los términos de la fórmula (44) corresponde con los términos de la ecuación de Penman agrupados.

E_{radS}	Componente de radiación de onda corta entrante
E_{radL}	Componente de radiación de onda larga saliente

E_{aero} Componente aerodinámico

Cada uno de estos términos resulta de una serie de simplificaciones explicadas extensamente por Valiantzas en su trabajo, para finalmente construir las siguientes ecuaciones.

$$E_{radS} = 0,051(1-\alpha)R_s\sqrt{(T + 9,5)} \quad (45)$$

$$E_{radL} = 0,188(T + 13)\left(\frac{R_s}{R_A - 0,194}\right)(1 - 0,00014(0,7T_{max} + 0,3T_{min} + 46)^2)\sqrt{\frac{HR}{100}} \quad (46)$$

$$E_{aero} = 0,049(T_{max} + 16,3)\left(1 - \frac{HR}{100}\right)(a_v + b_v v) \quad (47)$$

Algunos de los parámetros de las fórmulas (45), (46) y (47) no son medidas directas de las estaciones meteorológicas, sino que se calculan de manera indirecta mediante una serie de cálculos complementarios. La medición de la radiación solar, puede no estar disponible, por lo que se puede estimar por medio de la siguiente ecuación:

$$R_s = R_A \left(0,5 + 0,25 \frac{n}{N}\right) \quad (48)$$

Donde:

R_s	Radiación solar entrante	[MJ.m ² /día]
n	Luz del sol brillante diaria	[h]
N	Duración máxima posible de luz del día	[h]

A su vez:

$$R_A = 3Nsen(0,131N - 0,2\phi) \quad (49)$$

Donde ϕ es la latitud del sitio en radianes, y N se puede estimar, si se conocen los días julianos en los que se está haciendo el cálculo, mediante la siguiente ecuación:

$$N \approx 4\phi sen(0,53\iota - 1,65) + 12 \quad (50)$$

Donde ι es el número del día juliano, o el rango del mes, si se están haciendo estimaciones mensuales.

Además, n se puede aproximar por medio de:

$$n = \frac{1 - f_{cielo}}{N} \quad (51)$$

Donde f_{cielo} indica la cobertura del cielo, variando desde 0, para cielos despejados y 1 para cielos nublados.

4.4 FUNDAMENTOS DEL CLIMA Y LA RELACIÓN CON LA VENTILACIÓN NATURAL EN EDIFICIOS HISTÓRICOS

Introducción

Como se verá en el capítulo 6, las características del clima en el que se encuentra el edificio son factores determinantes, especialmente cuando se trata de construcciones históricas. Las variaciones higrotérmicas que realiza el edificio con el exterior se producen por medio de la envolvente y de los intercambios advectivos por ventilación natural. Por tanto, es fundamental conocer cómo se comporta la envolvente y también la ventilación.

Se detallan a continuación algunos de los principales conceptos necesarios para el estudio de la ventilación natural en relación con el edificio.

4.4.1 Conceptos generales

El viento se genera por las diferencias de presión, que producen el desplazamiento de aire. Éste se mueve de las zonas de altas presiones (anticiclón) a las zonas de bajas presiones (depresión). Su movimiento no es rectilíneo, a causa de la fuerza, sino que se curva dirigiéndose del anticiclón a la depresión.

El rozamiento con los elementos, como los edificios, hace que las fuerzas del viento se vean aminoradas. Es este rozamiento el que provoca turbulencias de las láminas de aire unas contra otras. Estos movimientos turbulentos varían según la naturaleza de la superficie en una zona denominada como “capa límite” (Izard, Guyot 1980).

Las turbulencias pueden reducir o modificar la velocidad y dirección del viento, canalizándolo y desviándolo.

Existen dos tipos de turbulencia:

1. Turbulencia térmica o convectiva, relacionada con las variaciones atmosféricas. Esta se produce comúnmente en áreas urbanas por calentamientos variados en las diferentes superficies constructivas con las que se encuentra el aire.
2. Turbulencia mecánica debida a la rugosidad y forma de las superficies que toca el viento. La rugosidad del terreno provoca fricción del aire, por lo que disminuye la velocidad, especialmente notable en las capas más cercanas al terreno, por encontrarse con mayor número de obstáculos y mayor superficie de rozamiento.

4.4.2 Movimiento de aire en el entorno del edificio

El movimiento del viento es difícil de estimar porque intervienen varios parámetros que afectan a su comportamiento, como las diferencias de presión atmosférica, temperatura, densidad del aire, topografía, rugosidad del terreno, etc. Es posible estimar cambios de velocidad en función de la rugosidad del suelo y en función de la altura.

Se pueden calcular: gradiente de altitud afectado por la rugosidad del suelo y capa límite.

a) Corrección por efecto de la rugosidad

Con los datos de la estación meteorológica con datos “despejados” se pueden estimar los datos para hacer una corrección por la rugosidad a la que se ve sometido el viento.

$$V_{ref} = A_0 V_{met} \quad (52)$$

Donde:

A_0	Constante de rugosidad	
V_{ref}	Velocidad de referencia	[m/s]
V_{met}	Velocidad meteorológica	[m/s]

(ASHRAE Fundamentals, 1985, Fuentes Freixanet, V. A.; Rodriguez Viqueira, M., 2004)

b) Corrección por altura

De la misma manera, las estaciones meteorológicas miden a 10m de altura, por lo que se debe corregir los datos de viento en el caso de los cálculos en arquitectura (ASHRAE Fundamentals, 1985).

$$V_H = V_{met} \delta_{met} (/H_{met})^{a_{met}} \left(\frac{h}{C} \right)^a \quad (53)$$

Donde:

V_H	Velocidad del viento a la altura h	[m/s]
δ_{met}	Capa de fricción o altura de la capa límite en la estación meteorológica (o lugar de medición ⁹)	[m]
H_{met}	Altura meteorológica	[m]
h	Altura de cálculo	[m]
C	Capa de fricción o altura de la capa límite del sitio que se quiere calcular	[m]

⁹ Generalmente, las estaciones meteorológicas suelen medir en campo abierto o aeropuertos, ASHRAE sugiere 270m

Existen otros modos de cálculo del perfil de velocidad que se desea calcular, por ejemplo, por medio de un cálculo logarítmico (Freixanet, V. A.; Rodríguez Viqueira, M., 2004)

4.4.3 Conceptos para el cálculo de la ventilación natural en el interior del edificio

La ventilación natural puede producirse por varias causas: presiones de viento o diferencias de temperatura, que significan a su vez diferencias de densidad.

a) Ventilación debida a la presión del viento

La ventilación por diferencias de presión se produce cuando hay dos aberturas, por ejemplo dos ventanas, y una de ellas se encuentra sometida a una presión de viento positiva (barlovento) y otra a presión de viento negativa (sotavento). En arquitectura es lo que conocemos como **ventilación cruzada**. Se puede calcular mediante dos métodos:

En función de las diferencias de presión

La presión de la dirección del viento a barlovento se puede estimar mediante la ecuación de Bernoulli.

$$p_w = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (54)$$

Donde:

P_w : presión dinámica del viento [Pa]

ρ : densidad del aire ambiente exterior – interior [kg/m^3] con $T = 20^\circ\text{C}$ y 1 metro desde nivel del mar. (1 atm) $\rho = 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$

v : velocidad del viento [m/s]

La ρ a cierta temperatura se puede estimar $\rho = 1,293 \cdot 273,15 / T_k$

1,293 es ρ_0 densidad de referencia [kg/m^3]

273,15 es T_0 temperatura del aire [K]

La presión no es uniforme a lo largo de toda la fachada, ni en barlovento ni en sotavento. El valor de la presión del viento se calcula en función del “coeficiente de presión” en cualquier punto.

Si el viento es perpendicular a la fachada en la cara de barlovento puede presentar presiones $0,5p_w$ y $1,0p_w$, valor máximo a 70% de la altura. En sotavento $-0,3$ y $-0,4p_w$

Hay que tener en cuenta cuestiones de la morfología del edificio. Hay correcciones para edificios con sección muy vertical o muy horizontal, por ejemplo.

La presión resultante para cada punto particular del edificio será entonces igual al producto de la presión máxima del viento (p_w) (estimada con la velocidad del viento que se presenta en el punto más elevado del edificio, en altura H) por el coeficiente de presión del punto específico.

$$p_w = C_p(0,5\rho v^2) \quad (55)$$

Mediante esta fórmula podemos calcular la presión que ejerce el viento sobre una abertura (ventana, puerta etc) concreta. Por tanto, la tasa de ventilación que pasa por esa abertura se puede calcular mediante:

$$Q = 0,827A(\Delta p)^{0,5} \quad (56)$$

Q: tasa de ventilación [m^3/s]

A: área de la abertura [m^2]

Δp : diferencia de presiones entre las dos aberturas de la ventilación cruzada [Pa]

Conociendo la tasa de ventilación, podemos calcular la velocidad del viento a través de esa misma abertura:

$$v = Q/A \quad (57)$$

El British Standard Method propone la siguiente fórmula para calcular la ventilación a través de un sistema de ventanas:

$$Q = C_D A_e v (\Delta C_p)^{0,5} \quad (58)$$

Donde:

Q: tasa de ventilación [m^3/s]

C_D : coeficiente de descarga de las aberturas

A_e : área efectiva de ventilación [m^2]

V: velocidad del viento [m/s]

ΔC_p : diferencia entre los coeficientes de presión [Pa] entre barlovento y sotavento.

El coeficiente de descarga considera la viscosidad del aire así como la turbulencia que se genera cerca de las aberturas. Este factor depende de la diferencia de temperaturas que se produzca entre el interior y el exterior, de la velocidad del viento y la geometría de la abertura. En general, el coeficiente es de 0,65 para aberturas pequeñas, o de 0,78 para aberturas de tamaño medio.

Si la ventana de entrada del aire tiene el mismo tamaño que la ventana de salida hay que considerar el “área efectiva” (A_e) de la ventilación:

$$1/A_e^2 = \left(1/A_1^2\right) + \left(1/A_2^2\right) \quad (59)$$

En función del flujo de viento que pasa por la abertura (puerta o ventana)

Ventilación cruzada:

En el caso de ventilación cruzada, ASHRAE proporciona la siguiente fórmula:

$$Q = C_v A_e v \quad (60)$$

Donde:

Q: tasa de ventilación [m^3/s]

C_v : efectividad de las aberturas

C_v : 0,5 a 0,6 para viento perpendicular

C_v : 0,25 a 0,35 para viento diagonal

A_e : área libre de la abertura de entrada de viento [m^2]

v: velocidad del viento [m/s]

La efectividad de las aberturas será:

$$C_{fr} = 0,6 \left[\frac{\left(\frac{R_v}{(1 + R_v^2)^{0,5}} \right)}{\sin 45} \right] \quad (61)$$

Donde:

R_v : relación entre la ventana de salida y la ventana de entrada de aire $R_v = A_s/A_e$

A_s : área de la abertura de salida del aire [m^2]

A_e : área de la abertura de entrada del aire [m^2]

Según ASHRAE, si el viento es diagonal, la efectividad de las aberturas disminuye de acuerdo con el seno del ángulo, por lo que la ecuación queda como:

$$Q = C_{fr} A_e v \sen \theta \quad (62)$$

Donde:

Q: tasa de ventilación [m^3/s]

C_{fr} : efectividad de las aberturas ya considerando el factor de relación

A_e : área de la abertura de entrada del aire (m^2)

v: velocidad del viento a nivel de la ventana (m/s)

θ : ángulo de incidencia del viento considerando 90º al viento perpendicular a la ventana

Ventilación unilateral:

Si la presión exterior es mayor que la interior, el aire tiende a entrar en el edificio. Si hay diferencia de temperatura entre el interior y el exterior - caso del aire exterior más frío en el exterior- el aire entra al interior más caliente. El aire, al calentarse sube y desciende si se enfría. En el caso de tener una sola abertura (ventilación unilateral) el aire se comporta como un remolino, porque solo puede salir por la misma zona por la que ha accedido. En este caso, las renovaciones serán más bajas, sobre todo si las diferencias de presión y el salto térmico es pequeño. El volumen de renovaciones será proporcional al viento exterior y al tamaño de huecos.

Si solo existe una abertura de barlovento, The British Standards Method sugiere:

$$Q = 0,025 A v \quad (63)$$

Velocidad del viento:

Si la abertura de salida es mayor que la de entrada, la efectividad de la ventilación aumenta. Ocurre lo contrario si la ventana de entrada es mayor que la de salida, la efectividad es menor.

Velocidad interior:

La velocidad interior depende de múltiples factores: dimensiones y forma del espacio interior, velocidad y dirección del viento, tamaño vano-macizo y relación entre las aberturas de entrada y salida del aire. Givoni encontró una relación entre la velocidad media interior y el tamaño de las ventanas. Esta relación establece que una habitación cuadrada con aberturas que tengan el mismo tamaño, y que estén ubicadas enfrentadas en los muros de barlovento y sotavento con viento perpendicular cumplen:

$$V_i = 0,45(1 - e^{-3,48x})V_e \quad (64)$$

Donde:

V_i : velocidad interior promedio [m/s]

E: constante de Euler o número ($e = 2,71828$)

X: relación del área de la ventana con respecto al área del muro (vano-macizo)

V_e : velocidad del viento exterior [m/s]

La velocidad del viento en el interior también depende de la dirección del viento, dependiendo del ángulo de incidencia respecto a la ventana. Giovani desarrolla unas tablas donde se recoge el efecto del tamaño de las ventanas sobre el viento interior.

Tabla 24. Ventilación cruzada

Velocidad promedio del viento interior
Aberturas en muros opuestos
Viento perpendicular a la entrada

Abertura de salida	Abertura de entrada		
	1/3	2/3	3/3
1/3	36	34	32
2/3	39	37	36
3/3	44	35	47

porcentaje con respecto a la velocidad del viento exterior

Tabla 25. Ventilación cruzada

Velocidad promedio del viento interior
Aberturas en muros opuestos
Viento oblicuo a la entrada (45°)

Abertura de salida	Abertura de entrada		
	1/3	2/3	3/3
1/3	42	43	42
2/3	40	57	62
3/3	44	59	65

porcentaje con respecto a la velocidad del viento exterior

Tabla 26. Ventilación cruzada

Velocidad promedio del viento interior
Aberturas en muros adyacentes
Viento perpendicular a la entrada

Abertura de salida	Abertura de entrada		
	1/3	2/3	3/3
1/3	45	51	50
2/3	39	-	-
3/3	51	-	-

porcentaje con respecto a la velocidad del viento exterior

Tabla 27. Ventilación cruzada

Velocidad promedio del viento interior
Aberturas en muros adyacentes
Viento oblicuo a la entrada (45°)

Abertura de salida	Abertura de entrada		
	1/3	2/3	3/3
1/3	37	36	37
2/3	40	-	-
3/3	45	-	-

porcentaje con respecto a la velocidad del viento exterior

Figura 24. Tipos de ventilación. FUENTE/REFERENCIA?

b) Ventilación debida a diferencias térmicas:

La ventilación también puede darse por diferencias térmicas. En el interior de los espacios el aire tiende a estratificarse debido a diferencias térmicas, que suponen diferencias de densidad. El aire caliente, sube en el interior de los espacios porque tiene menor densidad, este movimiento genera que se absorba aire del exterior. La ventilación debida a estos intercambios se conoce como Efecto Stack. La tasa de ventilación para este caso se puede calcular en función de las diferencias de presión generadas por el flujo de aire, o en función de las diferencias de temperatura.

El efecto Stack aprovecha el ascenso de aire por diferencias de presión entre el aire frío y cálido, considerándose un efecto convectivo¹⁰. El efecto que se produce es mayor cuanto mayor temperatura y mayor diferencia de alturas entre las aberturas.

¹⁰ La convección es la forma de transmisión de calor que se produce en fluidos y gases y es proporcional a su velocidad y al salto térmico entre el aire y el cuerpo con el que está en contacto.

El efecto Stack funciona solo cuando la temperatura interior es mayor que la temperatura exterior. La diferencia de presiones se puede determinar por medio de la siguiente ecuacin:

$$\Delta p = hg(\rho_0 - \rho_i) \quad (65)$$

Donde:

Δp : diferencia de presin [Pa]

h : diferencia de altura [m]

g : aceleracin gravitacional (9,81 m/s²)

ρ_0 : densidad del aire exterior [kg/m³]

ρ_i : densidad del aire interior [kg/m³]

Con ello se puede calcular la tasa de ventilacin debida al efecto Stack, que segn ASHRAE es la siguiente:

$$Q = C_D A [2g \Delta h (t_i - t_0)/t_i]^{0,5} \quad (66)$$

Donde:

Q : tasa de ventilacin [m³/s]

C_D : coeficiente de descarga para las aberturas. $C_D = 0,65$ cuando el flujo de aire a travs de la abertura es unidireccional y no hay mezcla. En caso contrario $C_D = 0,40 + 0,0045(t_i - t_0)$

A : rea de la abertura de salida [m²]

g : aceleracin gravitacional (9,81m/s²)

Δh : diferencia de alturas al NPL [m] Altura del punto medio de la abertura inferior al NPL

t_0 : temperatura del aire exterior [K]

t_i : temperatura del aire interior [K]

El Nivel de Presin Neutra (NPL) es el nivel del edificio o local en donde no existen diferencia de presin, o est igual a cero. La diferencia de alturas al NPL (nivel de presin neutra) se puede estimar por:

$$\Delta h = \frac{h}{1 + \left[\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \left(\frac{t_i}{t_0} \right) \right]} \quad (67)$$

Donde:

Δh : diferencia de alturas NPL [m]

H: altura entre aberturas

A₁: área de la abertura de entrada (inferior)

A₂: área de la abertura de salida (superior)

t₀: temperatura del aire exterior (K)

t_i: temperatura del aire interior (K)

El nivel de presión neutra (NLP) en edificios altos varía entre 0,3 y 0,7 de la altura total, mientras que en vivienda, generalmente se encuentra ente alrededor de 0,5 de la altura.

4.4.4. Fundamentos de la ventilación natural calculada con Design Builder

Se ha considerado necesario este apartado, dado que el programa con el que se han realizado ciertas estimaciones sobre la ventilación natural (cálculo de capacidad de renovaciones/hora de los distintos casos de estudio, velocidades del aire en el interior del edificio en algunas zonas, etc) ha sido por medio del programa Design Builder (DB). Por esta razón, es importante explicar cuáles son los fundamentos de cálculo por los que se rige.

EnergyPlus define la ventilación como el flujo de aire útil que entra del exterior en el ambiente del edificio con el fin de proporcionar cierta ventilación no mecánica.

La ecuación base para el cálculo de la ventilación es:

$$Ventilación = (V_d)(F_p)[A + B|T_{ext} - T_{int}| + C(V_{viento}) + D(V_{viento}^2)] \quad (68)$$

Donde:

V_d : caudal de diseño [m³/s]. Es la máxima cantidad de ventilación esperada en condiciones de diseño.

A: constante del programa que no se ve modificada por los parámetros ambientales. Se trata de un parámetro adimensional.

B: constante dependiente de la diferencia entre la temperatura exterior T_{ext} [°C] y la temperatura interior T_{int} [°C].

C: constante dependiente de la velocidad del viento medida en el exterior del edificio. Se trata de un parámetro adimensional.

F_p: Caudal de diseño. En función de los datos que se van introduciendo en las diferentes opciones del programa, el cálculo del flujo puede venir definido de cuatro maneras diferentes: por un valor numérico directo de flujo [m³/s], por un factor de flujo dependiente del área simulada, por un factor de flujo dependiente del número de personas en la zona simulada o por los intercambios de aire/hora que se producen en la zona simulada.

Para calcular la ventilación se puede definir de dos maneras: programada o calculada¹¹. En función del método que se use, el programa (DB) solicita que se definan unos valores determinados.

En la ventilación programada, se modela dando al programa las tasas máximas de renovación de aire [renov/h] que se puede modificar en el tiempo mediante programaciones. En el caso de ventilación natural calculada se modela tomando en cuenta las condiciones de viento en el sitio (velocidad y dirección), así como el grado de apertura y el funcionamiento de puertas y ventanas. Es necesario definir el grado de estanqueidad del edificio. Se define el caudal entrante por cada orificio (puertas y ventanas).

-El nivel de exposición del modelo al viento permite definir los coeficientes de presión del viento que se emplearán para calcular la ventilación natural calculada en las opciones del modelo: resguardado, normal o expuesto.

¹¹ Dentro de la interfaz del programa Design Builder se pueden elegir dos modos de cálculo de la ventilación natural. El modo programado, que es el más sencillo y el calculado, más complejo.

4.5. FUNDAMENTOS PARA LA SIMULACIÓN AMBIENTAL POR ORDENADOR

Introducción

En este apartado se tratan los fundamentos físicos en los que se basa el programa de cálculo empleado en este trabajo de investigación. Design Builder permite realizar cálculos mediante su módulo CFD, simulando el movimiento de aire en el interior del edificio. Por otro lado, las versiones más recientes del programa han integrado el cálculo de la transferencia de calor, aire y humedad (HAM).

En primer lugar, se van a explicar los principios que definen los programas CFD, especialmente en lo referente al estudio de la ventilación natural. En segundo lugar, los programas HAM, que han permitido estudiar el fenómeno de transferencia y calor a través de la envolvente. La combinación de ambos ha permitido realizar las comparativas necesarias con el cálculo de la evaporación de los muros, como se verá en el capítulo 6 dedicado al análisis de los tres casos de estudio.

4.5.1. El estudio del movimiento del aire mediante programas CFD.

Las herramientas de CFD resultan de gran utilidad para la simulación de los movimientos de aire dentro de un edificio. Para entender cómo operan estos programas con respecto a los movimientos de aire, es necesario explicar ciertas leyes y conceptos clásicos en las que se basa el cálculo del programa.

a) Conceptos previos: Flujo laminar y turbulento en la simulación del movimiento del aire

Existen dos tipos de flujo: laminar y turbulento. El flujo laminar se supone un movimiento del fluido de manera ordenada, estratificado y suave. En este caso, se supone que el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse y cada fluido sigue una trayectoria suave, llamada línea de corriente. Por su parte, el flujo turbulento es aquel en que existen fluctuaciones y las partículas invaden la trayectoria de las adyacentes, mezclándose y desplazándose de manera aleatoria (Figura 25).

Figura 25. Ejemplo de un flujo laminar (imagen superior) y un flujo turbulento (imagen inferior)(Pedley 1997).

En la naturaleza, el modo habitual de los fluidos es turbulento. No se trata de una característica de los fluidos, sino del flujo. Los flujos turbulentos son siempre rotacionales, con rápidas variaciones temporales en todas las dimensiones del espacio, donde generan estructuras conocidas como vórtices. El tamaño de los vórtices de mayor dimensión coincide con la estructura principal del flujo. Los vórtices más grandes van trasladando su energía cinética a los más pequeños. De esta forma, se van transformando a un tamaño menor, de manera que la inestabilidad no es lo suficientemente grande como para persistir, siendo las fuerzas de viscosidad las preponderantes. Durante este proceso, la energía cinética se transforma en energía térmica por efecto de la viscosidad. La característica más destacable es que los flujos turbulentos son difusivos, produciendo una mezcla que tiene como consecuencia el transporte de masa. Esta característica es muy importante, por los efectos que tiene sobre la ventilación natural.

El número de Reynolds (Re) permite clasificar el régimen de un fluido:

$$Re = \frac{vL}{\nu_v} \quad (69)$$

Donde:

Re	Número de Reynolds	-
v	Velocidad del fluido	m/s
L	Longitud característica (tamaño de vórtice de mayor tamaño)	m
ν_v	Viscosidad cinemática	m ² /s

El número de Reynolds relaciona los términos inerciales y los términos viscosos en la ecuación de Navier-Stokes. La relación del número de Reynolds con la turbulencia es directamente proporcional al régimen turbulento.

b) Fundamentos del cálculo de los programas CFD

El movimiento del aire en un espacio interior se puede describir matemáticamente por medio de un conjunto de ecuaciones diferenciales conocidas como Ecuaciones de Navier-Stokes (Nielsen 2015). Estas ecuaciones se pueden resolver de tres maneras diferentes: mediante DNS (Direct Numerical Simulation), la técnica RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Model) y la técnica LES (Large-Eddy Simulations). La utilidad y evolución de estos métodos, se explicaba en el capítulo 2 “*Antecedentes y estado de la cuestión*”.

Las ecuaciones se pueden resolver de manera analítica, solo para condiciones simples e ideales. Para el flujo, por ejemplo, de una habitación ventilada¹², es necesario reformular la ecuación diferencial en un extenso número de ecuaciones complejas. Esto sucede debido a que el flujo en la habitación es turbulento. Por tanto, cuando se trata de una simulación, la solución numérica requiere un gran número de puntos de malla que se deben interpolar¹³. La dificultad que supone resolver de forma exacta las ecuaciones diferenciales que describen estos flujos lleva a que se utilicen métodos para simplificarlas en sistemas algebraicos simples. Existe una gran variedad de métodos numéricos, los más utilizados son: diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos.

El cálculo por medio de *diferencias finitas* consiste en sustituir las derivadas parciales por diferencias en nudos infinitamente próximos. La gran desventaja de este método es que queda restringido a mallas simples, y que presenta dificultades para la conservación del momento, de la energía y la masa.

El método de *elementos finitos* consiste en calcular la simulación por medio de funciones sencillas, cuyo valor en cada punto del dominio se aproxime al valor de la función estudiada en ese punto. Se trata de un método cuyos resultados están condicionados al tamaño de la celda.

¹² Considerando como “habitación ventilada” un espacio en el que pueda existir un flujo de aire entrante por un hueco como puerta o ventana.

¹³ La malla es la rejilla en la que el programa divide el espacio del edificio para realizar los cálculos. El tamaño de malla puede ser definido por el usuario. Cuanto menor es el espaciado de la malla, mayor será la precisión del programa, pero hay que tener en cuenta que el tiempo de cálculo se multiplica.

El cálculo por medio de *volúmenes finitos* consiste en sustituir las ecuaciones diferenciales parciales por ecuaciones algebraicas y aplicarlas en cada celda. Este es el método más empleado por los programas CFD comerciales.

c) La definición de la cuadrícula de cálculo

El número de puntos de la malla se reduce enormemente si se establecen ecuaciones de transporte adicionales para describir una media de la turbulencia. El método más común para describir la turbulencia es con un conjunto de ecuaciones (K- ϵ) (Nielsen, 2015).

K: Energía cinética de la turbulencia

ϵ : disipación de la energía turbulenta

d) Modelos zonales y multizonales

Estos modelos de simulación se denominaron originalmente como modelos de método nodal (Megri, Yu 2015), diferentes de la simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD). Como se explicaba en el capítulo 2 “*Antecedentes y Estado de la cuestión*” existen software de cálculo específicos para modelos zonales y multizonales. A día de hoy, este cálculo ha sido incorporado por los programas CFD, por lo que existen muchas publicaciones que los incorporan en la clasificación CFD.

- *Modelos zonales*: Divide una habitación o recinto en varias subzonas en las que se supone que el aire es homogéneo. Algunos trabajos han demostrado y validado el uso del modelo zonal como una herramienta útil. Al mismo tiempo, como ocurre con el modelo multizonal, y con el cálculo de CFD en general, se ha ido sometiendo a revisiones que han mejorado las posibilidades de predicción del flujo de aire en el recinto. Esta evolución y la validación que han llevado a cabo algunos autores, se detalla en el capítulo 2 “*Antecedentes y estado de la cuestión*”.
- *Modelos multizona*: Estos modelos se utilizan con dos objetivos: el estudio de la distribución del flujo de aire en el edificio, y poder predecir las renovaciones/hora que hace el edificio. Los modelos multizona asumen que la temperatura y la concentración de especies químicas¹⁴ es uniforme.

El software empleado en este trabajo de investigación es capaz de trabajar con modelos multizona.

¹⁴ En química, el término especie química se emplea para referirse de manera genérica a las sustancias químicas, como son los átomos (sustancias elementales), iones, moléculas (agrupaciones de átomos), etc. que sean el objeto de consideración o estudio.

e) Fundamentos en Design Builder para la simulación

En el apartado anterior se han explicado los principios básicos que rigen el cálculo general de los programas CFD. En esta investigación se va a trabajar concretamente con el programa Design Builder (DB), por lo que, se ha considerado necesario contar más extensamente el modo de operar de este programa.

El motor de cálculo de DB es EnergyPlus, que para el cálculo del movimiento del aire en el interior del edificio se basa en una simplificación de las mencionadas ecuaciones de Navier-Stokes.

El modo en que el motor de cálculo de EnergyPlus opera se basa en una serie de “nodos” conectados entre sí por lo que el programa denomina una red. Cada “nodo” viene definido por una serie de parámetros de flujo de aire. De manera resumida, esta red queda definida por tres pasos secuenciales:

- *Cálculos de presión y flujo de aire*: determinan la presión en cada nodo y el flujo de aire a través de cada enlace entre nodos, dado por las presiones del viento y la fuerza del flujo de aire.
- *Cálculos de temperatura y humedad del nodo*: Basándose en el flujo de aire calculado para cada enlace, el modelo calcula la temperatura y humedad para cada nodo a partir de las tasas de temperatura y humedad del aire de la zona¹⁵.
- *Cálculos de cargas sensibles y latentes*: En función de la temperatura y humedad antes definida, el programa asume unas cargas sensibles y latentes para cada zona. El programa emplea estas cargas posteriormente en las ecuaciones de equilibrio de energía para predecir las cargas del sistema de HVAC (si existe¹⁶) y calcular las temperaturas, tasas de humedad y presiones finales en el aire de cada zona del edificio.

En un trabajo de investigación realizado por Gu, en el que emplea EnergyPlus, valida el uso de EnergyPlus para cálculos de movimiento del aire en el interior de un edificio mediante un modelo ideado. En dicho trabajo se describe de forma sencilla el procedimiento de partida para el cálculo del movimiento del aire dentro del edificio (Figura 26) (Gu, 2007).

¹⁵ Dentro del modelo de edificio se define lo que el programa denomina “zonas”, generalmente asociadas a las estancias o espacios del edificio. Puede tratarse de un modelo con una sola zona o múltiples zonas. En función de esto, el programa realiza los cálculos adecuados, como por ejemplo el intercambio de aire entre las diferentes zonas que se hayan definido en el modelo.

¹⁶ Dado que los edificios estudiados en esta tesis no tiene calefacción ni refrigeración, las variaciones micro-climáticas vienen principalmente condicionadas por los intercambios higrotérmicos entre el exterior y el interior a través de puertas y ventanas.

Figura 26. Vista de planta de un modelo de red para el cálculo del flujo de aire. (Gu, 2007)

Aunque el cálculo depende de muchos factores¹⁷, se resumen a continuación las principales ecuaciones que rigen el cálculo.

El método de Newton se usa para resolver las presiones de aire en los nodos y requiere un valor de partida para la presión en los nodos. Estos valores iniciales se pueden obtener incluyendo en cada componente de flujo de aire una aproximación lineal relacionada con la caída de presión:

$$m_i = C_i \rho \frac{\Delta P_i}{\mu} \quad (70)$$

Donde:

m_i	Tasa de masa de aire en el enlace	[kg/s]
ρ	Densidad del aire	[kg/m ³]
C_i	Coeficiente del flujo de la masa de aire	[m ³]
ΔP_i	Diferencia de presión a lo largo del enlace	[Pa]
μ	Viscosidad del aire	[Pa.s]

Esta ecuación proporciona un control o manejo adecuado del posible “efecto chimenea” y establece la dirección correcta para los flujos de aire.

Lo que el programa denomina como “enlace” es el flujo entre dos nodos, uno de entrada y otro de salida (Figura 26). Estos están vinculados por una razón de dependencia entre el flujo de aire y la presión. La diferencia de presión entre cada componente de un enlace está regida por la ecuación de Bernoulli:

¹⁷ Estos factores son, por ejemplo: si se produce mezcla de aire entre diferentes zonas del modelo, ventilación cruzada etc. En función de este tipo de parámetros la complejidad del cálculo aumenta. En este apartado se han reflejado solamente las fórmulas básicas que rigen los principales fenómenos de cálculo. El desarrollo completo figura extensamente explicado en los diferentes manuales de EnergyPlus y DesignBuilder.

$$\Delta P = \left(P_i + \frac{\rho V_i^2}{2} \right) - \left(P_m + \frac{\rho V_m^2}{2} \right) + \rho g(z_i - z_m) \quad (71)$$

Donde:

ΔP	Diferencia total de presión entre los nodos n y m	[Pa]
P_i, P_m	Presiones de entrada y salida	[Pa]
V_i, V_m	Velocidades del flujo de aire de entrada y salida	[m/s]
g	Aceleración debida a la gravedad [9.81m/s ²]	
z_i, z_m	Altura a la que se encuentran la entrada y salida del aire	[m]

El manual desglosa con detalle diferentes modelos de patrones de entrada de aire que se pueden producir por ventanas y puertas y cómo son las ecuaciones que gobiernan estos patrones. Del mismo modo sucede con los diferentes escenarios que se pueden producir: ventilación cruzada, ventilación forzada por conductos, recirculaciones de aire, etc. Cada uno de ellos tiene sus reglas físicas de cálculo, extensamente descritas en el citado manual.

4.5.2 Estudio de la transferencia de calor y humedad a través de la envolvente

a) Aspectos generales

Los materiales de construcción empleados en edificios históricos son porosos, como ya se ha explicado al comienzo del capítulo. Por ello, las variaciones climáticas producen una respuesta dinámica sobre la envolvente, con el consiguiente impacto sobre el ambiente interior del edificio. Tal es la influencia que hay autores que incluso han señalado que las fuentes de humedad producidas por la humedad que pasa desde el terreno al interior a través de los muros podría dominar sobre las fuentes de humedad interna (Tariku, Kumaran et al. 2010). Además del flujo desde el terreno existen otras fuentes de humedad como la lluvia combinada con el viento. La influencia de todos estos parámetros se puede calcular por medio de HAM.

En 1995, en su tesis doctoral, Hartwig M. Künzel explicaba: *“Todavía no es una práctica común para resolver problemas en la física de la construcción hacer cálculos de transporte de humedad más allá del cálculo de la difusión de vapores, como con el método de Glaser.”* Aún a día de hoy, no es habitual encontrar simulaciones que empleen la transferencia combinada de calor y humedad a través de la envolvente del edificio, como se vio por las referencias más modernas en el capítulo 2 *“Antecedentes y Estado de la cuestión”*. El objetivo del trabajo de Künzel en ese momento era desarrollar un procedimiento de cálculo que permitiera calcular de manera simultánea el transporte de humedad y calor en materiales multicapa. Esto se podría aplicar posteriormente a cálculos en edificios teniendo en cuenta la influencia del clima natural como la lluvia, las heladas y la radiación solar (Künzel, Kiessl 1995).

Los principales mecanismos de transporte de calor y humedad de los componentes de un edificio se resumen en la tabla siguiente, en base a la clasificación realizada por Künz el.

Tabla 2. Lista de los principales mecanismos de transporte de calor y humedad que ocurren en la práctica, causados por potenciales de conducción (Künzel, Kiessl 1995).

	Transport mechanism	Cause and potential of transport
heat transport	heat conduction	temperature
	heat radiation	tempeature in 4th power
	air flow	total pressure, density differentials
	enthalpy flows through moisture movement	vapour diffusion with phase change and liquid transport flows in temperature field
vapour transport	gas diffusion	vapour pressure (temperature, total pressure)
	Molecular transport (effusion)	vapoure pressure
	solution diffusion	vapour pressure
	convection	total pressure gradient
liquid transport	capillary conduction	capillary suction stess
	surface diffusion	relative humidity
	seepage flow	gravitation
	hydraulic flow	total pressue differentials
	electrokinesis	electrical fields
	osmosis	ion concentration

Los mecanismos de transporte de humedad se producen por difusión de vapor, succión capilar o una combinación de ambos, que depende del contenido de humedad del material. En la región higroscópica, los poros están principalmente llenos de vapor de agua, lo que supone que el transporte de humedad se produce por difusión de vapor. El transporte de agua líquida es posible donde existe capacidad para que los poros se llenen de agua, lo que se produce en la región capilar del elemento, cuando la humedad relativa supera el 95%.

El transporte de vapor y líquido no son dos fenómenos separados, sino que pueden darse de manera conjunta en el límite de la región mojada.

Tariku define una serie de ecuaciones de cálculo que permiten conocer este fenómeno de transporte a través de la envolvente. La primera de las ecuaciones es la de transferencia de humedad considerando el sistema como isoterma, sin considerar el flujo de aire o los efectos de la gravedad. La segunda de las ecuaciones considera el flujo de aire a través de medios porosos empleando la Ley de Poiseuille, que relaciona el gradiente de presión con la velocidad del flujo. Por último, emplea la ecuación de conservación de masa (Tariku, Kumaran et al. 2010). La combinación de estas ecuaciones son empleadas por Tariku y Kumaran para el análisis transitorio de HAM combinando el programa Matlab con COMSOL Multiphysics.

b) Fundamentos en Design Builder para el cálculo de HAM

El programa Design Builder opera con el motor de cálculo EnergyPlus¹⁸. El cálculo se resuelve mediante un algoritmo que combina calor y humedad de forma unidimensional mediante elementos finitos. Este simula el movimiento y almacenamiento de calor y humedad de forma simultánea entre el interior y el exterior a través de la envolvente del edificio. Todo ello está condicionado al conocimiento de un conjunto de propiedades de los materiales que componen las distintas capas del muro. En el capítulo 5 “Metodología” se detallan las propiedades que ha sido necesario conocer para los cálculos de este trabajo.

El programa emplea las ecuaciones de equilibrio de calor y humedad, cada uno de estos términos describen el almacenamiento, transporte y generación de calor respectivamente (Künzel, 1995):

$$\frac{\partial H}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa^w \frac{\partial T}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta \partial T}{\mu \partial x} \right) \quad (72)$$

Para calcular el coeficiente de difusión de vapor en el aire (δ), se emplea la siguiente ecuación, tomada también de Künzel:

$$\delta = \frac{(2 \times 10^{-7} \times (T + 273.15)^{0.81})}{P_{ambiente}} \quad (73)$$

El término que describe la capacidad de almacenamiento de calor depende del contenido de humedad del material. La relación se establece por medio de la ecuación siguiente:

$$\frac{\partial H}{\partial T} = (c\rho + c^w w) \quad (74)$$

Donde:

c^w	Calor específico del agua = 4,180 J/kg°C a 20 °C	
ρ	Densidad del material	[kg/m ³]
w	Contenido de humedad del material	[kg/m ³]

Tanto el contenido de humedad del material, como el factor de resistencia a la difusión de vapor dependen de la HR en el interior del material.

¹⁸ Las ecuaciones que se detallan a continuación se extraen del Manual de cálculo de EnergyPlus v. 8.2

5 METODOLOGÍA

5.1 ELECCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

- 5.1.1 Preselección de los casos de estudio
- 5.1.2 Selección final de casos de estudio
- 5.1.3 Condicionantes para la elección de los casos de estudio

5.2 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE ENSAYO A ESTUDIAR

- 5.2.1 Parámetros ambientales
 - 5.2.1.a)
 - 5.2.1.b)
 - 5.2.1.c) *Sistema de trabajo para medición de parámetros ambientales*
- 5.2.2 Parámetros materiales
 - 5.2.2.a) *Toma de muestras*
 - 5.2.2.b) *Ensayos realizados en el laboratorio*
 - 5.2.2.c) *Ensayos complementarios en campo*

5.3 SIMULACIÓN POR ORDENADOR

- 5.3.1 Modelado para la simulación
- 5.3.2 Precisión del modelo
- 5.3.3 Introducción de materiales en el modelo
- 5.3.4 Configuración de las condiciones de contorno para la simulación
 - 5.3.4.a) *Caudales de entrada de aire*
 - 5.3.4.b) *Horarios de apertura y uso del edificio*
 - 5.3.4.c) *Renovaciones e infiltraciones*
 - 5.3.4.d) *Temperaturas iniciales*
 - 5.3.4.e) *Creación de un archivo climático especializado*
- 5.3.5 Resultados obtenidos de las simulaciones con Design Builder

5.4 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DATOS

5. METODOLOGÍA

5.1 Introducción

El trabajo realizado en cada uno de los edificios analizados se divide en tres partes: trabajo en campo, trabajo en laboratorio y simulación. Los trabajos en campo consisten en realizar varios estudios in-situ en cada edificio, entre los cuales está la toma de medidas, fotografías, o inspecciones higrotérmicas manuales. Los trabajos en laboratorio consisten en la caracterización de muestras de material extraídas del edificio y ensayos físicos de las mismas. Por último, los trabajos de simulación, recogen todas las características del edificio, antes determinadas con los datos recopilados, en un modelo 3D que servirá para realizar los cálculos computacionales de comportamiento del ambiente del edificio. Cada uno de estos tres bloques de trabajo se explicará con detenimiento en los apartados siguientes.

5.2 ELECCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

5.2.1 Preselección de los casos de estudio

Para realizar la selección de los casos de estudio, se llevaron a cabo trabajos de toma de datos en 6 edificios históricos diferentes a los que se ha podido tener acceso. El patrón común de todos ellos era:

- a) Edificios históricos, formados por muros de fábrica de piedra¹.
- b) Todos los edificios se encuentran afectados por la filtración de agua capilar a través de sus muros. Lo que crea patrones de evaporación desiguales en algunas partes del edificio. Esto resultaba de interés para estudiar las razones de su comportamiento en cada caso.

En todos los edificios estudiados se realizaron trabajos de inspección manual con termohigrómetro y anemómetro en varias estaciones diferentes del año para entender cómo se comportaban higrotérmicamente. Algunos de los casos de estudio (Filmoteca de Castilla y León, Convento de Capuchinos) sirvieron para ensayar el método de trabajo diseñado. Con ello se pudo probar su funcionamiento, y realizar revisiones sobre el mismo: de estandarización de toma de datos, de proceso y análisis de datos, etc.

Una vez validado y estandarizado adecuadamente todo el proceso, se seleccionaron tres casos de estudio. En el apartado siguiente se explican los criterios de selección de los tres casos finales.

¹ A excepción de la Sala de Exposiciones “Montaña Artificial” ubicada en los Jardines del Buen Retiro (Madrid).

Tabla 3 Lista de los 7 casos de estudio analizados durante el período de investigación, con su ubicación y período durante el que se realizaron trabajos de toma de datos, inspección y monitorización higrotérmica.

Edificio	Ubicación	Período de trabajo
Capilla del Cristo (Monasterio de Sta. María de Conxo)	Santiago de Compostela	2014-2018
Ermita del Humilladero	Ávila	2014-2018
Filmoteca de Castilla y León	Salamanca	2015-2016
Iglesia de Santiago de Peñalba	Peñalba de Santiago (León)	2016-2018
Convento de los Capuchinos	Salamanca	2015-2016
Iglesia Corticela (Catedral de Santiago)	Santiago de Compostela	2017-2018

STª Mª de Conxo

Ermita de Humilladero

Filmoteca de Castilla y León

Santiago de Peñalba

Convento Capuchinos

Corticela

5.2.2 Selección final de casos de estudio

Finalmente, se seleccionaron 3 de los 6 casos, aquellos que presentaban mayor interés para esta investigación. Los criterios de selección se basan en las similitudes que los tres edificios tienen entre sí (Tabla 3), pero también en la existencia de ciertas diferencias entre ellos que los hacen interesantes para explorar la adaptación del método a las particularidades de cada caso de estudio.

En la siguiente tabla se recogen aquellas características comunes entre los tres casos seleccionados.

Tabla 4 Lista de los 3 casos de estudio que se seleccionaron finalmente para realizar el trabajo completo.

Edificio	Tipología de muros	Espesor [cm]	Morfología general	Capacidad de ventilación	Clima del lugar ²
Iglesia de Santiago de Peñalba	Mampostería de caliza	70-150	Masivo, pocos huecos de ventana. Esbelto	Deficiente	Oceánico.
Capilla del Cristo (M. de Conxo)	Mampostería y sillería de granito	70-100	Muy masivo, pocos huecos.	Deficiente	Clima oceánico húmedo.
Ermita del Humilladero	Mampostería y sillería de granito	70-100	Muy masivo, grandes huecos pero cerrados.	Media-Deficiente ³	Clima mediterráneo continentalizado

5.2.3 Condicionantes para la elección de los casos de estudio

Para la elección de los casos de estudio se tienen en cuenta una serie de características que todos los edificios deben tener en común y que se agrupan en tres grupos:

- Parámetros de clima.
- Materiales
- Morfología del edificio.

² Los climas de cada lugar vienen descritos con detalle en el capítulo de casos de estudio, dentro del apartado correspondiente para cada edificio.

³ En el caso de la Ermita del Humilladero, como se describe en el capítulo correspondiente a este caso, cuenta con una proporción de hueco-masivo muy favorable a la ventilación. Tiene grandes ventanas y puertas en la zona de capilla. Pero, debido al régimen de uso que tiene esta ermita, los grandes ventanales permanecen cerrados durante casi todo el año, por lo que no cuenta con una ventilación tan notable como la que se pudiera esperar. Según su régimen de uso habitual, suele ventilar por los huecos de la sacristía, que son los que tienen un régimen de apertura mayor durante los momentos de actividad de la cofradía que regenta este edificio.

Como se explicaba anteriormente, el comportamiento evaporativo de un edificio histórico, carente de sistemas de climatización, tiene una relación directa con su microclima, los materiales constructivos y su morfología.

a) **El microclima:** es necesario hacer un seguimiento mínimo durante un ciclo completo de un año de cada uno de los edificios, para poder estudiar correctamente las variaciones higrotérmicas que se van produciendo a lo largo de las diferentes estaciones. Además, el seguimiento a largo plazo permite estudiar la influencia de fenómenos como la lluvia.

De los tres edificios finalmente seleccionados, se identifican tres climas meteorológicos diferentes. Dos de ellos han presentan ciertas similitudes (Santiago de Compostela y Peñalba de Santiago), mientras que el tercero es considerablemente diferente:

- Peñalba de Santiago (León): Un clima oceánico con inviernos fríos y veranos calurosos y secos. Cuyos períodos de primavera y otoño son cortos.
- Santiago de Compostela: Un clima oceánico húmedo. Con inviernos fríos y húmedos. Veranos no muy calurosos despejados.
- Ávila: Un clima mediterráneo continentalizado. Con inviernos fríos y secos, veranos cortos y calurosos. En general, se trata de un clima seco durante todo el año.

b) **Los materiales constructivos:** Todos los casos estudiados tienen en común ciertas características constructivas y morfológicas que ayudan a establecer relaciones entre ellos. Los edificios estudiados se caracterizan por estar contruidos en piedra, con espesores de muro de entre 0,70m y 1m. En todos los casos, la cimentación, e incluso parte de los muros, están en contacto directo con el terreno, sin ningún tipo de material aislante, lo que hace que se trate de edificios permeables al agua del suelo, que en todos los casos presentaban problemas de succión capilar desde el terreno. En el caso de la Ermita del Humilladero (a) Figura 27 corresponde con una sección del muro sur, que se encuentra parcialmente enterrado por el desnivel de la calle (Figura 226, apartado 6.3.1, capítulo 6). Este muro presentaba problemas de humedad por filtraciones del terreno a través de este muro sur. En el caso de la Capilla del Cristo del Monasterio de Conxo (b) Figura 27, corresponde con una sección del muro norte. Este muro tiene adosado por el exterior nichos del cementerio que provocaban que el agua se acumulase y entrase al interior por la cubierta de los nichos (Figura 199, apartado 6.2.1, capítulo 6). Como en el caso de la Ermita del Humilladero, este edificio también tenía un problema de succión de agua del terreno⁴. En el caso de la Iglesia de Santiago de Peñalba (c) Figura 27, el

⁴ El problema de la filtración del agua del terreno se resuelve con un drenaje perimetral, documentado en el Proyecto básico y de ejecución de eliminación de humedades en la Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo (diciembre de 2012), redactado por la arquitecta Alicia Noya. No obstante, según las mediciones con termohigrómetro y monitorización que se llevaron a cabo durante los años 2014 a 2018, en el edificio persiste algún problema de filtración de agua en algunos puntos localizados.

muro norte se encuentra en contacto con el terreno, presentando algunas zonas succión capilar, igual que en los dos casos anteriores. Además, el edificio tiene problemas de filtración de agua de lluvia a través de las juntas de mortero, que hacen que aparezca una mancha al interior en momentos de lluvia intensa (Figura 76, apartado 6.1.1, capítulo 6). En el capítulo 6, se describe con más detalle el sistema constructivo de cada caso particular, así como los materiales, lesiones encontradas y otros datos de interés.

c) **La morfología:** Se trata de edificios con un nivel de ventilación deficiente. Esto se debe, en parte a su nivel de actividad, pero esencialmente por su morfología: muy masiva, con pocas aperturas al exterior y en una proporción muy pequeña por parte de los huecos. La excepción es la Ermita del Humilladero, que si posee una relación hueco-macizo favorable a los huecos, pero, por el régimen de uso que tiene, rara vez se abren las puertas norte u oeste (que son las de mayor dimensión). Generalmente ventila por la sacristía, en los momentos de actividad de la cofradía, que tiene una puerta de 1m de ancho por 2,10 de alto.

Figura 27 Detalles de muro de cada uno de los edificios estudiados. (a) Muro sur, parcialmente enterrado de la Ermita del Humilladero, en Ávila. (b) Muro norte, limitando con el cementerio de la Capilla del Cristo, del Monasterio de Santa María de Conxo, en Santiago de Compostela. (c) Muro norte de la Iglesia de Santiago de Peñalba, en Peñalba de Santiago (León). Planos realizados por la autora de esta tesis.

5.3 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE ENSAYO A ESTUDIAR

Dado que la evaporación del edificio histórico se caracteriza por los parámetros explicados en el apartado anterior, es necesario conocer qué variables físicas los determinan, y medirlas. En este caso, las mediciones se realizan de dos maneras: in-situ o en laboratorio. Las mediciones in-situ se realizan mediante instrumental especializado –data-loggers, termohigrómetros, anemómetros etc- y en laboratorio mediante ensayos específicos⁵.

Se pueden agrupar los parámetros a medir en dos tipos: ambientales y materiales. Los ambientales se miden in-situ y engloban el clima que rodea al edificio, y el ambiente interior del mismo. Por otro lado, las características materiales se determinan fundamentalmente por medio de la caracterización en laboratorio.

En el siguiente cuadro resumen se agrupan las variables a medir y los equipos empleados para ello.

Tabla 5 Clasificación de los parámetros que se deben estudiar en todos los edificios analizados, junto con las variables que los definen en cada caso, y el sistema de medición empleado para determinarlos.

TIPOS DE PARÁMETROS		VARIABLES		SISTEMA MEDICIÓN
AMBIENTALES	CLIMA INTERIOR	T	°C	Termohigrómetros
		HR	%	Data-loggers
		W	g/kg	Anemómetro
		v	m/s	
	CLIMA EXTERIOR	T	°C	Data-loggers
		HR	%	
		W	g/kg	
		v	m/s	Bases de datos meteorológicas
		R _n	MJ.m-2/día	
		ET	mm/d	
		Dir. v	°	

⁵ Los ensayos de laboratorio se realizan con muestras de material extraído del edificio.

TIPOS DE PARÁMETROS		VARIABLES		SISTEMA MEDICIÓN
AMBIENTALES	CLIMA EXTERIOR	Pluviometría	mm/d	Bases de datos meteorológicas
		Latitud Longitud	°	
MATERIALES		f_0	%	Ensayos hídricos: (Absorción por succión capilar, Permeabilidad al vapor de agua, Sorción higroscópica)
		S	mm/min ^{1/2}	
		ρ	kg/m ³	
		AC	mg/cm ² s ^{1/2}	
		C ₀	%	
		Composición mineral: (Tipos y % de minerales presentes)		Caracterización petrofísica: (DRX, MOP, Análisis térmico, SEM)
		C _p	J/kg.K	Código Técnico de la Edificación u otras fuentes bibliográficas.
		λ	W/m.K	
MORFOLÓGICOS	DIMENSIONES	Área	m ²	Mediciones con láser y flexómetro
		Volumen	m ³	
		Longitudes, anchos, espesores	m	
	SISTEMA CONSTRUCTIVO	Superposición de fases constructivas, tipología de muros, solución de encuentros con terreno y cubierta, tipos de ventana, acabados, estructura etc.		Fotografías Mediciones con flexómetro

TIPOS DE PARÁMETROS		VARIABLES	SISTEMA MEDICIÓN
MORFOLÓGICOS	OTROS DATOS	Distribución y porcentaje de huecos. Horarios de apertura de puertas y ventanas, Régimen de uso del edificio.	Anotaciones Fotografías

5.3.1 Parámetros ambientales

El clima interior del edificio se caracteriza midiendo: temperatura, humedad relativa y velocidad del viento. El clima exterior, se ve afectado por gran cantidad de parámetros meteorológicos más complejos de determinar, por lo que su análisis resulta un poco más laborioso y se ha llevado a cabo combinando las mediciones in-situ de temperatura (T), humedad relativa (HR) y velocidad del viento (v) con la descarga de datos de bases meteorológicas. Se explica a continuación cómo se ha trabajado en el clima exterior e interior al edificio. Para la toma de datos se siguen las recomendaciones recogidas en la norma UNE-EN16242:2014 *Conservación del patrimonio cultural. Procedimientos e instrumentos para la medición de la humedad del aire y los intercambios de humedad entre el aire y el patrimonio cultural*.

5.2.1.a) Microclima exterior

Es importante contemplar en el cálculo del comportamiento evaporativo del edificio los fenómenos externos al edificio, ya que es a través de su envolvente donde se producen los intercambios entre el interior y el exterior. En el exterior se producen una serie de cargas más o menos inestables que van cambiando a lo largo del año, mientras que el interior es más estable. Esta diferencia entre los dos ambientes es la que da lugar al proceso transitorio de transporte de calor, aire y humedad a través de la estructura (Tariku, 2008).

El clima exterior al edificio resulta ser un factor determinante. Tanto es así que existen algunos trabajos centrados en el estudio concreto de cómo los fenómenos atmosféricos afectan a las edificaciones con valores patrimoniales. (Lankester & Brimblecombe, 2012), realizaron un trabajo en el que desarrollan una función de transferencia para predecir la temperatura y la humedad en el interior de los edificios partiendo de los datos de clima exterior en una habitación no climatizada. En su trabajo, explican que los

cambios climáticos que parecen pequeños, como, por ejemplo, la variación de un par de grados Celsius, pueden llegar a producir cambios significativos en el ambiente interior.

Se han empleado dos fuentes de datos para conocer el clima exterior: la monitorización y las bases de datos meteorológicas. A continuación, se describe cómo se ha trabajado con cada una de estas fuentes.

Toma de datos mediante monitorización:

Se colocan, en cada edificio, dos data-loggers de exterior, en dos orientaciones diferentes –norte y sur- para poder obtener una media más precisa del clima cercano al edificio (Figura 28). Estos aparatos miden temperatura (T) y humedad relativa (HR). Con estos datos se realiza el cálculo del grado de humedad (W_{ext}). Los data-loggers de exterior se programan para tomar lecturas en intervalos de 10 minutos, midiendo al mismo tiempo que los del interior.

Posteriormente, con los datos de exterior se elabora un archivo climático⁶ que se emplea en la simulación por ordenador del edificio.

Figura 28. (Izquierda) Data-loggers de exterior colocados en la Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo (Santiago de Compostela). Se colocaron protegidos de las fuertes lluvias que en algunos momentos del año azotan la fachada, en el interior de la cornisa, pero dejando la ventana abierta en todo momento. (Derecha) Uno de los data-loggers de exterior, colocado en la Iglesia de Santiago de Peñalba, en un punto protegido de la lluvia y el viento.

Toma de datos de las bases meteorológicas:

Dada la complejidad que tiene recoger algunos de los datos meteorológicos, como la radiación solar, pluviometría, o viento, que requieren de instrumental especializado, se han tomados estos datos de las fuentes meteorológicas acreditadas para ello. Conocer

⁶ La finalidad y elaboración del archivo climático se explica con detenimiento en el apartado 5.4.4 “Configuración de las condiciones iniciales para la simulación”.

estos datos es necesario para realizar los cálculos de evaporación que se describen en el capítulo 6, además de poder analizar el comportamiento higrotérmico del edificio en relación a las variaciones del clima exterior. Las bases de datos empleadas se especifican en la Tabla 6. Se procura que la estación meteorológica de la que se toman los datos sea lo más cercana posible al edificio estudiado para asegurar la mayor precisión posible en el cálculo. Algunas estaciones meteorológicas permiten tener datos de clima cada media hora, como las de la Junta de Castilla y León, o incluso cada 10 minutos, como es el caso de las de la Xunta de Galicia. Los datos se descargan con la mayor precisión que ofrezca la base de datos, y se realizan medias horarias con estos datos.

Tabla 6 Bases de datos meteorológicas para cada uno de los casos de estudio analizados

Edificio	Base de datos meteorológica
Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo	Xunta de Galicia www.meteogalicia.gal Agencia estatal de meteorología (AEMET) www.aemet.es
Capilla del Humilladero	Junta de Castilla y León http://www.inforiego.org
Iglesia de Santiago de Peñalba	Junta de Castilla y León http://www.inforiego.org

Los parámetros que se han tomado de dichas fuentes se enumeran en la Tabla 7:

Tabla 7 Parámetros recogidos por las estaciones meteorológicas en su base de datos, y que han sido empleados en los cálculos de esta investigación. En esta tabla se enumera también la finalidad de cada uno de los datos recogidos.

Parámetro	Nomenclatura	Unidades	Archivo climático (Design Builder)	Cálculo de Evaporación
Temperatura media	T_{md}	°	X	X
Temperatura máxima	T_{mx}	°		X
Temperatura mínima	T_{mn}	°		X
Humedad relativa media	HR_{md}	%	X	X
Humedad relativa máxima	HR_{mx}	%		
Humedad relativa mínima	HR_{mn}	%		
Velocidad del viento	u	m/s	X	X
Dirección del viento	dr	°	X	X
Radiación	R	MJ/m ²	X	X
Precipitación	P	mm/día	X	X
Evapotranspiración media	e	mm/día		X

Finalidad de los datos del clima exterior:

Los datos recogidos, tanto con monitorización, como de las bases de datos meteorológicas, tienen tres finalidades:

- a) La creación de un archivo climático para la simulación por ordenador de cada edificio mediante software Design Builder. La creación de este archivo se explica en el apartado 5.4.4 *“Configuración de las condiciones iniciales para la simulación”*.
- b) El análisis comparativo de los datos de monitorización del ambiente interior en relación con el análisis del ambiente exterior.
- c) El cálculo de la evaporación, tal como se explica en el capítulo 6, apartado 6.1.3 para el caso de estudio de la Iglesia de Santiago de Peñalba, apartado 6.2.3 para el caso de la Ermita del Humilladero y apartado 6.3.3 para el caso de la Capilla del Cristo del Monasterio de Santa María de Conxo.

5.2.1.b) Clima o ambiente interior

Los parámetros que caracterizan el clima interior son: la temperatura (ya sea del aire, o de los materiales que constituyen el edificio), la humedad y la velocidad del aire.

El estudio de la distribución de humedad específica, humedad relativa y temperatura permiten identificar procesos de transporte e intercambio de humedad entre el aire y la superficie de los muros. Por tanto, para poder estudiar la evaporación de los muros y su relación con el ambiente –lo que se ha denominado como “comportamiento evaporativo”- se ha considerado necesario diseñar un sistema de monitorización basado en: registradores de temperatura y humedad (data-loggers), además de anemómetro para conocer la velocidad y temperatura del aire entrante por cada uno de los orificios⁷ del edificio. Las técnicas de monitorización han tenido un largo recorrido hasta la actualidad, sirviendo de gran utilidad en edificios históricos para caracterizar el comportamiento higrotérmico de éstos. Como ya se ha explicado en el capítulo 2 de *“Antecedentes y estado del arte”*, ya en los años 80 Dario Camuffo empieza a emplear este tipo de herramientas de medición de temperatura y humedad para analizar los intercambios entre el ambiente y los muros, por medio de estas mediciones de la lámina de aire cercana al muro (Camuffo 1982).

Lo que aquí se propone es un sistema de monitorización estandarizado para todos los casos de estudio. Se habla de “sistema” de monitorización porque se trata de un conjunto de registradores colocados en diferentes puntos, que responden a una serie

⁷ Se ha nombrado como “orificios” para incluir dos niveles de ventilación: Uno más controlado o previsible que se produce por aberturas -ya sean ventanas o puertas- o el aire de infiltración, que se produce de manera involuntaria por rendijas o grietas.

de estudios previos que se detallan más adelante (apartado 5.3.1.c). Estos registradores permiten hacer un seguimiento continuado de todo el edificio en su conjunto.

Es necesario que el sistema de monitorización trabaje en dos niveles:

- a) **Toma de datos sobre los paramentos**, para lo que se diseña un ensayo específico que se ha denominado **cuadrícula de monitorización**. Este ensayo consiste en colocar una cuadrícula de data-loggers en uno de los muros del edificio. En los párrafos siguientes se describe en qué consiste esta disposición de los aparatos. En el resto del edificio, también se colocan data-loggers en los muros. Los registradores deben colocarse en varios muros con orientaciones diferentes. Con ello se puede estudiar la influencia del calentamiento por el soleamiento en las diferentes orientaciones del edificio, la influencia de la lluvia sobre diferentes paramentos, el viento (la orientación o la velocidad producen flujos diferentes en cada muro), etc.

Como se explicaba en los capítulos 2 y 3, el fenómeno de absorción capilar, es frecuente en edificios de este tipo, y es el que produce los flujos de absorción- evaporación que se pretende estudiar. Esta absorción llega a equilibrarse con el ambiente en modo de evaporación, por lo que existe una zona en el muro “frente húmedo” –en el capítulo 2 “*Fundamentos teóricos*”, se explicaba que los investigadores C. Hall y W.D. Hoff habían acuñado el término de Sharp Front para denominar, y calcular, este frente húmedo- que se produce a una altura determinada. Con objeto de estudiar este fenómeno en relación con el ambiente es necesario colocar registradores a diferentes alturas y distancias del muro (Cuadrícula de puntos). Con ello se obtiene un análisis más preciso de aquella zona que presente mayor fenómeno de humedad, y por tanto, aquella zona del edificio donde pueden existir flujos de evaporación en ciertos momentos del año. La colocación de unos pocos data-loggers, repartidos de manera puntual, sin un estudio previo, no revelan correctamente el comportamiento global de un muro, de esta forma se puede obtener un conocimiento más preciso.

Para este estudio concreto, se ha diseñado una “**monitorización en cuadrícula**” (Figura 29 y Figura 30). Se colocan 3 columnas de data-loggers en vertical, separados entre sí 1,5 metros. Se colocan un total de 3 (o más en algunos casos) de filas horizontales en el mismo muro, lo que suman un total de 9 data-loggers. La distancia entre las verticales se procura que sea constante, de unos 3 metros, aunque dependen de las posibilidades de colocación, o de si se desea medir algún punto concreto que no corresponde al dibujo de la cuadrícula, en cada caso particular. Los data-loggers colocados en otros muros sirven para realizar una evaluación comparativa.

Figura 29. Ejemplo de la monitorización en cuadrícula sobre el muro norte de la Capilla del Cristo, en el Monasterio de Santa María de Conxo (Santiago de Compostela). La descripción completa del sistema de monitorización empleado en este edificio se describe en el capítulo correspondiente a este caso de estudio. Planos redibujados por la autora de esta tesis en base a la planimetría existente de la arquitecta Alicia Noya.

Figura 30. (Izquierda) Sección a modo de ejemplo de la monitorización en cuadrícula sobre el muro norte de la Iglesia de Santiago de Peñalba (León). (Derecha) Imagen de los data-loggers colocados sobre el muro, mediante un sistema evitando clavar sujeciones, por las exigencias de conservación de las pinturas del interior. La descripción completa del sistema de monitorización empleado en este edificio se describe en el capítulo correspondiente a este caso de estudio. Planos redibujados por la autora de esta tesis en base a la planimetría existente de la arquitecta Alicia Noya.

- b) Toma de datos en el ambiente interior del edificio.** Se colocan data-loggers en el ambiente del edificio, a diferentes alturas, para poder evaluar los gradientes térmicos y de humedad. Siempre se coloca algún data-logger de ambiente cercano al paramento en el que se encuentra la cuadrícula y otro en el centro del edificio a cierta altura y distancia del muro.

5.2.1.c Sistema de trabajo para la medición de parámetros ambientales

Antes de la colocación de los data-loggers, se han realizado inspecciones previas con termohigrómetro y anemómetro. La finalidad es localizar los focos de humedad, que puedan señalar posibles puntos de evaporación. Además de estudiar con anemómetro cómo se mueve el aire en el interior del edificio, lo que nos da una primera estimación, aunque luego se simulará por ordenador.

a) Inspección previa a la monitorización con termohigrómetro:

Se realizó con termohigrómetro TESTO 605 (Figura 31), que mide temperatura (T) en [°C], humedad relativa (HR) en [%] y temperatura de rocío (Td) en [°C] en. Las mediciones se realizan: en el ambiente interior, en varios puntos de éste; sobre los paramentos, y en el exterior. Si la inspección del interior se prolonga durante varias horas, las condiciones del clima exterior van variando, por lo que se realizan varias mediciones en el exterior.

Figura 31. Imagen de una medición con termohigrómetro cercana a la ubicación de una ventana en uno de los muros de la Ermita del Humilladero (Ávila).

Los puntos medidos con termohigrómetro se grafían sobre imágenes del edificio, para dejar definida la posición exacta de los puntos medidos (Figura 32). Finalmente, los puntos medidos se analizan estadísticamente (ejemplo de análisis de datos tomados con termohigrómetro en la inspección de uno de los edificios (Figura 34) para localizar

aquellos focos que tienen un comportamiento anómalo respecto al ambiente del edificio, presentando un grado de humedad más elevado, lo que indica un foco de humedad.

Figura 32. Imagen de la ubicación de los puntos medidos con termohigrómetro sobre el muro sur de la Ermita del Humilladero (Ávila). En esta inspección concreta, se tomaron más de 400 lecturas con termohigrómetro.

Los puntos medidos se pasan a planos, para conocer la distribución y ubicación exacta de aquellos puntos sobre los que se debe realizar control (Figura 33).

Figura 33. Ejemplo de un plano realizado en AutoCAD, del pavimento de la Capilla del Cristo, en el Monasterio de Santa María de Conxo (Santiago de Compostela). En este caso fue necesario graficar los puntos medidos no solo en pared, sino en el solado. Plano del solado realizado por la autora de la tesis.

Cada vez que se visita el edificio –esto se hace mínimo una vez al mes- se realizan mediciones con termohigrómetro a modo de puntos de control, aunque estén colocados los data-loggers.

Figura 34. Ejemplo del análisis de una de las inspecciones realizadas con termohigrómetro en uno de los edificios estudiados. Los puntos se clasifican por colores, según dónde se haya tomado la medición. Esto diferencia si se ha medido en el ambiente, o sobre paramentos. De esta gráfica se obtiene como resultado una clasificación de puntos que presentan valores de humedad anómalos y que, por tanto, serán controlados con monitorización.

b) Inspección previa a la monitorización con anemómetro:

Se ha empleado un anemómetro TESTO 405, que mide temperatura (T) en [°C] y velocidad del aire (v) en [m/s]. (Figura 35) Mediante anemómetro se han podido registrar las velocidades del aire entrante por puertas, ventanas y rejillas. En algunos casos ha sido muy importante para resolver hipótesis, como en el caso de la Iglesia de Peñalba que, a pesar de permanecer abiertas las puertas durante unas ocho horas al día de manera continuada (en horarios de 4 horas por la mañana y cuatro horas por la tarde), las lecturas con termohigrómetro confirman que en algunos puntos de la iglesia apenas se mueve el aire, especialmente a partir de los 3 metros de altura.

Se han realizado sencillos ensayos de ventilación para evaluar la capacidad que tiene cada edificio de renovar el aire:

- a) Con todas las puertas y ventanas cerradas
- b) Con diferentes combinaciones de puertas y ventanas

Este equipo permite situar el anemómetro en un punto del edificio y dejarlo registrando, a modo de data-logger, de manera continuada. De los valores obtenidos se realizan medias horarias de velocidad del viento y temperatura en los diferentes puntos monitorizados.

Figura 35. Anemómetro TESTO 405. Imagen de medición in situ en la Iglesia de Santiago de Peñalba, colocando el anemómetro fijo sobre un trípode para dejarlo midiendo durante el período de tiempo necesario.

c) Condicionantes para la colocación de data-loggers:

Ha sido necesario tener en cuenta las particularidades de cada caso estudiado para la colocación de los data-loggers.

El caso más complejo ha sido la monitorización de la Iglesia de Santiago de Peñalba. Los paramentos interiores de esta iglesia tienen pinturas de época mozárabe de gran valor artístico, que han sido restauradas. Esto exigía no colocar ningún tipo de anclaje para la sujeción de los equipos que se querían colocar sobre las paredes. Para resolver este problema, se ideó un sistema de colocación en altura desmontable, en el que los aparatos se colocaban a distancias pautadas, y posteriormente se situaban pegados a las paredes, sin realizar ningún tipo de perforación para su sujeción (Figura 36). En el caso de la Ermita del Humilladero, y de la Capilla de Conxo, se aprovecharon las juntas de mortero para anclar los aparatos (Figura 37).

Figura 36. Sistema de colocación de data-loggers en la Iglesia de Peñalba, sin perforaciones para la sujeción, evitando dañar las pinturas murales protegidas.

Figura 37. Sistema de colocación de data-loggers en aquellos edificios en los que las juntas de mortero se podían emplear para anclar un pequeño sistema de colocación. (Izquierda) Ubicación de data-logger de descarga manual en la Capilla de la Corticela (Catedral de Santiago de Compostela). (Derecha) Data-logger de descarga inalámbrica por medio de red local WiFi, en la bóveda de ladrillo de la Sala de Exposiciones “Montaña Artificial” en el Parque del Buen Retiro (Madrid)

d) Intervalo de medición:

La monitorización se realiza durante un tiempo de un año ininterrumpidamente. En algunos edificios, como la Capilla del Cristo del Monasterio de Santa María de Conxo, o la Iglesia de Santiago de Peñalba, se ha podido monitorizar durante más de un año. En particular, en la Capilla de Conxo, se decide prolongar el tiempo de monitorización debido a que los primeros datos no ofrecieron toda la información esperada. El intervalo de medida de cada aparato es de 10 minutos en todos los casos de estudio. Todos los aparatos colocados en un edificio están sincronizados de manera que empiecen a tomar las lecturas al mismo tiempo. Se obtiene un total de 144 lecturas de temperatura y humedad por día y por aparato. De los 9 aparatos colocados en pared, se obtiene un total de 1296 lecturas diarias, lo que supone más de 52000 lecturas al año, y más de 15000 lecturas en cada una de las estaciones del año. Esto permite un análisis muy preciso del edificio. Esto es importante para controlar las variaciones estacionales y su influencia sobre el ambiente interior.

e) Equipos utilizados:

Los registradores de datos empleados, además de medir la temperatura y la humedad, pueden ser programados en intervalos de medida regulares y tienen la ventaja de almacenar los datos en una memoria interna. Según el sistema empleado para la descarga de datos podemos clasificarlos en dos tipos: data-loggers de conexión inalámbrica y data-loggers de descarga manual.

Data-loggers de descarga inalámbrica: son aquellos que, por medio de una red local, tipo wifi, podemos visualizar los resultados almacenados en su memoria en el PC sin necesidad de conectar el registrador al ordenador. En este caso se ha contado con un router para la creación de una red local para tener acceso a los registradores. Existe la posibilidad de realizar la descarga de datos sin necesidad de personarse en el edificio si están conectados a una red de internet con acceso remoto. Este sistema solo se ha empleado en el caso de la Capilla del Cristo, en el Monasterio de Santa María de Conxo (Santiago de Compostela) por medio del sistema dispuesto por el Consorcio de Santiago al que se ha tenido acceso (Figura 38).

Figura 38. Data-loggers ubicados en la Capilla del Cristo de Conxo, durante la primera campaña de monitorización. Estos equipos pertenecían al Consorcio de Santiago, entidad contratante del estudio de las lesiones de humedad que se llevaron a cabo en esta Capilla.

En el resto de los casos se ha trabajado empleando una red local (WiFi) para la descarga de datos que resulta más económica (Figura 39 y Figura 40). La principal ventaja de este tipo de equipos es que pueden ser colocados en zonas altas o de difícil acceso y no es necesario retirarlos si se quiere realizar la descarga o visualización de las lecturas almacenadas. A pesar de ser equipos más económicos que los anteriores, su coste es más elevado que los data-loggers clásicos de descarga manual (Figura 41, Figura 42 y Figura 43). Por esta razón, se ha limitado su uso a aquellos puntos concretos en los que era necesario disponer de una descarga de datos inalámbrica.

Figura 39. Esquema de la red local para descarga de datos de los equipos con WiFi.

Figura 40. Lascar EL-WiFi TH+

Data-loggers de descarga manual: El sistema de almacenamiento es el mismo que los anteriores, pero la diferencia estriba en que la descarga debe realizarse de manera “manual” conectando el dispositivo al ordenador para poder descargar y/o visualizar los datos almacenados. Para ello era necesario contar con un ordenador portátil para poder realizar la descarga de datos in-situ. Esto permite no realizar una retirada de los equipos por un tiempo muy prolongado, evitando detener la monitorización. Los data-loggers de descarga manual tienen la ventaja de ser de menor tamaño y por tanto más ligeros, lo que ha resultado útil para colocarlos en zonas de fácil acceso, pero que deben estar ocultos por peligro de vandalismo o que resulta útil que no pesen porque deben ser colgados en altura. Otra ventaja de estos últimos es que resultaban ser más económicos al tener un menor nivel de sofisticación.

Figura 41 Perfect Prime TH0160

Figura 42 Logg 110 PCE Instruments

Figura 43 Lascar EL-USB-2-LCD+

Aunque se han empleado diferentes modelos de aparato, en todos los casos esto debían cumplir con un rango de medición, exactitud y resolución concreto.

En aquellos casos en los que se emplearon data-loggers de diferentes modelos para un mismo caso de estudio se realizan pruebas de precisión y calibración previas a su colocación para realizar las correcciones necesarias en caso de existir diferencias entre ellos.

Tabla 8 Equipos registradores de datos de humedad y temperatura y relación de edificios en los que se han recogido datos.

Modelo	Especificaciones técnicas	Descarga de datos	Edificio en el que se ha empleado	Cantidad empleada
Logg 110 PCE Instruments	TEMPERATURA: -20 a +50 °C Resolución: 0,1 °C Precisión: $\pm 0,5$ °C / -20 ... +50 °C $\pm 0,7$ °C (en el resto del rango) HUMEDAD RELATIVA: 0 a 99 % HR. Resolución: 0,1 % HR Precisión: ± 3 % HR	Manual	Montaña Artificial, Retiro (Madrid)	2
			Capilla del Cristo de Conxo (Santiago de Compostela)	2
			Iglesia de Santiago de Peñalba (Ponferrada)	1
			Capilla del Humilladero (Ávila)	3

Modelo	Especificaciones técnicas	Descarga de datos	Edificio en el que se ha empleado	Cantidad empleada
Lascar EL-WiFi TH+	TEMPERATURA: -20 a +60 °C Resolución: $\pm 0,01$ °C Precisión: $\pm 0,5$ °C HUMEDAD RELATIVA: 0 a 100 % HR Resolución: 1,0 % HR Precisión: $\pm 0,1$ % HR	Red local	Montaña Artificial, Retiro (Madrid)	1
			Capilla del Cristo de Conxo (Santiago de Compostela)	1
			Corticela, Catedral de Santiago de Compostela	1
Lascar EL-USB-2-LCD+	TEMPERATURA: -35 a +80 °C Resolución: $\pm 0,5$ °C Precisión: ± 2 °C HUMEDAD RELATIVA: 0 a 100 % HR Resolución: 0,5 % HR Precisión: ± 2 % HR	Manual	Iglesia de Santiago de Peñalba (Ponferrada)	3
			Montaña Artificial, Retiro (Madrid)	3
Perfect Prime TH0160	TEMPERATURA: -40 a +125 °C Resolución: $\pm 0,1$ °C Precisión: $\pm 0,3$ °C HUMEDAD RELATIVA: 0 a 100 % HR Resolución: 0,1 % HR Precisión: ± 2 % HR	Manual	Corticela, Catedral de Santiago de Compostela	6, 7
			Capilla del Cristo de Conxo (Santiago de Compostela)	12
			Capilla del Humilladero (Ávila)	5
			Iglesia de Santiago de Peñalba (Ponferrada)	11

f) Cantidad de equipos necesarios

La cantidad de equipos colocados responde a las necesidades de cada caso particular, pero los trabajos que se han ido realizando en los edificios estudiados, así como las recomendaciones de diferentes fuentes, han dado en determinar que existe un número mínimo de equipos que se debe colocar en todos los casos, que son:

2 data-loggers en exterior: uno en orientación norte y otro sur

Mínimo 1 data-logger de ambiente en el interior (preferiblemente 2 para evaluar el gradiente higrotérmico en altura)

El número necesario según inspección manual previa de data-loggers en el muro y encuentro entre el suelo y el muro.

Se ha notado, gracias a la cantidad considerable de equipos colocados en los tres principales casos de estudio, que nunca existen datos redundantes, si se hace una distribución correcta. Dados los comportamientos diferenciales en las distintas zonas del edificio, siempre es interesante monitorizar la mayor cantidad de puntos posible. Lo contrario, conduce a la falta de datos y a un análisis impreciso. Así lo reconocen (Albero, et al., 2004). En su trabajo, estos autores recurren a la simulación mediante el software STAR-CD Adapco, precisamente para complementar los datos sobre el edificio, debido a que “la cantidad de equipos colocados no fueron suficientes”.

A pesar de defender la necesidad de una monitorización lo más extensa posible, es necesario matizar que se deben “medir” los esfuerzos y no realizar una campaña descontrolada de datos. Para ello, es fundamental la inspección higrotérmica previa, así como el apoyo mediante la simulación, al modo en que Albero et. al. realizan en la Domus Aurea. Precisamente el apoyo mediante herramientas CDF –que también se ha incorporado a la metodología de trabajo, y se explica en apartados posteriores-completa esta tarea de estudio del edificio.

5.3.2 Parámetros materiales

Existen ciertas características físicas de los materiales de construcción que determinan su comportamiento higrotérmico (Tabla 9) y por tanto, determinan su capacidad de evaporación (M.P.Q Delgado, et al., 2012).

Tabla 9 Parámetros materiales que se deben determinar mediante los ensayos físicos.

Parámetros materiales que se determinan mediante ensayos		
A_b	Coeficiente de absorción (presión atmosférica)	[%]
AC	Coeficiente de absorción por capilaridad	[kg/(m ² .s ^{1/2})]
D^w	Coeficiente de transporte líquido	m ² /s
f_0	Porosidad abierta	[%]
V_b	Volumen aparente (de una probeta o muestra de material)	[mm]
W	Contenido en humedad	[kg/m ³]
δ_p	Permeabilidad al vapor de agua	kg/(m.s.Pa)
ρ_b	Densidad aparente	[kg/m ³]
λ	Conductividad térmica	[W/mK]

Además de las mediciones higrotérmicas en el edificio, es necesario realizar la caracterización de los materiales mediante una serie de ensayos (página 150). En todos los casos estudiados se han tomado muestras de material que han sido analizadas en laboratorio.

5.2.2.a) Toma de muestras:

Siguiendo las recomendaciones de la norma UNE-EN 16085:2012 *Conservación del patrimonio cultural. Metodología para la toma de muestras de materiales del patrimonio cultural. Reglas generales*. Es necesario definir el objeto con el que se toman las muestras. En el caso de este trabajo, todas se toman para realizar los ensayos que se enumeran en el apartado siguiente, con objeto de conocer los parámetros de la Tabla 9—coeficiente de absorción, porosidad etc— de manera que se puedan realizar los cálculos requeridos en esta tesis. Todos los cálculos se detallan en los apartados siguientes de este capítulo de Metodología.

A la toma de muestras, precede una inspección detallada del edificio, para elegir la zona adecuada de la que se deben tomar las muestras. La extracción o toma de muestras se realiza siempre de manera que se minimice cualquier efecto visible y/o dañino para el patrimonio estudiado. Las muestras se toman, según recomienda la norma, de un emplazamiento tan discreto como sea posible.

Figura 44. (Izquierda) Toma de muestras de tierra bajo las losas granito de la Capilla del Cristo del Monasterio de Santa María de Conxo (Santiago de Compostela). (Derecha) Toma de muestras en el muro norte de la Iglesia de Santiago de Peñalba (León).

De todas las muestras extraídas se realiza una ficha de registro (Tabla 10), asociada a la muestra. Todas las muestras se numeran con un código. Estas tablas se detallan en cada uno de los capítulos dedicados a los diferentes casos de estudio, en su apartado correspondiente a ensayos de laboratorio.

Tabla 10 Relación de muestras recogidas en cada caso de estudio.

Edificio	Código	Fecha de toma	Material	Estado	Lugar extracción	Ensayo
Iglesia Santiago de Peñalba	P01	14/06/2017	Mármol	C	5043_3	EH4
	P02	14/06/2017	Mármol	C	5043_3	EH1, EH2, EH3
	P03	14/06/2017	Mármol	C	5043_3	EH4
	P04	14/06/2017	Mortero 2	C	5043_3	EH4
	P05	14/06/2017	Mortero 1	C	5043_3	EH4
	P06	26/08/2017	Mortero 1	C	5043_3	EH1, EH2, EH3
	P07	26/08/2017	Mortero 2	C	5043_3	EH1, EH2, EH3
	P08	26/08/2017	Mármol	C	5043_3	EP2
	P09	26/08/2017	Mármol	C	5043_3	EP1, EH2
	M01	14/06/2017	Mortero 1	A	5043_3	EP2, EH2
	M02	14/06/2017	Mortero 2	C	5043_3	EP2, EH2
Capilla del Cristo, M. de Conxo	X01	17/03/2015	Granito	C	5100_0	EH4
	X02	17/03/2017	Granito	C	5100_0	EH1, EH2, EH3, EH4
	X03	17/03/2017	Granito	C, E	5100_0	EH1, EH2, EH3, EH4
	X04	17/03/2015	Granito		5100_0	EH2
Ermita del Humilladero	H01	11/09/2015	Granito	C, E	7344_5	EH4
	H02	11/09/2015	Granito	C, E	7344_5	EH1, EH2, EH3
	H03	11/09/2015	Granito	C, E	7344_5	EP1, EH2
	H04	11/09/2015	Granito	C, E	7344_5	EP2

Códigos para Tabla 10

<i>Estado</i>	<i>Ensayos</i>
<i>C Consistente</i>	<i>EH1 Absorción capilar</i>
<i>A Arenizado</i>	<i>EH2 Densidad aparente, porosidad abierta, densidad real (picnómetro)</i>
<i>E Presenta eflorescencias</i>	<i>EH3 Absorción bajo presión (inmersión)</i>
<i>B Presenta biodegradación</i>	<i>EH4 Sorción higroscópica</i>
	<i>EP1 Difracción de Rayos X (DRX)</i>
	<i>EP2 Microscopía electrónica de polarización (MOP)</i>

El número de muestras tomadas en cada edificio se limita al mínimo necesario para cada ensayo, siempre limitado a las exigencias de preservación del patrimonio. Es importante comentar que, de cada una de las muestras que se tomaron en el edificio, se hace una división en porciones en el laboratorio, y cada una de ellas se reutiliza en varios ensayos, ya que algunos de estos ensayos, como los de caracterización petrográfica (EP1 a EP4) requieren de muy pocos gramos, o incluso micras de material. Por tanto, la numeración de la Tabla 10 corresponde con el número final asignado a cada una de estas porciones por ensayo.

Las muestras se etiquetan con un código individual para cada una de ellas, siempre en recipientes herméticos (dependiendo de la integridad de la muestra o facilidad de transporte pueden ser botes o bolsas herméticas). El empleo de botes se ha dedicado especialmente para aquellas muestras que se encuentran muy disgregadas como arenas o morteros a las que es necesario realizar ensayos tratando de no tener que moverlas de recipiente. En estos casos los botes han sido previamente tarados para conocer su peso. En la Figura 45 se ubican los puntos en que se tomaron las muestras (punto azul sobre el plano de planta) en cada uno de los tres edificios.

Planta ermita del Humilladero (Ávila). En azul, marcadas las zonas en las que se tomaron las muestras.

Planta de la iglesia de Santiago de Peñalba (León). En azul, marcadas las zonas en las que se tomaron las muestras.

Planta de la capilla del Cristo, Monasterio de Conxo (Santiago de Compostela). En azul, marcadas las zonas en las que se tomaron las muestras.

Figura 45. (Arriba) plantas de los tres casos de estudio, marcando en azul la zona en la que se tomaron las muestras. (Abajo) Conjunto de muestras de varios de los edificios ensayados para la tesis doctoral. En la imagen aparecen muestras de algunos de los 7 edificios ensayados, aunque finalmente se eligen 3 para el desarrollo completo del estudio. Si las muestras no tienen integridad material suficiente se colocan en recipientes herméticos previamente tarados y numerados.

El almacenamiento de las muestras se realiza en el laboratorio, sin retirarlas de sus recipientes, solamente para los ensayos que sea necesario hacerlo (Figura 45).

5.2.2.b) Ensayos realizados en de laboratorio:

Para cada caso de estudio se han tomado varias muestras de piedra y en algunos casos de mortero, dependiendo de su estado de integridad, para realizar los correspondientes ensayos. Los ensayos hídricos se han llevado a cabo en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (Universidad Politécnica de Madrid). Los ensayos de caracterización petrográfica de las muestras, se han llevado a cabo en el Centro de Asistencia a la Investigación (CAI) de la Facultad de Ciencias Geológicas, de la Universidad Complutense de Madrid.

[EP1] Difracción de Rayos X (DRX)

Este método se basa en la difracción de radiaciones que produce la materia cristalina. De los distintos métodos de difracción, el de rayos X es el más versátil y utilizado.

Se hace incidir sobre una estructura cristalina un haz de rayos X, y los planos de esta hacen que los rayos se reflejen produciendo dispersión o difusión. Cuando son difundidos se generan procesos de interferencia, de tipo destructivo la mayoría de las ocasiones (cuando el desfase entre dos rayos es media longitud de onda), o constructiva

en algunas direcciones, dando lugar al fenómeno de la difracción. En este fenómeno dos rayos están desfasados una longitud de onda, reforzándose en la interferencia.

La difracción depende de la estructura cristalina en la que incide el haz de rayos, de su longitud de onda y del ángulo de incidencia.

En una muestra se pueden identificar conjuntos de planos reticulares, que permiten la identificación de cada especie cristalina. Los resultados se plasman en un difractograma, que es un listado de los espaciados de estos planos representados en una serie de picos por cada ángulo de difracción. Atendiendo a los tres picos de mayor intensidad del difractograma es posible identificar una mineral.

[EP3] Microscopía electrónica de polarización (MOP)

La microscopía permite ver la estructura interna de la roca o mortero, así como composición, grado de alteración, tamaño y distribución de poros. Esto ofrece información muy interesante para conocer en qué estado se encuentra el material observado, y especialmente cómo se comporta el agua en contacto con éste. Es sabido que el tamaño de poros es un factor determinante en la permeabilidad y capilaridad – cuyos valores se estudiarán más adelante mediante ensayos hídricos-, debido a que condicionan la entrada y movilidad del agua en su interior.

Previo al empleo de esta técnica será necesario la preparación de las muestras en secciones o láminas delgadas para que los minerales sean traslúcidos a la luz transmitida.

Al incidir luz sobre un material, esta se refleja y refracta, dividiéndose en dos rayos en la mayoría de los minerales (Birrefringentes).

Para el estudio de las propiedades ópticas de los minerales se emplea luz polarizada, que vibra en una sola dirección. Para lograr esto se emplean filtros de luz que, en el caso del microscopio petrográfico, son dos, polarizador y analizador, llamados nícoles paralelos y cruzados, a 90°.

En el caso de los minerales cristalizados en sistema cúbico, isótropos a la velocidad de la luz, el rayo no se desdobra, quedando el campo de visión totalmente oscuro con el filtro analizador.

Los minerales opacos no se observan en luz transmitida, por lo que serán necesarias técnicas petrográficas de luz reflejada. En el caso de los poros, al corresponderse con un hueco, se verá el vidrio del portamuestras con nícoles paralelos, y oscuro con nícoles cruzados.

La preparación de las muestras de lámina delgada se solicitó al Servicio de Preparación de Rocas y Materiales Duros (SAI), de la Facultad de Ciencias Geológicas, de la Universidad de Zaragoza.

Figura 46. Láminas delgadas cubiertas, preparadas para ensayo EP3

[EH1] Ensayos de absorción al agua por absorción capilar

Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad. UNE-EN15801:2010

Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad. UNE-EN 1925:1999

La norma exige una forma regular de las muestras. En la mayoría de los casos, las muestras eran irregulares, pues al tratarse de porciones de piedra en estado de deterioro y con valor patrimonial, las muestras tenían que ser pequeñas y no siempre puede desperdiciarse material regularizando las caras de la muestra.

Procedimiento llevado a cabo en el ensayo:

Se secan las muestras en estufa a temperatura constante de 40 ° hasta que alcanzan un peso constante m_0 . Este es el considerado como peso seco de la muestra.

La muestra se coloca en una bandeja con agua sobre una rejilla que ponga en contacto de la muestra con el agua, permitiendo la absorción por la base de la muestra, pero sin que se sumerja. (Figura 47)

Figura 47. Ensayo de succión capilar de dos muestras de material.

Para el pesado se retira del medio, se seca levemente con un paño húmedo para eliminar el agua adherida y se pesa en balanza. La balanza tiene una precisión de 0,1mg según exige la norma. Las pesadas se realizan en intervalos de tiempo regulares, controlando el tiempo con cronómetro.

Expresión de los resultados obtenidos:

La cantidad de agua absorbida por la probeta por unidad de superficie Q_i [kg/m²] en el tiempo t_i [s] se calcula mediante la fórmula:

$$Q_i = [(m_i - m_0)/A] \quad (75)$$

Para determinar la curva de absorción, los valores se representan en un gráfico. El coeficiente de absorción de agua por capilaridad (AC) es dependiente de la parte lineal de la curva representando la variación de la masa por unidad de superficie (Q_i) en función de la raíz cuadrada del tiempo ($t_i^{1/2}$).

Estos resultados –curva de absorción y tablas con los coeficientes de absorción– se muestran en los capítulos correspondientes a cada caso de estudio.

m_d masa de la probeta en seco [kg]

m_i masa de la probeta en el tiempo t_i [kg]

A superficie de la probeta en contacto con el agua [m²]

t_i tiempo transcurrido desde el comienzo del ensayo [s]

Q_i cantidad de agua absorbida por unidad de superficie [kg/(m².s^{1/2})]

Otro procedimiento de ensayo: Por inmersión parcial

Determinación del coeficiente de absorción de agua por inmersión parcial. UNE-EN ISO 15148:2002

Con una humedad relativa de más del 95% el movimiento del agua en el material depende del transporte en la fase líquida. Esta situación se da cuando un material se moja, por ejemplo, por lluvia. El agua se moja bajo presión hidráulica, cuando cesa la fuente de agua, el material pasa a una segunda fase en que el agua absorbida se redistribuye por su interior.

Según explica la norma, este ensayo describe un método para determinar el coeficiente de absorción de agua a corto plazo, por inmersión parcial sin gradiente de temperatura. Se pretende evaluar el coeficiente de absorción de agua, mediante acciones de capilaridad a partir de una lluvia continuada.

El procedimiento de ensayo es similar al anterior. Partiendo de una muestra de material con masa constante, se sumerge parcialmente en agua y se cronometra el tiempo que está sometida al ensayo. Se realizan pesadas de la muestra hasta un mínimo de 24 horas.

[EH2] Cálculo de la densidad aparente, porosidad abierta, volumen aparente y densidad real

Cálculo de la densidad aparente:

Se emplearán las fórmulas y procedimiento establecido por la norma UNE-EN 13755:2008 “Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica” y la norma UNE-EN 1015-10:2000 “Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido”

La densidad aparente para las muestras de piedra (ρ_b) se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \times \rho_{rh} \quad (76)$$

Donde:

ρ_b	Densidad aparente	[kg/m ³]
m_d	Peso seco	[g]
m_s	Peso saturado	[g]
m_h	Peso sumergido	[g]

ρ_{rh} Densidad del agua [kg/m³]

La densidad aparente para muestras de mortero se calcula dividiendo la masa de la probeta secada en estufa en kg, por el volumen de la probeta de mortero (V_s) en m³.

Para el cálculo del volumen de la probeta se emplea la siguiente expresión, según la norma:

$$V_s = \frac{m_{s,sat} - m_{s,i}}{\rho_{rh}} \quad (77)$$

Donde:

$m_{s,i}$	Masa de la probeta saturada del mortero endurecido sumergido en agua	[kg]
$m_{s,sat}$	Masa de la probeta de mortero endurecido saturada	[kg]
ρ_{rh}	Densidad del agua	[kg/m ³]
V_s	Volumen de la probeta de mortero	[m ³]

Cálculo de la porosidad abierta:

La porosidad abierta se calcula por medio de la relación (en porcentaje) entre el volumen de poros abiertos el volumen aparente de la probeta, mediante la siguiente fórmula:

$$f_0 = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100 \quad (78)$$

Donde:

f_0	Porosidad abierta	[%]
m_d	Peso seco	[g]
m_s	Peso saturado	[g]
m_h	Peso sumergido	[g]

Volumen aparente (V_b):

Volumen del material, teniendo en cuenta poros abiertos y cerrados. Se puede calcular alternativamente con las dimensiones de la probeta. A este cálculo de volumen alternativo, lo denominamos volumen geométrico, para diferenciar el cálculo. Al tratarse de probetas irregulares, conviene más el uso de la fórmula.

$$V_b = \frac{m_s - m_h}{\rho_{rh}} \times 100 \quad (79)$$

Densidad real (ρ_r):

La densidad real excluye la porosidad, y se define como el cociente entre la masa de la roca en seco y el volumen de sólido. Se calculará según siguiendo la norma (UNE-EN 1936 2007) “*Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total*”.

Empleando el método del picnómetro se puede calcular la densidad real de cada muestra. Debe triturarse la muestra, en este caso se ha empleado un mortero de ágata, y posteriormente se ha tamizado con malla de 53 μm .

Para realizar los cálculos, se introduce agua desionizada en el picnómetro hasta la mitad de la altura. Se introduce la materia sólida. Hay que dejar que la materia sólida de asiente hasta que el agua por encima del residuo sea clara. Se rellena hasta enrasar y se tapa. Se pesa con una balanza de precisión $\pm 0,01\text{g}$. Se vacía, se limpia y se rellena sólo con agua, se pesa con la misma precisión.

$$\rho_r = \frac{m_e}{m_2 + m_e - m_l} \times \rho_{rh} \quad (80)$$

Donde:

m_e	Masa de la probeta triturada y secada	[g]
m_2	Masa del picnómetro con agua	[g]
m_l	Masa del picnómetro con agua y probeta triturada	[g]
ρ_{rh}	Densidad del agua	[kg/m ³]
ρ_r	Densidad real de la probeta	[kg/m ³]

[EH3] Ensayo de absorción bajo presión (Inmersión):

La norma que rige este ensayo es la UNE-EN 13755:2008 *Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica*”.

Este ensayo se realiza inmediatamente después del ensayo de absorción capilar. Las probetas se sumergen en agua a presión atmosférica para determinar la absorción de agua del material a presión atmosférica.

No se ha realizado este ensayo con todas las muestras de material porque, en algunos casos, las muestras se disgregaban con facilidad.

Procedimiento llevado a cabo en el ensayo:

Se secan las muestras hasta masa constante.

Se colocan las muestras en un recipiente con los apoyos necesarios. En caso de introducir varias probetas dentro del mismo recipiente, deben estar separadas 15mm.

El agua empleada era corriente, ya que este ensayo no exige el uso de agua destilada. La temperatura debe ser de 20 ± 10 °C.

El agua, según indica la norma, se añade en tres tiempos. Primero en t_0 hasta la mitad de la altura de las probetas. A los $t_0+(60\pm5)$ minutos se añade más agua hasta alcanzar una altura tres cuartas partes la altura de las probetas sumergidas. En $t_0+(120\pm5)$ minutos se añade agua hasta que las probetas queden totalmente sumergidas bajo una lámina de agua de (25 ± 5) mm de espesor.

En el caso de las muestras traídas de los edificios, al tratarse de probetas de pequeñas dimensiones se ha adaptado el ensayo sometiéndolas a dos tiempos de inmersión, omitiendo el paso intermedio, dado que no tienen altura suficiente para realizar el procedimiento con precisión.

Las muestras se pesaron a las 48 ± 2 horas, continuando las pesadas cada 24 ± 2 horas hasta alcanzar masa constante. En la mayoría de los casos, antes de las 48 horas se alcanza masa constante, por el tamaño y estado de degradación de algunas de las muestras. Por ello, se realizaron pesadas más continuadas antes de las 48 horas.

Expresión de los resultados obtenidos:

El coeficiente de absorción de agua a presión atmosférica A_b se calculó con la ecuación:

$$A_b = \frac{m_s - m_d}{m_d} \times 100 \quad (81)$$

Donde:

A_b	Coeficiente de absorción de agua a presión atmosférica	[%]
m_d	Peso seco	[g]
m_s	Peso saturado	[g]

[EH4] Ensayo de adsorción higroscópica

Los materiales de construcción de este tipo de edificios son porosos e hidrófilos, como materiales rocosos y morteros, por lo que absorben y eliminan vapor de agua, y lo hacen más o menos rápidamente, hasta ponerse en equilibrio con el ambiente en el que se encuentran. Como ya se explicaba en el capítulo de fundamentos teóricos y en el de antecedentes, la cantidad de humedad presente en las rocas depende tanto de las condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa) como de las características del propio material (mineralogía y sistema poroso).

El agua higroscópica presente en las rocas se puede deber a distintas causas(Alonso, Esbert et al. 1987b):

- Agua de hidratación o cristalización: Las sales son los principales componentes que presentan este comportamiento. Son abundantes en rocas alteras, algo frecuente en construcciones históricas.
- Agua de adsorción: Es agua que se encuentra ligada a la superficie específica de la roca.
- Agua de condensación capilar. Agua retenida en conductos capilares, en equilibrio para presiones de vapor inferiores a la de saturación.

La norma existente que regula el procedimiento de ensayo en este caso es la UNE-EN ISO 12571:2013 *“Prestaciones higrotérmicas de los productos y materiales para edificación. Determinación de las propiedades de sorción higroscópica”*

Las isotermas de absorción de vapor de agua que se pueden calcular mediante este ensayo ofrecen información de cómo se comporta el contenido de agua presente en la roca en función de la humedad ambiente, e indirectamente del tamaño del poro.

Las probetas empleadas son de mínimo 10g, según marca la norma. El documento indica que se deben ensayar al menos 3 probetas, pero esto ha dependido de la cantidad de material que se ha podido extraer en cada caso.

Procedimiento llevado a cabo en el ensayo:

Se secaron las muestras empleadas en estufa hasta masa constante.

La temperatura establecida para la realización de este ensayo se ha establecido en torno a los 23 °C. Se ha controlado manualmente mediante termohigrómetro, o data-logger en los casos en los que se ha considerado más adecuado tener un control más constante.

1º Cálculo de la curva de adsorción:

Se prepararon una serie de cámaras climáticas. Cada una de ellas posee un ambiente a una determinada humedad relativa que se mantiene siempre constante. Se ha llevado a cabo el control del ambiente de cada cámara con la ayuda del termohigrómetro.

Las cámaras se preparan con soluciones saturadas⁸ que permitan la obtención de la humedad relativa necesaria. (Tabla 11).

Tabla 11 Sales empleadas para preparar la solución saturada de las cámaras.

Nº Cámara	Sustancia	Humedad relativa [%]
1	MgCl ₂ .6H ₂ O	33
2	NaCl	75
3	KNO ₃	93

⁸ Se realiza la disolución de las sales en agua destilada, con la proporción indicada por la norma ISO 12571:2013, Anexo B.

Las probetas se someten a estos ambientes, realizando sucesivas pesadas hasta que se encuentran a una masa constante en equilibrio con su ambiente.

Objetivo de los resultados de los ensayos

-El cálculo de la evaporación. Los valores de sorptividad del material y porosidad son necesarios para realizar los cálculos de succión-evaporación de los muros. (ver capítulo 4 “*Fundamentos teóricos*” donde se explica cómo se calcula la evaporación y ver capítulo 6, cómo se ha calculado en cada caso de estudio).

-La simulación con Design Builder: mediante la introducción de los parámetros materiales calculados para cada caso de estudio se atribuyen propiedades más precisas a los componentes del modelo computacional, obteniendo un cálculo más ajustado de cómo se comporta el material.

5.2.2.c) Ensayos complementarios en campo:

Además de estos ensayos en laboratorio, en alguno de los edificios estudiados se han realizado algunos ensayos in-situ. En el caso de la Capilla del Cristo de Conxo se han realizado varias campañas de medición de la presencia de sales (nitratos y cloruros). En este caso particular, ha sido necesario porque la Capilla presentaba lesiones aparentemente severas causadas por la contaminación por sales que había dado lugar a un oscurecimiento de la piedra del solado. Aunque el objeto principal de este trabajo no es el estudio de los daños por contaminación por sales, es necesario conocer el alcance de la lesión dado que la contaminación por sales afecta a la capacidad de evaporación de la piedra (capítulo 6, apartado 6.2 Caso 2: “*Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo*”) (García-Morales, Otero-Ortiz de Cosca et al. 2016).

En el caso de la Capilla del Humilladero (Ávila) se realizó también una campaña de mapeado de sales, con un objetivo similar al de Conxo.

.

5.4 SIMULACIÓN POR ORDENADOR

En este apartado se explica el procedimiento seguido para realizar la simulación por ordenador de los casos de estudio presentados.

Los modelos 3D de los edificios estudiados se realizan en el propio programa de cálculo mediante la importación de su geometría previamente dibujada en CAD. La simulación en condiciones transitorias se realizó en el programa Design Builder (DB), que cuenta con un módulo de dinámica de fluidos computacional (CFD, siglas en inglés), que permite realizar simulaciones 3D en estado estacionario, partiendo de un conjunto de condiciones previamente establecidas en el programa nodal, que es EnergyPlus (EP). Este programa sirve como motor de cálculo de DB y es una potente herramienta que permite operaciones muy precisas y detalladas del edificio. Las últimas versiones de DB poseen nuevas herramientas de scripting para permitir obtener resultados personalizados de EnergyPlus (EP) en régimen dinámico. El uso de estos cálculos personalizados con EP se explicará en el capítulo 6, correspondiente a los cálculos sobre los casos de estudio. Esta herramienta ha sido validada por otros investigadores (Campano et. al. 2015).

Por tanto, la simulación dinámica de los distintos edificios requiere los siguientes pasos:

- Modelado 3D del edificio, con sus dimensiones exactas, posición de ventanas, terreno, orientación solar y elementos del entorno próximo que puedan generar obstrucciones al soleamiento o al viento.
- Establecimiento de los valores de precisión adecuados para la simulación: dimensiones de la malla.
- Especificación de los materiales que componen cada elemento del edificio, así como asignación de las propiedades físicas a todos los materiales.
- Definición de las condiciones de contorno para cada simulación. A lo que precede un estudio de los datos climáticos y de monitorización, y elección de los períodos que interesa monitorizar en base al análisis del edificio.

Cada uno de estos puntos se explica con detenimiento en los apartados siguientes.

5.4.1 Modelado para la simulación

1º Medición del edificio y el entorno para el levantamiento 3D.

Para la toma de medidas de los edificios se han empleado medidores laser, flexómetro y cámara fotográfica.

2º Se documentan: espesores de muro, ubicación y tamaño de las aperturas (puertas, ventanas y cualquier tipo de rejillas o grietas). Se anotaron y tomaron fotos de aquellos elementos constructivos o soluciones constructivas que representan una característica

particular de cada caso de estudio, y que debe ser tomada en cuenta en el levantamiento 3D para que la simulación resulte eficiente. Por ejemplo, en el caso de la Ermita del Humilladero, que cuenta con un muro parcialmente soterrado, se anotaron todas las cotas necesarias para ubicar correctamente el edificio respecto al terreno. Algo similar sucedía en el caso de la Capilla de Conxo, en el que el muro norte se encuentra unos centímetros por debajo de la cota del cementerio exterior que tiene adosado. Existen unos nichos adosados al muro norte que ha sido necesario medir y documentar pues resultan una interferencia para ese muro. En el caso de la Iglesia de Santiago de Peñalba, existe un fuerte desnivel de la calle respecto al edificio que también se ha documentado, así como la altura de la cerca de piedra que cierra el entorno próximo a la iglesia, pues, como se verá en el capítulo correspondiente, ha influido en la relación del clima con el edificio.

Se anotan materiales y se documentan fotográficamente. Cada uno de los elementos que componen el edificio, ya sean muros, puertas, ventanas etc., se dibujan en el modelo 3D, y llevarán asociados unas propiedades de material, por lo que es importante tener registro de todo ello.

3º Se dibujan los planos 2D en formato CAD, que posteriormente se importan al programa Design Builder (DB) donde se realizará la simulación. Al edificio generado en DB se le atribuyen todas las propiedades materiales que requiere el programa para realizar un cálculo preciso.

4º Se modela el terreno que pueda estar en contacto con el edificio, para que el programa reconozca aquellos elementos soterrados o parcialmente soterrados en contacto con el terreno. Es importante a efectos de transferencia de temperaturas y humedad aquellos elementos que se encuentran en contacto con terreno.

5º Se modelan los volúmenes del entorno. Es decir, todos aquellos elementos que puedan arrojar sombra sobre el edificio objeto de estudio, o que puedan generar alteraciones en las corrientes del viento que se produce en la zona del edificio.

5.4.2 Precisión del modelo

Cuando se crea el modelo, o se importa de un 3D externo, el programa asocia cada elemento dibujado con los ejes de coordenadas X, Y, Z. Design Builder genera una malla, formada por una cuadrícula. Las distancias entre las líneas de la malla se conocen como regiones, y los espacios entre regiones se pueden definir inicialmente por el usuario. Cuanto más pequeñas sean estas regiones, más preciso será el cálculo CFD de Design Builder. La desventaja de una cuadrícula muy cerrada es que los tiempos de ejecución de cálculo aumentan notablemente. Partiendo del nivel de definición que viene por defecto en el programa es suficiente para sacar resultados precisos.

En cuanto a la forma del modelo 3D que se introduce en el programa, tratándose de edificios históricos, se asume cierta simplificación de las geometrías. Así, por ejemplo,

(De Berardinis, Rotilio et al. 2014) asumen la simplificación de algunas partes del modelo, obteniendo igualmente resultados validados.

5.4.3 Introducción de materiales en el modelo

Una vez finalizado el modelo 3D, se asocian materiales a los elementos constructivos. En los apartados de cálculo de cada uno de los casos de estudio se especificará con detalle cuáles son los materiales empleados en cada caso.

Todos los elementos constructivos del edificio llevarán asociados los materiales correspondientes: suelos, cubiertas, muros, puertas y ventanas. Se prestó especial atención a los muros, pues se realizarán cálculos de succión-evaporación con éstos.

Se ha trabajado considerando los elementos multicapa como, por ejemplo, los muros o cubiertas, que tienen diferentes materiales y espesores. Todos ellos quedan definidos convenientemente.

El programa permite, atribuirle al terreno que rodea el edificio algunas propiedades como el tipo de terreno, que también ha sido definido. Esto es importante tratándose de edificios históricos, pues al no tener elementos de impermeabilización y encontrarse las cimentaciones en contacto directo, e incluso algunos muros parcialmente enterrados, el terreno afecta a al comportamiento del edificio.

Es necesario mencionar que, en este tipo de estructuras, tan heterogéneas, se asume cierto desconocimiento, por ejemplo, de los elementos del interior de los muros. Así, por ejemplo, (De Berardinis, Rotilio et al. 2014) optan por la simplificación, haciendo una estimación de cómo es la estructura interna de los muros.

Propiedades de transmisión de calor y humedad de los materiales

Existen ciertas propiedades de los materiales que influyen en la transferencia de calor y humedad a través de la envolvente (HAM, en inglés). El programa Design Builder cuenta, desde época reciente, con un módulo implementado que permite calcular el comportamiento del edificio teniendo en cuenta tanto la transferencia de calor, como la de humedad de manera conjunta. Para ello, es necesario introducir los datos de algunas propiedades de los materiales.

La norma internacional ISO 13788 establece un procedimiento de cálculo para la determinación de las características higrométricas de los componentes y materiales de construcción, suponiendo que se puede descuidar la influencia del contenido de humedad en el campo térmico a través de paredes, techos y techos. Sin embargo, algunos autores señalan la importancia de tener en cuenta el parámetro “humedad”, como por ejemplo Dell’Isola, que explica que el agua condensada aumenta la conductividad térmica efectiva de los materiales de construcción, modificando así los

perfiles de temperatura a través de la envolvente del edificio (Dell'Isola, d'Ambrosio, F.R., Giovenco, G. et al. 2012).

Teniendo en cuenta que se trata de edificios sin cargas, en los que los únicos intercambios de energía y masa se producen a través de los muros y por la ventilación a través de los huecos, la influencia de las fluctuaciones a través de la envolvente tiene una repercusión capital en el edificio.

En este trabajo se ha comprobado que la precisión de la simulación varía enormemente si se simula teniendo en cuenta HAM respecto a obviar este fenómeno. Gracias a la monitorización higrotérmica, se han podido validar los resultados de las simulaciones.

Algunas de las propiedades materiales pueden ser ensayadas en laboratorio de una manera más o menos asequible o sencilla. Estas propiedades se explicaban en el apartado 5.3.2 “*Parámetros de los materiales*” (Tabla 9). Algunas de las características que solicita el programa no se pueden conocer mediante ensayos sencillos, pues requieren de un muestreo amplio, y de pruebas que emplean maquinaria muy específica, así como ensayos que en algunos casos suponen varios años para obtener una media de valores fiable. En cualquier caso, la literatura ofrece tablas con algunos de estos valores para los materiales más comunes (UNE-EN ISO 10456 2012, Código Técnico de la Edificación (CTE) 2008, UNE-EN ISO 10456 2001), por lo que se ha optado por obtener algunos de estos valores de los documentos (k^w , δ y ϕ). La Agencia Internacional de la Energía (IAE⁹) desarrolló un documento que recoge las principales propiedades de los materiales de construcción de los cerramientos (Hens 2009, Hens, Ojanen et al. 1996, Kumaran 1996). En base a los valores presentados en este documento, y a los que se han podido obtener mediante los ensayos, se han desarrollado las tablas de valores adecuados para los edificios objeto de estudio (Tabla 12).

Tabla 12 Propiedades de los materiales que serán introducidas en el programa para la simulación.

Propiedades de los materiales para la simulación		
W	Contenido de humedad	[kg/m ³]
f	Porosidad	[m ³ /m ³]
k^w	Conductividad térmica (función de la humedad)	[W/mC]
δ	Coeficiente de difusión de vapor	[kg/msPa]
ϕ	Transferencia de humedad	-
D ^w	Coeficiente de transporte líquido	[m ² /s]

Estas propiedades de los materiales serán necesarias para una correcta simulación de la transferencia de calor y humedad a través de los muros. Como se ha explicado en el capítulo 2 “*Antecedentes y estado de la cuestión*” la simulación del ambiente interior es más precisa si se tienen en cuenta de manera conjunta, la transferencia de masa junto con la de calor. En cada uno de los casos de estudio se presentan gráficas que validan el

⁹ International Energy Agency (IEA) en sus siglas en ingles.

cálculo de los edificios con HAM (capítulo 6, apartados 6.1.3 para el caso de la Iglesia de Santiago de Peñalba, apartado 6.2.3 para el caso de la Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo, y apartado 6.3.3 para el caso de la Ermita del Humilladero). En estas se puede ver cómo la simulación combinada con transferencia de calor y humedad tiene mayor parecido con la realidad monitorizada que la simulación sólo con calor.

5.4.4 Configuración de las condiciones de contorno para la simulación

Se definen las condiciones iniciales para cada simulación. Para ello se especifican unos valores de temperatura, caudales de aire, etc. a partir de los que se inicia la simulación. Para que estos valores iniciales que se aproximen a la realidad se emplean los datos de las mediciones de monitorización realizadas en el edificio.

En simulación de edificios históricos se han encontrado pocas referencias en la literatura que hablen de un método de calibración previa a la simulación que esté basado en la comparación de simulación con lo monitorizado en el edificio (Roberti, et al., 2015). En aquellos trabajos en que se han tomado medidas en el edificio se realiza con tan solo unos pocos aparatos (Cornaro, et al., 2016) , o con períodos breves de tiempo, o no se miden todos los parámetros higrotérmicos fundamentales (temperatura, humedad y viento). Esto puede derivar en una simulación poco precisa.

Existen un número mayor de publicaciones y recomendaciones (ASHRAE, 2002) para la calibración de los modelos si se trata de obra nueva. Estas publicaciones están orientadas especialmente a obtener buenos resultados en el análisis de consumo del edificio, es decir, están orientadas a la simulación de edificios contemporáneos, por lo que, no todas las recomendaciones son aplicables al caso que se desarrolla en esta tesis. En (Fabrizio & Monetti, 2015) se presentan una serie de criterios estadísticos de importancia que se deben incluir como parte de la calibración precisa del modelo, para que lo simulado se parezca más a lo construido. A nivel de aplicación práctica, por ejemplo, en (Royapoor & Roskilly, 2015) se evalúa la precisión del modelo de EnergyPlus (EP), utilizando como guía las recomendaciones de ASHRAE. El trabajo concluye la necesidad de emplear los archivos meteorológicos locales, así como la toma de datos medidos con intervalo hora a hora. Señala también la importancia de realizar una simulación en tiempos largos, de un ciclo completo de un año. En (Monetti, et al., 2015) se aplica a un caso de estudio, monitorizando un pequeño edificio en el sur de Bélgica y comparando los resultados medidos en campo con lo simulado con el software EnergyPlus. La simulación realizada en EP es optimizada encuentra buena correspondencia entre lo simulado y lo que señala la guía ASHRAE antes mencionada. Este tipo de herramientas, que mejoran la precisión del modelo, se desarrollan muy especialmente para obtener buenos resultados de rendimiento en consumo del edificio. Por ejemplo, en (Sun, et al., 2016) se desarrolla un modo de calibración automatizada basada en patrones para que el consumo de energía simulada y el real se parezcan.

5.3.4.a) Caudales de entrada de aire

Se trata de un parámetro importante, pues los intercambios de calor y humedad por medio de la ventilación natural juegan un papel importante en este tipo de edificios, sin sistemas de acondicionamiento. Se pueden definir los caudales de entrada de aire por cada una de las aperturas del edificio, así como el porcentaje de apertura de cada hueco. Para introducir estos valores en el programa, se realizó previamente un estudio de cómo ventila el edificio, consistente en la toma de mediciones con anemómetro en distintos puntos del edificio.

5.3.4.b) Horarios de apertura y uso del edificio

Generalmente, los edificios cuentan con cargas de calefacción y/o refrigeración que, en determinadas temperaturas de consigna, activan sistemas mecánicos de ventilación. En los casos de estudio que aquí se describen la ventilación natural se produce cuando se abren puertas y ventanas manualmente¹⁰. Por tanto, para este trabajo, se introducen en el programa las horas del día en que se abre el edificio (Figura 48), independientemente de las condiciones climáticas del exterior o de las condiciones del interior, asegurando que se produzca la ventilación tal como sucede en la realidad.

De este análisis se obtiene como resultado el comportamiento del edificio ante su uso horario normal. Esto permitirá conocer la capacidad de ventilación del edificio, así como el movimiento del aire en el interior. Estos datos son de gran utilidad para los cálculos de evaporación que se hacen posteriormente (ver capítulo 6, apartados 6.1.3, apartado 6.2.3 y apartado 6.3.3) y para el estudio de la capacidad de disipación de la humedad evaporada por los muros. Además, la posibilidad de modificar las condiciones de contorno de la simulación permite alterar los escenarios reales para introducir modificaciones y comprobar si éstas suponen una mejora de las condiciones de comportamiento evaporativo o, por el contrario, dificultan la evaporación. Por ejemplo, se han podido modificar los horarios de apertura para analizar si se producen mejoras en el comportamiento del edificio.

¹⁰ Esto se ve claramente en los registros de monitorización, por ejemplo, del caso 1: Iglesia de Santiago de Peñalba (capítulo 6, apartado 6.1.2 Análisis higrotérmico)

Perfiles							
Mes	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
Ene	INVIERNO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...	Off	Off	INVIERNO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...
Feb	INVIERNO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...	Off	Off	INVIERNO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...
Mar	INVIERNO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...	Off	Off	INVIERNO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...
Abr	VERANO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...	Off	Off	VERANO 10:00 a 14:...	VERANO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...
May	VERANO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...	Off	Off	VERANO 10:00 a 14:...	VERANO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...
Jun	VERANO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...	Off	Off	VERANO 10:00 a 14:...	VERANO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...
Jul	VERANO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...	Off	Off	VERANO 10:00 a 14:...	VERANO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...
Ago	VERANO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...	Off	Off	VERANO 10:00 a 14:...	VERANO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...
Sep	VERANO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...	Off	Off	VERANO 10:00 a 14:...	VERANO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...
Oct	INVIERNO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...	Off	Off	INVIERNO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...
Nov	INVIERNO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...	Off	Off	INVIERNO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...
Dic	INVIERNO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...	Off	Off	INVIERNO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...	INVIERNO 10:00 a 14:...

Figura 48. Ejemplo de una programación de uno de los casos de estudio, preparada para la ventilación natural.

5.3.4.c) Renovaciones e infiltraciones

Es necesario también especificar los valores de renovaciones/hora e infiltraciones.

Después de realizar diferentes pruebas de simulación controlando las infiltraciones y renovaciones del edificio, se ha comprobado que resulta ser un parámetro determinante en los resultados de las simulaciones. Esto resulta lógico, dado que, en todos los casos de estudio analizados, los movimientos de aire dentro del edificio sólo se pueden producir por ventilación natural, al no existir ningún otro tipo de ventilación.

Para realizar el cálculo de las renovaciones se hace una estimación mediante las fórmulas que se han explicado en el capítulo 2 “Fundamentos teóricos” y que se recuerdan para en el capítulo 6, para el caso de estudio 1: Iglesia de Santiago de Peñalba.

Este cálculo depende de la morfología de cada edificio, pues algunos de ellos tienen ventilación cruzada más eficiente que otros, o incluso algunos de ellos apenas tienen entrada de aire unilateral. Esto se explica con detenimiento dentro del análisis de cada caso de estudio.

5.3.4.d) Temperaturas iniciales

El programa solicita varios valores de temperatura de partida con los que comienza el cálculo de simulación. Estos valores son: temperatura superficial interior (T_{SINT}), temperatura superficial exterior (T_{SEXT}), temperatura superficial de ventanas (T_{SV}), temperatura promedio del ambiente (T_{med}) y temperatura del aire entrante (T_{ENT}). Como se verá en el capítulo 6, dedicado a los casos de estudio, para cada una de las simulaciones realizadas se toman estos valores de las mediciones realizadas en el edificio, ya sean manuales o con monitorización higrotérmica. El objetivo es que los resultados de simulación sean lo más ajustados posible a la realidad.

5.3.4.e) Creación del archivo climático especializado

Una parte importante de la simulación es el archivo climático. Se han elaborado archivos climáticos que se introducen en el programa, es necesario introducirlos antes de que el programa empiece a calcular la simulación para asegurar que opere con los datos meteorológicos correctos.

En el campo de la simulación de edificios históricos existen pocos trabajos que expliquen cuáles son los parámetros ambientales que emplean para el cálculo. A penas en algún caso se señala la importancia de un archivo climático con datos reales (Cornaro, et al., 2016)

Se elabora un documento en formato *.epw*¹¹ preparado para que Design Builder sea capaz de interpretarlo y operar con él. Este documento contiene toda la información climática necesaria en relación con el ambiente exterior que le rodea al edificio.

Design Builder nos permite ubicar el edificio en un punto de la geografía, en sus coordenadas exactas. Design Builder cuenta con una base de datos extensa de más de 2100 archivos climáticos correspondientes a las ciudades más representativas de cada región¹². Aunque los archivos que contiene el programa permiten realizar una estimación relativamente precisa de cómo se comporta el edificio en una zona determinada de la geografía, si se desea realizar un cálculo preciso es necesario realizar un archivo climático propio.

En el caso de este tipo de edificios estudiados, que están completamente condicionados por los fenómenos meteorológicos, es fundamental que el archivo climático esté desarrollado con la mayor precisión posible para poder obtener resultados óptimos de la simulación.

El programa Design Builder opera con el motor de cálculo EnergyPlus. Este programa cuenta con un formato de archivo climático muy completo, comparado con el de otros programas, permitiendo además trabajar con resolución sub-horaria (EnergyPlus, 2017).

Existen múltiples plataformas para la creación de archivos climáticos estandarizados, pero en este caso se han elaborado con el conversor de datos climáticos de EnergyPlus.

Se han introducido, por medio de este programa los datos reales del sitio obtenidos de dos fuentes: monitorización y bases de datos meteorológicas (Tabla 13) De la monitorización se obtienen los datos de temperatura y humedad relativa. Las bases de datos se emplearon para conocer aquellos parámetros que necesitan una estación

¹¹ La extensión *.epw* es la propia de EnergyPlus para los datos climáticos "EnergyPlus Weather"

¹² <https://energyplus.net/weather>

meteorológica especializada, de la que no se dispone comúnmente. Las bases de datos empleadas, han sido diferentes en cada caso de estudio, dependiendo de su ubicación.

El archivo climático creado cuenta con intervalos hora a hora para todos los días del año.

Se crea una hoja de datos con las medias calculadas hora a hora de la monitorización, junto con los datos meteorológicos horarios de la base de datos correspondiente en formato .csv (Figura 49) para luego convertir al formato solicitado por el programa (Figura 50).

The image shows a screenshot of a CSV file opened in Microsoft Excel. The file is named 'Datos_1.csv' and contains meteorological data for a specific location. The data is organized in a structured manner with headers and rows of numerical values. The columns include location, date, time, temperature, humidity, wind speed, and various calculated parameters. The data is organized in a structured manner with headers and rows of numerical values.

Figura 49. Imagen de una hoja de datos en formato .csv para su modificación y preparación en formato “.epw”

The image shows a screenshot of an EPW file opened in a text editor. The file is named 'Datos_1.epw' and contains the same meteorological data as Figure 49, but in a different format. The data is organized in a structured manner with headers and rows of numerical values. The format is different from the CSV file, using a more compact notation for the data.

Figura 50. Imagen de un archivo climático en formato “. epw” preparado para introducir en el programa.

Parámetros introducidos en el archivo climático:

En la siguiente tabla se especifican todos los datos climáticos que son necesarios, y cuáles son las fuentes de datos de las que se tomaron.

Tabla 13 Parámetros climáticos empleados.

Parámetro empleado	Unidades	Fuente
Temperatura (T)	°C	Monitorización
Temperatura de rocío (Td)	°C	
Humedad relativa (HR)	%	
Presión atmosférica (P _a)	Pa	Bases de datos meteorológicas
Radiación solar (global, normal, difusa)	Wh/m ²	
Velocidad del viento (v)	m/s	
Dirección del viento (d)	grados	
Pluviometría (Pl)	mm/h	

Se deben especificar además otros datos como:

- La localización del edificio: latitud, longitud, elevación y uso horario.
- Temperaturas típicas, extremas y horas de sol

Zonas climáticas en las que se ha trabajado:

Se ha trabajado en tres ubicaciones diferentes: Santiago de Compostela (A Coruña), Peñalba de Santiago (León) y Ávila capital. La descripción del clima de cada una de estas localidades, así como las gráficas de los datos meteorológicos recogidos durante el tiempo que ha durado la campaña de toma de datos se detalla en el apartado correspondiente para cada caso de estudio (apartado 6.1.1 caso 1, apartado 6.2.1 caso 2, apartado 6.3.1, caso 3)

Introducción del archivo climático en Design Builder y sistema de cálculo:

El archivo climático se introduce en Design Builder para asociarlo al edificio correspondiente. Se realiza un archivo climático para cada una de las ubicaciones geográficas de la Tabla 4.

Figura 51. Pestaña de configuración de Design Builder en la que se define el período del año que se desea simular, indicando el día de inicio y día de fin de la simulación. Se puede elegir que los datos se muestren de manera horaria o subhoraria.

Para la realización de la simulación ambiental del edificio se eligió una semana representativa de cada mes. La elección de los días exactos de cada mes, en cada caso de estudio depende de los resultados del análisis higrotérmico que se hace previamente con los datos de monitorización. Como ya se ha explicado, los resultados de simulación, en combinación con los datos de monitorización se utilizan para los cálculos de evaporación y el estudio del comportamiento ambiental del edificio (apartados 6.1.3, 6.2.3 y 6.3.3). Design Builder asocia los días seleccionados para la simulación con los datos climáticos correspondientes del archivo climático que se realice.

5.3.5 Resultados obtenidos de las simulaciones con Design Builder

De todos los resultados que se pueden obtener con la simulación mediante el programa DB, se ha trabajado con dos partes fundamentales. Por un lado, los datos de temperatura y humedad relativa en régimen dinámico para el ambiente del edificio –en distintas zonas, si las hay, dependiendo del caso de estudio–, así como las renovaciones diarias que es capaz de realizar el edificio en base a las condiciones de contorno que se establezcan. Del módulo CFD se han empleado los datos de distribución de temperatura y velocidad del aire para hacer comprobaciones, como, por ejemplo, si la ventilación es eficiente en todas las zonas de un edificio, o, si por el contrario, el aire no es capaz de acceder a todas las zonas por igual. Como se verá en el capítulo 6, esto ha ayudado a resolver hipótesis como, por ejemplo, que en el caso 1, a pesar de permanecer las puertas abiertas durante muchas horas al día, la forma del edificio y su entorno no ayudan a la disipación de la humedad acumulada en algunas zonas. Se han empleado los resultados de cálculo del movimiento del aire exterior y el soleamiento para completar las hipótesis que derivan de los datos de monitorización. Además, como ya se ha comentado, los datos de velocidad del aire en cada punto que se pueden obtener del módulo CFD han servido para el cálculo de la evaporación de los muros.

5.5 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DATOS

En este apartado se explica la metodología que se ha seguido para analizar los datos que se obtienen de todos los procedimientos explicados en los apartados anteriores. En la Tabla 14 se resume el contenido de este apartado, para mayor claridad.

1º Análisis de los datos higrotérmicos: de éstos se detectan las tendencias de comportamiento del edificio.

En primer lugar, se realiza un estudio global, de todo el período monitorizado, para localizar comportamientos anómalos en comparación con el comportamiento del clima exterior, y estudiando las fluctuaciones estacionales en general. Este primer análisis, al observar períodos largos de tiempo, refleja fenómenos como la capacidad de inercia térmica e hídrica del edificio en relación con el clima.

En segundo lugar, se estudian las tendencias diarias del edificio. Esto refleja las fluctuaciones que se producen en el interior en relación con los cambios de clima diurnos-nocturnos, así como con el régimen de uso del edificio: cambios por apertura de puertas y/o ventanas, por ocupación de personas etc.

El análisis higrotérmico permite localizar puntos con un comportamiento anómalo, dentro del comportamiento general del edificio. Esto permite localizar aquellos momentos del año, o del día en que se producen alteraciones diferenciales.

2º Cálculo de la evaporación: con los datos de monitorización ya analizados en el punto anterior, y los datos de caracterización de material, se calcula la succión-evaporación de los muros en régimen dinámico. Esto se puede hacer gracias a los registros continuados que proporcionan los data-loggers, y que permiten conocer la evolución de los valores de temperatura y humedad para cada día.

3º Los datos de evaporación se emplean para el posterior estudio del comportamiento evaporativo del edificio, por medio de la comparación de la producción de los muros con la capacidad de disipación de la humedad que tiene el edificio. Para ello, se apoya el cálculo en la simulación con DB y EP.

Es necesario señalar que el método sistemático que se propone en este capítulo es necesario adaptarlo a cada caso de estudio, pues la complejidad individual de cada edificio hace que no sea viable asumir las mismas condiciones para cada caso. Otros autores han intentado enfoques sistemáticos para edificios históricos (Franco, et al., 2015), (Ascione, et al., 2011). Pero en definitiva, han resultado más útiles los resultados que se obtienen “caso a caso” (De Berardinis, et al., 2014), (Cornaro, et al., 2016). Por ello, el método que se propone aquí pretende basarse en un trabajo sistemático que sea el mismo para todos los casos de estudio, pero adaptable.

Tabla 14 Metodología de análisis de datos, descripción de cada una de las fases de trabajo y fuente de la que se obtienen los datos.

CRONOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE DATOS	DESCRIPCIÓN UTILIDAD DEL ANÁLISIS	DATOS NECESARIOS PARA EL ANÁLISIS
FASE 1ª Análisis higrotérmico estacional	Evolución a lo largo del año para detectar la influencia de los cambios de clima por estaciones sobre el edificio.	Monitorización higrotérmica media diaria interior y exterior: T, HR, W
FASE 2ª Análisis higrotérmico diario	Cambios higrotérmicos en el interior con respecto al clima y al uso diario que se hace del edificio.	Monitorización higrotérmica realizando medias horarias del interior y exterior: T, HR, W
FASE 3ª Validación de la simulación	Comparando los resultados de la simulación con los datos de monitorización del edificio se confirma que el modelo es correcto . Debe realizarse la validación antes de emplear los datos de simulación en las fases 4ª y 5ª	Monitorización higrotérmica vs Simulación con Design Builder
FASE 4ª Cálculo de la succión-evaporación de los muros	Se calcula la succión-evaporación de los muros .	Monitorización higrotérmica realizando medias horarias del interior: T, HR Datos de Design Builder: v [m/s] Datos de caracterización de los materiales: S, i, f_0
FASE 5ª Cálculo del comportamiento evaporativo del edificio	Capacidad de disipación del vapor de agua evaporado por los muros al exterior. Se calculan las renovaciones que está haciendo diariamente el edificio (teniendo en cuenta los horarios de apertura de puertas y ventanas). Se compara este dato con las renovaciones que debería hacer para disipar la producción de vapor de los muros, calculada en la fase 4ª.	Datos de DESIGN BUILDER: renovaciones/día Resultados del punto 4º

6.1. IGLESIA DE SANTIAGO DE PEÑALBA (LEÓN)

6.1.1. ESTUDIO Y DESCRIPCIÓN DEL CASO 1

- 6.1.1.a. Contexto histórico sobre la construcción de la Iglesia*
- 6.1.1.b. Características constructivas*
- 6.1.1.c. Caracterización de los materiales*
- 6.1.1.d. Estudio del clima de Santiago de Peñalba*
- 6.1.1.e. Descripción de la inspección y monitorización del caso 1*
- 6.1.1.f. Parámetros para la simulación del caso 1*

6.1.2. ANÁLISIS HIGROTÉRMICO

- 6.1.2.a. Análisis estacional: Evolución de las tendencias generales**
- 6.1.2.b. Análisis por estaciones: Primavera 2017*
- 6.1.2.c. Análisis por estaciones: Verano 2017*
- 6.1.2.d. Análisis por estaciones: Otoño 2017*
- 6.1.2.e. Análisis por estaciones: Invierno 2017-2018*
- 6.1.2.f. Análisis por estaciones: Primavera 2018*
- 6.1.2.g. Conclusiones al análisis estacional*
- 6.1.2.h. Análisis de las tendencias diarias**
- 6.1.2.i. Conclusiones al análisis diario*

6.1.3. CÁLCULO DEL COMPORTAMIENTO EVAPORATIVO

- 6.1.3.a. Cálculo de las propiedades del material para la evaporación*
- 6.1.3.b. Cálculo de la evaporación de los muros*
- 6.1.3.c. Evaluación del comportamiento evaporativo medio diario*
- 6.1.3.d. Conclusiones al comportamiento evaporativo del caso 1*

6.1.4. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EVAPORATIVO MEDIANTE SIMULACIÓN POR ORDENADOR

6.1.1. ESTUDIO Y DESCRIPCIÓN DEL CASO 1

6.1.1.a CONTEXTO HISTÓRICO SOBRE LA CONSTRUCCIÓN DE LA IGLESIA

La Iglesia de Santiago de Peñalba, ideada originalmente por San Genadio, fue construida durante el primer tercio del siglo X por el abad Salomón, durante el reinado de Ramiro II. De los estudios arqueológicos que se llevaron a cabo en la Iglesia por parte de la Fundación del Patrimonio Histórico de Castilla y León, en colaboración con la Diócesis de Astorga y el Excmo. Ayuntamiento de Ponferrada, se deduce que todo el edificio – que se encuentra actualmente- se construyó *ex-novo*, dada la construcción unitaria que presenta. El edificio actual formaba parte de un conjunto mayor, del que tras múltiples reformas a lo largo de los años sólo se conserva el cuerpo de la iglesia con sus capillas adosadas, y el cuerpo y espadaña del campanario (Cortés Santos, 2011 (Ed. 2013)).

Figura 52. Vista parcial de la iglesia desde el lado sur, en la que se puede ver con claridad cómo es la fábrica irregular que compone los muros de la iglesia.

6.1.1.b CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

Para poder realizar los trabajos de investigación, es necesario conocer la composición material, dimensiones y sistema constructivo del edificio. Todos estos datos serán aplicados en las diferentes fases de la investigación: ensayos, cálculos y simulación. Se describen a continuación los datos más relevantes sobre las características constructivas de este caso de estudio.

Figura 53. Zanja de la Capilla vista desde el Sur. Indicadas las tres zarpas de cimentación. Fuente: Memoria del proyecto básico y de ejecución de restauración de cubiertas de la Iglesia de Peñalba de Santiago. Arquitectos: Pedro Luis Gallego Fernández y Ángel Cepeda Martín.

La iglesia se realizó en mampostería, más o menos irregular, fundamentalmente realizada en pizarra y caliza, trabada con barro. Los bloques de piedra que se emplearon estaban escasamente tallados, dispuestos en hiladas no regulares, tal como se puede apreciar en la actualidad (Figura 52 y Figura 54).

Figura 54. Mampostería del muro norte realizada de manera irregular.

El suelo interior está principalmente realizado en “opus signinum”, siendo un mortero mezcla de cal, arena y ladrillo machacado. Algunos elementos están realizados en piedra caliza, como las columnas del interior.

Tiene una superficie construida de 159,25 m². Posee planta de cruz latina, consta de una sola nave dividida en dos tramos por un arco de herradura, dos estancias abiertas en el segundo tramo de la nave, un ábside occidental y un contra-ábside. Tiene una longitud –incluyendo los muros- de 20,31 metros y 6,57 metros de ancho. La altura mayor es de 13,12 metros¹. El edificio se construyó con una composición simétrica doble en la que se contraponen ábside con contra-ábside y las estancias norte con sur.

Figura 55. Planta de la Iglesia de Santiago de Peñalba. Fuente: Memoria del proyecto básico y de ejecución de restauración de cubiertas de la Iglesia de Peñalba de Santiago. Arquitectos: Pedro Luis Gallego Fernández y Ángel Cepeda Martín.

El ábside, contra-ábside y transepto están cubiertos por bóvedas gallonadas dispuestas sobre anillos (Figura 56), mientras el tramo de la nave que precede al contra-ábside y las estancias laterales se cubren con bóvedas de cañón (Figura 57).

¹ En pies, estas medidas son de 60x16x39.

Figura 56 Bóveda gallonada en transepto

Figura 57 Bóveda de cañón

En el exterior esta composición se traduce en una sucesión de volúmenes que alcanzan su cota máxima en el tramo que precede al ábside oriental². Exteriormente, los muros están articulados con cuatro pares de contrafuertes completamente trabados con el muro.

² Esta misma composición la vemos en iglesias como la de San Miguel de Celanova, de época contemporánea.

Figura 58 Fachada Sur. Vista desde la calle de la fachada y el muro de cierre.

La puerta principal, en el muro sur, es geminada con doble arco de herradura sobre columnas (Figura 58). Tiene una anchura de 2,5 metros. Casi enfrentada a la puerta principal, está la puerta del muro norte, de 1,57 metros de luz.

Reparaciones históricas en las cubiertas:

Los datos existentes sobre las intervenciones realizadas en el edificio resultan de gran interés para esta investigación, pues dotan de información sobre los materiales y sistemas constructivos que han llegado hasta la actualidad y que han sido empleados en la construcción –o sucesivas intervenciones del edificio- afectando al estado actual del edificio.

Según explica la *Memoria del Proyecto básico y de ejecución de restauración de cubiertas de la Iglesia de Santiago de Peñalba (León)*, redactada por Pedro Luis Gallego Fernández y Ángel Cepeda Martín, se deducen los siguientes datos de la exploración de los cuerpos de cubierta realizada con motivo de las obras de conservación preventiva llevadas a cabo en octubre de 2013:

La solución de cubierta existente pertenece a la restauración de González Mercadé de los años 70. Se realizaron catas para explorar la composición de esta cubierta.

La solución de cubierta cuenta con perfiles metálicos dispuestos cada 60cm, formando los faldones de cubierta, apoyados sobre un zuncho de hormigón que remata los muros

(Figura 59). Una viga metálica forma la línea de cumbrera. Sobre los perfiles metálicos apoyan bovedillas cerámicas rematadas con mortero de cal sobre el que se clava directamente la pizarra.

Figura 59. Imagen del interior del ábside. Fuente: Memoria del proyecto básico y de ejecución de restauración de cubiertas de la Iglesia de Peñalba de Santiago. Arquitectos: Pedro Luis Gallego Fernández y Ángel Cepeda Martín.

La cubierta del cimborrio, debido a la poca distancia que existe entre el extradós de la bóveda y la línea de faldones, se solucionó poniendo sobre dicho extradós una capa de mortero de cemento con áridos gruesos y armadura de acero corrugado en malla electrosoldada del tipo 15/15/6 sobre la que se aplicó una solución de continuidad (Figura 60), otra capa uniforme de mortero de cal que varía entre los 5 y los 10cm de espesor, y sobre la cual se clavarón las pizarras.

Figura 60. Cata en la cubierta donde se puede ver la malla electrosoldada. Fuente: Memoria del proyecto básico y de ejecución de restauración de cubiertas de la Iglesia de Peñalba de Santiago. Arquitectos: Pedro Luis Gallego Fernández y Ángel Cepeda Martín.

Figura 61. Sección del tablero. Fuente: Memoria del proyecto básico y de ejecución de restauración de cubiertas de la Iglesia de Peñalba de Santiago. Arquitectos: Pedro Luis Gallego Fernández y Ángel Cepeda Martín.

También en las obras de los años 70 se realizó la colocación del alabastro en los huecos de las ventanas, con el objetivo de lograr una mejora en la ventilación de la iglesia.

Bajo el “Plan de trabajo para la intervención integral de la Iglesia de Santiago de Peñalba” (año 2002) se realizaron trabajos de arqueología. Se pudo comprobar que el pavimento actual parece ser el original de la iglesia, puesto que no se han certificado niveles inferiores de pavimento³.

También de los trabajos de arqueología, gracias a las excavaciones se deduce que el edificio se construyó de manera unitaria y estable estructuralmente. Las cimentaciones son profundas, de entre 2 y 3 metros (Figura 53 y Figura 62).

Figura 62. Detalle de encuentro en cimentación. Fuente: Memoria del proyecto básico y de ejecución de restauración de cubiertas de la Iglesia de Peñalba de Santiago. Arquitectos: Pedro Luis Gallego Fernández y Ángel Cepeda Martín.

³ Queda la duda de si el pavimento pudiera haberse realizado en la restauración de Menéndez Pidal, pudiendo entonces, ser una anastilosis.

Figura 63. Detalle de suelo bajo el lucillo de San Fortis. Fuente: Memoria del proyecto básico y de ejecución de restauración de cubiertas de la Iglesia de Peñalba de Santiago. Arquitectos: Pedro Luis Gallego Fernández y Ángel Cepeda Martín.

Figura 64. Hueco en la cara interior del muro Norte donde se puede ver el relleno de los muros.

Reparaciones recientes:

En la *Memoria del Proyecto básico y de ejecución de restauración de cubiertas de la Iglesia de Santiago de Peñalba (León)*, redactada por Pedro Luis Gallego Fernández y Ángel Cepeda Martín, se describen los trabajos que se van a realizar.

Desmontar la pizarra de las cubiertas y reponer aquellas dañadas, fijándola a una tablazón de rastreles y lámina impermeabilizante recuperando las direcciones correctas de solapes.

Para resolver las humedades de las zonas bajas de la iglesia, se propone una recogida superficial de aguas pluviales, pavimentando la zona de la cabecera y recogiendo el agua en una canaleta de hormigón in situ que lleve el agua a la red municipal.

Para evitar las filtraciones que se estaban produciendo en los muros, especialmente en el muro norte, se plantea un retacado con cal hidráulica de los muros en las zonas más expuestas.

La Tabla 1 sintetiza los elementos constructivos anteriormente descritos. Esta tabla sirve como base para definir en el modelo tridimensional del edificio realizado por ordenador las características físicas de la realidad del edificio para conseguir precisión en la simulación.

Tabla 15. Características de los principales elementos constructivos que componen la Iglesia de Santiago de Peñalba.

Elemento constructivo	Material	b [m]	Detalle constructivo e imágenes
Muros	Pizarra y caliza trabados con barro (originalmente) retacados con cal hidráulica (actualmente)	0,70–0,80	<p>01 - Muro de mampostería e=75cm 02 - Enlucido de cal interior 03 - Suelo interior 04 - Terreno</p> <p>Fuente: elaboración por la autora de este trabajo</p>

b: espesor del elemento [m]

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.1 IGLESIA DE SANTIAGO DE PEÑALBA (LEÓN)

Elemento constructivo	Material	b [m]	Detalle constructivo e imágenes
Solado interior	Solera de cal, cemento blanco, piedra silíceo y teja machacada, extendida sobre cama de hormigón (1:5), bruñido. Actualmente cubierta por una tarima de protección.	0,15	<p><i>Fuente: Memoria del proyecto básico y de ejecución de restauración de cubiertas de la Iglesia de Peñalba de Santiago. Arquitectos: Pedro Luis Gallego Fernández y Ángel Cepeda Martín.</i></p>
Cubiertas	Pizarra clavada a madera sobre mortero de cal		<p><i>Fuente: Memoria del proyecto básico y de ejecución de restauración de cubiertas de la Iglesia de Peñalba de Santiago. Arquitectos: Pedro Luis Gallego Fernández y Ángel Cepeda Martín.</i></p>

Elemento constructivo	Material	b [m]	Detalle constructivo e imágenes
Ventanas	Piezas de alabastro	Hueco: 1,00x0,45 m Piezas alabastro: 0,45 x0,45 x0,02 m	<p><i>Fuente: Fotografías tomadas por la autora de este trabajo</i></p>
Puerta muro norte	Caliza	Hueco: 1,25x2,85 m	<p><i>Fuente: Fotografías tomadas por la autora de este trabajo</i></p>

Elemento constructivo	Material	b [m]	Detalle constructivo e imágenes
Puerta muro sur	Caliza	Hueco: 2 huecos con parteluz de 0,95x2,85 m	<p data-bbox="798 1070 1347 1137"><i>Fuente: Fotografías tomadas por la autora de este trabajo</i></p>

6.1.1.c CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

En el capítulo 5 “*Metodología*”, apartado 5.3.2 “*Parámetros materiales*”, se detallaba la cantidad de muestras tomada en cada edificio, a qué ensayo va destinada cada muestra, qué valores se obtienen de cada ensayo, y la finalidad de estos valores.

La Tabla 16 siguiente recuerda el número de muestras tomadas en el caso 1: Iglesia de Peñalba. En importante señalar que, aunque en la tabla se enumeran un total de 11 muestras, muchas de ellas son porciones menores de las originales sacadas del edificio, o son muestras que se han sometido a ensayos sucesivos y compatibles entre ellos. Se ha tenido especial atención a tomar la cantidad de muestra estrictamente necesaria, pues se trata de un edificio con valores patrimoniales, por lo que se ha buscado realizar la menor alteración posible.

Tabla 16. Relación de muestras recogidas en la Iglesia de Santiago de Peñalba (León).

Código	Fecha de toma	Material	Estado ⁴	Lugar extracción	Ensayo ⁵
P01	14/06/2017	Mármol	C	5043_3	EH4
P02	14/06/2017	Mármol	C	5043_3	EH1, EH2, EH3
P03	14/06/2017	Mármol	C	5043_3	EH4
P04	14/06/2017	Mortero 2	C	5043_3	EH4
P05	14/06/2017	Mortero 1	C	5043_3	EH4
P06	26/08/2017	Mortero 1	C	5043_3	EH1, EH2, EH3
P07	26/08/2017	Mortero 2	C	5043_3	EH1, EH2, EH3
P08	26/08/2017	Mármol	C	5043_3	EP2
P09	26/08/2017	Mármol	C	5043_3	EP1, EH2
M01	14/06/2017	Mortero 1	A	5043_3	E23, EH2
M02	14/06/2017	Mortero 2	C	5043_3	EP2, EH2

⁴ La traducción de los códigos empleados para denominar el estado en el que se encontraba la muestras cuando se tomó en el edificio se recogen en la tabla 10 del capítulo 5 “*Metodología*”.

⁵ La traducción de los códigos empleados para denominar los ensayos que se llevaron a cabo con cada una de las muestras se recogen en la tabla 10 del capítulo 5 “*Metodología*”.

Las muestras se tomaron en una zona del muro norte, que a la que se le ha atribuido el código⁶, que en este caso es el 5043_3, como se muestra en la tabla.

Figura 65. Ubicación sobre el plano de planta de los puntos de toma de muestras en el caso 1, Iglesia de Santiago de Peñalba. Plano redibujado por la autora en base a la documentación gráfica del proyecto básico y de ejecución de restauración de cubiertas de la Iglesia de Peñalba de Santiago. Arquitectos: Pedro Luis Gallego Fernández y Ángel Cepeda Martín.

En los apartados siguientes se detallan los resultados concretos de los ensayos realizados en las muestras de este caso 1. En primer lugar, se explican los resultados de la caracterización petrográfica de una muestra de piedra y dos muestras de mortero. En segundo lugar, se explican los resultados obtenidos en los diferentes ensayos hídricos llevados a cabo en las muestras de mortero y piedra.

Caracterización petrográfica y mineralógica de la roca empleada en la Iglesia de Peñalba:

Los ensayos de caracterización petrográfica se llevaron a cabo en el Centro de Asistencia a la Investigación (CAI), de la Facultad de Ciencias Geológicas, en la Universidad Complutense de Madrid. Para estos ensayos se han empleado pequeñas cantidades de muestra, tanto de piedra como de mortero, numeradas en la Tabla 16. El objetivo de estos ensayos es conocer la composición mineral, así como observar su estructura interna, grado de alteración, etc.

[EP1] Difracción de Rayos-X (DRX):

Este ensayo se llevó a cabo en una porción de muestra de piedra (P08) y en dos muestras de mortero (M01 y M02). Se decidió ensayar dos muestras diferentes de mortero

⁶ Cada uno de los muros lleva un código asociado, para su identificación a la hora de realizar los diferentes cálculos.

porque, por la apariencia *de visu* se trataba de dos morteros diferentes, por lo que interesaba conocer la composición en ambos casos.

Para la realización de este ensayo fue necesario fracturar una pequeña parte de cada muestra, obteniendo unos pocos gramos que se machacaron hasta obtener un fino polvo. Este polvo se tamizó (<63µm) (Figura 66).

Figura 66. (Izquierda) De la muestra de material se fracturó una pequeña parte, que se denominó como P08, y que se empleó para el ensayo DRX. (Derecha) Apariencia de la muestra P09 machacada en el mortero.

Posteriormente se colocó en el porta-muestras, sin orientar los granos. El porta-muestras se introduce en el Difractómetro (Figura 67). En este caso se trata de un Difractómetro de polvo Bruker D8 Advance.

Figura 67. Imagen del Difractómetro empleado para el ensayo

Los resultados del difractograma de la muestra P09 revelan la presencia de una fase mineralógica predominante que es la calcita (C) en proporción 99,6%, y una detectada en proporciones minoritarias que es el cuarzo (Q), en proporción 0,4% (Gráfica 1). Lo que revela que se trata de un mármol, al contrario de lo que se esperaba, pues en la documentación existente sobre el edificio nombran la piedra como una caliza.

Gráfica 1. Difractograma para la muestra de piedra P09. Iglesia de Santiago de Peñalba.

El difractograma muestra dos morteros diferentes. De la muestra M01 se obtiene como resultado un mortero de cal aérea y árido silíceo (Gráfica 2). El mortero M02 tiene una composición de cal aérea y árido carbonático. La presencia de cuarzo y feldespato en esta muestra puede deberse a la impureza de la piedra caliza con la que se elaboró la cal, o un pequeño añadido de arena para mejorar su trabajabilidad (Gráfica 3).

Tabla 17. Resultado composición mineral y porcentajes de los morteros según difractograma.

	Fase mineralógica	Porcentaje [%]
MORTERO M01	Calcita	13
	Filosilicatos	71
	Cuarzo	16
MORTERO M02	Calcita	90
	Filosilicatos	6
	Cuarzo	4

Gráfica 2. Difractograma para la muestra de mortero M01. Iglesia de Santiago de Peñalba.

Gráfica 3. Difractograma para la muestra de mortero M02. Iglesia de Santiago de Peñalba.

[EP2] Microscopía óptica de polarización (MOP):

En este caso, la preparación de las láminas delgadas se solicitó a un técnico del SAI⁷ (Figura 68).

Figura 68. Imagen de las láminas delgadas de las muestras de mortero M01, M02, y la muestra de piedra P08.

Las imágenes de la lámina P08 (Figura 69) muestran que se trata de una roca carbonática metamórfica. En cuanto a la textura, se trata de cristales en su mayoría homogéneos en

⁷ Servicio de Preparación de Rocas y Materiales Duros (SAI) Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad de Zaragoza.

forma y tamaño, subangulares, con una orientación lineal siguiendo su eje longitudinal, con un tamaño medio de 200 x 40-50 micras. Siguiendo la orientación preferente aparecen algunas fisuras recristalizadas y con presencia suelta de minerales silitacatados, cuarzo y arcilla. En las imágenes se aprecia la baja porosidad de la roca.

A- MUESTRA P08/01 - NP
B- MUESTRA P08/01 - NC
C- MUESTRA P08/02 - NP
D- MUESTRA P08/02 - NC

Figura 69. Imágenes lámina delgada muestra P08.

Las imágenes de la muestra M01 (Figura 70) muestran escasa cantidad de ligante, con relación ligante/árido 1/4. El ligante presenta un aspecto entre marrón claro y marrón oscuro homogéneo en toda la matriz. La composición es cal aérea, tal como ya se evidenciaba en el ensayo con DRX. El árido tiene una distribución bimodal, con granos pequeños en su mayoría, algunos entre medianos a grandes. En cuanto a la forma del grano se puede decir que es subangulosa en los fragmentos pequeños y redondeada en los grandes. La granulometría es variada, desde 50 a 500 micras. Existe una importante fracción porosa, algunos por pérdida de granos de árido y otros relacionados con los bordes de grano, éstos últimos conectados entre sí con fisuras estrechas y lineales.

A- MUESTRA M01/01 - NP
B- MUESTRA M01/01 - NC
C- MUESTRA M01/02 - NP
D- MUESTRA M01/02 - NC

Figura 70. Imágenes lámina delgada muestra M01

En lo que se refiere al aspecto macroscópico de la muestra M01 podemos decir que se trata de un mortero con una apariencia compacta, de color claro, con una tonalidad entre blanquecina y grisácea. Parece tener buena cohesión ligante/árido y no muestra evidencias de alteración. Es duro y no se disgrega con facilidad (Figura 71).

Figura 71 (Izquierda) Muestra de mortero M01. (Derecha) Imagen tomada con lupa electrónica Dino Lite Edge 3. sobre la misma muestra.

La muestra M02 (Figura 72), presenta un claro aspecto diferenciado respecto a la muestra M01. La cantidad de ligante es mayor, en una proporción ligante/árido 1/1. El aspecto es marrón oscuro, con composición de cal aérea. En cuanto al árido se observa una distribución de granos de dos tipos, pero de tamaño homogéneo. La forma de los granos es alargada y angulosa, con una granulometría de entre 150 y 200 micras. Algunos granos son fragmentos de mármol y otros son silicatados de una arena con un tamaño homogéneo, probablemente tamizada. Se aprecia algo de presencia de grumos. Algunas zonas del ligante forman agregados continuos que pueden estar mal carbonatados. En lo que respecta a la porosidad, es de dos tipos: poros pequeños y redondeados, relacionados con el amasado, y poros cortos y semilineales asociados a la retracción por carbonatación.

A- MUESTRA M02/01 - NP
B- MUESTRA M02/01 - NC
C- MUESTRA M02/02 - NP
D- MUESTRA M02/02 - NC

Figura 72. Imágenes lámina delgada muestra M02

En cuanto al aspecto macroscópico de la muestra M02 se trata de un mortero con una apariencia menos compacta que el anterior, de color grisáceo oscuro. Parece no tener buena cohesión ligante/árido. Los granos de árido se ven a simple vista, en algunas zonas presenta algo de alteración, y se disgrega con más facilidad de M01. (Figura 73).

Durante el proceso de tamizado que se realizó para algunos ensayos, se ha podido observar que el mortero M01 presentaba unos granos alargados y esquitosos de color negro, que también se aprecian en las imágenes de la lupa (Figura 71). Tal como explica la norma UNE-EN 933-4:2008, este tipo de granos produce un mortero muy trabajable antes de fraguar, pero que requiere una proporción de conglomerante más elevada que con granos redondeados. Por otra parte, lo convierte en un mortero más poroso. En el proceso de tamizado del mortero M02 se observan unos granos más redondeados y de pequeño tamaño (Figura 73), que producen un mortero más compacto, tal como se observaba en las imágenes con el microscopio petrográfico.

Figura 73. (Izquierda) Muestra de mortero M02. (Derecha) Imagen tomada con lupa electrónica Dino Lite Edge 3. de la misma muestra.

Conclusiones a la caracterización petrográfica y mineralógica:

La caracterización ha permitido conocer el tipo de roca empleada en la Iglesia de Santiago de Peñalba. Según los informes y Proyecto de restauración del año 2013, venía clasificándose como una caliza. Gracias a estos ensayos se ha podido conocer que se trata de un mármol.

Como conclusión sobre los morteros, se evidenció que son diferentes en su composición mineral. Uno de ellos (M01) parece más compacto que el otro (M02), tanto macroscópicamente como microscópicamente. Por ello, se podía esperar que su comportamiento frente al agua pudiera ser diferente. Para caracterizarlo se sometieron a distintos ensayos hídricos que se explican en los apartados siguientes. El mortero M02 cuenta con fragmentos de mármol, común como aditivo en morteros. Es posible, que ese mármol sea de la propia piedra del lugar machacada, la misma empleada en la construcción de la Iglesia.

Algunos autores indican la dificultad a la hora de clasificar pastas y morteros de este tipo dentro de los conceptos actuales, debido a la presencia de material con granulometría variada (Igea, Lapuente et al. 2012).

Ensayos hídricos

Los ensayos hídricos realizados para esta tesis, se llevaron a cabo en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (ETSAM).

Para la realización de los ensayos hídricos se emplearon 7 muestras, entre piedra y mortero, de las cuales 3 son de piedra (P01 a P03) extraída del muro y 4 son de mortero de juntas (P04 a P07). Dada la composición irregular de los muros de esta iglesia, se ha considerado importante no solo ensayar la piedra sino también el mortero de las juntas.

Como se ha explicado anteriormente, las muestras se han podido recoger durante los ensayos in-situ realizados en el muro norte (Figura 65) como parte de un trabajo encargado por la Junta de Castilla y León⁸, para la evaluación de las lesiones por humedad en el muro norte. De las siete muestras, 3 se sometieron a ensayos de absorción capilar (P02, P06 y P07). Las otras 4 muestras se sometieron a absorción de vapor de agua, mediante cámara húmeda (P01, P03, P04 y P05). En la Tabla 15 se resumen estos ensayos.

Respecto al procedimiento seguido para realizar estos ensayos, como ya se comenta en el capítulo de metodología, al tratarse de un edificio histórico, las muestras que se han tomado son de pequeñas dimensiones. Además, en la mayoría de casos, el material que se extrae se encuentra degradado. Esto hace que las muestras no sean regulares. En cada uno de los ensayos que se describen en los apartados siguientes se explica cómo se ha ido adaptando el método a las posibilidades que ofrecían las muestras de la Iglesia de Santiago de Peñalba.

Tabla 18. Características físicas obtenidas de los ensayos hídricos realizados en muestras de material de la Iglesia de Santiago de Peñalba.

	P02	P06	P07
Volumen aparente (V_b)	26,83	29,44	5,41
Densidad aparente (ρ_b) [kg/m ³]	2720,50	1570,31	1354,89
Densidad real (ρ_r) [kg/m ³]	2920	2110	1660
Porosidad abierta (f_0) [%] *	0,25	27,37	26,98
Coefficiente de absorción A_b [%]	0,09	17,43	19,92

(*) Datos empleados en el cálculo de la evaporación, que se realizan en el apartado 6.1.3 Cálculo del comportamiento evaporativo.

⁸ “Informe sobre humedades en la Iglesia de Santiago de Peñalba” 2017

[EH1] Ensayos de absorción al agua por absorción capilar:

La norma que rige este ensayo es la UNE-EN 15801:2010. *Conservación del patrimonio cultural. Método de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad*. De manera complementaria, si se trata de materiales pétreos, se podría considerar la UNE-EN 1925: 1999. *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad*.

Para el cálculo del coeficiente de absorción capilar, que se puede obtener de este ensayo, la probeta ensayada tiene que ser regular. De esta manera se puede calcular la cantidad de agua absorbida en función del área de absorción (A).

Dado que las muestras del edificio no son regulares, el cálculo del coeficiente de absorción capilar no tiene un valor fiable. No obstante, puede emplearse el ensayo para conocer la forma y tendencia de la curva de absorción capilar, que da como resultado el comportamiento de la piedra y el mortero del edificio frente al agua, aunque se trate de un resultado más cualitativo que cuantitativo.

Este problema frente a la caracterización hídrica de muestras de edificios históricos no es nuevo, y otros investigadores lo resuelven acompañando la caracterización hídrica con la mineralógica, asegurando de este modo una correlación de datos fiable (Bustamante, Sanchez-de Rojas 2007). También encontramos trabajos que ensayan las propiedades de la piedra empleando muestras de piedra del mismo tipo, pero con origen de cantera (D'Agostino 2013). De esta manera se pueden seguir las especificaciones que marcan las normas, como podrían ser la UNE-EN 15801:2009 o UNE-EN 1925:1999, con probetas regulares como cubos o cilindros. Pero, si se hace con este procedimiento, encontramos el problema de que los valores de absorción de una piedra sana⁹ no se van a parecer a los de la piedra puesta en obra. Por tanto, a pesar de la dificultad de caracterizar materiales extraídos del edificio, se ha optado por este método.

Del mármol (P02)¹⁰, se ha obtenido una curva de absorción muy baja, al tratarse de un tipo muy compacto. Por el contrario, las muestras de mortero (P06 y P07) presentan una curva de absorción mayor, pero variable, si las comparamos entre ellas (Gráfica 4). El mortero P06 alcanza la saturación a las dos horas, mientras que P07, alcanza la saturación antes de una hora. Esta variación se debe a las diferentes dosificaciones de los sucesivos morteros que se han empleado en los rejuntados sucesivos que ha sufrido la iglesia a lo largo del tiempo¹¹.

⁹ Por “sano” se entiende un material que no se ha visto alterado por diferentes agentes de deterioro que puedan aparecer al estar colocada en obra construida, como son las sales higroscópicas que alteran su comportamiento frente al agua.

¹⁰ Las características petrofísicas se describen en el apartado “Caracterización petrográfica”,

¹¹ En el apartado “Caracterización petrográfica”, se detalla la caracterización de las muestras M01 y M02 de dos de los morteros empleados en la iglesia y su dosificación obtenida mediante el ensayo de análisis térmico.

Gráfica 4. Curvas de absorción capilar de las muestras de piedra (P02) y mortero (P06 y P07) de la Iglesia de Santiago de Peñalba.

Gráfica 5. Curva de secado a presión atmosférica y temperatura constante (20°C) de la muestra P02 de piedra. Iglesia de Santiago de Peñalba.

Gráfica 6. Curva de secado a presión atmosférica y temperatura constante (20°C) de la muestra P06 de mortero. Iglesia de Santiago de Peñalba.

De la Gráfica 4 se deduce que la mayor absorción de agua en el muro puede deberse a los morteros. Es especialmente absorbente el mortero P06 (mortero 1, Tabla 16), que según la caracterización es más poroso que P07 (mortero 2, Tabla 16). Por su parte, la piedra P02, tiene una capacidad de absorción capilar casi nula. Esto era coherente con lo que se observó en las imágenes de la microscopía (Ensayo EP2), donde se veía una roca muy compacta, con poca porosidad.

Para completar este ensayo, se ha realizado la curva de secado de una muestra de piedra (P02) y de mortero (P06) después de haberlas sometido a absorción bajo presión atmosférica hasta llevarlo a estado de saturación completa¹². Como resultado se puede ver que el mortero (P06) ha absorbido más porcentaje de agua por peso de muestra (16%) que la muestra de piedra (1,2%). Además, la muestra de piedra (P02) tarda menos tiempo en secarse (6h) mientras que la muestra (P06) tarda más del doble (29h) en secar.

De todo ello, se confirmó que los morteros absorbían considerablemente más que la piedra. Además de una rápida succión, se pudo ver también que evaporaban con mayor facilidad y rapidez. La piedra era mucho más impermeable, absorbiendo mucho menos, pero también tenía mayor dificultad para evaporar lo absorbido, necesitando mucho más tiempo para secar.

¹² Esto se realiza como parte del ensayo EH2 y EH3

[EH2] y [EH3] Cálculo de la densidad aparente, porosidad abierta, y ensayo de absorción bajo presión (Inmersión):

Cálculo de la densidad aparente (ρ_b):

Habiendo secado la probeta en estufa, hasta peso constante, se obtiene el peso seco (m_d). Para el cálculo de la masa saturada, por medio del ensayo de absorción capilar, se somete la probeta a la succión de agua. Cuando ésta ha alcanzado peso constante, se sumerge en agua a presión atmosférica (Figura 8), teniendo sobre la muestra una columna de mínimo 5cm de agua, según indican las prescripciones del ensayo UNE-EN 13755:2008. El peso obtenido se considera como peso saturado (m_s). Para obtener el peso sumergido (m_h), se pesa la muestra con balanza hidrostática. La fórmula de cálculo se puede consultar en el capítulo 5 “Metodología”.

Del ensayo de absorción a presión atmosférica [EH3] se puede obtener el coeficiente (A_b). En este caso, la piedra ha dado como resultado un coeficiente de absorción muy bajo de $A_b=0,94\%$, especialmente si se compara con los morteros, con valores más altos de entre 19 y 17%. Por tanto, si algún elemento de la fábrica de estos muros “manda” sobre la absorción es el mortero, mucho más que la piedra.

Figura 74. Muestra de piedra de Santiago de Peñalba sometida a absorción bajo presión atmosférica, mediante inmersión en agua destilada a temperatura ambiente (20°C).

Mediante la ecuación 77 (capítulo 5 “Metodología”), para las muestras de mortero se obtuvieron densidades aparentes de P06= 1570,31 kg/m³ y P07=1354,89 kg/m³.

Calculo de la porosidad abierta (f_0):

Para los morteros, la porosidad abierta obtenida es de P06= 27,37% y P07= 26,98%. (Tabla 18).

El valor obtenido para la muestra de piedra P02= 0,25%, que es un valor muy bajo, similar al de las piedras más compactas que podemos encontrar en las tablas de

características físicas. Por lo que, es lógico que se trate de una piedra con un coeficiente de absorción muy bajo.

Cálculo de la densidad real (ρ_r):

Una vez determinada la densidad aparente y la porosidad abierta de la piedra, mediante el método del picnómetro se puede calcular la densidad real, con la ecuación 80 (capítulo 5 “Metodología”). De este ensayo se ha obtenido un valor para P02 de $\rho_r = 2920 \text{ kg/m}^3$.

[EH4] Ensayo de sorción higroscópica (Cámara húmeda):

Las muestras P03, P04 y P05 se emplearon para realizar ensayos de absorción a vapor de agua, mediante cámara húmeda, siguiendo las estipulaciones metodológicas de la norma *Prestaciones higrotérmicas de los productos y materiales para edificación. Determinación de las propiedades de sorción higroscópica UNE-EN ISO 12571:2002*. En el capítulo 5 “Metodología” se explica el procedimiento llevado a cabo para realizar este ensayo, así como el material empleado. A continuación, se exponen los resultados obtenidos para las muestras de la Iglesia de Peñalba de Santiago:

Cada una de las muestras pasa por tres cámaras húmedas sucesivas (tabla 11 capítulo 5 “Metodología”). El tiempo de permanencia en cada una de las cámaras es de un mes. Las muestras se introducen en la primera cámara (33%HR) en estado seco, después de haber pasado por estufa. P05, que corresponde con el mortero 1, presenta una mayor pendiente. Este mismo mortero es el que tenía una curva de absorción capilar mayor (P06 en Gráfica 4). Con esa misma humedad relativa, la muestra de piedra, P03, casi no presenta adsorción. La muestra de mortero 2, P04, presenta una adsorción mucho más baja incluso que la piedra. En todo caso, se trata de materiales que absorben muy poco vapor de agua, ya que tras tres meses de estudio bajo las condiciones de humedad constante, la muestra que más ha variado (P5) no llega a un 0,3% de incremento de su peso respecto a su peso seco (Gráfica 7).

Gráfica 7. Ensayo de sorción hídrica para la iglesia de Santiago de Peñalba: Contenido en agua en función de la HR

Gráfica 8. Curvas de absorción de vapor de agua (HR:33%): Contenido en agua (u) en función del tiempo ($\sqrt{t}$)

Gráfica 9. Curvas de absorción de vapor de agua (HR:75%): Contenido en agua (u) en función del tiempo ($v t$)

Gráfica 10. Curvas de absorción de vapor de agua (HR:98%): Contenido en agua (u) en función del tiempo ($v t$)

Conclusiones generales a los ensayos hídricos:

- Las muestras de piedra, sometidas a cualquiera de los ensayos presentados, muestra una baja permeabilidad al agua, ya sea líquida o vapor. Sin embargo, los morteros presentan un coeficiente de absorción mucho mayor. Esto revela que el mortero es el que más influye en la dinámica del agua en los muros, lo cual

será importante a la hora de realizar los cálculos de succión-evaporación de los muros.

- No existe un método para realizar ensayos hídricos sobre muestras de pequeña dimensión que provengan de edificios históricos que resulte completamente fiable sin recurrir a comparativas con muestras sanas¹³. Por esta razón, resulta importante complementar con ensayos de caracterización mineralógica (DRX, MOP, etc.) para tener un conocimiento fiable del material y su estructura.

¹³ En el esfuerzo por aproximarse a la realidad del material histórico, algunos trabajos realizan la caracterización sobre muestras sanas, y por comparación evalúan la durabilidad mediante ensayos de envejecimiento acelerado (Igea 2011).

6.1.1.d ESTUDIO DEL CLIMA DE SANTIAGO DE PEÑALBA

El edificio se encuentra en la provincia de León. Se trata de una región con un clima que se define como clima oceánico *Csb* según la clasificación de Köppen-Geiger. Esto se traduce en inviernos fríos y veranos calurosos y secos, con períodos de otoño y primavera cortos. Es importante señalar que se encuentra en una zona a gran altitud (1133 msnm) por lo que encontramos un gradiente térmico y de humedad muy acusado entre las zonas de montaña, como en la que se encuentra Peñalba, en comparación con zonas de llanura en la misma región.

Detalles de la estación meteorológica:

La estación más cercana a la localidad de Peñalba de Santiago es Carracedelo (Figura 75). Latitud: 42° 33' 6" N - Longitud: 6° 44' 6" O. Está a una altitud de 456msnm, lo que representa cierta diferencia con el clima de Peñalba de Santiago, ubicado a mayor altitud. Hay una distancia entre ambas localidades de 30 Km. No existe ninguna estación más cercana. Por lo que todos los datos que no se pueden conocer con la monitorización exterior mediante los data-loggers, se tomarán de esta estación.

Figura 75. Imagen de la estación de Carracedelo (León)

Este modelo de estación cuenta con tres partes principales: la fuente de alimentación eléctrica la hace autónoma, gracias a una célula fotovoltaica con panel orientación sur. Para las horas sin sol se dispone además de una batería. La estación posee una memoria cíclica donde se va recopilando la información de los sensores en intervalos de 30 minutos. Esta información se envía una vez al día al ordenador central.

La sonda VAISALA HMP45C (CAMPBELL) mide la temperatura y humedad relativa. El sensor de temperatura se realiza mediante un sensor de temperatura Pt1000, que se basa en la variación de la resistencia del platino con la temperatura. La humedad relativa

se mide mediante un dispositivo capacitivo de estado sólido, que cambia sus características eléctricas respondiendo a variaciones de humedad, de tal manera que al absorber la humedad disminuye la capacidad. Estos cambios son detectados, linealizados y amplificados por un circuito electrónico situado en la sonda, que, además compensa la humedad relativa con la temperatura.

Tabla 19. Especificaciones técnicas para la sonda VAISALA HMP45C de medida de temperatura y humedad. Estación meteorológica empleada para el caso de estudio 1 Iglesia de Santiago de Peñalba.

Variable meteorológica	Rango de medida	Sensor	Unidades de medida
Temperatura (T)	-39,2°C;+ 60°C	± 0,2°C	°C
Humedad relativa (HR)	0,8-100 %	± 2 %	%

El pluviómetro ARG100 (CAMPBELL). Un dispositivo de cazoletas basculantes (o cangilones) que mide el volumen de precipitación. Está formado por dos partes, una base y un embudo superior para la recogida.

La velocidad del viento y su dirección se miden con una ANEMOVELETA RM YOUNG 05103. La medida de la velocidad del viento se mide por medio de la rotación de la hélice de 4 palas que produce la señal eléctrica. La medida de la dirección del viento se mide por la rotación de la hélice, siendo el norte 0°.

Tabla 20. Especificaciones técnicas para la ANEMOVELETA RM YOUNG 05103 para la medida de velocidad y dirección del viento. Estación meteorológica empleada para el caso de estudio 1, Iglesia de Santiago de Peñalba.

Variable meteorológica	Precisión	Rango de medida	Unidades de medida
Velocidad	± 0,3 m/s para 1-60 m/s ± 1,0 ms-1 para 60-100 m/s	1-60 m/s	m/s
Dirección	± 3 °	0 - 360 °	°

La radiación solar medida por un piranómetro SKYE SP1110 (CAMPBELL). Es una fotocélula de silicio sensible a la radiación entre 350 y 1100 nm. Su orientación es SUR, para evitar el sombreado de otros elementos de la estación.

Tabla 21. Especificaciones técnicas para el piranómetro SKYE SP1110 para la medida de la radiación solar.

Variable meteorológica	Precisión	Rango de medidas	Unidades de medidas
Radiación solar	3 %	350-1100 nm	Wm ⁻²

Según el Atlas Agroclimático de Castilla y León de 2013 publicado en la página web de AEMET¹⁴, las medias anuales de los principales valores climáticos son las siguientes:

Temperatura media anual está entre los 11 y 11,4 °C

Precipitación media anual entre los 500 a 600mm

Radiación solar media anual entre 1.527,79 y 1.652,78 kW/m².año

Análisis de los datos climatológicos:

En términos generales, el período estudiado (mayo 2017 – abril 2018) se encuentra dentro de un año climático un poco atípico. Como se va explicando a lo largo de este documento, se han dado temperaturas máximas en invierno poco usuales, o fuertes tormentas a finales de verano. Esto ha condicionado el comportamiento higrotérmico del edificio, como se explicará en los siguientes capítulos.

En la Tabla 22 se describen las medias mensuales de los principales parámetros climáticos. Las medias corresponden a los meses estudiados. La temperatura y la humedad relativa se han calculado mediante monitorización con registradores situados en dos puntos del exterior de la iglesia, en dos orientaciones diferentes para asegurar una media más precisa.

Tabla 22. Medias mensuales de los principales parámetros para los meses estudiados en la Iglesia de Santiago de Peñalba.

Mes	T [°C] media	HR [%] media	v [m/s] media	Pp total [mm]
Mayo 2017	15,9	69,8	1,07	75,78
Junio 2017	14,1	71,4	1,31	15,77
Julio 2017	19,5	55	1,19	4.73
Agosto 2017	19,5	53,5	1,03	14.39
Septiembre 2017	14,6	63,7	9,40	3.55
Octubre 2017	14,6	51,3	1,66	16.75
Noviembre 2017	6,7	67,9	1,73	44.13
Diciembre 2017	3,9	78,8	2,04	0.2
Enero 2018	3,9	82,2	1,04	53
Febrero 2018	2,3	78,2	0,86	47.3
Marzo 2018	6,47	78,91	1,65	171
Abril 2018	11,25	72,23	1,11	90,43

Durante el período monitorizado, los meses con mayores lluvias se producen durante la primavera. El mes con el mayor promedio de lluvia ha sido abril de 2018, con una media de 90,43mm, seguido por mayo de 2017, con una media de 75,78mm. Pero, las lluvias

¹⁴ Página web de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) www.aemet.es

diarias más intensas se produjeron durante los meses de invierno y hasta la primavera. Los meses más secos se producen durante el otoño, entre los meses de septiembre y octubre. Los días más lluviosos de todo el período monitorizado se producen en noviembre y diciembre de 2017. El mes de febrero de 2018 presenta también algún día de lluvia muy intensa.

Gráfica 11. Evolución de la pluviometría [mm] durante el período monitorizado, desde el mes de mayo de 2017 y hasta el mes de abril de 2018. Los días, del eje de abscisas se han representado en días julianos. Gráfica realizada con los datos proporcionados por la estación meteorológica.

Los meses con mayor temperatura media del período estudiado han sido: Julio y agosto de 2017 (Gráfica 12 y Tabla 22). La temperatura empieza a descender a partir del mes de agosto. Este descenso se aprecia en los registros de los data-loggers del interior, como se explica en el apartado 6.1.2 “Análisis higrotérmico”. Las temperaturas más bajas se producen durante los meses de enero y febrero¹⁵, habiendo incluso valores negativos que podríamos asociar a nevadas. La temperatura máxima registrada ronda los 38°C y se produce en el mes de Julio de 2017. La temperatura más baja ronda los -7°C y se produce en el mes de febrero de 2018.

¹⁵ Hay que matizar que, tal como se aprecia en la Gráfica 12, en los meses de noviembre y diciembre hay un vacío de datos, debido a un fallo en la estación meteorológica. Según lo que se ha podido conocer

Gráfica 12. Evolución de la temperatura [°C] durante el período monitorizado, desde el mes de mayo de 2017 y hasta el mes de abril de 2018. Los días, del eje de abscisas se han representado en días julianos. Gráfica realizada con los datos proporcionados por la estación meteorológica. Entre los meses de noviembre y diciembre no existen datos de la estación meteorológica, posiblemente debido a un fallo por las bajas temperaturas y épocas de intensas nevadas. Se cuenta con los registros de monitorización tomados en el exterior de la iglesia para suplir esta carencia.

Gráfica 13. Evolución de la velocidad del viento [m/s] durante el período monitorizado, desde el mes de mayo de 2017 y hasta el mes de abril de 2018. Los días, del eje de abscisas se han representado en días julianos. Gráfica realizada con los datos proporcionados por la estación meteorológica.

La máxima velocidad del viento registrada en el período monitorizado se produce en el mes de diciembre, coincidiendo con los días de máxima pluviometría (Gráfica 11). Pero los meses más ventosos se producen en invierno, seguidos por los meses de primavera. Los meses menos ventosos se producen en otoño (Gráfica 12).

En cuanto a la radiación solar, las curvas siguen la misma tendencia que las de temperatura, como es lógico. La radiación descende a medida que nos acercamos a los meses más fríos de invierno. Los meses con mayor radiación solar son los de junio y julio. El aumento tras el invierno se empieza a producir rápidamente durante la primavera y el descenso empieza en el mes de agosto.

Gráfica 14. Registros de (R_s) radiación solar [MJ/m^2] registrada entre los meses de mayo de 2017 y abril de 2018, según la estación meteorológica. En el eje de abscisas se ha expresado el tiempo en días julianos.

6.1.1.e DESCRIPCIÓN DE LA INSPECCIÓN Y MONITORIZACIÓN DEL CASO 1

Hipótesis establecidas para la monitorización del caso de estudio

Tras una primera inspección del edificio se establecen tres hipótesis que se deben responder. Todas las cuestiones tienen relación con el comportamiento higrorotmico del edificio y, por tanto, con condicionantes sobre el comportamiento evaporativo del mismo.

¿Cómo ventila este edificio?

¿El agua de lluvia se queda retenida en el interior de los muros?

¿Está entrando agua por capilaridad en la zona enterrada?

Para responder a estas tres hipótesis sobre el edificio se estudian tres fenómenos– ventilación, lluvia y absorción capilar– que se describen a continuación.

1º La capacidad de ventilación de este edificio.

a) Descripción de los condicionantes para la ventilación

Se trata de un edificio con una altura media interior de 10 metros, 19 metros de largo y 5,34 metros de ancho, es, por tanto, un edificio muy esbelto. Además, cuenta con un total de 6 ventanas, con una superficie media de huecos, cada una de ellas de 0,45 metros cuadrados. Esto es un porcentaje inferior a 1% de huecos respecto a macizo, lo que nos habla de un edificio con poca capacidad de ventilación. Las dos puertas, una situada en el muro norte, que se vienen denominando en este documento como la secundaria, y otra en el muro sur, siendo la principal y de mayor tamaño, se encuentran casi completamente enfrentadas, a los pies de la iglesia. A través de ellas, tal como se ha medido con anemómetro, se produce una ventilación cruzada constante, si están abiertas, pero que no es suficiente para toda la iglesia, dado que a pocos metros de las puertas el aire reduce su velocidad prácticamente a 0m/s, midiendo velocidades en torno a los 0,03-0,01m/s.

Las ventanas además están constituidas con placas de alabastro de 2 cm de espesor dispuestas en vertical del modo que se ve en la Tabla 1. Esto limita la capacidad de ventilación de las mismas.

b) Hipótesis sobre la ventilación natural:

Es posible que la mayor ventilación se produzca a los pies de la iglesia, no llegando a ventilar suficientemente la cabecera y pequeñas capillas. Esto puede limitar en gran medida la capacidad de evaporación del edificio. Se pretende evaluar la capacidad de ventilación de este edificio en relación con el comportamiento evaporativo del mismo.

c) Sistema de trabajo y análisis sobre la ventilación natural en Peñalba

Para responder a la capacidad de ventilación del edificio se trabaja con una serie de data-loggers cercanos a muros, otros en el centro del edificio en el ambiente a diferentes alturas, o cercanos a puertas, además de realizar mediciones con anemómetro. Todos estos registros revelan el gradiente de humedad y temperatura que se produce en el interior del ambiente del edificio. Todos estos datos se comparan con los resultados de las simulaciones realizadas con el software Design Builder. Variando las diferentes condiciones de infiltración y ventilación del aire, o creando diferentes escenarios de simulación en los que se modifiquen huecos de entrada y salida del aire se puede realizar un estudio comparados con los datos de monitorización para determinar cómo se está comportando el edificio en cuanto a ventilación.

2º La capacidad de secado de los muros frente a la lluvia en relación con la capacidad de evaporar el agua contenida en los muros por parte del ambiente interior.

a) Descripción de los muros de la Iglesia de Peñalba

En algunos momentos del año, acompañando a lluvias intensas, el agua llega a traspasar el espesor del muro y a manifestarse en el interior en forma de manchas en la pared. Esto no se produce en toda la iglesia, sino en una zona concreta, que parece que se ve más azotada por la lluvia, se cree que por el estado de degradación de los morteros de juntas. La mancha que se produce en el muro norte a una altura de 6 metros. En el período en que se ha trabajado en el edificio, se ha detectado la aparición de la mancha en varios momentos. Primero aparece en el punto que se ve a la derecha de la Figura 76, el día 29/12/2017, tras un día de tormenta. Posteriormente aparece una mancha en la capilla de San Genadio (Figura 77).

Figura 76 Mancha de humedad en el muro norte, fecha 29/12/2017.

Gráfica 15. Pluviometría registrada por la estación meteorológica entre los días 15 de diciembre de 2017 y 15 de febrero de 2018.

Los meses de diciembre a enero son de los más ventosos del período –junto con marzo y abril-. Coincidiendo con los días de tormenta, se producen además vientos elevados (Gráfica 16).

Gráfica 16. Velocidad del viento registrado por la estación meteorológica en el periodo comprendido entre diciembre de 2017 y febrero de 2018.

El edificio ha sido intervenido en el año 2013 por última vez solucionando las posibles humedades derivadas de fallos en cubierta. Se ha podido observar que existen ciertas zonas de los muros que tienen el mortero deteriorado.

En cuanto a la estanqueidad de suelos y cerramientos, en el proyecto de intervención antes mencionado, del año 2013 se describía el problema de la penetración del agua a

través de las fábricas, especialmente en las zonas de vientos dominantes por haberse perdido los revestimientos exteriores originales. Además, la pérdida de los morteros en las juntas de la mampostería de lajas contribuye a dicha filtración.

b) Hipótesis sobre la capacidad de evaporación del muro norte

Se estima que la mancha se debe a las fuertes lluvias que se han producido en estos dos momentos puntuales. Estas manchas revelan que el agua es capaz de entrar en el interior del muro llegando incluso a traspasar al interior, lo que refleja que existen puntos en el muro donde el mortero está debilitado y permite la entrada del agua.

En la parte que concierne concretamente a esta investigación, es la averiguación de si el agua que se encuentra contenida en el muro es capaz de salir al exterior a través del ambiente interior del edificio, es decir, cual es la capacidad evaporativa de este muro.

Figura 77. Imagen de la mancha en la capilla de San Genadio –a los pies de la iglesia- aparecida el día 05/01/2018. Fotografía de María del Carmen del Río, guía de la Iglesia de Santiago de Peñalba.

c) Sistema de trabajo para el estudio del comportamiento del muro frente al agua de lluvia y su capacidad de evaporación hacia el interior.

Para ello se trabaja con la monitorización en altura de ese paramento por medio de la disposición de los aparatos en cuadrícula (Figura 84 y Figura 85) y además se evaluará el interior del muro por medio del software EnergyPlus que permite estudiar las diferentes zonas del muro en todo su espesor.

Figura 78 Colocación de data-logger de ambiente en altura.

3º Focos de humedad debidos al terreno y otras causas

a) Descripción del encuentro del terreno con la Iglesia

Tras una de las inspecciones higrotérmicas manuales realizadas con termohigrómetro se empezaron a detectar diferentes focos de humedad, especialmente en la zona norte y este del edificio, coincidiendo con la cabecera. (Figura 79 y Figura 80). En esta zona, la iglesia se encontraba parcialmente enterrada originalmente (Figura 81). Tras las últimas restauraciones, se ejecutó un drenaje perimetral en esta zona para conducir el agua de lluvia y del terreno fuera del recinto de la iglesia (Figura 82). Además, el muro de la capilla norte se encuentra en contacto con la cerca de piedra, lo que genera un punto conflictivo.

El hecho de que la cabecera se encuentre tan alejada de las puertas puede ser un motivo que propicie la acumulación de humedad en estos puntos. Por otro lado, la zona de la cabecera es la menos soleada, especialmente en la capilla norte. Esto, junto con la dificultad del agua de lluvia o nieve que se puede acumular en esa zona, a pesar del drenaje, hace que sea más sensible a la aparición de fuentes de humedad que da lugar a su aparición en el interior. Como se verá en el análisis de soleamiento calculado con el programa Design Builder, la zona de la cabecera de la iglesia está casi todo el año en sombra (Gráfica 148, apartado 6.1.3).

Figura 79 Manchas de humedad y regueros de agua en el muro norte en el cabecero.

Figura 80 Manchas de humedad y regueros de agua en el muro norte en el cabecero.

Figura 81. Zona enterrada por el desnivel del terreno en parte de la cabecera (señalado en rojo). Plano redibujado en base a la documentación gráfica del al Proyecto de Restauración de Cubiertas de la Iglesia de Santiago de Peñalba, de los arquitectos Pedro Luis Gallego y ángel Cepeda Martín.

Se estima que existe influencia del terreno que hace que el edificio se moje, en general en toda la zona de encuentro de los muros con el terreno. Esta absorción no es muy alta debido a que existe un drenaje perimetral. Además, las cualidades de la piedra ayudan a evitar el ascenso, que, como se ha explicado, es poco porosa. No obstante, en la zona de cabecera, la humedad observada es mayor, por lo que se quiso analizar qué cantidad de agua absorben los muros, y analizar si el aporte es mayor en la cabecera y cuál es su influencia sobre la evaporación interior.

Raquel Otero Ortiz de Cosca

Para ello se disponen varios data-loggers en esta zona y otros a los pies de la iglesia, que forman parte de la cuadrícula y que tienen como fin el seguimiento de estos focos, Los que se encuentran a los pies de la iglesia se emplearán en el análisis para contrastar los datos con los que se ubican en la cabecera de la iglesia.

Descripción del sistema de monitorización completo en la Iglesia de Santiago de Peñalba.

Tras establecer los tres bloques de trabajo anteriormente comentados, se determina la cantidad de dispositivos necesarios para la monitorización, contabilizando un total de 19 data-loggers. Estos se dispusieron en diferentes puntos del edificio, con los diferentes fines explicados anteriormente.

Previamente a la colocación de los registradores se procede a una inspección con termohigrómetro que revela que los puntos con mayor grado de humedad. En estos puntos se colocarán varios de los aparatos para realizar control de estos focos de posible evaporación.

A continuación, en la Tabla 23 se describe la cantidad y ubicación de todos los sensores colocados en este edificio, además en los planos adjuntos (Figura 83, Figura 84 y Figura 85) se puede ver sobre la imagen su ubicación.

Tabla 23. Sistema de numeración de los registradores de temperatura y humedad ubicados en la iglesia de Santiago de Peñalba.

UBICACIÓN DATALOGGER SANTIAGO DE PEÑALBA			
UBICACIÓN EDIFICIO	CÓDIGO DESIGN BUILDER	Nº DT	ALTURA (m)
MURO NORTE	5043_WALL_3	DT1	6
		DT2	4,5
		DT3	3
		DT4	1,5
		DT6	0
MURO NORTE - pies iglesia	4996_WALL_3	DT13	0
		D14	1,5
MURO NORTE/ESTE (capilla Virgen)	5214_WALL_2	DT17	0
		DT16	1,5
		DT15	1,5
		L2	0
MURO SUR	5043_WALL_5	DT7	6
		DT8	4,5
		L1	0
AMBIENTE	5100	DT5	6
		DT9	1,5
		DT10	1,5
EXTERIOR	EXTERIOR	DT12	8,5
		L3	8,5

Figura 83. Planta de ubicación de data-loggers y numeración de muros. Planos redibujados por la autora de la tesis en base al Proyecto de Restauración de Cubiertas de la Iglesia de Santiago de Peñalba, de los arquitectos Pedro Luis Gallego y ángel Cepeda Martín.

Figura 84. Sección AA'. Ubicación de data-loggers en muro Norte. Planos redibujados por la autora de la tesis en base al Proyecto de Restauración de Cubiertas de la Iglesia de Santiago de Peñalba, de los arquitectos Pedro Luis Gallego y ángel Cepeda Martín.

Figura 85. Sección BB'. Ubicación de data-loggers en muro Sur. Planos redibujados por la autora de la tesis en base al Proyecto de Restauración de Cubiertas de la Iglesia de Santiago de Peñalba, de los arquitectos Pedro Luis Gallego y ángel Cepeda Martín.

6.1.1.f PARÁMETROS PARA LA SIMULACIÓN DEL CASO 1

En primer lugar, es importante aclarar, que, aunque las gráficas de simulación CFD obtenidas de Design Builder se encuentran en el apartado 6.1.4, la simulación se ha empelado en algunas fases previas:

- En el apartado 6.1.3.b: para obtener datos sobre la velocidad del aire en el interior del edificio, que serán usados para el cálculo de evaporación de los muros.
- En el apartado 6.1.3.c.: para obtener datos sobre las renovaciones de aire que hace diariamente el edificio, que serán usados para el análisis de la capacidad de disipación de la humedad.

Por ello, se ha considerado necesario, antes de los cálculos de evaporación, contar cómo se ha realizado la simulación de la iglesia y cómo se ha validado el modelo, que luego se empleará para los cálculos de los apartados 6.1.3.b y 6.1.3.c.

Para realizar la simulación se han estudiado las propiedades hídricas y térmicas de los materiales que componen la envolvente del edificio, especialmente de los muros, ya que en los siguientes apartados serán la parte de la envolvente objeto de cálculo de la evaporación. Por otro lado, se ha estudiado el funcionamiento de puertas y ventanas, para conocer cómo influyen en la ventilación, así como la morfología y dimensiones generales del edificio. Otros parámetros como la ubicación, orientación del edificio y clima han sido de gran importancia para obtener resultados precisos en la simulación. En el capítulo 5 “Metodología” se explican todos estos parámetros con detenimiento. En los apartados siguientes se enumeran los valores concretos para el caso 1 de la Iglesia de Santiago de Peñalba.

Propiedades de los materiales

Con los datos históricos e informes de reparaciones del edificio, la toma de datos in-situ y los ensayos sobre los materiales realizados en laboratorio se obtuvieron todos los parámetros necesarios para introducir en el programa, en lo que respecta a materiales.

Los muros introducen en el programa como elementos de doble hoja (Tabla 15, ver sección tipo del muro). Una hoja exterior de mampostería de piedra, una intermedia de relleno y otra interior de mampostería con acabado revocado. En este punto el programa empleado presenta ciertas limitaciones, pues no permite especificar dimensiones o disposición de las piedras, así como detallar algunos datos sobre el material de unión –mortero- que sería interesante tratar. En cualquier caso, dado el objetivo final con que se utiliza este programa y, como se verá en las gráficas, la precisión del cálculo higrotérmico no presenta grandes problemas de precisión, y los datos que aporta el modelo son muy útiles y concuerdan con las hipótesis que se plantean a raíz de la observación de los datos de monitorización.

El espesor medio de los muros es $b = 70\text{cm}$, pero el programa permite dibujar las zonas con mayor espesor. Lo que resulta de gran utilidad para estudiar correctamente zonas como la cabecera etc.

Como se ha explicado en el capítulo 5 “Metodología”, el programa permite el cálculo con HAM, lo que resulta muy conveniente, dado que los intercambios de energía y masa de este tipo de edificios están muy condicionados por la envolvente. En la tabla 11 del capítulo de metodología se describían las propiedades de los materiales que es necesario conocer para la simulación. Algunas de ellas se han obtenido de los ensayos antes detallados. Otras, se han tomado de las tablas de datos existentes. Dado que los resultados de los ensayos que vienen en las tablas se realizan sobre materiales no alterados, se plantea en este trabajo que una futura investigación debería abordar el estudio completo de todas las propiedades de muestras obtenidas de edificios. Aunque es un reto, dadas las limitaciones de toma de muestras en patrimonio, sería una herramienta interesante para conocer mejor los fenómenos que condicionan el comportamiento evaporativo, especialmente a la hora de hacer simulaciones más precisas.

Condiciones iniciales para la simulación

Tabla 24. Parámetros climáticos

PARÁMETROS CLIMÁTICOS CARACTERÍSTICOS DE LA UBICACIÓN GEOGRÁFICA	
Elevación sobre el nivel del mar	1132 m
Latitud y longitud	42.43, -6.533
Clasificación Koppen	Cfb
Zona climática ASHRAE	4A
Zona horaria	GTM +1:00
Inicio de invierno	Octubre
Final de invierno	Marzo
Inicio de verano	Abril
Final de verano	Septiembre

Las simulaciones se realizan sin sistemas HVAC, pues la iglesia no dispone de ninguno de ellos. Un parámetro importante es la ventilación natural, que como se explica en el apartado 6.1.2 “Análisis higrotérmico”, influye notablemente en este edificio. Esto se nota especialmente cuando se abren las puertas para realizar las visitas. Tal como se ve en las gráficas 23 a 35 del análisis higrotérmico, las fluctuaciones de temperatura y humedad en el interior de la Iglesia son especialmente notables mientras las puertas permanecen abiertas. Por tanto, se han programado unos datos para ventilación natural que se introducen en el programa, basado en las observaciones de la monitorización. Es decir, para cada una de las simulaciones realizadas, se ha analizado el horario en que las puertas han permanecido abiertas (Tabla 25). Por otro lado, se realiza un pre-cálculo de las renovaciones que el edificio realiza, en base a las mediciones realizadas con

anemómetro, los cálculos de volumen y dimensiones de huecos. Las fórmulas se han explicado extensamente en el capítulo 2 “*Fundamentos teóricos*”. Este pre-cálculo servirá al programa como condiciones iniciales para la simulación.

Tabla 25. Horarios Iglesia de Peñalba

L	M	X	J	V	S	D
*	*	10:00-14:00	10:00-14:00	10:00-14:00	10:00-14:00	10:00-14:00
*	*	16:00-20:00	16:00-20:00	16:00-20:00	16:00-20:00	16:00-20:00

*Días que la iglesia permanece cerrada

Otro de los parámetros importantes, son los caudales de aire de renovación que entran por puertas y ventanas (Tabla 26, Tabla 27). Estos parámetros pertenecen a las condiciones de contorno o iniciales que se deben introducir en el programa. En esta investigación se ha procedido mediante la medición con anemómetro de estos caudales. El tipo de anemómetro empleado permite realizar medición continua, a modo de data-logger (almacenando un dato por segundo) y almacenar los datos en un archivo de formato editable. Con estos datos, se ha realizado una media de valores horarios que será la que se introduce en el programa. Se ha realizado todas las mediciones necesarias para cada una de las simulaciones que se han llevado a cabo. A este respecto, y como se ha explicado en el estado de la cuestión, es frecuente encontrar casos de estudio en los que la velocidad del aire que entra en el edificio se estima, o se emplea un valor promedio anual que proviene de datos de estaciones meteorológicas. Este método parece no ser del todo preciso, pues al igual que sucede con las mediciones higrotérmicas cercanas al edificio, respecto a las que pertenecen a la estación meteorológica, los valores cambian. Es decir, no es lo mismo el clima en el entorno cercano al edificio, que el clima a unos metros o kilómetros –especialmente si tenemos en cuenta que es necesario realizar correcciones de altura para valores de viento cercanos a los edificios-. Por ello, todas las mediciones que se puedan realizar sobre el edificio serán más precisas. Lógicamente, esto pertenece a un modo de simplificar la dificultad del proceso de cálculo, especialmente si no es una de las variables fundamentales, dependiendo del fin último de la simulación, o de la precisión que sea necesaria. El procedimiento ideal sería monitorizar el aire entrante por puertas y ventanas, además de otros puntos que resulten importantes del edificio, para poder hacer una estimación precisa. Pero esta campaña de monitorización es costosa, pues hacen falta bastantes equipos con un nivel de precisión alto, que suelen tener un precio elevado. Existen algunos casos de investigación que sí trabajan con este procedimiento (D’Agostino, Congedo et al. 2014, D’Agostino, Congedo 2014)

Tabla 26. Resumen de ventanas para la iglesia de Santiago de Peñalba.

VENTANAS	Dimensiones [cm]	Ubicación	Altura [cm]
V01	37 x 100	5043_WALL_5	791
V02	25 x 88	5043_WALL_5	591
V03	15 x 88	5187_WALL_5_0_0	411
V04	53 X 88	5134_WALL_2_0_0	182
V05	37 X 100	5043_WALL_3	791
V06	25 X 88	5043_WALL_3	591
V07	53 X 88	4996_WALL_3	230

Tabla 27. Resumen de puertas para la Iglesia de Santiago de Peñalba.

PUERTAS	Dimensiones [cm]	Ubicación
P01 (Exterior)	205 X 285	5043_WALL_5
P02 (Exterior)	123 X 282	5043_WALL_3
P03 (Interior)	97 X 259	5043_WALL_5
P04 (Interior)	97 X 259	5043_WALL_3

Por otra parte, la simulación debe iniciarse con unas condiciones de contorno de temperatura que son importantes. En muchos casos se recurre a valores estimativos, como sucedía con la velocidad del viento. Para obtener una mayor precisión, se han medido estos valores sobre el edificio con termohigrómetro. El procedimiento ha sido tomar lecturas en diferentes puntos y en diferentes momentos del día para hacer un promedio de valores que puedan ser más precisos como condiciones de partida. Se ha realizado una prueba simulando con unas condiciones de partida estándar establecidas por defecto por el programa y después con las condiciones medidas sobre el edificio. Se han obtenido valores con un índice de precisión mucho mayor en el segundo caso.

Los condicionantes del entorno del edificio son importantes. En el caso de la Iglesia de Peñalba, existe una cerca de piedra que rodea el recinto, que llega a alcanzar 5 metros en la zona norte del muro, más elevada y 2 metros en la parte sur. Existe un campanario, que está exento del resto del volumen de la iglesia (Figura 86), sin embargo, genera una zona en sombra a los pies de la misma. La distancia a las viviendas es pequeña, y el desnivel de la calle en la parte norte hace que existan zonas en sombra fomentadas por la presencia de esos volúmenes cercanos. Esto condiciona los flujos de viento alrededor del edificio (Gráfica 151, apartado 6.1.3), así como el soleamiento (Gráfica 148, apartado 6.1.3), lo que a su vez incide en el calentamiento de los muros (Figura 87 del 3D de Design Builder).

Figura 86 Campanario exento del edificio

El programa ofrece una amplia base de datos dentro de la cual se encuentran archivos climáticos de diferentes localizaciones geográficas. La más cercana a la ubicación de este edificio es León, que está a 133 Km de Peñalba de Santiago. Además, las condiciones climáticas, aunque similares, no son exactamente las mismas. Por esta razón, se ha considerado necesario realizar un archivo climático propio –al modo que se explicaba en el capítulo 5 “*Metodología*”- empleando dos fuentes de datos: Por un lado, los datos de monitorización del clima exterior con los data-loggers DT12 Y DTL3. Por otro lado, aquellos datos que necesitan de instrumental muy específico para realizar la medición, como son la radiación solar, la precipitación, dirección del viento, velocidad del viento, etc. se tomaron de una estación meteorológica más cercana, situada en Carracedelo, a

30 Km de Peñalba de Santiago. La creación de este archivo climático propio proporcionó una mejora notable en los resultados de la simulación.

Figura 87 Iglesia de Santiago de Peñalba rodeada por la cerca que cierra el recinto, adosada así como los volúmenes¹⁶ (viviendas) que rodean al edificio arrojando sombra.

¹⁶ Los volúmenes que rodean al edificio se modelan como elementos sencillos, pues no constituyen el objeto principal y simplemente tienen como función arrojar sombra sobre el edificio.

Validación de la simulación para el caso 1

Como ya se ha explicado, para comprobar la precisión del modelo calculado, se comparan los datos de simulación con los obtenidos con la monitorización. En las Gráfica 17 y Gráfica 18 se representa la comparación entre los datos registrados en el edificio por medio de monitorización y el resultado de la simulación para cuatro días del mes de junio. El data-logger DT5 está situado en ambiente a 6 metros de altura, mientras que el DT10 está en ambiente a 1 metro. La curva de simulación (discontinua) representa el promedio del ambiente del edificio. En la Gráfica 17 vemos que el grado de humedad es bastante similar, habiendo una diferencia de menos de 0,40 g/Kg entre la media medida en el edificio –media entre las dos alturas DT5 y DT10- y el resultado obtenido por simulación. En cuanto a temperatura (Gráfica 18), la diferencia es un poco mayor. En casi todas las simulaciones realizadas se ha encontrado algo más de imprecisión en los resultados de la temperatura. Se cree que es posible que se deba a las propiedades atribuidas a los materiales, que como se ha explicado antes, es difícil tener los valores exactos al tratarse de materiales históricos alterados y de los cuales no se pueden obtener muchas muestras para realizar los pertinentes ensayos con toda la precisión que se podría requerir. Por otra parte, la temperatura que el software está obteniendo para este edificio es un poco más alta de la que se ha medido con DT5. Esto podría ser cierto, pues no se han podido colocar data-loggers a más altura de 6m, por lo que es posible que exista una capa de aire más caliente a esa altura que aumente la temperatura si se pudiera calcular la media contando con esos estratos más altos. Esto tiene coherencia con las observaciones que se hacen en el apartado de análisis higrotérmico, pues se ve perfectamente en las gráficas de temperatura como existe una estratificación del aire de forma que las capas más altas tienen mayor temperatura. Como sólo se ha podido monitorizar hasta 6 metros de altura, es posible que la temperatura siga aumentando. Además, hay que tener en cuenta que esos días pertenecen al período más caluroso del año, llegando las temperaturas a alcanzar, incluso superar, los 30 °C. Esto supone el calentamiento por la radiación solar de la cubierta, que emite calor al interior, aumentando también la temperatura de las capas más altas. En cualquier caso, y viendo los valores obtenidos en simulación de temperatura¹⁷ por algunos autores, se podría decir que es un error asumible. D’Agostino en la simulación de la Cripta de la Catedral de Lecce obtiene una desviación entre los valores medidos y los simulados de un 2% para la temperatura y un 5% para la humedad relativa. Leissner, por su parte, obtiene una precisión de $\pm 10\%$ HR y $\pm 1\text{g/Kg}$ en grado de humedad (D’ Agostino, Congedo et al. 2013, Leissner, Kiian 2014). Haciendo este cálculo para el caso de estudio, la diferencia obtenida entre la simulación y la monitorización

¹⁷ En el trabajo de D’Agostino, Congedo et al. se especifican en la tabla 2 los valores obtenidos entre las temperaturas medidas y las simuladas en la Cripta de la Catedral de Lecce. En algunos puntos la diferencia se traduce en torno a 1°C, consiguiendo un buen ajuste en otros con apenas décimas de diferencia (D’ Agostino, Congedo et al. 2013).

es, en temperatura $T=1\%$ y en humedad relativa $HR=3\%$, por lo que se puede decir que entra dentro del límite admisible.

Gráfica 17. Evolución del grado de humedad (W) entre los días 10 de junio de 2017 y 13 de junio de 2017. En la gráfica se representa el grado de humedad medido por distintos data-loggers colocados en el interior del edificio (DT5 y DT10), el registro del exterior y la simulación promedio del ambiente interior.

Gráfica 18. Evolución de la temperatura (T) entre los días 10 de junio de 2017 y 13 de junio de 2017. En la gráfica se representa la temperatura medida por distintos data-loggers colocados en el interior del edificio (DT5 y DT10), el registro del exterior y la simulación promedio del ambiente interior.

6.1.2 ANÁLISIS HIGROTÉRMICO

Introducción

En este apartado se presentan los valores medios diarios de temperatura (T), humedad relativa (HR) y grado de humedad (W) de los puntos monitorizados para la iglesia. Estos valores se ordenan por meses, de manera que se pueda ver cómo evoluciona el edificio a todo el período monitorizado. Se ha monitorizado desde el mes de mayo de 2017 hasta abril de 2018 (12 meses). En el apartado anterior se describían la cantidad y ubicación de los data-loggers.

Se ofrece, en primer lugar, el apartado 6.1.2.a que analiza las tendencias generales para todo el período monitorizado (desde mayo de 2017 hasta abril de 2018). Posteriormente, se analizan las tendencias clasificadas por estaciones, para ver los cambios higrotérmicos que se producen en el interior del edificio, en relación con los cambios estacionales. Al final de este apartado se ofrece un resumen de conclusiones de cómo se está comportando el edificio, para extraer aquellos puntos que necesitan un análisis más exhaustivo, y que se estudiarán en los puntos 6.1.3 y siguientes.

Es necesario matizar, antes de empezar a desarrollar estos apartados, que, para simplificar la lectura de los datos, y para facilitar el análisis y comprensión de los mismos, se ha tomado una semana representativa de cada mes.

6.1.2.a ANÁLISIS ESTACIONAL: EVOLUCIÓN DE LAS TENDENCIAS GENERALES

En las gráficas de este apartado se presentan los datos higrotérmicos de una semana representativa de cada mes para todo el período monitorizado. Cada una de estas semanas ofrece una idea de la tendencia de comportamiento del edificio a lo largo de todo el mes.

El edificio empieza a calentarse en primavera, hasta junio la temperatura exterior va en ascenso, por lo que el edificio gana calor (Gráfica 88). A partir del mes de agosto, empieza el descenso de la temperatura. El ambiente interior del edificio acompaña al descenso del exterior. La temperatura ambiente interior se ha medido a 1 y 6 metros de altura. La temperatura media anual a 6 metros es de 17,53 °C mientras que a 1 metro es de 14,18 °C. La diferencia entre la temperatura ambiente a 1 metro de altura y la temperatura ambiente a 6 metros de altura es de más de 3°C. Comparando dos puntos monitorizados, DT1 en el muro norte y DT7 en el muro sur, ambos a 6 metros, se observa que: a la misma altura, el muro sur tiene una temperatura media a lo largo del año de 17,45 °C, mientras que el muro norte tiene una temperatura media de 17,40° C. La diferencia, por tanto, es de 0,05° C entre ambos puntos a 6 metros de altura. Por tanto, la superficie interior de los muros, en esos dos puntos monitorizados, está a una temperatura muy similar. Si se observa la Gráfica 88, la temperatura en el punto DT7 es

más alta el 54,75% de los días, frente días al punto DT1, que es más alta el 45,25%. Por tanto, la temperatura es bastante similar. En general, todas las temperaturas interiores son muy uniformes, tanto en pared como en el ambiente, presentando diferencias muy pequeñas entre las diferentes alturas monitorizadas (Gráfica 88). Se nota algo de estratificación de la temperatura en altura, que se analiza en los apartados siguientes.

Gráfica 88. Evolución de la temperatura media diaria [°C] medida en diferentes puntos del interior de la Iglesia de Santiago de Peñalba y del exterior. Se representa todo el periodo monitorizado, desde el mes de mayo de 2017, hasta abril de 2018. En la gráfica figuran los datos de una semana representativa de cada mes.

En cuanto al grado de humedad (Gráfica 89), durante casi todo el año es más bajo en el exterior que en el interior. Es más alto en el interior en los meses más fríos del año, enero y febrero. El interior varía siguiendo las fluctuaciones del exterior. La diferencia media en grado de humedad entre el interior y el exterior a lo largo del año es $\Delta W_{\text{ini-ext}} = 1,02\text{g/kg}$. El grado de humedad es mayor en pared que en ambiente, y especialmente alto en los puntos que se encuentran en el encuentro entre el muro y el suelo a 0m (tal como DT17 en el muro sur, o DT13, en el muro norte). Si observamos la gráfica se ve que, hasta el mes de junio, cuando la temperatura exterior es mayor que la interior –el edificio viene frío del invierno y ahora empieza a ganar calor–, el grado de humedad es más alto en la pared norte que en la pared sur. Sin embargo, en los días del mes de agosto, cuando la temperatura exterior empieza a descender en el exterior –el interior ha ganado calor, aunque empieza a descender lentamente– el grado de humedad en el muro sur desciende más lentamente que el muro norte. Esta diferencia norte-sur puede deberse a dos cosas: que el muro sur, por su orientación, al haber ganado más calor, esté evaporando más tiempo que el muro norte, por tanto, el grado de humedad que se detecta en la superficie interior del muro con el data-logger se deba a que el muro evapora. O, podría deberse a que, al encontrarse el data-logger en una esquina de la cabecera, se esté condensando la humedad en esa zona, por tanto, el grado de humedad más alto que se mide, es por falta de buena ventilación. La posible influencia de la

ventilación se trata con detenimiento en el apartado 6.1.3 “Cálculo del comportamiento evaporativo”.

Gráfica 89. Evolución del grado de humedad medio diario [g/kg] medido en diferentes puntos del interior de la Iglesia de Santiago de Peñalba y del exterior. Se representa todo el período monitorizado, desde el mes de mayo de 2017, hasta abril de 2018. En la gráfica figuran los datos de una semana representativa de cada mes.

Tabla 28. Medias mensuales de grado de humedad interior ($W_{med.Int}$) grado de humedad exterior ($W_{med.Ext}$), temperatura interior ($T_{med.Int}$), temperatura exterior ($T_{med.Ext}$), y diferencias entre interior y exterior en grado de humedad ($\Delta W_{int-ext}$) y temperatura ($\Delta T_{int-ext}$)

Mes	Grado de humedad [g/kg]			Temperatura [°C]		
	$W_{med.Int}$	$W_{med.Ext}$	$\Delta W_{int-ext}$	$T_{med.Int}$	$T_{med.Ext}$	$\Delta T_{int-ext}$
Mayo	8,66	7,85	0,81	17,01	16,10	0,91
Junio	10,05	9,41	0,64	19,80	23,06	-3,26
Julio	9,05	7,12	1,92	21,52	19,79	1,72
Agosto	9,65	7,66	1,99	19,80	16,48	3,32
Septiembre	6,97	5,84	1,13	15,51	12,07	3,43
Octubre	7,62	5,59	2,03	16,95	15,37	1,58
Noviembre	6,65	5,22	1,43	12,58	8,58	4,00
Diciembre	4,87	4,43	0,44	5,13	4,07	1,07
Enero	4,64	4,17	0,46	3,94	3,69	0,25
Febrero	4,69	4,81	-0,12	3,84	5,75	-1,91
Marzo	4,31	3,43	0,88	3,63	3,52	0,11
Abril	5,67	5,00	0,66	7,52	11,03	-3,51

Inercia hídrica

La relación entre el grado de humedad interior y exterior, en general, es tal que: *A mayor grado de humedad exterior, mayor grado de humedad en el interior. Pero, si se observan*

las líneas de tendencia por meses, se ve que, en los meses más fríos, son más horizontales. Esto indica un grado de humedad interior con valores más dispersos, frente a un grado de humedad exterior más estable (Gráfica 90). Cuanto más horizontal es la línea de la función que define la relación W_{int} vs. W_{ext} , el coeficiente que define la pendiente más se aproxima a 0, esto significa que no existen fuerzas externas y que los ciclos de variación externos están completamente atenuados. Esto mismo era observado por Camuffo y Sturaro en Santa María Maggiore, en Roma (Camuffo, Sturaro et al. 1999). Mientras que en el exterior es más estable, en el interior se producen mayores diferencias entre puntos. La falta de ventilación que se comentaba antes podría estar influyendo en que existan zonas peor ventiladas que están acumulando vapor de agua, o condensando debido a las bajas temperaturas (Gráfica 95 y Gráfica 96). En los meses más cálidos, como junio, julio, agosto y septiembre, la línea de tendencia es más vertical, indicando una relación de proporción más adecuada entre el interior y el exterior. Aquí se cumple que “a mayor grado de humedad exterior, mayor grado de humedad interior”. En estos meses cálidos, el coeficiente se acerca a 1, pareciéndose a la diagonal principal que se podría trazar en la gráfica cuando $W_{int} = W_{ext}$. Esto significa que el clima interior responde al clima exterior sin ningún tipo de atenuación. La atenuación se produce cuando existen diferencias entre los valores interior-exterior. El efecto de atenuación viene causado por la inercia térmica o hídrica del edificio.

Gráfica 90. Relación entre el grado de humedad interior (W_{int}) y el exterior (W_{ext}) en los diferentes meses del año monitorizado.

Simplificando la Gráfica 90 anterior, se puede trazar una diagonal que indica dónde $W_{int} = W_{ext}$. Los valores medios mensuales de W_{int} , en relación con los valores medios mensuales de W_{ext} , indican que existe una tendencia de atenuación hídrica por parte del interior, que tiene mayor grado de humedad que el exterior durante todo el año (Gráfica 91). No obstante, todos los meses se encuentran cercanos a la diagonal principal. Esto indica que existe una relación directa con el grado de humedad del exterior.

Gráfica 91. Tendencias estacionales de grado de humedad, valores medios interiores (W_{int}) frente a valores medios exteriores (W_{ext}). Iglesia de Santiago de Peñalba.

Inercia térmica

La relación entre la temperatura interior y exterior, en general, es tal que: *A mayor temperatura exterior, mayor temperatura en el interior.* Poniendo en relación la temperatura interior (T_{int}) con la del exterior (T_{ext}) se observa que, cómo el mes más cálido en el exterior es junio, y también en este mes se han registrado los valores más altos de temperatura en el interior. A medida que descende la T_{ext} descende T_{int} , pero de manera más lenta. Se puede ver cómo los valores de T_{int} en el mes de julio y agosto son similares. El mes de octubre ofrece una nube de puntos muy dispersa, posiblemente en relación con las temperaturas inusualmente altas registradas, como se ve en la Gráfica 88, y que también se pueden ver en los registros climáticos de temperatura (Gráfica 12, apartado 6.1.1). El mes de octubre ha sido un mes, además de más cálido de lo normal, poco ventoso (Gráfica 13, apartado 6.1.1) y de los más secos de todo el período monitorizado (Gráfica 11, apartado 6.1.1). Es posible que esto haya dado lugar a un mes propicio a la evaporación de algunas zonas del edificio, por lo que la nube de puntos es más dispersa que la de meses más fríos. Los meses más fríos en el exterior, van de enero a marzo, también lo son en el interior. Al comenzar la primavera, el mes de abril presenta valores de temperatura interior tan altos como algunos meses de verano. Es un mes con una nube de puntos dispersa, al igual que octubre, posiblemente por una buena ventilación del edificio. Al acercarse la primavera tiende a abrirse más tiempo las puertas, por lo que los intercambios de aire son mayores. Si se observa el mes de mayo, sin embargo, la nube de puntos es mucho menor, las oscilaciones térmicas han sido menores, tanto en el interior como en el exterior. Esto puede tener relación con las lluvias. Como se veía en la gráfica 11, del apartado 6.1.1 en el mes de mayo se producen lluvias abundantes, por lo que se tiende a tener el edificio cerrado más tiempo.

Gráfica 92. Relación entre la temperatura interior (T_{int}) y el exterior (T_{ext}) en los diferentes meses del año monitorizado. Iglesia de Santiago de Peñalba.

El rango de temperaturas en el interior, entre el mes de junio y el mes de agosto, es muy similar. El exterior es más cálido en junio que en agosto. La dispersión de puntos de temperatura exterior (Gráfica 92) es mucho mayor en el mes de agosto, llegando a tener temperaturas similares al mes de noviembre. A pesar de esta oscilación y del enfriamiento del exterior en agosto, la nube de puntos del interior es muy similar a la de junio, indicando la inercia térmica del edificio.

Como en el caso del grado de humedad, se puede trazar una diagonal (Gráfica 93) que indica dónde $T_{int} = T_{ext}$. Se puede ver que, la tendencia general anual, es que la temperatura en el interior esté más alta que en el exterior. A medida que el clima se vuelve más frío, la diferencia entre la temperatura interior-exterior aumenta en orden de $T_{int} > T_{ext}$, con una diferencia interior-exterior que alcanza su máximo en el mes de septiembre.

Gráfica 93. Tendencias estacionales de temperatura, valores medios interiores (T_{int}) frente a valores medios exteriores (T_{ext}). Iglesia de Santiago de Peñalba

Localización de comportamientos alejados de las tendencias estacionales

La relación entre el ambiente interior del edificio y el clima exterior se produce de manera lógica, tal que: *A mayor temperatura, mayor grado de humedad*. Esta relación dibuja una “nube de puntos” con forma vertical/ascendente (Gráfica 94). Los puntos del interior, representados con un aspa, se encuentran más agrupados, concentrados en torno a una línea ascendente imaginaria. Los puntos del exterior, representados con un punto, presentan valores más dispersos, con una nube de puntos menos homogénea, debido a las variaciones climatológicas. Las nubes de puntos del interior en los meses más fríos tienden a ser pequeñas y estar concentradas. Esto se debe, por una parte, a que los intercambios con el exterior en invierno son menores, como se verá en la Gráfica 106 y Gráfica 107 de los meses más fríos como noviembre, en que las curvas son más planas, porque se abre menos. Las puertas pasan más tiempo cerradas, por tanto, la temperatura interior es más estable. Por otra parte, al no calentarse la envolvente, el edificio tiene más dificultad para evaporar. La nube de puntos tiende a hacerse más dispersa en los meses más cálidos. Sin embargo, cabe destacar que el mes de noviembre presenta una nube de puntos similar a las de septiembre y octubre, a pesar de ser un mes de invierno. Según la Agencia Estatal de Meteorología, el mes de noviembre ha tenido una temperatura media normal, pero las máximas han sido más altas de lo normal, esto podría haberse traducido en una nube de puntos similar a la de mese más otoñales.

Resulta interesante estudiar aquellos puntos de cada mes que se salen de la tendencia general de su nube. Se trata de puntos que se podrían interpretar como de “comportamiento anómalo”. Un ejemplo es el mes de noviembre, en el que existe un

grupo de puntos con una temperatura similar a la del resto de puntos, pero con un grado de humedad más elevado, entre 8 y 10g/kg, mientras que la media está en 6,65g/kg. En el mes de octubre, sucede lo mismo, hay un conjunto de puntos que se salen de la nube de puntos que le corresponden. Una vez localizados la ubicación de estos puntos en el edificio, para estudiar si se trata de una evaporación del muro.

Gráfica 94. Relación del grado de humedad (W) con la temperatura (T) a lo largo de los diferentes meses del año. Medias mensuales. Iglesia de Santiago de Peñalba.

Los puntos del mes de noviembre que se han descrito como “de comportamiento anómalo”, están situados en la cabecera (DTL2 y DTL1, Figura 88), y se encuentran cercanos o incluso al 100% de humedad relativa (Gráfica 95). Cuanto más cercanos al muro norte, mayor es la cercanía a valores de condensación. Por tanto, estos puntos “anómalos” son puntos cercanos a la saturación. También los puntos a 0 metros de altura (suelo pared), en otras zonas de la iglesia (DT6 y DT13) tienen un valor de grado de humedad más elevado que los puntos situados a más altura. Sin embargo, se encuentran alejados de la condensación.

241

Gráfica 96. Psicrométrico con valores medios de temperatura (T) y grado de humedad (W), medidos en el mes de febrero, en diferentes puntos de la Iglesia de Santiago de Peñalba.

La situación cambia hacia el verano, como se veía en la gráfica 3. Se han introducido diferentes puntos del mes de junio en el psicrométrico (Gráfica 97). La temperatura y el grado de humedad interior es similar al del exterior. Esto significa que el edificio intercambia aire con el exterior, y está casi en equilibrio con éste. No se detectaron puntos con condensación. Existe una mezcla buena de todos los puntos, independientemente de la altura a la que se encuentren. Aparentemente, el aire se encuentra bien mezclado. Se realiza un análisis pormenorizado de todos los puntos del interior para estudiar si existen zonas que se encuentren peor ventiladas, o existe gradiente higrotérmico en el interior del edificio (apartado 6.1.2.i).

Gráfica 97. Psicrométrico con valores medios de temperatura (T) y grado de humedad (W), medidos en el mes de JUNIO, en diferentes puntos de la Iglesia de Santiago de Peñalba.

6.1.2.b ANÁLISIS POR ESTACIONES: PRIMAVERA 2017

Según el resumen climatológico de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) el mes de mayo ha sido “extremadamente cálido” con una temperatura $2,9^{\circ}\text{C}$ por encima del promedio. En términos generales, las temperaturas han sido altas en toda la región, y se han sucedido episodios de inestabilidad con numerosos días de tormenta. El carácter y cantidad de las precipitaciones de este mes han estado dentro de lo normal de la región, siendo más abundantes en zonas de montaña. En el mes de mayo se han registrado bastantes lluvias (Gráfica 11, apartado 6.1.1), siendo el mes con mayores lluvias de la temporada cálida de primavera y verano. Estas lluvias, junto con el aumento de la temperatura que se va produciendo desde finales de mayo y durante los meses de junio y julio, contribuyen al aumento del W_{ext} . El grado de humedad en el interior también aumenta desde finales del mes de mayo, durante los meses de junio y julio (Gráfica 89). El aumento de W_{int} puede deberse en parte al aporte del W_{ext} . Es necesario conocer en qué momentos el aumento de humedad detectado en los data-logger del interior corresponde a un aporte motivado por la entrada de aire húmedo del exterior y en qué momentos se debe a la evaporación de los muros. En un análisis pormenorizado, estudiando semanas representativas de cada mes, se analiza la diferencia entre el aporte del exterior y el de los muros.

6.1.2.c ANÁLISIS POR ESTACIONES: VERANO 2017

Durante los meses de verano, mientras la iglesia permanece abierta al público (Tabla 29), las puertas norte y sur están abiertas de manera continuada, lo que genera una corriente de aire a modo de ventilación natural. Las fluctuaciones más pronunciadas de temperatura y de humedad en el interior de la iglesia se deben al intercambio advectivo¹ a través de puertas y ventanas, motivados por el viento. Se evidencia en que los picos de mayor intercambio de calor y humedad con el exterior se producen coincidiendo con los horarios de apertura de la iglesia (Gráfica 98 y Gráfica 99)

Tabla 29. El horario de verano (1 de abril al 30 septiembre)

	L	M	X	J	V	S	D
Mañana	*	*	10:00-14:00	10:00-14:00	10:00-14:00	10:00-14:00	10:00-14:00
Tarde	*	*	16:00-20:00	16:00-20:00	16:00-20:00	16:00-20:00	*

*permanece cerrada la iglesia

Gráfica 98. Evolución de la temperatura (T) entre los días 10 y 16 del mes de junio de 2017. En la misma gráfica se ha representado la pluviometría. Iglesia de Santiago de Peñalba.

¹ La advección es un proceso generalmente asociado a la meteorología, que indica el proceso de transporte de una propiedad atmosférica, en este caso calor y humedad, por efecto del viento.

Gráfica 99. Evolución del grado de humedad (W) entre los días 10 y 16 del mes de junio de 2017. En la misma gráfica se ha representado la pluviometría. Iglesia de Santiago de Peñalba.

El comportamiento general del edificio en verano, en relación con los horarios de uso es el siguiente:

Con la apertura de puertas, a las 10:00 y las 16:00 horas, aumenta la temperatura y el grado de humedad en el interior. Cuando se cierran las puertas, a las 14:00 y las 20:00 horas, el grado de humedad desciende (Gráfica 100 y Gráfica 101).

Gráfica 100. Evolución de la temperatura (T) de la Iglesia de Santiago de Peñalba durante el día 10/06/2017.

Gráfica 101. Evolución del grado de humedad (W) de la Iglesia de Santiago de Peñalba durante el día 10/06/2017.

Los días en que la iglesia permanece cerrada, por ejemplo, el lunes 12 de junio, se ve que el aumento de temperatura y grado de humedad en el interior se debe solo al intercambio de calor a través de los muros, por lo que el aumento es menos pronunciado (Gráfica 102 y Gráfica 103). Dado el espesor de los muros, el ambiente interior es muy estable.

Gráfica 102. Evolución de la temperatura (T) de la Iglesia de Santiago de Peñalba durante el día 12/06/2017.

Gráfica 103. Evolución del grado de humedad (W) de la Iglesia de Santiago de Peñalba durante el día 12/06/2017.

En verano, entre los meses de junio y agosto se produce una inflexión en la temperatura y el grado de humedad. Esto se debe a una masa de aire frío que entra en la región a finales de agosto, marcando notablemente el comportamiento atmosférico. Los chubascos y tormentas se concentran entre los días 26 y 30 de agosto². Esto provoca que el edificio pase de ganar temperatura a empezar a perderla a partir de estos días (Gráfica 88 y Gráfica 89).

En líneas generales, el W_{int} es similar en ambos meses, con una diferencia mínima de $W_{int} = 0,4 \text{ g/kg}$ entre ambos meses. En el exterior, la variación es de $W_{ext} = 1,75 \text{ g/kg}$ entre junio y agosto (Gráfica 90). En el mes de junio hace más calor en el exterior $T_{ext} = 23,06^\circ\text{C}$ que en el mes de agosto $T_{ext} = 16,48^\circ\text{C}$. También el grado de humedad es mayor en el mes de junio $W_{med.int} = 10,05 \text{ g/kg}$ que en agosto $W_{med.int} = 9,65 \text{ g/kg}$, con una diferencia en el interior de $W_{int} = 0,4 \text{ g/kg}$ y una diferencia en el exterior $W_{ext} = 1,75 \text{ g/kg}$ entre ambos meses. La temperatura en el interior se mantiene constante $T_{med.int} = 19,80^\circ\text{C}$.

El mes de junio de esta región se describe como “extremadamente cálido” según la Agencia Estatal de Meteorología, registrándose records históricos en algunas zonas de las Comunidades de Castilla y León. Según los registros de los data-loggers, entre los meses de junio y julio se registran los valores más altos de T_{int} . El registro más frío se produce en los dos últimos días del mes, por debajo de lo normal. El resto del mes ha tenido períodos de temperaturas por encima de los 30°C durante más de 16 días.

El mes de julio ha sido más cálido de lo normal, a pesar de comenzar con valores por debajo de lo habitual, con un promedio de 13°C . Este descenso se aprecia a finales de junio y principios de julio en la gráfica 12 apartado 6.1.1. El número de precipitaciones

² Datos atmosféricos descritos en el informe mensual de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET).

está por debajo del promedio de otros años. En el mes de julio solo se ha registrado un día de lluvia aislada, menor de 5mm.

6.1.2.d ANÁLISIS POR ESTACIONES: OTOÑO 2017

Avanzando hacia las estaciones frías, las características meteorológicas cambian, descendiendo la temperatura exterior y, por consiguiente, la del interior. En otoño, la temperatura interior tiende a mantenerse más alta que la del exterior. En esta época del año, al producirse un contraste térmico mayor del que había en verano entre el interior y el exterior, los intercambios de aire por ventilación natural tienden a ser más efectivos. Adelantando lo que se explica en el apartado siguiente, cuando se calcula la evaporación, se verá en la gráfica 140, apartado 6.1.3 que existen incluso días más favorables a la disipación de la humedad en el mes de octubre que en el mes de agosto y septiembre.

El mes de octubre, es muy seco, con escasas precipitaciones registradas (Gráfica 13, apartado 6.1.1). Esto significaría, que, el terreno deja de acumular agua de lluvia, por lo que, en días cálidos, la evaporación del ambiente exterior no tendría un aporte de humedad tan importante como en los días de primavera, lo que supone un aire más seco, que deja ventilar adecuadamente la humedad del interior (Gráfica 104).

Gráfica 104. Evolución del grado de humedad (W) desde el 13 de octubre de 2017 al 19 de octubre de 2017.

La temperatura mínima ha descendido, pero la máxima se mantiene bastante alta la primera quincena del mes. Esta situación se prolonga a lo largo del mes, siendo las mínimas más bajas y las máximas teniendo un descenso menos acusado (Gráfica 12,

apartado 6.1.1). En el interior, la temperatura ha descendido respecto a los meses de junio y julio. Por otro lado, en octubre, la temperatura T_{int} y el grado de humedad W_{int} en el interior es más alto que en el mes de septiembre. Esto se debe a la influencia del clima exterior. Mientras que en el mes de septiembre las máximas han descendido respecto a los meses anteriores, en el mes de octubre vuelven a subir. Esto se traduce en un clima diurno cálido para la época del año, aunque las noches sean más frías. Esta temperatura que aún se mantiene cálida durante el día, junto con unos meses de otoño secos, pueden facilitar la evaporación de los muros. Esto corrobora lo comentado por Camuffo (Camuffo, Sturaro et al. 1999). Esto se analiza en el apartado 6.1.3 de este mismo capítulo. Del otoño, parece que el mes más favorable es el de octubre.

Según afirma Camuffo en el artículo antes mencionado, al producirse una ventilación con mayor efecto sobre el interior del edificio, el aire frío drena el interior, por lo que la estratificación vertical de la temperatura se reduce, con respecto a los meses de verano. En este caso, sin embargo, la estratificación de la temperatura en altura parece ser más notable en octubre que, por ejemplo, en junio o mayo (Gráfica 105). En este edificio en particular, podría deberse a dos posibilidades, que pueden darse combinadas. Por un lado, se trata de un edificio muy esbelto y con escasos para ventilar en la parte más alta. Por otro lado, es posible que, en al acercarse los meses más fríos, el tiempo en que las puertas de la iglesia permanecen abiertas de manera continuada se reduzca. Hay que comprobar si se debe a alguna de las dos posibilidades, por medio de un cálculo pormenorizado (apartado 6.1.3).

Gráfica 105. Evolución de la temperatura (T) en la semana del 13 de octubre de 2017 al 19 de octubre de 2017.

6.1.2.e ANÁLISIS POR ESTACIONES: INVIERNO 2017-2018

La tendencia general es que el interior está más frío que el exterior. Con el descenso de la temperatura media exterior, el edificio ha ido perdiendo temperatura. Mientras que el exterior, con las horas de luz aumenta su temperatura, el interior, no es capaz de calentarse con tan poca temperatura y horas cálidas, por lo que está más frío. El descenso de la temperatura en el interior en las capas altas del edificio viene inducido por la pérdida de radiación, que no calienta la cubierta. Esto se nota en que, a partir del mes de noviembre, la estratificación de la temperatura de los puntos en altura se reduce.

Tabla 30. El horario de invierno (1 de octubre al 31 de marzo)

	L	M	X	J	V	S	D
Mañana	*	*	10:00-14:00	10:00-14:00	10:00-14:00	10:00-14:00	10:00-14:00
Tarde	*	*	15:00-17:50	15:00-17:50	15:00-17:50	15:00-17:50	*

*permanece cerrada la iglesia

Si nos fijamos en el mes de noviembre, el edificio ha acumulado calor durante la primavera y el verano (Gráfica 88). Esto se evidencia en que, a pesar de que la $T_{med.Ext}$ es más baja en un mes de invierno como noviembre, la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior ($\Delta T_{int-ext}$) es más alta en noviembre que en junio. Esto se debe a la inercia térmica (Tabla 28).

Al igual que la temperatura, el grado de humedad, tanto interior como exterior ha ido disminuyendo, sin embargo, la diferencia entre el interior y el exterior ha aumentado. La iglesia ha pasado de tener $\Delta W_{int-ext}=0,64$ g/kg en el mes de junio, a tener $\Delta W_{int-ext}=1,43$ g/kg en el mes de noviembre. Esto significa que hay mayor porcentaje de humedad en el interior. Es posible que esto se deba a la peor ventilación del edificio en invierno, en parte porque hay menos visitas y se abre menos. Esto se puede ver en las gráficas de temperatura y humedad de los meses fríos, que se producen menos fluctuaciones de T_{int} y W_{int} a lo largo del día. Aunque el horario de verano e invierno es prácticamente el mismo, las horas en que las puertas están abiertas en invierno son menos. Esto se debe a la costumbre de mantener cerrado en los días fríos, para evitar las corrientes de aire frío, la lluvia y la humedad.

Esto indica que se está produciendo un aumento de vapor de agua en el ambiente interior del edificio. A pesar de estar enfriándose al pasar de junio a noviembre, y a pesar de estar disminuyendo el grado de humedad en el exterior, la iglesia no solo retiene calor, sino que además acumula humedad.

Esto podría suponer que se están produciendo dos cosas:

- El edificio está evaporando* porque ha acumulado calor durante los meses cálidos, lo que explica el aumento del grado de humedad.

- b) *El edificio no está evaporando*, sino que existan zonas en las que se está produciendo una “bolsa de vapor” debida a la falta de ventilación, o al aporte de humedad que proviene del ambiente exterior.

En este caso, parece que existen algunos puntos (DTL2, DTL1 y DT17) que están condensando, o cercanos a la condensación, si se observa la Gráfica 91. El resto de puntos tienen un grado de humedad parecido al del ambiente (DT5 y DT10, son puntos de ambiente). Esto significa que, los puntos se encuentran igualados al ambiente interior, por lo que, en términos generales no se aprecia una producción de vapor destacada. La excepción son puntos como DT13. Este punto se encuentra en el muro norte, a 0 metros de altura, en el encuentro del muro con el suelo. Este presenta algunos valores más altos de W en el gráfico 4, por encima de la media del ambiente. En la gráfica 2, además, se ve más claramente que este punto tiene un grado de humedad mayor que el de la media. El punto DT6, tiene un W similar a DT13, con valores superiores a los de la media. Este punto también se encuentra a 0 metros en el muro norte, en el encuentro del muro con el suelo. Parece que la evaporación de los muros podría concentrarse a nivel del suelo, ya que todos los puntos que presentan un grado de humedad elevado están a 0m en las zonas de suelo-pared. Los puntos que se encuentran a 1m de altura presentan valores normales, similares a los del ambiente general del edificio. Esto indica que, a la altura de 1 metro, es posible que no llegue la absorción del agua. Como se verá en el apartado 6.1.3, gráfica133, esta hipótesis se confirma con el cálculo del ascenso capilar en los muros de la iglesia.

Durante la temporada fría, las variaciones en el interior del edificio son más pequeñas en comparación con el resto del año. En primavera y verano se observaban claros gradientes de temperatura y humedad entre las capas altas y las bajas de la iglesia (Gráfica 95 y Gráfica 96). En invierno, estos gradientes son menores, tal como se explicaba en la Tabla 28. Por ejemplo, el grado de humedad en noviembre en los diferentes puntos ha perdido la estratificación (Gráfica 106). Del día 1 al 4 de noviembre, el grado de humedad en el DT10, situado en ambiente a 1 metro de altura, es mayor que el grado de humedad de DT5, situado en ambiente a 6 metros de altura, al contrario de lo que sucede en los meses de primavera y verano.

Gráfica 106. Evolución del grado de humedad (W) entre los días 1 y 7 del mes de noviembre de 2017. En la misma gráfica se ha representado la pluviometría. Las líneas de 1 a 10 son puntos monitorizados en el interior del edificio, la línea 13 representa el punto monitorizado en el exterior.

La estratificación de la temperatura (Gráfica 107) en altura aún se mantiene, aunque la diferencia de temperatura entre los distintos puntos es mucho menor que en verano. Como se ha explicado antes, el edificio tiene gran inercia térmica y los cambios en la temperatura son más lentos que en grado de humedad, motivado por la influencia de los muros. Según avanza el invierno, el gradiente en temperatura y humedad en altura es cada vez es menor. Por ejemplo, en febrero, la temperatura en el interior ha descendido más de 8°C con respecto a noviembre. El grado de humedad también ha descendido $0,40\text{ g/kg}$.

Gráfica 107. Evolución de la temperatura (T) entre los días 1 y 7 del mes de noviembre de 2017. En la misma gráfica se ha representado la pluviometría. Las líneas de 1 a 10 son puntos monitorizados en el interior del edificio, la línea 13 representa el punto monitorizado en el exterior.

6.1.2.f ANÁLISIS POR ESTACIONES: PRIMAVERA 2018

En los meses de marzo y abril se observaba cómo comenzaba de nuevo a aumentar la temperatura interior del edificio, en todos sus puntos (Gráfica 88 y Gráfica 89). También aumenta paulatinamente el grado de humedad. Abril de 2018 se presenta ya como un mes cálido, alcanzando temperaturas en el exterior como las que se han medido en mayo de 2017. En el mes de marzo y abril, además, se han registrado numerosas lluvias (Gráfica 11, apartado 6.1.1). Las precipitaciones, junto con el aumento de la temperatura, pueden producir un aumento del grado de humedad exterior, y, por tanto, en el interior. Si tenemos en cuenta que, a principios de la primavera, con el aumento de la temperatura, el agua acumulada por el terreno, después del deshielo comienza a evaporar, es posible que se observe un aumento considerable del grado de humedad exterior en los siguientes meses.

6.1.2.g CONCLUSIONES AL ANÁLISIS ESTACIONAL

Del estudio estacional realizado, se deducen las siguientes tendencias de comportamiento ambiental del edificio:

- Se confirma la influencia de las fluctuaciones del clima exterior sobre el interior.
- Las fluctuaciones higrotérmicas más importantes se producen entre primavera y verano y vienen motivadas por el intercambio advectivo interior-exterior.
- El edificio tiene gran inercia térmica e hídrica, que se hace especialmente notable cuando el exterior empieza a enfriarse hacia otoño e invierno.
- Los puntos con un comportamiento anómalo, que pueden señalar focos de evaporación, se han localizado a 0 metros de altura en suelo-pared.
- Existe un gradiente de temperatura y humedad que disminuye en los meses de invierno.
- El edificio acumula calor durante la primavera y hasta finales de julio o principios de agosto. A partir del mes de agosto, el edificio pierde lentamente la temperatura. Esto influye en la capacidad de evaporación de los muros, que tienen mayor dificultad para evaporar.

De todas estas tendencias, deben estudiarse de manera más pormenorizada los siguientes parámetros:

- **Debe estudiarse la relación de la ventilación con la capacidad de evaporación del edificio.** El movimiento del aire en el interior es uno de los principales parámetros que influyen en la capacidad de evaporación (D'Agostino 2013), y en este edificio se evidencia la influencia de la ventilación natural sobre los cambios en temperatura y humedad.

- **Cómo evaporan los focos localizados en relación con el ambiente interior.** Dado que se han localizado una serie de focos con un grado de humedad por encima de la media—especialmente en el encuentro del suelo con el muro- debe estudiarse qué condiciones son favorables para la evaporación y la relación con la capacidad evaporativa del edificio.
- **Debe estudiarse el gradiente higrotérmico.** Dado que se produce un gradiente de temperatura y humedad, debe estudiarse si: el vapor de agua se acumula en las capas altas, o si el edificio es capaz de mover el vapor de agua y renovar por completo el aire.

6.1.2.h ANÁLISIS DE LAS TENDENCIAS DIARIAS

Introducción

El objetivo de este apartado es identificar las fluctuaciones de temperatura y humedad que se producen en el interior de la iglesia, en relación con las variaciones diarias del clima exterior.

Existen una serie de tendencias generales que se repiten todos los días y que están en relación con dos factores³:

- Las variaciones diurnas y nocturnas de la temperatura y humedad exterior, que influyen sobre el edificio.
- Los horarios de apertura y cierre de la iglesia, que influyen en el intercambio entre el clima exterior y el ambiente interior.

Ambos factores se combinan para dar como resultado el comportamiento diario del ambiente interior del edificio.

En este capítulo se desarrolla especialmente aquellos meses más cálidos, entre la primavera y el verano. Tal como se exponía en el apartado anterior, las interacciones en la época cálida son más importantes que durante el invierno.

Influencia del clima exterior:

Durante los meses cálidos, se ve cómo la relación entre la temperatura y el grado de humedad exterior influyen sobre el ambiente interior (Gráfica 108 y Gráfica 109). Con la salida del sol aumenta la temperatura, se empieza a notar un ascenso acusado en los registros del exterior a las 8:00 horas. La temperatura (T_{ext}) empieza a subir, por lo que

³ Algunos autores señalan la influencia de la iluminación sobre el calentamiento del ambiente interior (Camuffo, 1983)(Camuffo 2014). Así como en otros edificios monitorizados se ha podido notar esto, en este caso particular, no se ha notado una influencia destacable de la luminaria sobre el ambiente interior del edificio, pero sí del régimen de apertura de puertas coincidiendo con los horarios de visita de la iglesia.

también aumenta el grado de humedad (W_{ext}). Esto se manifiesta en el interior. Con la caída del sol empieza a descender la temperatura exterior. Esto se empieza a notar en los registros sobre las 20:00 horas.

Tomando como ejemplo una semana del mes de junio, se observa en la Gráfica 108 cómo el grado de humedad interior (W_{int}) sigue, en todos los puntos monitorizados (DT 1 a DT10 en el interior⁴), la tendencia de la curva del exterior, en azul claro (Exterior). Las fluctuaciones del grado de humedad en el interior se producen con un poco de retardo respecto al exterior. La temperatura interior también se comporta siguiendo la tendencia del exterior (Gráfica 109).

Gráfica 108. Evolución del grado de humedad (W) entre los días 10 y 16 del mes de junio de 2017. En la misma gráfica se ha representado la pluviometría. Las líneas de 1 a 10 son puntos monitorizados en el interior del edificio, la línea 13 representa el punto monitorizado en el exterior.

⁴ La ubicación de cada uno de los puntos en el edificio se detalla en los planos de planta y sección del apartado 6.1.1.

Gráfica 109. Evolución de la temperatura (T) entre los días 10 y 16 del mes de junio de 2017. En la misma gráfica se ha representado la pluviometría. Las líneas de 1 a 10 son puntos monitorizados en el interior del edificio, la línea 13 representa el punto monitorizado en el exterior.

En contraste con lo que sucede en junio, en los meses fríos se reduce la estratificación de los valores de humedad y temperatura en los puntos medidos en el interior de la iglesia. El descenso de la radiación solar (R_s) de los meses de invierno, reduce el calentamiento de la cubierta, que transmitía calor al interior (Gráfica 14, apartado 6.1.1). La temperatura de las capas altas desciende. Esto corresponde con lo que también observaba Camuffo en Santa María Maggiore, en Roma (Camuffo, Sturaro et al. 1999). El efecto de inercia térmica del edificio, que se comentaba en el capítulo anterior, hace que este fenómeno de pérdida de temperatura se produzca de manera lenta. En el mes de noviembre, las diferencias entre la temperatura de los puntos que se encuentran, por ejemplo, a 6 metros (DT1) y los que se encuentran a 1 metro (DT4) es de 1°C (Gráfica 107), pero aún se encuentra el aire estratificado. Sin embargo, en el mes de febrero, cuando ha pasado un tiempo y el edificio ha podido enfriarse, esta estratificación no se mantiene de manera constante, habiendo días en los que puntos ubicados a 1 metro, como DT9, superan en temperatura a puntos ubicados a 6 metros, como DT1. También puntos ubicados a 0 metros, como DT6, tiene más temperatura que DT4, que se encuentra a 3 metros (Gráfica 110).

Gráfica 110. Evolución de la temperatura (T) entre los días 13 y 19 del mes de febrero de 2017. En la misma gráfica se ha representado la pluvimetría. Las líneas de 1 a 10 son puntos monitorizados en el interior del edificio, la línea 13 representa el punto monitorizado en el exterior.

En el caso del grado de humedad, la estratificación que se veía con claridad en el mes de junio (Gráfica 108) no se produce con tanta intensidad en noviembre (Gráfica 106). Por ejemplo, el punto medido en ambiente DT10, a 1 metro de altura supera, en grado de humedad, desde el día 1 al 5, al punto DT5 a 6 metros de altura. Por otro lado, puntos medidos en pared, como DT3, a 3 metros, tienen casi todos los días menor grado de humedad que puntos que se encuentran más bajos. En cualquier caso, en este edificio se aprecia durante todo el año una tendencia a encontrarse el aire estratificado, esto se debe a la morfología del edificio, ya que se trata de un edificio muy esbelto, que no tiene ventanas en la parte más alta, por lo que se produce una bolsa de aire húmedo que se mantiene en las capas más altas, y que presenta dificultad para moverse. Esto se analiza detenidamente en el apartado “Gradiente higrotérmico”, y se ve con claridad en las Gráfica 125, Gráfica 126 y Gráfica 129 cuando se explica cómo se ventila el edificio y la influencia de esta ventilación sobre el movimiento higrotérmico.

Gráfica 111. Evolución del grado de humedad (W) entre los días 13 y 19 del mes de febrero de 2017. En la misma gráfica se ha representado la pluviometría. Las líneas de 1 a 10 son puntos monitorizados en el interior del edificio, la línea 13 representa el punto monitorizado en el exterior.

Como conclusión a este apartado se desprenden dos puntos fundamentales:

1. Las variaciones entre el día y la noche se notan en el interior de la iglesia, especialmente en los meses cálidos.
2. La estratificación de temperatura y humedad en las capas de aire en el interior se reduce durante el invierno, aunque el proceso es lento, porque el edificio guarda calor de los meses cálidos.

Influencia de los horarios de apertura de la iglesia:

a) Días en que la iglesia está abierta:

De miércoles a sábado la iglesia abre mañana y tarde (Tabla 29 y Tabla 30). Durante las horas en que la iglesia está abierta al público, las puertas del muro norte y sur permanecen abiertas, por lo que se produce una corriente de ventilación cruzada continua que se ve reflejada en los registros de los data-loggers.

El día 10 de junio es sábado, se puede ver cómo con el aumento de la temperatura exterior, al abrir la iglesia a las 10:00 de la mañana, la temperatura en el interior también aumenta (Gráfica 112). Este día, en que la iglesia cierra a las 14:00 horas y abre por la tarde a las 16:00 horas de nuevo, volviendo a aumentar la temperatura. Esto mismo se nota en el aumento del grado de humedad en el interior (Gráfica 113).

Gráfica 112. Evolución de la temperatura (T) a lo largo del día 10 de junio de 2017.

Gráfica 113. Evolución del grado de humedad (W) a lo largo del día 10 de junio de 2017.

La apertura de puertas produce variación higrotérmica, en este caso, aumentan la temperatura y el grado de humedad. Esto se debe a que, el aire que entra del exterior está más caliente y más húmedo que el del interior (Gráfica 114). No es así al principio, sobre las 10:00 de la mañana se nota un pequeño descenso del grado de humedad interior que dura algo más de una hora (Gráfica 113). En ese momento, el aire exterior estaba más frío y menos húmedo, por lo que induce una bajada del W_{int} . Pero, a partir de las 12:00h esta situación cambia y el W_{int} comienza a subir en todos los puntos.

Gráfica 114. Ábaco psicrométrico en el que se muestran mediciones realizadas por los data-loggers el día 10 de junio de 2017 entre las 09:00 y las 14:00 horas. El punto DT2 se encuentra sobre pared, a 4,5m de altura, punto DT5 en ambiente a 6m de altura, punto DT10 en ambiente a 1m de altura.

Por tanto, este día, el aire que entra del exterior hace que el W_{int} aumente. Un día favorable a la disipación de la humedad interior sería, aquel en que la ventilación conduzca a una reducción del grado de humedad. Esto sucede cuando el aire del exterior está más frío y menos húmedo durante suficientes horas como para rebajar las condiciones del interior.

En el caso de Peñalba de Santiago, esta situación se alcanza en meses como septiembre. Este mes aún no es muy frío, como los de invierno. Aún existen días en los que se registran 20°C. Además, la iglesia ha acumulado calor durante los meses de verano, por lo que la T_{int} está aún alta, en contraste una temperatura exterior algo más fría que en verano (Gráfica 115). El grado de humedad (Gráfica 116), al no calentarse tanto el terreno y con el descenso de la radiación solar (Gráfica 14, apartado 6.1.1), es más bajo que en verano, lo que hace que el aire esté más seco. Esta situación es favorable para una mejor ventilación, lo que ayuda a la disipación del vapor y a una evaporación “efectiva” de los muros⁵.

⁵ Se ha nombrado como “evaporación efectiva” a aquella situación en la que, tanto los muros que están evaporando más de lo que absorben por succión capilar, como el ambiente que los rodea, están en unas condiciones higrotérmicas favorables para que se produzca evaporación (por parte de los muros) y una disipación de la humedad evaporada (por parte del ambiente interior) al exterior, produciendo una situación en la que los muros podrían estar secando. Esto se explica detalladamente en el apartado 6.1.3.

Gráfica 115. Evolución del grado de humedad (W) entre los días 13 y 19 del mes de septiembre de 2017. En la misma gráfica se ha representado la pluviosidad. Las líneas de 1 a 10 son puntos monitorizados en el interior del edificio, la línea 13 representa el punto monitorizado en el exterior.

Gráfica 116. Evolución de la temperatura (T) entre los días 13 y 19 del mes de septiembre de 2017. En la misma gráfica se ha representado la pluviosidad. Las líneas de 1 a 10 son puntos monitorizados en el interior del edificio, la línea 13 representa el punto monitorizado en el exterior.

Si se observa, por ejemplo, el día 15 de septiembre, al abrir la puerta a las 10:00, se produce el descenso de W_{int} y de T_{int} . Este descenso se mantiene hasta que se cierra la puerta a mediodía. El fenómeno se repite por la tarde, al volver a abrir. Ese día, puntos como el DT1, a 6m, pierde 2g/kg entre la mañana y la tarde, gracias a estas horas de renovación de aire (Gráfica 117 y Gráfica 118).

Gráfica 117. Evolución del grado de humedad (T) el día 15 de septiembre de 2017. Iglesia de Santiago de Peñalba.

Gráfica 118. Evolución del grado de humedad (W) el día 15 de septiembre de 2017. Iglesia de Santiago de Peñalba.

b) Días en que la iglesia está cerrada:

Al contrario de lo que sucede el día 10, los días 12 y 13, no se producen variaciones en los registros del interior, viendo una gráfica “plana”. Esto es porque la iglesia permanece cerrada estos dos días –que corresponden con lunes y martes-⁶. La temperatura permanece constante en todos los puntos del interior, aumentando a penas unas décimas (Gráfica 119). La gráfica de grado de humedad en el interior aumenta de

⁶ El horario completo de apertura y cierre de la iglesia se recoge en las Tabla 29 y Tabla 30.

manera progresiva acompañando al W_{ext} , pero sin producirse los mismos aumentos de 1,5 g/kg como los que se dan los días en que el edificio está abierto (Gráfica 120).

Gráfica 119. Evolución de la temperatura (T) el día 12 de junio de 2017. Iglesia de Santiago de Peñalba.

Gráfica 120. Evolución del grado de humedad (W) el día 12 de junio de 2017.

Los días en que la iglesia está abierta se puede ver en los registros del interior cómo se produce la mezcla del aire de los dos ambientes. Mientras la iglesia permanece cerrada, el movimiento de aire que se produce en el interior es muy pequeño, existiendo únicamente un volumen de renovaciones motivado por las infiltraciones – aproximadamente 1,3 renov/día- por pequeñas rejillas en puertas y ventanas. La influencia de las infiltraciones apenas se ve reflejada en los registros de los data-loggers.

El día 11 de junio, domingo, la iglesia abre solo por la mañana, de 10:00 a 14:00h, por lo que se trata de un día en que la iglesia puede ventilar hasta mediodía. Durante toda la mañana, el grado de humedad exterior (Exterior) es más alto que el del interior (Gráfica 123), por lo que el edificio tiene dificultad para evaporar. Al contrario de lo que sucede en días favorables, como el 10 de junio, en los que al abrir la puerta descende el W_{int} , este día, al abrir se produce un aumento instantáneo del W en todos los puntos. Este aumento se interrumpe en el momento en que se cierran las puertas de la iglesia a mediodía (Gráfica 123). Al cierre del edificio, este tiene mayor grado de humedad, que antes de las 10:00h.

Gráfica 121. Ábaco psicrométrico en el que se muestran mediciones realizadas por los data-loggers el día 11 de junio de 2017 entre las 10:00 y las 14:00 horas. El punto DT2 se encuentra sobre pared, a 4,5m de altura, punto DT5 en ambiente a 6m de altura, punto DT10 en ambiente a 1m de altura.

Gráfica 122. Evolución de la temperatura (T) el día 11 de junio de 2017. Iglesia de Santiago de Peñalba.

Gráfica 123. Evolución del grado de humedad (W) el día 11 de junio de 2017. Iglesia de Santiago de Peñalba.

Del análisis de este apartado se desprenden dos conclusiones:

1. El régimen de apertura y cierre de la iglesia influye notablemente sobre el ambiente interior. El aire que entra del exterior en los momentos en que se abre la puerta modifica en menos de una hora la temperatura y el grado de humedad del interior.
2. Esta variación, que produce la ventilación natural, puede ser o no favorable para el ambiente interior. Dependiendo de las condiciones climáticas del exterior,

puede ayudar a rebajar el grado de humedad del interior, o aumentar la cantidad de vapor de agua en el ambiente⁷.

Gradiente higrotérmico:

Otro de los puntos de las conclusiones del análisis estacional era la necesidad de estudiar el gradiente higrotérmico del edificio. El objetivo es comprobar si se produce una acumulación del vapor de agua en las capas altas de la iglesia, por deficiencia en la ventilación.

Durante los meses cálidos, cómo el aire está estratificado de manera que: a mayor altura, mayor temperatura y grado de humedad (Gráfica 108 y Gráfica 109). Como se explicaba antes, esta situación se prolonga durante toda la época cálida y parte del invierno.

Para entender cómo y porqué se produce esta estratificación es necesario estudiar qué sucede cuando entra el aire en el edificio, si el movimiento de aire inducido por la ventilación se registra en la monitorización para identificar la capacidad del aire del exterior de modificar las características higrotérmicas del interior y producir la mezcla. Para ello, se analizan días en los que el edificio está abierto, pudiendo mezclar el aire interior y exterior, y días en los que el edificio está cerrado, para analizar la diferencia que se produce entre ambas situaciones.

Poniendo como ejemplo de nuevo el día 10 de junio, se puede ver cómo durante las horas nocturnas, el aire no se mueve, por lo que las gráficas de temperatura y grado de humedad dibujan un aire que se mantiene constante y estratificado (Gráfica 112 y Gráfica 113). A las 10:00 horas, cuando se abre el edificio, el aire de todos los puntos se mezcla. Los data-loggers DT1, DT2, DT5 y DT7 son los que tienen mayor grado de humedad. Éstos se encuentran a una altura a partir de 4,5m (secciones AA' y BB', figuras 84 y 85, apartado 6.1.1). A las 10:00 de la mañana desciende el grado de humedad de estos puntos hasta igualarse con los data-loggers DT4, DT10 y DT9 que se encuentran a 1 o 2m de altura. Esto indica que se produce la mezcla del aire haciendo que descienda la concentración de humedad que se encuentra en las cotas más altas.

⁷ No entendiendo rebajar el grado de humedad interior como algo bueno y aumentarlo como malo. Las condiciones higrotérmicas ideales en el interior dependerán de muchas variables. En el caso de este tipo de edificios, con valores patrimoniales, el control de la ventilación natural, puede ayudar a la conservación de pinturas murales, esculturas, mobiliario etc (La Gennusa, Rizzo et al. 2005).

Gráfica 124. Evolución del grado de humedad en los puntos del 1 al 12 en el interior, en relación con el exterior (13 Exterior) el día 10 de junio, entre las 09:00 y las 14:00 horas.

Por la mañana, a la hora en que se abre el edificio, el ambiente exterior es propicio para la correcta ventilación y evaporación. Tal como se puede ver en el psicrométrico, en este momento, el aire exterior está más frío y menos húmedo que el del interior (Gráfica 114). Teniendo en cuenta la diferencia de presiones que se genera con la apertura de las puertas de la iglesia, el aire frío del exterior entra en la iglesia, mezclándose con las capas de aire bajas y calentándose, por lo que asciende a las capas altas, moviendo el aire “estancado” arriba provocando la mezcla. Se trata de un efecto muy puntual, que se nota al abrir las ventanas, pero que desaparece enseguida. A partir de las 12:00 horas, se puede ver cómo el aire vuelve de nuevo a estratificarse por alturas (Gráfica 113). Por tanto, la situación que se ve en la gráfica es la favorable para la evaporación, al producirse renovaciones de aire que introducen aire seco en el edificio, pero el efecto se prolonga durante poco tiempo. Como ya se ha sugerido en el capítulo anterior, esto puede deberse a la morfología de la iglesia y del entorno. Las puertas por las que entra la mayor parte del aire –por las ventanas, tal como se ha medido con anemómetro, el caudal de aire es muy pequeño- se encuentran a los pies de la iglesia (Figura 83, apartado 6.1.1), y suponen un porcentaje muy pequeño del área de la envolvente. Por lo que el caudal es muy pequeño, comparado con el volumen total de aire de la iglesia. Si además tenemos en cuenta que se trata de una iglesia muy esbelta (Figura 81, apartado 6.1.1), es difícil que el aire llegue a moverse por las partes altas de las bóvedas

En la Gráfica 125 se comprueba que el aire en las capas más altas monitorizadas tiene mayor dificultad para moverse. Antes de abrir las puertas a las 09:00h, el perfil⁸ de

⁸ En las gráficas de estratificación en altura, como la Gráfica 125, se ha denominado como “perfil” aquellas líneas verticales que unen puntos medidos a la misma hora, pero en ubicados a diferente altura.

estratificación en altura del grado de humedad (Gráfica 125) se puede dividir en dos zonas. En las capas altas, a partir de los 4,5m de altura, el aire tiene un grado de humedad estable, en torno a los 8,50 g/kg hasta 6m de altura⁹. En las capas bajas, desde los 3m hasta el suelo, el aire tiene un grado de humedad que desciende cuanto más descendemos en altura. En el momento en que se abre la iglesia, a partir de las 10:00h, los puntos de las capas bajas, que tenían menor W , aumentan una media de 1g/kg cada uno, hasta prácticamente igualarse (12:00h) con los puntos a 4,5 y 6m, que, por su parte, solo han ganado 0,50 g/kg. La iglesia sigue ganando grado de humedad durante la mañana, de manera proporcional en todos sus estratos. La línea que dibuja la Gráfica 125 a medio día es prácticamente vertical, indicando que el grado de humedad se iguala en todas las alturas. En el momento en que se cierra (14:00h) desciende el grado de humedad, hasta que se abre por la tarde (16:00h) momento en que volverá a aumentar. Por tanto, durante el día, el aire que entra del exterior motiva el movimiento y la mezcla de todas las capas. La temperatura del aire asciende más en las capas más altas. La temperatura aumenta progresivamente a lo largo del día en todos los puntos monitorizados, pero la estratificación se mantiene durante todo el día, siendo los puntos más altos los que conservan mayor temperatura durante todo el día y los puntos más bajos los que tienen menor temperatura (Gráfica 126). Esto entra dentro de la lógica de un comportamiento normal, en el que el aire más caliente, menos pesado, asciende. Ocurre una excepción en altura 4,5m. Se debería esperar que el aire estuviera más caliente que el punto anterior a 3m, pero como se ve en los perfiles de las 14:00, 18:00 y 20:00h, al contrario de lo esperado, el aire desciende. Esto es posible que ocurra porque existe una ventana en muro norte situada cerca del punto monitorizado a 4,5m. Esta ventana puede estar introduciendo aire frío a esa altura, lo que rebaja la temperatura en ese punto. Esto posiblemente reduce también el grado de humedad que se podría detectar a esa altura.

Ocurre lo contrario durante la noche. Al no existir movimiento de aire, éste se vuelve a estratificar en el interior. A las 00:00 horas se ve en la Gráfica 125 cómo el perfil de W vuelve a ser una línea que se quiebra, representando un grado de humedad mayor en las capas altas y un grado de humedad menor en las capas bajas.

En un análisis general, se extrae que las mayores variaciones de W_{int} se producen en las capas más bajas, que oscilan más de 1,5 g/kg, desde los 7,75g/kg de mínima hasta los 9,40 g/kg de máxima. La menor oscilación de valores se produce en los puntos a mayor altura.

⁹ No se han medido puntos a más de 6 metros de altura. A partir de esa altura el edificio no cuenta con ventanas por las que pueda entrar corriente de aire. Se detecta que el aire de “estanca”, a 4m, por lo que 6m se ha considerado suficiente para hacer una estimación de la variación higrotérmica en altura.

Gráfica 125. Estratificación en altura del grado de humedad en el interior de la iglesia (W_{int}) durante el día 10 de junio de 2017.

Gráfica 126. Estratificación en altura de la temperatura (T_{int}) durante el día 10 de junio de 2017.

Esto mismo se ha podido comprobar mediante el cálculo CFD de Design Builder, pues, como se ve en la gráfica 143 apartado 6.1.3, la velocidad del aire en las capas más altas es 0m/s.

Si comparamos el día 10 de junio, en el que la iglesia permanece abierta, con un el día 13, que ha estado cerrada, se puede ver cómo afecta la falta de ventilación al ambiente interior. Ese día la iglesia se comporta de manera diferente. El día 13, el exterior experimenta un descenso de W_{ext} a partir de las 7:00 de la mañana y la temperatura permanece, durante todo el día más cálida en el exterior que en el interior (Gráfica 127). Al estar T_{int} más frío, el aire tiende a salir, por las rejillas y huecos de las ventanas. Con esto se produce un descenso de grado de humedad se nota en el interior (Gráfica 128 y Gráfica 129). Sin embargo, a una altura de 4,5m parece que el grado de humedad del aire desciende, pero a menor velocidad, como si el edificio retuviera humedad a esa altura, quedando siempre como el punto que tiene mayor W . Esto se ve en la Gráfica 129, como el grado de humedad del punto 2 no desciende con el resto, sino que se mantiene más alto.

Así como en el grado de humedad del día 13 se experimentan cambios por las filtraciones a través de las ventanas y las rejillas, la temperatura en el interior permanece con pocas variaciones (Gráfica 127). Además, la estratificación que se puede observar en un día en el que la iglesia está abierta es mucho menor en este día (Gráfica 130). Como se verá en el apartado 6.1.3.g, las simulaciones CFD confirman que, con el edificio cerrado, la estratificación en altura de la temperatura se reduce, en comparación con un día abierto.

Gráfica 127. Evolución de la temperatura (T) a lo largo del día 13 de junio de 2017 en la Iglesia de Santiago de Peñalba.

Gráfica 128. Evolución del grado de humedad (W) a lo largo del día 13 de junio de 2017 en la Iglesia de Santiago de Peñalba.

Gráfica 129. Estratificación en altura del grado de humedad en el interior de la iglesia (W_{int}) durante el día 13 de junio de 2017.

Gráfica 130. Estratificación en altura de la temperatura en el interior de la iglesia (T_{int}) durante el día 13 de junio de 2017.

La hipótesis que se estima para este día es que el aire del interior se mueve solamente de dos formas. Primero, por la filtración a través de grietas¹⁰, segundo, por las rejillas de las ventanas¹¹. Aunque el total de esta ventilación no es especialmente significativo, es cierto que se ha notado en los registros de los data-loggers cercanos a puertas o ventanas. La explicación del grado de humedad acumulado a 4,5 metros podría ser una combinación de los dos efectos de ventilación mencionados. Por un lado, se produce un flujo de ventilación de grietas en los estratos más bajos, por las puertas, que no llega a mover el aire de las capas más altas. Por otro lado, cerca del data-logger colocado a 4,5m hay una ventana (Figuras 84 y 85, apartado 6.1.1) por la que entra el aire. Al estar caliente (Gráfica 127), este aire tiende a subir, como además está más seco (Gráfica 128) que el del interior es capaz de mezclarse y mover el vapor acumulado en la parte más alta, por ello desciende el W a 6m. Este descenso provoca el aumento de W en las capas por debajo, notándose a 4,5m. Al no existir ventilación natural que pueda remover todo el aire y mezclarlo completamente, se produce la acumulación de vapor de agua a esa altura (Figura 89). Como se verá más adelante, esta hipótesis formulada a raíz de la

¹⁰ Entendiendo por grietas pequeños huecos que quedan, por ejemplo, en las puertas, por la falta de estanqueidad de éstas, al tratarse de carpinterías históricas.

¹¹ Entendiendo por rejillas de las ventanas los huecos que quedan entre las hojas de alabastro que forman la ventana (ver foto en tabla 15)

observación de los datos de monitorización se confirma con la simulación (Gráfica 147, apartado 6.1.3.g).

Figura 89. Hipótesis del movimiento del aire para el día 13 de junio.

El día 12 es similar al 13. El edificio tampoco está abierto, pero a diferencia del día 13, este día el grado de humedad del exterior aumenta, el lugar de disminuir. El efecto que se produce en el interior es un ascenso paulatino del grado de humedad en los diferentes puntos del interior, pero sin producirse mezcla del aire, conservando todos los puntos su estratificación (Gráfica 119 y Gráfica 120). Este mismo efecto ya ha sido observado en otros casos. Por ejemplo Oetelaar et al. afirman que, sin la entrada de aire, la estratificación se vuelve predominante, efecto que confirma por medio de la simulación (Oetelaar, Johnston et al. 2013).

Si el día 12 el edificio estuviera abierto, el W_{ext} elevado no favorecería la disipación de la humedad generada por la evaporación de los muros. Así ocurre el día 11 de junio, domingo (Gráfica 122 y Gráfica 123).

6.1.2.i CONCLUSIONES AL ANÁLISIS DIARIO

Suponiendo un día en el que el edificio esté abierto, se pueden dar dos escenarios:

- **Día favorable a la disipación de la humedad interior.** Se cumple que el grado de humedad del exterior es más bajo que el interior ($W_{ext} < W_{int}$), y la temperatura exterior va en aumento a lo largo del día. Un ejemplo es el día 10 de junio (Gráfica 112, Gráfica 113, Gráfica 114, Gráfica 124, Gráfica 125 y Gráfica 126). Este día, el aire que entra está más seco y más caliente que el del interior, por lo que tiende a entrar y ascender, moviendo el vapor de aire que se pueda haber quedado contenido en las capas altas. Se producirá mezcla del aire, por lo que se puede evacuar el vapor de agua.

Localizando los días que cumplan este patrón, y estudiando cuánto evapora el muro, se puede conocer la capacidad de disipación de vapor de agua que tiene el ambiente del edificio. Este cálculo se explicará en el siguiente apartado 6.1.3.

- **Día no favorable a la ventilación y la disipación de la humedad interior.** Sucede cuando el grado de humedad exterior es más alto que el del interior ($W_{ext} > W_{int}$). El aire que entra estará más húmedo, por tanto, la mezcla no será eficiente ya que el interior gana humedad. Un ejemplo de este día es el 11 de junio (Gráfica 122 y Gráfica 123).
1. En todos los casos, la ventilación natural es el único modo en que el aire interior se mueve, produciendo intercambio con el exterior.
 2. A partir de cierta altura, el aire no se mueve, por lo que existe una bolsa de aire acumulada en las partes altas de las bóvedas.
 3. La ventilación es notable a los pies de la iglesia, donde hay ventilación cruzada por las puertas, pero es menos notable en las zonas más alejadas de la entrada del aire, como la cabecera.
 4. Los días en que el edificio permanece cerrado se detecta el efecto de un flujo de aire menor, pero significativo en algunos puntos, motivado por las infiltraciones a través de grietas en puertas y rejillas de ventana. Un ejemplo es el día 13 de junio (Gráfica 127, Gráfica 128 y Gráfica 129).

6.1.3. CÁLCULO DEL COMPORTAMIENTO EVAPORATIVO

Introducción

En este apartado 6.1.3 dedicado al cálculo del comportamiento evaporativo de la iglesia, se van a realizar tres apartados de cálculo importantes:

Primero, se realiza el **cálculo de la succión-evaporación de los muros**. Para ello, se explica el cálculo de las propiedades de los materiales que intervienen en el proceso (apartado 6.1.3.a). A continuación, se realiza el cálculo de la succión-evaporación de los muros en régimen estacionario, y posteriormente en dinámico (apartado 6.1.3.b).

En segundo lugar, se realiza el **cálculo del comportamiento evaporativo del edificio**. Este es el punto central, en el que se relaciona el aporte de los muros por evaporación calculado en el apartado anterior con la capacidad de ventilación del edificio (apartado 6.1.3.c). Por último, se exponen las conclusiones que se deducen de los cálculos anteriores (apartado 6.1.3.d).

6.1.3.a CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL PARA LA EVAPORACIÓN

Existen dos propiedades importantes para el cálculo de la absorción y evaporación que son: la sortividad y la porosidad. Aunque ya se ha hablado del método de caracterización de los materiales en el capítulo 5, apartado 5.3.2 “Parámetros materiales”, y se contó cómo se realizaron los cálculos para el caso concreto de la Iglesia de Santiago de Peñalba en el capítulo 6, apartado 6.1.1, se retoman estas dos propiedades en este capítulo para discutir las en relación con la evaporación.

a) Sortividad:

La sortividad (S) expresa la tendencia de un material para absorber y transmitir agua y otros líquidos por capilaridad. Este parámetro viene determinado tanto por la conductividad, como por la succión del material (Hall & Hoff, 2002). El significado físico viene determinado por la relación mostrada en la ecuación 18¹.

$$i = St^{1/2} \quad (18)$$

Donde:

i	Cantidad acumulativa de agua absorbida por la superficie expuesta al agua	[g/mm ²]
$t^{1/2}$	es el tiempo transcurrido	[min]

A su vez i puede calcularse como (Reda Taha, et al., 2001):

¹ En el capítulo 4, apartado 4.1 se explica el desarrollo completo del cálculo de la sortividad.

$$i = \frac{\Delta M}{A \rho_{rh}} \quad (1)$$

Donde:

ρ_{rh}	Densidad del agua	
ΔM	Incremento de la masa de agua absorbida	[g]
A	Área expuesta a la absorción de agua	[mm ²]

La sortividad S se puede determinar mediante la parte lineal de la curva de la gráfica i [mm], frente a $\sqrt{t}$ [min]. Se puede determinar por medio de varios métodos de ensayo, tal como se describe en (Hall & Hoff, 2002). El primero de ellos es someter a la muestra a un flujo horizontal, omitiendo los efectos de la gravedad, pero la absorción se ve afectada por las fuerzas hidrostáticas; infiltración donde la absorción se debe en parte a succión capilar y en parte a fuerzas gravitacionales; y el caso de succión capilar donde los efectos de capilaridad y gravitacionales son fuerzas que se oponen. Para la mayoría de los materiales de construcción, las fuerzas debidas a la acción capilar son dominantes sobre el resto de configuraciones, por lo que este último método es el más efectivo para este tipo de casos (Sabir, et al., 1998). Numerosas investigaciones han demostrado que la sortividad es una propiedad, no solo fácil de determinar sino útil para caracterizar la absorción de agua en diferentes materiales como hormigón, morteros y materiales de mampostería como el ladrillo. La sortividad tiene la ventaja sobre otros criterios de absorción de poder describir el rendimiento de absorción de agua en el tiempo crítico del inicio de absorción capilar.

Este ensayo se normalizó en la Norma Americana ASTM C1585-04(11), en la que el término sortividad indica la velocidad de absorción capilar de la probeta (Howland & Martin, 2013). En el caso de la norma española UNE-EN 1925 (1999) viene determinado a través del cálculo del coeficiente de absorción.

b) Porosidad

Para el cálculo de la porosidad abierta (f_0) se siguen las recomendaciones de la norma UNE-EN 1936:2007 y su fórmula de cálculo (Ecuación 78, capítulo 5).

La densidad real (ρ_r) se puede calcular por medio de la ecuación 80, descrita en el capítulo 5.

Con el cálculo de las ecuaciones 78 y 80, se calcula la porosidad total (f), por medio de la ecuación siguiente:

$$f = \frac{\frac{1}{\rho_b} - \frac{1}{\rho_r}}{\frac{1}{\rho_b}} \times 100 = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_r}\right) \times 100 \quad (82)$$

Donde:

ρ_b	Densidad aparente de la muestra	[kg/m ³]
ρ_r	Densidad real de la muestra	[kg/m ³]

c) Cálculo de la sortividad y porosidad de las muestras de material del caso de la Iglesia de Santiago de Peñalba:

Como se ha explicado en el apartado 5.1.1, del capítulo 5 “Metodología”, no se puede obtener un valor fiable de sortividad de las muestras del edificio al no tratarse de probetas regulares. Para el cálculo de la absorción del muro es necesario conocer los valores de sortividad de los materiales que componen el muro. Por tanto, con la intención de dar un valor lo más ajustado posible, se ha trabajado de la siguiente manera:

- Se han recogido los valores de porosidad, densidad, sortividad, etc. obtenidos por los diferentes investigadores, que han trabajado con probetas de material como el que encontramos en la iglesia de Peñalba, o con propiedades similares que se puedan relacionar con este caso. Estos ensayos siguen estrictamente los protocolos de ensayo marcados por las correspondientes normas.
- Estos valores se han correlacionado con aquellas propiedades de las muestras de material que se han podido ensayar en laboratorio de manera fiable, como la densidad y la porosidad.

Los valores más ajustados se han empleado para el cálculo de la absorción del muro. A continuación se desarrolla y discute con detenimiento esta metodología empleada.

d) Ajuste de valores:

Mediante los ensayos EH2 y EH3 se ha determinado el valor de la densidad aparente (ρ_b), porosidad abierta (f_0) y densidad real (ρ_r) de las muestras de piedra y mortero de la iglesia (Tabla 31). Al tratarse de ensayos en los que el cálculo no depende estrictamente de la geometría de la probeta, se pueden determinar estos parámetros con muestras irregulares del edificio (UNE-EN 13755 2008) y (UNE-EN 1936 2007). Los valores obtenidos se comparan con los que ofrecen otros autores.

Tabla 31. Características físicas obtenidas de los ensayos hídricos.

	P02	P06	P07
Densidad aparente (ρ_b) [kg/m ³]	2720,50	1570,31	1354,89
Densidad real (ρ_r) [kg/m ³]	2920	2110	1660
Porosidad abierta (f_0) [%] *	0,25	27,37	26,98

No se ha encontrado documentación en la que se caracterice el mármol empleado en la Iglesia de Santiago de Peñalba. Se han estudiado aquellos valores que más se ajustan a las propiedades físicas de las muestras del edificio gracias a la documentación existente sobre ensayos físicos e hídricos en piedras con comportamiento similar (Alonso, et al., 1987) (Alonso, et al., 1987b) (Navarro, Cruz et al. 2017)

En cuanto al mortero, los valores de sortividad que se han encontrado también son muy variables, dependiendo, como es lógico, de la dosificación del mortero. En (Hall & Kam-Ming Tse, 1986) se ensayan una serie de morteros mezcla de cemento, cal y arena, detallando la sortividad de éstos. Mar Barbero detalla en su tesis valores de densidad aparente de 1914 kg/m^3 (Barbero-Barrera 2011). (Alejandre Sánchez et al.) ofrecen un valor de densidad aparente de entre $1,7\text{-}1,9 \text{ g/cm}^3$ para los morteros de cal ensayados, así como una porosidad abierta que oscila entre 29 y 32% (Alejandre Sanchez, Martin del Rio et al. 2011). Los morteros que ensayan son un total de 9 dosificaciones diferentes, en las que se emplean distintos áridos (arena silíceo, marmolina o arena caliza), así como distintos tipos de cal (cal en polvo o en pasta). La dosificación en peso es la misma en todos los casos. Los resultados obtenidos para los morteros de la iglesia ofrecieron valores algo más bajos.

Es importante tener en cuenta algunas matizaciones sobre los materiales y el sistema constructivo (muro histórico, en este caso). En primer lugar, la estructura interna de la piedra cambia una vez que ha pasado por un proceso de absorción, modificando su distribución de poros. Esto justifica que las muestras de material “sanas”, que no pertenecen al edificio, no se comportarán de la misma manera que las muestras del edificio, tal como demuestran Dejian et al., observando diferentes muestras de material pétreo mediante SEM. (Dejian, Guilian et al. 2011)

En segundo lugar, como ya se explicaba en el capítulo 4 “*Fundamentos teóricos*”, el contenido de agua de la región mojada en los materiales de construcción sometidos a largos períodos de absorción, como sucede en los muros históricos, se puede acercar a la saturación total. La consecuencia de esto es que podemos esperar que los valores de θ_w y S , determinados en pruebas a corto plazo, subestimen los verdaderos valores. Por tanto, puede que θ_w se acerque más a la porosidad abierta f_0 que al valor de la ecuación 30 del capítulo 4 “*Fundamentos teóricos*”; y que la sortividad S puede ser hasta un 50% mayor que el valor estándar (Hall 2007).

Por último, la altura de ascenso capilar aumenta en un factor de aproximadamente siete entre el primer y centésimo año de vida del muro, tal como explicaba ya (Mason 1974). Por tanto, el valor obtenido por medio del cálculo de humedad ascendente con morteros nuevos será una aproximación respecto a la realidad, ya que estos no se encuentran en la situación real en una pared tan antigua.

Aunque se trate de tomar el valor más exacto posible, se trata de unos muros con mucha heterogeneidad de materiales, pues como se ha explicado, cuenta con varias intervenciones de mortero diferentes, y la piedra es irregular. Además, se desconoce el

material de relleno del interior, cabe suponer que se trata de un relleno pobre, como se pudo ver en un mechinaal practicado en el muro en algún y que permanece abierto en la actualidad (Figura 90). Todo ello hace que sea necesario resaltar que el valor de sortividad es una aproximación.

Figura 90. (Izquierda) Mechinales en el muro norte de la Iglesia. (Derecha) Interior del muro visto a través de los mechinales.

Dada esta la gran heterogeneidad del muro, se ha considerado necesario tener en cuenta tanto la sortividad de la piedra como la del mortero. Especialmente teniendo en cuenta que el mortero absorbe más agua que la piedra, por lo que es el elemento determinante en la fluctuación succión- evaporación, tal como se deducía de las gráficas 4, 5 y 6 apartado 6.1.1.

Por tanto, se ha tomado como medida de sortividad para el muro de la iglesia de Santiago de Peñalba el siguiente valor:

$$\text{Sortividad muro} = 50\% \text{ Mortero} + 50\% \text{ Piedra}$$

$$\text{Sortividad muro} = 0,5 \times 0,27 + 0,5 \times 1,24 = 1,50 \text{ mm/min}^{1/2}$$

La toma en consideración del mortero de la iglesia, y no solo de la piedra, es coherente con las observaciones de (Rirsch 2010) en las que se demuestra la influencia del mortero sobre el ascenso capilar. En este trabajo, además, las observaciones experimentales demostraron ser coherentes con los cálculos realizados mediante la teoría de Sharp Front, si se tomaba en cuenta la sortividad del mortero. Como se veía en el capítulo 3 “*Antecedentes y estado de la cuestión*” D’Agostino aplicaba las fórmulas de SF para el cálculo en la Cripta de la Catedral de Lecce, empleando como valor para la sortividad el definido por la piedra caliza de Lecce. En este trabajo no se menciona la influencia de los morteros, aunque sí menciona que se desconoce el material de relleno de los muros (D’Agostino 2013).

Una vez determinado el valor de sortividad y porosidad más adecuado, se realizaron los siguientes cálculos²:

$$i = \theta_w h = S t^{1/2} \quad (31)$$

El volumen de agua por unidad de volumen del material, promediado para la región mojada (θ_w), es una propiedad del material definida en la teoría de difusión capilar basada en las ecuaciones de Buckingham-Richards. Esta cantidad puede obtenerse mediante mediciones directas sobre el muro o a través de la fórmula:

$$\theta_w = 0,85f \quad (30)$$

Según estudios existentes (Hall & Hoff, 2007) existe una relación entre la porosidad (f) y el contenido de humedad del material (θ_w). Existen además trabajos en la literatura científica que han aplicado este cálculo en edificios, obteniendo resultados con buena precisión (Karagiannis, et al., 2017) (D'Agostino, 2013). Tomando estos trabajos como referencia, se realiza el cálculo de θ_w para la iglesia de Peñalba, obteniendo un valor $\theta_w = 7,13$

Con los datos de sortividad (S) y volumen de agua absorbida (θ_w) en este apartado, se realizan en el apartado siguiente los cálculos de absorción y ascenso capilar de los muros de la iglesia. Para ello se han empleado las fórmulas propuestas por Hall y Hoff, explicadas en el capítulo 2, “Fundamentos teóricos” y en el capítulo 3 “Antecedentes y estado de la cuestión”.

² El desarrollo completo de Sharp Front Theory, que implica a las ecuaciones 30 y 31 se pueden consultar en el apartado 4.2.2, capítulo 4 “Fundamentos teóricos”.

6.1.3.b CÁLCULO DE LA EVAPORACIÓN DE LOS MUROS

En este apartado se describen los cálculos de evaporación realizados en la iglesia de Peñalba. Para facilitar el seguimiento de estos cálculos, se acompañan de una breve descripción de las fórmulas aplicadas en cada apartado. El desarrollo completo de las mismas se explica extensamente en el capítulo 2 “*Fundamentos teóricos*”, apartado 2.2 “*El comportamiento higrotérmico de los muros históricos*”. Posteriormente, se discuten los resultados obtenidos.

El procedimiento que se ha seguido en esta parte es el siguiente:

Primero se realizó el cálculo de la succión-evaporación en régimen estacionario para conocer el agua absorbida por el muro hasta llegar a una situación de equilibrio en que el agua absorbida es igual a la evaporada. Este cálculo permite conocer la altura de ascenso capilar (h_{ee}), el tiempo que el muro tarda en alcanzar la situación de equilibrio (t_{ee}).

En segundo lugar, se realizó el cálculo en régimen dinámico. Con este cálculo se ha podido conocer la cantidad de agua que absorbe, se almacena y evapora en cada momento en el muro.

Para realizar estos dos primeros pasos se ha seguido la metodología de cálculo empleada por D’Agostino en la Cripta de la Catedral de Lecce (D’Agostino 2013). Su método se basa en el empleo de las fórmulas ideadas por Hall y Hoff (Hall, Hoff 2002), en combinación con las ecuaciones de Penman para el cálculo del potencial de evaporación. Su trabajo valida el empleo de las fórmulas de Hall y Hoff en casos de estudio reales, fuera de condiciones de laboratorio.

A este método se ha añadido un paso en este trabajo que es el cálculo de la “capacidad evaporativa” del edificio. Esto se traduce en la capacidad que tiene el edificio de disipar el agua evaporada por los muros en relación con la ventilación del mismo. Para poder conocer la capacidad de disipar el vapor de agua producido por los muros en el interior es necesario saber cómo entra el aire en el edificio, cómo se mueve y las renovaciones diarias que es capaz de realizar. Para ello, con el modelo 3D del edificio, realizado con Design Builder, se ha podido realizar la simulación y obtener los datos necesarios³.

como ya se explicaba en el capítulo 5 “*Metodología*”, mediante el programa Design Builder (DB), se pueden realizar cálculos tanto en régimen dinámico, como estacionario. Los cálculos en régimen dinámico se validaron con los datos de monitorización (gráficas 15 y 16, apartado 6.1.1). Los mapas de datos que se pueden extraer de cada simulación CFD muestran la distribución de temperatura y velocidad del aire en cada punto del

³ En el capítulo 5 “*Metodología*” se explicaba que los cálculos con Design Builder se han validado mediante la comparación con los resultados obtenidos mediante monitorización. Para el caso concreto de la capilla de la iglesia de Peñalba, las gráficas 17 y 18 del apartado 6.1.1 muestran la validación de la simulación.

espacio del edificio. Los datos de velocidad del aire se emplearán como dato para realizar los cálculos de evaporación de los muros. Esto simplifica los medios materiales pues, una vez validados los resultados de la simulación, no es necesario disponer de mucha cantidad de anemómetros en cada edificio, pues se puede estimar el movimiento del aire en el interior por medio de la simulación.

a) Cálculo de la evaporación de los muros en régimen estacionario.

Según explica la teoría de ascenso capilar capítulo 4, “*Fundamentos teóricos*” suponiendo un estado de equilibrio, tal que, el flujo de agua que entra en el muro por absorción capilar (U_{ee}), es igual a la cantidad de agua perdida por evaporación (E_{ee}), existe un flujo constante (F_{ee}). Se puede decir que $U_{ee}=E_{ee}$. Aunque se han desarrollado extensamente las fórmulas en el capítulo correspondiente, se detallan a continuación las que se emplearán para el cálculo en el caso 1.

Dado que la velocidad total de flujo en el muro, con un espesor (b) es:

$$U_0 = \frac{bS^2}{2\theta_w h} + \frac{Neh}{2} \quad (39)$$

Y el componente de evaporación (E) depende de la altura de la región húmeda (h) y del potencial de evaporación (e) condicionado por el microambiente:

$$E = eh \quad (34)$$

Dado que $U_{ee}=E_{ee}$, se puede decir también:

$$F_{ee} = E_{ee} = Neh_{ee} = \frac{bS^2}{2\theta_w h} + \frac{Neh}{2} \quad (83)$$

Pudiendo escribir finalmente, que la altura estabilizada del frente capilar (h_{ee}) es:

$$h_{ee} = \left(\frac{bS^2}{e\theta_w} \right)^{1/2} \quad (40)$$

Para realizar el cálculo de h_{ee} , se toma un potencial de evaporación medio anual (Hall 2007, D’Agostino 2013). Para calcular este potencial de evaporación se emplean los registros de la base de datos meteorológica. En este caso, se ha obtenido un $e = 0,27\text{mm/d}$. Para el espesor (b) del muro, se ha considerado también un valor medio $b=70\text{cm}$. Este espesor es el que tienen los muros de la iglesia, a excepción de algunas

zonas como las de cabecera ($b=150\text{cm}$), o los contrafuertes ($b=100\text{cm}$). Teniendo en cuenta que la altura de ascenso capilar varía proporcionalmente al espesor del muro, en estas zonas de la iglesia, se puede alcanzar una altura mayor.

Gráfica 130. Altura de ascenso capilar en función del tiempo. En esta gráfica se ve cómo el agua alcanza el equilibrio a los 140 años.

Además, la cantidad de agua almacenada (C_{ee}) viene dada por el agua absorbida, el área de entrada y la altura que alcanza el frente capilar. En situación de equilibrio del flujo de entrada y salida, se escribía:

$$C_{ee} = \theta_w b h_{ee} \quad (84)$$

Según los cálculos realizados, para el muro, la cantidad de agua acumulada cuando se alcanza la altura de equilibrio es $C_{ee} = 3,32\text{L}$, mientras que para la zona de la cabecera se acumulan más del doble $C_{ee} = 10,40\text{L}$.

El tiempo medio de permanencia del agua en el muro (t_{ee}), puede calcularse como:

$$t_{ee} = C/F \quad (85)$$

Este tiempo también es diferente dependiendo del espesor. Mientras que, en los muros el agua tarda 140,46 años, en la cabecera, con casi el doble de espesor, el agua tarda 300,99 años en alcanzar el equilibrio. En esa zona, el agua llega a alcanzar 1,16m de altura, mientras que, en los muros alcanza 0,80m, que es el ascenso que se puede espesar en la mayoría de la iglesia (Tabla 32).

Tabla 32. Resultados de la altura de equilibrio h_{ee} que alcanza la Iglesia de Peñalba y el tiempo que tarda en producirse este equilibrio t_{ee} en función del espesor del elemento (muro, contrafuerte o cabecera).

	b [cm]	h_{ee} [m]	C_{ee} [L]	t_{ee} [años]
Muros	70	0,75	7,36	140,46
Contrafuertes	100	0,95	12,57	200,66
Cabecera	150	1,16	23,11	300,99

Para simplificar el cálculo de los apartados siguientes, se ha tomado como valor promedio el espesor de los muros ($b=70\text{cm}$).

b) Cálculo de la evaporación de los muros en régimen dinámico

Suponiendo una situación de estado dinámico en la que el sistema estudiado no se encuentre en equilibrio, el agua absorbida y evaporada no son iguales. Esta es la situación es la que se supone como real para el edificio. Para realizar el cálculo, es necesario conocer el potencial de evaporación medido de manera dinámica. Esto supone conocer múltiples datos climáticos como temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, etc. Estos deben ser medidos en el lugar de manera continuada. Estos datos se han obtenido de dos fuentes: Por un lado, la monitorización realizada para este caso de estudio y, por otro, los registros de la base de datos meteorológica.

A continuación, se explica cómo se ha realizado este cálculo y se detallan los resultados obtenidos.

Para el cálculo del potencial de evaporación de manera dinámica se emplearon las ecuaciones simplificadas de Penman (Valiantzas, 2006)⁴.

$$E_{PEN} = E_{radS} - E_{radL} + E_{aero} \quad (44)$$

Cada uno de los términos de la ecuación de Penman se descomponen en las ecuaciones correspondientes, tal como se explicaba en el capítulo 4 “Fundamentos teóricos”. Se recuerdan aquí las ecuaciones principales:

Componente de radiación de onda corta entrante:

$$E_{radS} = 0,051(1-\alpha)R_s\sqrt{(T + 9,5)} \quad (45)$$

⁴ Estas ecuaciones fueron empleadas por primera vez en edificios por D’agostino, validando los resultados mediante un ensayo diseñado por Hall y Hoff. Se obtuvieron buenos resultados, con buena precisión en el cálculo.

Componente de radiación de onda larga de salida:

$$E_{radL} = 0,188(T + 13)\left(\frac{R_s}{R_A - 0.194}\right)(1 - 0,00014(0.7T_{max} + 0,3T_{min} + 46)^2)\sqrt{\frac{HR}{100}} \quad (46)$$

Término aerodinámico de la ecuación:

$$E_{aero} = 0,049(T_{max} + 16,3)\left(1 - \frac{HR}{100}\right)(a_v + b_v v) \quad (47)$$

Para los términos E_{radS} y E_{radL} que involucran variables climáticas se emplean datos obtenidos de las bases meteorológicas⁵. Para el término E_{aero} ⁶, que involucra únicamente parámetros de T, HR y v, se emplean datos tomados de la monitorización. En el apartado 6.1.1 se explica la ubicación y número de registradores empleados en el edificio (Figuras 83-85, apartado 6.1.1).

Los datos meteorológicos de los que se dispone son medias diarias, por ello, los cálculos de E_{PEN} se van a realizar como medias diarias. Los datos de monitorización están tomados cada 10 minutos, con ello se realiza un promedio diario para poder relacionar los valores de T y HR con los parámetros climáticos. La velocidad del aire en el interior se toma de las simulaciones realizadas con Design Builder, como ya se comentaba al principio de este apartado.

Los resultados de los cálculos reflejan que existe una relación entre el potencia de evaporación y el “término calor” de la ecuación (E_{radS} y E_{radL}). Esto se evidencia en que el término calor (Gráfica 131) sigue el comportamiento de la temperatura del exterior (Gráfica 12 apartado 6.1.1 “Descripción del edificio”). El potencial de evaporación aumenta a partir de primavera y hasta el mes de agosto. Sin embargo, el término aerodinámico, presenta una menor influencia sobre la evaporación potencial. El momento de mayor potencial de evaporación se produce entre los meses de junio y julio, momento en que la radiación solar también alcanza su máximo (Gráfica 14, apartado 6.1.1 “Descripción del edificio”).

⁵ Las bases meteorológicas empleadas para cada caso de estudio se detallaban en la tabla 13, en el capítulo 5 “Metodología”.

⁶ Es importante señalar que para diferenciar el término aerodinámico del interior y el del exterior al edificio se ha nombrado cada uno de ellos como E_{aero_int} y E_{aero_ext} respectivamente.

Gráfica 131. Evolución del potencial de evaporación en el exterior de la Iglesia de Santiago de Peñalba a lo largo del período monitorizado. Se desglosan cada uno de los términos de la ecuación de cálculo (E_{radS} , E_{radL} , E_{aero_ext}) en la gráfica.

El potencial de evaporación en el interior se calcula con el término aerodinámico (E_{aero_ext}) que no cuenta con parámetros del ambiente exterior, como la radiación. Tal como se explicaba en el apartado 6.1.2 “Análisis higrotérmico” el edificio gana calor gracias al calor del exterior de primavera y verano. El calor acumulado se mantiene en los meses que la temperatura exterior ha empezado a descender. Por ello, el potencial de evaporación del interior presenta cierto retardo con respecto al exterior, además de ser más alto en los meses fríos (Gráfica 132).

Gráfica 132. Evolución del potencial de evaporación en el interior (E_{aero_int}) de la Iglesia de Santiago de Peñalba a lo largo del período monitorizado.

En la (tabla 22, apartado 6.1.1) se ve como el calor se acumula en el interior hasta noviembre, después desciende de nuevo. Este mismo efecto parece verse reflejado en la evaporación potencial del interior (Gráfica 132). Sin embargo, en el mes de octubre se presenta alto. En el exterior se ha dado una temperatura máxima y media más alta que la del mes de septiembre (Gráfica 12, apartado 6.1.1 “Descripción del edificio”). Además, ha sido un muy ventoso, por lo que es posible que al interior de la iglesia entrase el aire con mayor velocidad. La velocidad del aire, como la temperatura, es directamente proporcional a E_{aero_int} .

Una vez calculado el potencial de evaporación interior y exterior para todo el período monitorizado, se puede calcular cómo varía la altura de ascenso capilar condicionado a este potencial de evaporación (Gráfica 133).

Para este cálculo, se tomó la ecuación diferencial para el cálculo de la altura de ascenso capilar⁷.

$$h^2 = \frac{c}{a} [1 - \exp(-2at)] \quad (38)$$

Donde los términos a y b son simplificaciones de la ecuación:

$$a = Ne/2\theta_w b$$

$$c = S^2/2\theta_w^2$$

⁷ El desarrollo de esta fórmula se explica extensamente en el capítulo 4 “Fundamentos teóricos”.

Eliminando el estado inicial seco (Gráfica 130), se puede calcular la altura de ascenso capilar a la que se encuentran los muros. Los meses en que más asciende el agua en el muro es en invierno, coincidiendo con los meses que se suponían peores para la evaporación de los muros, según el análisis de los capítulos anteriores. El mes en que menos ha ascendido el agua, es octubre. En el mes de octubre, además, se daban buenas condiciones para la disipación de la humedad ambiental acumulada en el edificio, según el análisis del (apartado 6.1.2 “Análisis higrotérmico”), los meses de otoño, al darse mayor contraste térmico entre el interior y el exterior, el aire que entra más frío y más seco ayuda a disipar la humedad acumulada en el interior (apartado 6.1.2 “Análisis higrotérmico”)

La altura media de ascenso capilar es de $h=0,61\text{m}$ a lo largo del año monitorizado. En los meses que se produce el descenso más acusado del potencial de evaporación, se produce también el ascenso de la altura capilar. Así, mientras en julio $h=0,45\text{m}$ de media, en enero está en torno a $h=0,90\text{m}$. La cantidad de agua acumulada en el muro (Q), varía proporcionalmente a la altura de ascenso capilar (h). La media de agua acumulada para todo el período en el muro es de $Q=2,83\text{L}$ por metro lineal de muro.

Gráfica 133. Evolución de la altura de ascenso capilar (h) y la evolución del agua contenida en el muro (C) en la Iglesia de Peñalba, durante el período monitorizado.

El flujo de agua que entra en el muro es de $U_{in}=0,21\text{L}$ por día. El caudal de salida, por evaporación, es $E_{out}=0,23\text{L}$ por día. Lo que se traduce en que, las condiciones climáticas a lo largo del año parecen favorables para la evaporación del agua que pueda entrar en el muro. Los meses en que se produce una evaporación positiva se prolongan desde

mayo hasta noviembre. Sin embargo, a partir del mes de diciembre y hasta abril, la evaporación es negativa. En los meses de invierno entra más agua en el muro de la que es capaz de salir al interior por evaporación.

Gráfica 134. Evolución del flujo de entrada (U_{in}) y salida (E_{out}) del agua en el muro de la Iglesia de Santiago de Peñalba.

Se podría establecer la siguiente relación:

- Si $E_{out} < U_{in}$, se está almacenando agua en el muro.
- Si $E_{out} > U_{in}$, el muro está evaporando más de lo que absorbe, por tanto, podrían darse condiciones para secar.

Habría que matizar que, tal como reflejan los registros climáticos de los meses de diciembre, enero, febrero, marzo y abril, existieron días de nieve. En algunos de estos meses, se han producido importantes nevadas. Según la AEMET, el mes de febrero, por ejemplo, ha tenido un alto número de días de nieve, con una media de 8 días de nieve en esta zona. Esto supone nieve acumulada que se va derritiendo poco a poco, lo que pasa a ser agua en el terreno que puede ser absorbida por los muros.

c) Conclusión al cálculo de evaporación en estado dinámico:

El cálculo que se ha empleado supone que existe, en mayor o menor medida, un flujo de evaporación que es constate (Gráfica 134) –al igual que existe un flujo de succión de agua del terreno constante-. La evaporación del muro está en relación con el potencial de evaporación de su ambiente, es decir, el muro evapora más o menos cantidad de agua, en función de lo favorables que sean las condiciones de su ambiente (T , HR , v) a la evaporación.

Pero, para realizar un estudio global del *comportamiento evaporativo* del edificio, no basta solo con estudiar lo que el muro evapora, sino que es necesario ponerlo en relación con la capacidad que tiene el edificio de disipar el vapor de agua que pasa al ambiente. Si el edificio tiene buena capacidad de ventilación, y ésta se produce en los momentos efectivos, el vapor de agua producido por los muros se disipará de manera eficiente y se podría hablar de un “comportamiento evaporativo efectivo”. Si, además de disipar bien la humedad producida por los muros, el agua que entra por succión en el muro es menos que la que sale, estaremos ante un momento de “potencial de secado efectivo”. Esto significa, que el muro no solo evapora más de lo que absorbe, sino que además la ventilación expulsa al exterior el vapor de agua que pasa al aire. Con el objetivo de estudiar y clasificar en qué momentos se produce cada una de estas situaciones, se desarrolla el apartado 6.1.3.c siguiente.

6.1.3.c EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EVAPORATIVO MEDIO DIARIO DE LA IGLESIA DE SANTIAGO DE PEÑALBA

Es necesario estudiar cómo se difunde este vapor de agua aportado por los muros (E_{out}) al ambiente, cómo se mueve y si es capaz de ser evacuado al exterior o por el contrario se queda acumulado en el interior.

Al tratarse de un edificio histórico, sólo cuenta con la ventilación natural como único sistema para renovar el aire del interior. Por tanto, esta es la única forma de mover el vapor de agua producido por la envolvente. El aire que entra del exterior lo hace con un determinado grado de humedad (W_{ext}) en cada momento. Este grado de humedad indica la cantidad de gramos de agua por kilogramo de aire que es capaz de contener ese aire a una determinada temperatura (T_{ext}) y humedad relativa (HR_{ext}). Por tanto, relacionando (W_{ext}) del aire entrante con el flujo de vapor en el interior (E_{out}), se puede calcular el volumen de aire necesario (V_{an}) para evacuar la producción de vapor de los muros.

$$V_{an} = \left(\frac{E_{out} \cdot 1000 \cdot P}{\rho_a} \right) / (W_{int} - W_{ext}) \quad (86)$$

Conociendo el aire necesario (V_{an}) y el volumen del edificio (V_{ed}), se pueden calcular las renovaciones diarias (R_n) que tiene que hacer la iglesia para evacuar la producción de vapor de los muros.

$$R_n = V_{an} / V_{ed} \quad (87)$$

Introduciendo la iglesia en el software Design Builder se puede calcular con precisión la ventilación natural del edificio. El cálculo de las renovaciones diarias se puede realizar de manera manual, con las fórmulas correspondientes (capítulo 2 “Fundamentos teóricos”), pero el programa permite atribuir al edificio unas renovaciones máximas, junto con serie de parámetros que hacen que el cálculo sea más preciso.

El programa tiene en cuenta: La orientación de las aperturas, su tamaño, la morfología del edificio, ubicación geográfica, y datos de clima como velocidad, dirección del viento, temperatura y humedad relativa influyen en la capacidad de ventilación del edificio. Además, los horarios de funcionamiento del edificio, que también influyen en el régimen de apertura de puertas y ventanas, especialmente en este caso concreto, en que las puertas permanecen abiertas en el horario estricto de visitas de la iglesia. Todas estas características se introducen en el programa y forman parte del conjunto de variables del cálculo computacional (en el capítulo 4 se explica brevemente cómo opera el programa con estos parámetros). De esta manera, se han obtenido unas tablas de resultados de ventilación natural que se han promediado para hacer un cálculo de renovaciones medias diarias.

Mediante el software, podemos saber exactamente las renovaciones que es capaz de hacer el edificio, considerando todos los parámetros involucrados en el cálculo.

Teniendo en cuenta que los lunes y martes el edificio permanece cerrado, la ventilación natural en esos días no se produce, las pocas renovaciones de aire son las que motivan las infiltraciones. El resto de días, la iglesia abre en horario de mañana durante 4 horas, y por la tarde otras 4 horas en verano y 2 horas y 50 minutos en invierno. Esto hace una media de 8 horas de ventilación natural diaria en verano y 6 horas y 50 minutos en invierno. Teniendo en cuenta las renovaciones/hora y la cantidad de horas que la iglesia está abierta, se ha calculado una tabla de renovaciones diarias (Tabla 33).

Tabla 33. Resumen de renovaciones, según los horarios de apertura de la Iglesia de Santiago de Peñalba.

	Ventilacion natural [Renov/dia], según Design Builder						
	L	M	X	J	V	S	D
VERANO	0	0	1,4	1,4	1,4	1,4	0,8
INVIERNO	0	0	1,2	1,2	1,2	1,2	0,8
	Infiltraciones [renov/dia]						
VERANO	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
INVIERNO	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
TOTAL INVIERNO	1,5	1,5	2,7	2,7	2,7	2,7	2,3

Comparando las renovaciones calculadas con DB, que vamos a denominar como “renovaciones reales” (R_r), comparadas con las necesarias (R_n), sabemos si el edificio está siendo, o no, capaz de evacuar el vapor de agua que se produce en el interior.

Se puede extraer la siguiente conclusión:

- Si $R_r > R_n$ el edificio está siendo capaz de evacuar el vapor de agua producido por los muros.
- Si $R_r < R_n$ el edificio no es capaz de evacuar el vapor de agua producido por los muros, por tanto, se acumula en el ambiente interior.

Gráfica 135. Comparativa entre las renovaciones reales (R_r) y las renovaciones necesarias (R_n) para la Iglesia de Santiago de Peñalba.

En el caso de la iglesia, en el mes de septiembre y octubre, $R_n > R_r$ en algunos días del mes. Esto indica, en primer lugar, que la evaporación es alta (Gráfica 134) en esos días, en relación con las condiciones climáticas favorables. Pero, por otra parte, la iglesia en esos días no está evacuando la cantidad de evaporación que se está produciendo (Gráfica 135 y Gráfica 136). En el mes de septiembre, se producían días en los que el aire que entra al interior de la iglesia es favorable para la disipación de la humedad (Gráficas 28 y 29, apartado 6.1.2), pero, parece que la cantidad de horas que la iglesia está abierta no es suficiente para evacuar todo el vapor de agua que evaporan los muros durante todo el día.

El caso contrario se da en meses como febrero, en que se cumple $R_n < R_r$, indicaría que el ambiente del edificio está siendo capaz de evacuar el agua evaporada por el muro, pero en febrero $E_{out} < U_{in}$ (Gráfica 134.) y, además, el agua contenida en el muro (Q) aumentaba en febrero (Gráfica 133). Por tanto, un valor bajo de R_n puede indicar que hacen falta pocas renovaciones, porque el muro está evaporando poco. Esto significa que $R_n < R_r$, no tiene porqué indicar que el ambiente está siendo capaz de evacuar toda el agua producida por el muro, sino que, el muro no está evaporando, o evapora poco, pero almacena mucha cantidad de agua (Gráfica 136).

Gráfica 136. Comparativa entre las renovaciones reales (R_r) y las renovaciones necesarias (R_n) para la Iglesia de Santiago de Peñalba entre los meses de septiembre a diciembre. En amarillo se señalan aquellos días en que $R_r < R_n$.

Como conclusión, se evidencia que debe analizarse de manera conjunta las renovaciones necesarias en cada momento, con la situación del agua absorbida por el muro

La situación en que $E_{out} < U_{in}$ se prolonga durante todos los meses de frío (Gráfica 134), y las renovaciones $R_n < R_r$, excepto en algunos momentos puntuales.

Es importante entender que el flujo de evaporación es constante a lo largo del año -a veces menor, otras veces mayor- pero este modelo de cálculo supone un caudal constante. Como se adelantaba en las conclusiones del apartado anterior, lo que es necesario saber es cuándo se trata de una cantidad de evaporación significativa para la iglesia. Para ello hay que definir un valor -o rango de valores- de evaporación (E_{out}) en los que se cumpla que:

La evaporación sea mayor que la succión del muro, las renovaciones necesarias sean menos de las que se están produciendo, y que las propiedades higrotérmicas del aire que entra en el edificio sean adecuadas⁸.

Sabiendo que ésta sería la situación favorable a un “secado efectivo”, se han resumido los posibles escenarios que podrían darse en la iglesia (Tabla 34) :

⁸ Debe ser un aire más frío y más seco, como el que se ha registrado en los meses de otoño. El aire que entra en el edificio no debe introducir más contenido en humedad en el aire. El contraste térmico entre el aire del interior y el del exterior ayuda a realizar la mezcla y mover las capas de aire estratificado del interior.

Tabla 34. Posibles escenarios de evaporación y disipación de vapor que pueden presentarse en la Iglesia de Santiago de Peñalba.

Escenario	Escenario
(1)	$(E_{out} < U_{in}) + (R_r < R_n)$
(2)	$(E_{out} > U_{in}) + (R_r < R_n)$
(3)	$(E_{out} < U_{in}) + (R_r > R_n)$
(4)	$(E_{out} > U_{in}) + (R_r > R_n)$

El **escenario 1**, se produce el día 18 de diciembre. Este día, el agua que está absorbiendo el muro, es más de la que es capaz de evaporar. Además, el ambiente facilita renovaciones suficientes para disipar el agua de evaporación. Este escenario se da puntualmente este día. Según los registros de monitorización de ese día, el grado de humedad exterior ha sido más alto que el del interior, lo que dificulta la evacuación de la humedad interior (Gráfica 137).

Gráfica 137. Marcado el día 18 de diciembre sobre el análisis de renovaciones (izquierda), junto al registro de grado de humedad para ese mismo día.

El **escenario 2**, supone que el agua evaporada es más que el agua absorbida por los muros, pero las renovaciones no son suficientes para disipar el vapor de agua aportado al ambiente. Esto se produce algunos días de los meses de agosto, septiembre, octubre y noviembre.

Gráfica 138. Evolución del grado de humedad (W) entre los días 26 y 28 de agosto de 2017 en la Iglesia de Santiago de Peñalba.

Gráfica 139. Evolución de la temperatura (T) entre los días 26 y 28 de agosto de 2017 en la Iglesia de Santiago de Peñalba.

Se produce esta situación entre los días 26 y 28 de agosto, porque esos días el edificio ha estado cerrado⁹ y las renovaciones que se producen ese día $R_r=1,3$, son solamente las de infiltración. Esta situación se manifiesta en las gráficas de grado de humedad y temperatura. Los registros de esos días son muy estables, sin apenas variaciones al no abrirse las puertas (Gráfica 138 y Gráfica 139). El resto de días analizados de agosto, con una evaporación similar, tienen suficiente grado de renovación, por lo que, en este mes,

⁹ El día 26 de agosto es sábado. Los sábados tiene horario de apertura, pero debido a una fuerte tormenta que se produjo ese día en Peñalba, en el que el edificio perdió el suministro eléctrico, permaneció cerrado.

con un horario de apertura normal, es suficiente para disipar la producción de vapor de los muros.

En el mes de octubre, se vuelve a producir el escenario 2 en algunos días puntuales. Uno de ellos es el día 13 de octubre. Esta vez, el edificio está abierto. Este día, la cantidad de agua evaporada por el muro $E_{out} = 0,39$ L, incluso superior al mes de agosto $E_{out} = 0,36$ L, a pesar de ser un mes más frío. Esto significa que las condiciones del clima han sido favorables a la evaporación (esto ya se había adelantado en el análisis estacional del apartado 6.1.2). Las renovaciones ese día no son suficientes para disipar toda la evaporación, a pesar de ser un día muy ventilado, pues el edificio abre mañana y tarde, pero la cantidad de evaporación es tan alta, que las renovaciones no son suficientes. El aire que entra del exterior es un aire con buenas cualidades para la disipación de la humedad, pues está más frío por la mañana que el interior –aunque luego se calienta llegando a alcanzar una máxima de $T_{ext} = 26^{\circ}\text{C}$, tan alta como la que ha podido haber en verano- y más seco que el aire del interior. Este día, el problema no es la calidad del aire entrante, sino la cantidad de horas que la puerta permanece abierta.

El escenario 3, supone que el muro está absorbiendo más agua de la que evapora, y el ambiente es capaz de disipar aquella cantidad que está siendo evaporada –aunque sea menor que la absorbida-. Los meses en que absorbe más van desde diciembre hasta abril (Gráfica 134). Durante estos meses, casi todos los días el edificio es capaz de evaporar el aporte de humedad de los muros. En parte, esto es porque ha descendido la cantidad de agua evaporada, lo cual es lógico, ya que, según las fórmulas de cálculo: a menor temperatura ambiente, mayor absorción y menor evaporación. El muro retiene más agua (Gráfica 133). Los días que no cumplen esto, son los que se han explicado en el escenario 2. Los días del escenario 3, no significan tanto que el edificio esté teniendo una ventilación efectiva para la disipación, sino más bien que hay poca evaporación.

El escenario 4 es el más favorable al secado de los muros. La evaporación de los muros supera al agua que entra por absorción, esto se produce desde mayo hasta noviembre. Además, las renovaciones son suficientes para disipar el agua acumulada por la evaporación de los muros. Dentro del rango de meses de mayo a noviembre, se produce esta situación de renovaciones favorables, especialmente en el mes de mayo y junio. Sin embargo, estos meses no son los más favorables a la disipación de la humedad del interior, según lo que se ha explicado en el apartado 6.1.2. Por ejemplo, en las gráficas 112 y 113 de ese apartado 6.1.2, se veía como el día 10 de junio, al abrir las puertas el aire que entraba aumentaba el contenido en humedad del interior, al estar más húmedo. Según los cálculos de renovaciones, el día 10 de junio $R_r = 2,10$ renov/d $>$ $R_n = 1,83$ renov/d. Sin embargo, el aire que entra no es adecuado para la disipación de la humedad.

6.1.3.d CONCLUSIONES AL COMPORTAMIENTO EVAPORATIVO DEL CASO DE LA IGLESIA DE SANTIAGO DE PEÑALBA

En términos generales, se trata de un edificio en el que los muros absorben agua durante los meses más fríos. La altura de ascenso capilar no llega en ningún caso a alcanzar el metro de altura. Las renovaciones de aire que realiza el edificio son suficientes para disipar el vapor de agua producido por los muros, la mayor parte del año, a excepción de ciertos días de otoño, en los que E_{out} es más alta. En principio, se trata de un edificio bien ventilado para disipar la humedad de los muros. Pero, no es suficiente con evaluar las renovaciones, sino que es necesario estudiar cómo es el aire que entra en el interior del edificio, si tiene las cualidades higrotérmicas para disipar la humedad. Esto reduce el porcentaje de días efectivos a la evaporación efectiva del edificio.

Para calcular cuáles son estos días efectivos, es necesario que se cumpla la triple condición:

$$(E_{out} > U) + (R_r > R_n) + (W_{ext} < W_{int}) \quad (88)$$

Si se cumple esta condición y además la temperatura exterior es más fría que la del interior la ventilación es más efectiva. En las gráficas siguientes se recoge un análisis de los días en que se producen situaciones de ventilación efectiva.

Los días en que el ambiente exterior es adecuado para la disipación de la humedad interior se ha marcado con columna roja: Todos cumplen la condición de la ecuación (88). Pero, cuando la barra alcanza el nivel 1, es un día semifavorable, con una temperatura exterior superior o con tendencia a ser superior a la interior. Si la barra roja alcanza el nivel 2 se trata de días altamente favorables para la disipación de la humedad interior. Para mayor facilidad en la interpretación de los resultados se han marcado en amarillo aquellos días que no son nada favorables para la disipación. Durante los meses más cálidos los días favorables son la mayoría. Sin embargo, en los meses más fríos la situación se invierte (Gráfica 141), y vemos que existe un gran número de días que no son favorables a la disipación de la humedad.

Gráfica 140. Resultados de la comparación de las renovaciones del edificio con la situación del clima exterior para los meses de mayo a octubre de la Iglesia de Santiago de Peñalba. Cuando la barra roja alcanza el valor 2 indica un día altamente favorable a la disipación de la humedad. Cuando la barra roja alcanza 1, es un día semifavorable a la disipación de la humedad. Si la barra roja se encuentra en 0, es un día no favorable para la disipación. En amarillo se han marcado los días que no cumplen los requisitos de la ecuación (88).

Gráfica 141. Resultados de la comparación de las renovaciones del edificio con la situación del clima exterior para los días de noviembre a abril de la Iglesia de Santiago de Peñalba. Cuando la barra roja alcanza el valor 2 indica un día altamente favorable a la disipación de la humedad. Cuando la barra roja alcanza 1, es un día semifavorable a la disipación de la humedad. Si la barra roja se encuentra en 0, es un día no favorable para la disipación. En amarillo se han marcado los días que no cumplen los requisitos de la ecuación (88).

Al igual que se ha considerado que sólo un porcentaje de los días de ventilación son eficientes, se debe hacer un matiz al cálculo del ascenso capilar. Este modelo, está suponiendo que existe un flujo de agua constante e igual en todo el muro. Pero, tal como se ha medido mediante monitorización, en diferentes zonas, el grado de humedad y temperatura no es uniforme. Es necesario realizar un cálculo más pormenorizado, por zonas, para conocer la evaporación de cada uno de los puntos, y compararlo con la media del muro que le corresponda. Este cálculo se explica en el apartado siguiente.

6.1.4 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EVAPORATIVO MEDIANTE SIMULACIÓN POR ORDENADOR

Las simulaciones realizadas con el programa Design Builder quedan validadas por medio de las gráficas 17 y 18 presentadas en el apartado 6.1.1. Por lo tanto, como ya se explicaba al principio de este capítulo, se pueden emplear las simulaciones para comprobar los cálculos y análisis realizados en los apartados anteriores.

A continuación, se enuncian las hipótesis que se han ido formulando a lo largo de los apartados 6.1.2 “Análisis higrotérmico”, y 6.1.3 “Cálculo del comportamiento evaporativo” y se comparan con los resultados de simulación.

1º Los días en que la iglesia permanece cerrada, la estratificación de la temperatura del aire es menor.

Esto se puede ver en la simulación CFD realizada para el día 12 de junio de 2017. Ese día, el edificio permanece cerrado, como se aprecia, el aire tiende a igualar su temperatura (Gráfica 142) y la velocidad del aire es cercana a cero¹⁰ (Gráfica 143).

Gráfica 142. Distribución de la temperatura a las 12:00 horas, con la iglesia cerrada, día 12/06/2017. Sección longitudinal de la Iglesia de Santiago de Peñalba.

En la observación del modelo CFD, se ha notado, que el poco movimiento de aire que existe se produce por diferencias de temperatura cercanas a los paramentos verticales,

¹⁰ El módulo CFD de Design Builder no simula las infiltraciones, sin embargo, en la simulación dinámica sí se tiene en cuenta, lo que permite afirmar que existe cierta infiltración que genera algunas corrientes de aire, apreciables en algunos momentos del día por la monitorización. Esto se ha podido comprobar mediante mediciones con anemómetro en el interior de la iglesia con las puertas cerradas.

tal como se aprecia en algunas zonas de la Gráfica 143 anterior. Esto se aprecia mejor en la sección transversal, donde se ve que el muro norte al estar más frío, formando una banda de velocidad que se aprecia en los vectores de la imagen sobre el muro norte (Gráfica 144).

Gráfica 143. Distribución de la velocidad del aire a las 12:00 horas, día 12/06/2017, simulando que la iglesia se encuentra cerrada. Sección longitudinal de la Iglesia de Santiago de Peñalba.

Gráfica 144. Distribución de la velocidad del aire a las 12:00h día 12/06/2017, simulando que la iglesia se encuentra cerrada. Sección transversal por el crucero. Los vectores de la imagen indican la velocidad y dirección del aire que se mueve en el interior. Iglesia de Santiago de Peñalba.

Este fenómeno por contraste térmico sucede de manera más evidente en días en que la iglesia ventila. Simulando el mismo día 12 de junio a las mismas 12:00 horas, pero suponiendo que la iglesia está abierta, se obtienen velocidades más altas que la media en la capilla de San Genadio (a los pies de la iglesia). Esto se debe al contraste térmico entre esa zona del edificio con el resto del espacio (Gráfica 145). El campanario arroja sombras durante todo el día sobre esa parte de la iglesia (Figura 86, apartado 6.1.1), por lo que se encuentra a una temperatura más baja que el resto, por lo que cuando entra aire más caliente al interior, se produce un contraste térmico marcado en esa zona, que genera turbulencias cercanas a los muros, tal como se ve en la Gráfica 146.

Gráfica 145. Distribución de la temperatura del aire en la sección longitudinal a las 12:00 horas del día 12/06/2017, simulando la iglesia abierta. Se aprecia la diferencia entre la capilla de San Genadio (izquierda) y el resto de la iglesia por la influencia de la sombra arrojada por el campanario. Iglesia de Santiago de Peñalba.

Gráfica 146. Distribución de la velocidad del aire en planta a las 12:00 horas del día 12/06/2017, simulando la iglesia abierta. El corte en planta se ha realizado a 150cm de la cota 0m, suelo terminado. Iglesia de Santiago de Peñalba.

2º El aire no llega por igual a todas las partes de la iglesia.

En este punto hay que hablar de dos fenómenos. Por un lado, se han localizado una serie de puntos en cota 0m, con un grado de humedad elevado, condensando en algunos momentos del año. Respecto a estos puntos, se ha observado en las gráficas de análisis higrotérmico que, a pesar de que se nota su influencia del aire en data-loggers que están ubicados en pared, estos puntos -clasificados antes como anómalos en el análisis higrotérmico del apartado 6.1.2-, no parecen verse afectados por la ventilación. Esto hace pensar que puede deberse, entre otras razones, a que el aire no llega a moverse en las zonas en las que se encuentran ubicados, pues la ventilación es más notable a los pies de la iglesia que en la cabecera. Esto se debe a que las puertas generan una ventilación cruzada que no es suficiente para llegar a la cabecera, pues la disposición de ambos huecos es casi enfrentada. Esto hace que los puntos donde se ha detectado mayor humedad sean los menos ventilados, lo que no favorece la disipación. Para comprobar esto, se puede observar la sección de planta de CFD realizada a una altura de 150cm, en la que se ve cómo el aire en las zonas de la cabecera no se mueve (Gráfica 146).

Por otro lado, en las gráficas de estratificación en altura (Gráficas 125, 126, 129 y 130, apartado 6.1.2), se veía que, a cierta altura, el aire tiene dificultad para moverse. Esto

mismo se venía prediciendo desde el apartado 6.1.1 cuando se hablaba de la morfología del edificio, explicando ya que se trata de un edificio muy compacto, con pocos huecos y muy esbelto. Las simulaciones CFD confirman que el aire a cierta altura tiene dificultad para moverse (Gráfica 147).

Gráfica 147. Distribución de la velocidad del aire. Sección transversal día 12 de junio de 2017 a las 12:00h. Simulación con el edificio está abierto.

3º Los elementos del entorno, como el campanario, la cerca de piedra, las casas o el terreno afectan al soleamiento sobre la iglesia, y al movimiento del aire en el entorno.

Simplemente observando el edificio, se puede imaginar que los elementos como el campanario, la cerca, las casas cercanas y el desnivel del terreno pueden afectar notablemente a la capilla norte y a la cabecera. Además de los análisis realizados en el interior de la iglesia, se completa con el estudio del exterior (soleamiento y movimiento del viento en el entorno del edificio) en este apartado.

En la zona de la cabecera, especialmente en los muros norte y la capilla de ese mismo lado, es donde se han medido los valores más altos de grado de humedad. Se ha confirmado con el análisis anterior que la falta de ventilación en esa zona podría estar colaborando con la dificultad de la disipación de la humedad que ahí se acumula. A esto se suma la falta de soleamiento de la zona norte de la iglesia, especialmente si se tiene en cuenta el desnivel del terreno en la zona de cabecera. En la Gráfica 148 se puede ver cómo la cabecera y la nave norte están en sombra. La cerca, que en esa zona tiene mayor altura respecto a la cota del suelo de la iglesia, también proyecta sombra sobre la cabecera.

Gráfica 148. Estudio del soleamiento sobre el edificio el día 12 de junio. (a) corresponde a las 07:00h, (b) 13:00h, (c) 18:00h. Todas las imágenes corresponden con la vista norte.

La cabecera, en el lado sur, recibe unas horas de sol en las horas centrales del día, especialmente en los meses de verano.

4º La dirección del aire en el exterior no facilita la entrada de aire al interior.

Si se realiza un corte transversal por un plano imaginario perpendicular al edificio, se puede ver cómo en la zona cercana a la cota del suelo la velocidad del aire se reduce considerablemente. Los objetos del entorno como las casas, la cerca o el campanario generan rozamientos que reducen la velocidad del aire, tal como se aprecia en la Gráfica 149 y Gráfica 150 en la zona de las puertas de acceso sur, donde la velocidad del aire se reduce. Esto provoca que el aire que puede entrar por las puertas tiene menor velocidad que el que podría entrar por las ventanas, las cuales ventilan con dificultad por su diseño en paneles de alabastro.

Gráfica 149. Distribución de la velocidad del aire exterior en un plano perpendicular a la iglesia de Santiago de Peñalba.

En el corte realizado a 1m del suelo de la iglesia se puede ver cómo la velocidad del aire está entre 0 m/s y 2,73 m/s (Gráfica 151). En la zona de la cabecera la velocidad del aire llega a reducirse a 0 m/s. Esto, unido a la falta de soleamiento concuerdan con la dificultad de esa zona del edificio para evaporar el agua que absorben los muros.

Gráfica 150. Distribución de la velocidad del aire exterior en un plano perpendicular a la iglesia de Santiago de Peñalba. Las flechas indican la dirección del viento.

Gráfica 151. Distribución de la velocidad del aire en el entorno de la iglesia. Plano de corte realizado a 1m del suelo. Iglesia de Santiago de Peñalba.

6.2. CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO DE SANTA MARÍA DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

6.2.1. ESTUDIO Y DESCRIPCIÓN DEL CASO 2

6.2.1.a. Contexto histórico sobre la construcción de la Iglesia

6.2.1.b. Características constructivas

6.2.1.c. Caracterización de los materiales

6.2.1.d. Estudio del clima de Santiago de Compostela

6.2.1.e. Descripción de la inspección y monitorización del caso 2

6.2.1.f. Parámetros para la simulación del caso 2

6.2.2. ANÁLISIS HIGROTÉRMICO DEL CASO 2

6.2.2.a. Análisis estacional: Evolución de las tendencias generales

6.2.2.b. Análisis por estaciones: Verano 2017

6.2.2.c. Análisis por estaciones: Otoño 2017

6.2.2.d. Análisis por estaciones: Invierno 2017-2018

6.2.2.e. Análisis por estaciones: Primavera 2018

6.2.2.f. Conclusiones al análisis estacional

6.2.2.g. Análisis de las tendencias diarias

6.2.2.h. Conclusiones al análisis diario

6.2.3. CÁLCULO DEL COMPORTAMIENTO EVAPORATIVO

6.2.3.a. Cálculo de las propiedades del material para la evaporación

6.2.3.b. Cálculo de la evaporación de los muros

6.2.3.c. Evaluación del comportamiento evaporativo medio diario

6.2.3.d. Conclusiones al comportamiento evaporativo del caso 2

6.2.4. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EVAPORATIVO MEDIANTE SIMULACIÓN POR ORDENADOR

6.2.1. ESTUDIO Y DESCRIPCIÓN DEL CASO 2

6.2.1.a. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CAPILLA DEL CRISTO DEL MONASTERIO DE SANTA MARÍA DE CONXO

Los orígenes de Santa María de Conxo se remontan al siglo XII, cuando el arzobispo Diego Gelmírez derriba la primera iglesia, para construir una nueva y un convento de monjas.

La construcción de la Capilla del Cristo, perteneciente al monasterio, se remonta a los orígenes de la primitiva iglesia.

Figura 191. Planta Capilla del Cristo, St^a M^a de Conxo. Planos redibujados por la autora de la tesis en base a la planimetría existente de la arquitecta Alicia Noya.

Según señala la memoria histórica redactada por Belén María Castro Fernández para el Proyecto Básico y de Ejecución de eliminación de humedades en la Capilla del Cristo, redactado por Alicia Noya Asende (diciembre 2002) es muy probable que las reducidas dimensiones de la capilla y el auge del culto que recibe la talla del Cristo impulsara la construcción de una nueva capilla hacia el año 1729. El maestro a quien se le encarga su ejecución es Simón Rodríguez.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Figura 192. Acceso a capilla bajo el coro.

La Capilla tiene planta de cruz latina, con una sola nave (Figura 192), un tramo de crucero (Figura 193 y Figura 195) y capilla mayor rectangular (Figura 194) Siguiendo el eje longitudinal del conjunto tiene adosado un camarín (Figura 198).

Figura 193. Vista del crucero desde el coro.

Figura 194. Vista del crucero

El alzado se organiza mediante un sistema de pilastras de orden toscano arquivado. La cubierta de la nave de la Capilla está resuelta mediante bóveda de cañón (Figura 194) reforzada por arcos fajones, mientras que el crucero se cubre con una media naranja levantada sobre pechinas (Figura 195 y Figura 196).

Figura 195. Cúpula sobre pechinas en crucero.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

En el primer tramo del brazo longitudinal se encuentra el coro, construido mediante una bóveda rebajada de cantería (Figura 192), al cual se accede mediante una escalera embutida en el muro que separa la Capilla de la sacristía de la iglesia.

Figura 196. Sección longitudinal de la capilla. Planos redibujados por la autora de la tesis en base a la planimetría existente de la arquitecta Alicia Noya.

En los brazos del crucero se abren arcos de medio punto, albergados en un cajado del muro en para alojar los retablos menores (Figura 197).

Figura 197. Retablo muro Sur.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

El camarín situado detrás del Retablo Mayor (Figura 198), presenta planta cuadrangular. La parte central está cubierta con bóveda de arista, mientras que en los laterales se opta por bóveda de cañón reforzada por arcos fajones igual que en la cabecera. Consta de dos cuerpos comunicados por escaleras, de caja rectangular, situadas en el ángulo del muro oriental, actualmente cumple las funciones de sacristía para la capilla. En el espacio simétrico al que ocupa la escalera que asciende desde el "camarín" hasta la sala superior, hay actualmente un aseo con inodoro y lavabo.

Figura 198. Camarín.

En total la capilla cuenta con un espacio interior de 24 metros de largo, por 12 de ancho y 12 de alto en el punto más alto de la cúpula. En la nave central esta altura se ve reducida a los 7,5 metros. Si contásemos el camarín, añadiría 6 metros y medio más de longitud.

6.2.1.a. CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

Los muros de carga de la Capilla son de sillería de granito bien trabajada en la hoja interior. En el exterior la hoja es más sencilla, simplemente careada (Figura 199). Se desconoce el tipo de relleno o traba que pueda haber entre ambas hojas. En las zonas donde el espesor es mayor, este puede llegar a los 1,77 metros. En el crucero,

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

concretamente en los rebajes para los retablos, los muros se reducen en sección hasta los 0,70 metros, quedando aun así una sección de un espesor considerable, teniendo en cuenta que no se trata de una construcción con mucha altura.

Figura 199. Fachada Norte con nichos adosados.

Los arcos que trasladan el empuje de las bóvedas y la cúpula a los muros no se manifiestan en el exterior, y los contrafuertes quedan absorbidos en el espesor de los muros. En el exterior del muro Sur se puede ver la zarpa que indica el arranque sobre la cimentación (Figura 200).

Figura 200. Exterior de muro Sur.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Los muros del camarín son más delgados que los del resto de la capilla (50 cm). Los empujes de la bóveda en esta parte, cargan sobre arcos que transmiten las cargas hacia los dos cuerpos que albergan escalera y aseo, ambos adosados al muro Este.

El arco rebajado que soporta el coro apoya sobre los muros laterales. Uno de estos muros tiene un espesor de 12cm, muy reducido, pues alberga el núcleo de escalera que conduce al coro.

En el interior de la capilla, sin tener en cuenta el camarín, se abren 2 ventanas en el muro Norte, y en el muro Sur se abren 2 ventanas. Todas las ventanas tienen dos partes de vidrio parcialmente solapadas con objeto de permitir la ventilación de la capilla de manera constante. A mayores se abren dos pequeñas ventanas en el coro, en el muro norte. La cúpula sobre el crucero tiene cuatro óculos circulares cerrados con vidrio que impiden la ventilación a través de ellos. Se desconoce cómo es el cerramiento de estos óculos.

El camarín cuenta con 3 ventanas en planta de acceso, una al Norte y otra al Sur, tres ventanas en la escalera, y tres ventanas más en el piso superior, una a cada orientación que da la sala.

El pavimento es un enlosado de granito, con calles para sepulturas.

La cubierta tenía un sistema de evacuación de pluviales mediante gárgolas. Aún se puede ver alguna en algún punto. El sistema actual está formado por canalones y bajantes, recientemente reparados bajo la intervención de 2002 de la arquitecta Alicia Noya. El sistema de bajantes conduce el agua a un sistema de recogida enterrado que se ubican en una atarjea perimetral (Figura 201).

Figura 201. Canal perimetral para recogida de pluviales. Fuente: Consorcio de Santiago.

La cota del cementerio está elevada 30cm respecto a la del pavimento de la Capilla, por lo que el muro Norte está parcialmente soterrado en la zona de encuentro con el cementerio (Figura 202). Además, existe un conjunto de nichos adosados al muro Norte.

Figura 202. Sección transversal de la capilla. Planos redibujados por la autora de la tesis en base a la planimetría existente de la arquitecta Alicia Noya.

Reparaciones históricas

La primera reparación, llevada a cabo por Francisco Pons Sorolla y José L. García Fernández, el Proyecto está fechado en 1964, tenía como objeto la reparación general del monumento y la ordenación de sus accesos. Se repararon cubiertas y algunas grietas encontradas. En la memoria se refleja que el material de cubrición es teja árabe sentada sobre un tablero de madera, toda la estructura de cubiertas era de madera con cuadro tosco. Se sustituye la estructura de madera por otra metálica en la nave principal y la Capilla del Cristo. La nueva cubierta de teja se sustenta sobre un doble tablero de rasilla impermeabilizado donde se recibe la nueva teja curva.

Las obras acometidas en 1965 se hicieron en dos fases, primero la iglesia y posteriormente la capilla. Se desconoce si la segunda fase, en la que se debía realizar la capilla se llegó a llevar a cabo. Existe una carta del Párroco en la que se cuenta que se agotó la subvención para las obras en 1968, por lo que no se sabe si se llegó a completar la intervención. Según describe la Memoria del Proyecto Básico y de Ejecución de Alicia

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Noya, la solución final que se debió adoptar para la estructura de la Iglesia –se desconoce si de la Capilla- consistió en cerchas de hormigón, sobre zuncho perimetral de hormigón. Sobre la estructura se ponía un tablero cerámico y una impermeabilización con una chapa de fibrocemento para recibir la teja.

Las principales características de los elementos que la conforman se recogen en la Tabla 35.

Los datos recogidos en esta tabla son necesarios para el levantamiento planimétrico del edificio y su posterior simulación. El conocimiento de los elementos constructivos tiene como fin poder ajustar al máximo posible las características físicas que se le atribuyen a los elementos construidos dentro del programa de simulación realizada con Design Builder.

Tabla 35. Características físicas de los principales elementos constructivos que componen la Capilla del Cristo de Conxo.

Elemento constructivo	Material	b [m]	Detalle constructivo e imágenes
Muros	Dos hojas de granito.	1,25	<div> <p>LEYENDA</p><ul style="list-style-type: none">01 - Hoja exterior - muro de mampostería de granito02 - Hoja interior - Sillares de granito03 - Enlosado de granito e=20-30cm04 - Terreno05 - Canal de drenaje perimetral al muro norte<p>Sección de muro. Fuente: la autora de la tesis.</p></div>

b: espesor del elemento [m]

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA Mª DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Elemento constructivo	Material	b [m]	Detalle constructivo e imágenes
Solado interior	Solado de granito sobre terreno	0,30
Ventanas	Dos hojas de vidrio separadas para permitir ventilación	variable

6.2.1.b. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

En el capítulo 5 “*Metodología*”, apartado 5.3.2 “*Parámetros materiales*”, se detallaba la cantidad de muestras tomada en cada edificio, a qué ensayo va destinada cada muestra, qué valores se obtienen de cada ensayo, y la finalidad de estos valores.

En la Tabla 36 siguiente se recuerda el número de muestras tomadas en el caso 2: Capilla de Conxo. A diferencia del caso 1, en este caso se necesitaron menos muestras porque ya existían ensayos de caracterización mineralógica, lo que permitió tomar menos cantidad de muestra, simplificando el problema de alterar los valores patrimoniales.

Tabla 36. Relación de muestras recogidas en la Capilla de Conxo

Código	Fecha de toma	Material	Estado ¹	Lugar extracción	Ensayo ²
X01	17/03/2015	Granito	C	5100_0	EH4
X02	17/03/2017	Granito	C	5100_0	EH1, EH2, EH3, EH4
X03	17/03/2017	Granito	C, E	5100_0	EH1, EH2, EH3, EH4
X04	17/03/2015	Granito		5100_0	EH2

Figura 203. Planta de la capilla de Conxo. Toma de muestras. Planos redibujados por la autora de la tesis en base a la planimetría existente de la arquitecta Alicia Noya.

¹ La traducción de los códigos empleados para denominar el estado en el que se encontraba la muestras cuando se tomó en el edificio se recogen en la tabla 8 del capítulo 5 “*Metodología*”.

² La traducción de los códigos empleados para denominar los ensayos que se llevaron a cabo con cada una de las muestras se recogen en la tabla 8 del capítulo 5 “*Metodología*”.

Las muestras se tomaron en dos puntos, una esquina del muro norte, y una losa bajo el coro, aprovechando la realización de otra serie de ensayos que se estaban llevando a cabo en ese momento en la Capilla para la redacción de un estudio sobre las humedades que afectaban a la capilla³(García-Morales, Otero-Ortiz de Cosca et al. 2016).

En los apartados siguientes se detallan los resultados concretos de los ensayos realizados en las muestras de este caso 2. En primer lugar, se explican los resultados de la caracterización mineralógica. En segundo lugar, se explican los resultados obtenidos en los diferentes ensayos hídricos llevados a cabo en las muestras de piedra.

Caracterización petrográfica y mineralógica de la roca empleada en la Capilla del Cristo del Monasterio de Santa María de Conxo.

Además de los ensayos realizados específicamente para esta investigación se tiene información del estado del granito de la capilla gracias al informe *“Análisis del enlosado granítico de la Capilla del Santo Cristo del Monasterio de Santa María de Conxo (2013)”* realizado por el *Grupo de Estudios Medioambientales aplicados al Patrimonio de la Universidad de Santiago de Compostela (GEMAP-USC)*, firmado por Beatriz Prieto Lamas⁴. Del análisis mediante Difracción de Rayos X (DRX) se desprende que los principales constituyentes de las muestras de roca analizadas son: cuarzo, feldespatos y micas, constituyentes principales de las rocas graníticas (Figura 205 a Figura 208). También se detectó la presencia de yeso (sulfato cálcico). No se detectó ningún mineral resultante de la alteración de los minerales primarios, lo que indica que no se ha producido alteraciones de las rocas debida a procesos de meteorización.

La ubicación de las muestras tomadas en la capilla para el análisis DRX se muestra en la Figura 204.

³ Los resultados de estos estudios se pueden ver publicados por el Consorcio de Santiago en el libro *“Investigación sobre el oscurecimiento húmedo que afecta a la capilla del Cristo del Monasterio de Santa María de Conxo”* Cuadernos Técnicos. Consorcio de Santiago. ISBN: 978-84-16753-03-1.

⁴ Este informe tiene como objetivo determinar los agentes responsables del aspecto permanentemente húmedo que presenta la capilla. Para ello, el informe recoge un análisis del contenido en sales solubles en las losas y de materia orgánica. Las pruebas que recoge son: estudio de la conductividad eléctrica, estudio mineralógico mediante DRX y estudio mediante microscopio electrónico de barrido (SEM) con microsonda de fluorescencia de rayos X (EDX). Las conclusiones de este informe indican que las causas del aspecto húmedo que presenta el enlosado de la capilla se debe a la presencia de sales solubles y materia orgánica. Estas sales solubles son higroscópicas, por lo que absorben la humedad de la atmósfera y se disuelven. Dado que en la capilla existen unas condiciones de humedad relativa alta estas sales van a permanecer siempre solubilizadas.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Figura 204 Imagen del muestreo realizado en la capilla para el “Análisis del enlosado granítico de la Capilla del Santo Cristo del Monasterio de Santa María de Conxo (2013)” realizado por el Grupo de Estudios Medioambientales aplicados al Patrimonio de la Universidad de Santiago de Compostela (GEMAP-USC), firmado por Beatriz Prieto Lamas.

Figura 205. Difractograma de rayos X de una de las muestras (A1). Fuente: “Análisis del enlosado granítico de la Capilla del Santo Cristo del Monasterio de Santa María de Conxo (2013)” realizado por el Grupo de Estudios Medioambientales aplicados al Patrimonio de la Universidad de Santiago de Compostela (GEMAP-USC), firmado por Beatriz Prieto Lamas.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Figura 206. Difractograma de rayos X de una de las muestras (B1). Fuente: “Análisis del enlosado granítico de la Capilla del Santo Cristo del Monasterio de Santa María de Conxo (2013) realizado por el Grupo de Estudios Medioambientales aplicados al Patrimonio de la Universidad de Santiago de Compostela (GEMAP-USC), firmado por Beatriz Prieto Lamas.

Figura 207. Difractograma de rayos X de una de las muestras (C1). Fuente: “Análisis del enlosado granítico de la Capilla del Santo Cristo del Monasterio de Santa María de Conxo (2013) realizado por el Grupo de Estudios Medioambientales aplicados al Patrimonio de la Universidad de Santiago de Compostela (GEMAP-USC), firmado por Beatriz Prieto Lamas.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Figura 208. Difractograma de rayos X de una de las muestras (D3). Fuente: “Análisis del enlosado granítico de la Capilla del Santo Cristo del Monasterio de Santa María de Conxo (2013) realizado por el Grupo de Estudios Medioambientales aplicados al Patrimonio de la Universidad de Santiago de Compostela (GEMAP-USC), firmado por Beatriz Prieto Lamas.

Del estudio mediante SEM-BSE realizado en una de las muestras tomadas en la superficie de una losa, reveló la presencia carbono en la zona 1 de la Figura 209. En los puntos 2, 3 y 4 se encuentran elementos constituyentes del cuarzo y aluminosilicatos (feldespato y micas), además de hierro, pero también se detecta azufre y cloro, que pudieran estar presentes en forma de sulfatos y cloruros, respectivamente.

Figura 209. Arriba imagen SEM-BSE realizado sobre la muestra A1. Abajo, espectros EDX correspondientes a los puntos 1 a 4, marcados en la imagen superior. Fuente: “Análisis del enlosado granítico de la Capilla del Santo Cristo del Monasterio de Santa María de Conxo (2013) realizado por el Grupo de Estudios Medioambientales aplicados al Patrimonio de la Universidad de Santiago de Compostela (GEMAP-USC), firmado por Beatriz Prieto Lamas.

Ensayos hídricos

Los ensayos hídricos realizados para esta tesis, se llevaron a cabo en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (ETSAM-UPM).

Para la realización de los ensayos hídricos se emplearon 3 muestras, todas de la misma losa de granito, siendo la X03 de la parte superior de la losa, y las otras dos, de la parte inferior, en contacto directo con el terreno.

Como se ha explicado anteriormente, las muestras se han podido recoger durante los ensayos in-situ realizados en el enlosado de la capilla. Dos de las muestras se ha sometido a ensayos de absorción capilar (X02 y X03). La otra muestra se ha sometido a absorción de vapor de agua, mediante cámara húmeda (X01). En la Tabla 36 se resumen estos ensayos.

Respecto al procedimiento seguido para realizar estos ensayos, es necesario matizar que, las muestras empleadas no cumplen con la forma y tamaño estándar de la norma. Tal como se ha explicado en el capítulo 5 “*Metodología*”, se ha adaptado el ensayo a las posibilidades de los materiales que se podían extraer del edificio. Al igual que pasaba en el caso 1, al tratarse de un edificio histórico, las muestras que se han tomado son de pequeñas dimensiones. Además, en la mayoría de casos, el material que se extrae se encuentra degradado. Esto hace que las muestras no sean regulares. En cada uno de los ensayos que se describen en los apartados siguientes se explica cómo se ha ido adaptando el método a las posibilidades que ofrecen las muestras del edificio.

Tabla 37. Características físicas obtenidas de los ensayos hídricos realizados en muestras de material de la capilla del Cristo de St^a M^a de Conxo.

	X02	X03
Volumen aparente(V_b) [mm]	22,78	14,19
Densidad aparente (ρ_b) [kg/m ³]	2140	2138
Densidad real (ρ_r) [kg/m ³]	2692,98	2530,65
Porosidad abierta (f_0) [%] *	2,64	2,15
Coeficiente de absorción A_b [%]	0,82	1,02

(*) Datos empleados en el cálculo de la evaporación, que se realiza en el apartado 6.2.3.

[EH1] Ensayos de absorción al agua por absorción capilar:

La norma que rige este ensayo es la UNE-EN 15801:2010. *Conservación del patrimonio cultural. Método de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad*. Complementariamente, si se trata de materiales pétreos, se podría considerar la UNE-EN 1925: 1999. *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad*.

Para el cálculo del coeficiente de absorción capilar, o sorptividad, que se puede obtener de este ensayo, la probeta ensayada tiene que ser regular. De esta manera se puede calcular la cantidad de agua absorbida en función del área de absorción (A).

Dado que las muestras del edificio no son regulares, al igual que sucedía en el caso 1, el cálculo del coeficiente de absorción capilar no tiene un valor fiable⁵. No obstante, puede emplearse el ensayo para conocer la curva de absorción capilar, que nos indica el comportamiento de la piedra frente al agua. En este caso de estudio ha resultado un dato revelador del estado de conservación de la misma, pues algunas de las muestras analizadas tienen una capacidad de absorción que no es habitual para el granito, que se caracteriza por un coeficiente de absorción bajo.

Para realizar este ensayo en la capilla de Conxo se han empleado dos muestras de granito de la misma pieza del enlosado, una de las muestras se tomó de la parte inferior de la losa (X02) y otra de la parte superior (X03). Comparando ambas curvas (Gráfica 152), se puede ver que la muestra X02, en contacto con el terreno, presenta una absorción algo menor que la X03. Esto se debe a una contaminación por sales que se encuentra en la superficie de las losas y que afecta a toda la capilla, haciendo que el granito sea altamente higroscópico y dificultando la capacidad de evaporación de las piezas de piedra. Esto, como se verá en los resultados del análisis higrotérmico, afecta a la capacidad de evaporación de la envolvente, condicionando el ambiente interior de la capilla. La primera prueba que demostró la existencia de la contaminación por sales que impedía el secado del solado fue un ensayo en el que, al levantar una de las losas por encima de la cota del resto, dejando que ventilase por la parte inferior (la menos contaminada, tal como muestra X02) la pieza completa se secaba notablemente en comparación con el resto de las losas (Figura 210). El estudio completo realizado sobre el solado se puede ver publicado el libro editado por el Consorcio de Santiago (García-Morales, Otero-Ortiz de Cosca et al. 2016)⁶

⁵ En el capítulo 6, “Caso 1: Iglesia de Santiago de Peñalba”, apartado 6.1.1 [EH1] “Ensayos de absorción capilar” se comenta con detenimiento este condicionante.

⁶ Además de la publicación escrita se ha dado difusión de los resultados de investigación por medio del Congreso Internacional YOCOCU 2016

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Gráfica 152. Curvas de absorción capilar de las muestras de piedra de la capilla del Cristo de Conxo.

Figura 210. Losa levantada tras unos meses notablemente más seca que las del entorno. Imagen tomada con fecha 16 de diciembre de 2015.

[EH2] y [EH3] Cálculo de la densidad aparente, porosidad abierta, y ensayo de absorción bajo presión (Inmersión):

Cálculo de la densidad aparente (ρ_b):

En primer lugar se seca la muestra en estufa, hasta que alcanza peso constante, que se denominará como peso seco (m_d). Para el cálculo de la masa saturada, por medio del ensayo de absorción capilar, se somete la probeta a la succión de agua. Cuando ésta ha alcanzado peso constante, se sumerge en agua a presión atmosférica, teniendo sobre la muestra una columna de mínimo 5cm de agua, según indican las prescripciones del ensayo UNE-EN 13755:2008. El peso obtenido se considera como peso saturado (m_s). Para obtener el peso sumergido (m_h), se pesa la muestra con balanza hidrostática. La fórmula de cálculo se puede consultar en el capítulo 5 “Metodología”. Los resultados de cálculo para el caso 2 se recogen en la Tabla 37.

Del ensayo de absorción a presión atmosférica [EH3] (capítulo 5 “Metodología”) se puede obtener el coeficiente (A_b). En este caso, la muestra X02 ha dado como resultado un coeficiente de absorción menor que la muestra X03, lo que corresponde con lo observado en los ensayos anteriores, siendo X03 una parte de la piedra que presenta mayor contaminación, con un coeficiente de absorción alto de $A_b=1,02\%$ para lo que suelen ser los valores normales en granito (Sanjurjo, Alves 2006, Esbert 2007). Este valor alto se ha asociado con la citada contaminación por sales.

Calculo de la porosidad abierta (f_0):

El valor obtenido para las muestras nos da una porosidad mayor en la cara inferior de la losa. Esto puede ser debido al alto estado de deterioro en que se encuentra el enlosado. La porosidad e interconexión del sistema de poros está condicionada por el grado de alteración de la roca. De esta forma, granitos petrográficamente diferentes pueden mostrar porosidades similares que varían con la meteorización (Sanjurjo, Alves 2006).

[EH4] Ensayo de sorción higroscópica (Cámara húmeda):

Las tres muestras (X01-X03) se han empleado para realizar ensayos de absorción a vapor de agua, mediante cámara húmeda, siguiendo la norma *Prestaciones higrotérmicas de los productos y materiales para edificación. Determinación de las propiedades de sorción higroscópica UNE-EN ISO 12571:2002*. En el capítulo 5 “Metodología” se explica el procedimiento llevado a cabo para realizar este ensayo, así como el material empleado.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA Mª DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Gráfica 153. Curvas de sorción higrorotmica para las muestras de la Capilla del Cristo de Stª Mª de Conxo.

En la Gráfica 153 se puede observar las curvas para las distintas muestras. Por un lado, las dos muestras tomadas en la cara inferior, menos contaminada (X01 y X02), se comportan de manera casi idéntica. Por el contrario, la muestra X03, de la cara superior de la losa, dibuja una curva de absorción mayor en todas las cámaras en general, y especialmente a 98% de humedad relativa.

Esto se debe a la alta contaminación que tiene el enlosado y parte de los muros en su superficie con nitratos, provenientes de la materia orgánica del cementerio anexo. Como se ve en las Gráfica 154 y Gráfica 155, X03, que se encuentra en la capa superficial de la losa, tiene siempre mayor facilidad para captar el vapor de agua contenido en la cámara húmeda. El tiempo en el que se estabilizan las tres piedras es más o menos similar, tanto en la cámara H=R75% como HR=98%. En ambas gráficas, las muestras recogidas en la cara interior del solado se comportan de manera parecida. Esto viene a confirmar que la contaminación se produce en la cara más superficial.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Gráfica 154. Curvas de sorción higroscópica que muestran el incremento de contenido en humedad [%] frente al tiempo en cámara de 75%HR, para las muestras de la Capilla del Cristo de St^a M^a de Conxo.

Gráfica 155. Curvas de sorción higroscópica que muestran el incremento de contenido en humedad [%] frente al tiempo en cámara de 98%HR, para las muestras de la Capilla del Cristo de St^a M^a de Conxo.

Conclusiones generales a los ensayos hídricos:

De la capilla de St^a M^a de Conxo, se puede concluir que se trata de un granito muy deteriorado, sobre todo superficialmente, y que se encuentra altamente contaminado superficialmente por sales de nitrato, que desaparecen en profundidad. Como se ha explicado en el capítulo de antecedentes y estado de la cuestión, existe un número importante de publicaciones que demuestran que la contaminación por sales afecta a la capacidad de evaporación y secado de la piedra. Por tanto, aunque el objeto principal de este trabajo de investigación no es la caracterización del comportamiento de las sales higroscópicas, este dato debe tenerse en cuenta para realizar el análisis adecuado de los datos que se obtienen de la monitorización, así como del cálculo de evaporación de los muros. Además, el conocimiento de esta alteración permitirá discernir la certidumbre de los datos que se obtengan de la simulación por ordenador, dado que el software no está pensado –ni tiene como objeto- contar con este tipo de alteraciones.

6.2.1.c. ESTUDIO DEL CLIMA DE SANTIAGO DE COMPOSTELA

El clima de Santiago de Compostela, es del tipo Clima Oceánico Húmedo. Se caracteriza por veranos mayormente despejados, no muy calurosos e inviernos fríos, húmedos y parcialmente nublados. La temperatura media anual oscila entre los 5°C y los 25°C. No suelen producirse temperaturas por debajo de los 0°C, ni tampoco supera los 30°C. La época más cálida se prolonga entre finales de junio hasta mediados de septiembre, con una temperatura máxima promedio de 22 °C y una mínima promedio de 14°C. La temporada más fría del año se prolonga entre mediados de noviembre hasta principios de marzo, siendo la temperatura máxima promedio menor de 14°C.

En este apartado se expone el estudio del clima de Santiago de Compostela, lugar en el que se ubica la Capilla del Cristo del Monasterio de Santa María de Conxo. Los datos que se explican a continuación pertenecen al período monitorizado, que abarca desde el mes de julio de 2017 al mes de junio de 2018.

Detalles de la estación meteorológica:

Los datos meteorológicos se han tomado de la estación Santiago Eoas, situada a 3km del Monasterio. Las coordenadas de esta estación son: Latitud 42.876 WGS84, longitud: -8.55944 WGS84, la altitud (255msnm) es igual que la del edificio, por lo que, en este caso de estudio, la estación meteorológica tiene buena similitud.

La estación cuenta con: termómetro para la detección de la temperatura, geotermómetro para la temperatura del suelo, barómetro para la presión, anemómetro y anemógrafo para la dirección e intensidad del viento, tanque y evaporímetro para evaporación, psicrómetro para precipitación, heliógrafo de Campbell-Stokes para insolación y actinógrafo para radiación. Algunos de los aparatos se disponen en una garita Stevenson para protegerlos.

Análisis de los datos climatológicos:

La temporada de mayores precipitaciones se prolongan durante 8 meses, desde finales de septiembre hasta finales de mayo, con una probabilidad de más del 25%. La mayor probabilidad se produce en enero, con más de 40%. El tipo más común de precipitación en Santiago de Compostela es aquella producida por lluvia, sin nieve.

La velocidad promedio del viento por hora en Santiago de Compostela tiene variaciones estacionales leves, a lo largo del año. La época del año más ventosa, de media, se produce entre finales de octubre y principios de mayo, prolongándose alrededor de 6 meses. El día más ventoso es, por promedio, se produce a finales de diciembre. El período más calmado del año se produce durante los meses de primavera y hasta otoño, como promedio desde principios de mayo hasta finales de octubre.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

La dirección de viento más frecuente en Santiago es Norte, durante más de 6 meses al año, desde finales de marzo hasta principios de octubre, con una probabilidad media superior al 50%. El viento con dirección Sur se produce con una probabilidad del 43% durante los meses de octubre a marzo.

En la Tabla 38 se describen las medias mensuales de los principales parámetros climáticos. Las medias corresponden a los meses estudiados. La temperatura y la humedad relativa se han calculado mediante monitorización con registradores situados en dos puntos del exterior de la iglesia, en dos orientaciones diferentes para asegurar una media más precisa.

Tabla 38 Medias mensuales de los principales parámetros para los meses estudiados en la capilla del Cristo de S^a M^a de Conxo.

Mes	T [°C] media	HR [%] media	v [m/s] media	Pp total [mm]
Julio 2017	19,07	77,48	7,30	8,80
Agosto 2017	19,37	74,29	7,06	24,90
Septiembre 2017	16,17	82,30	6,08	33,90
Octubre 2017	16,51	74,52	7,14	52,20
Noviembre 2017	10,40	83,33	6,77	100,70
Diciembre 2017	8,69	87,55	8,27	243,90
Enero 2018	8,93	89,94	8,59	145,60
Febrero 2018	7,14	82,18	8,45	169,00
Marzo 2018	8,18	85,97	11,73	393,70
Abril 2018	11,38	82,83	9,78	204,60
Mayo 2018	14,40	77,23	7,31	28,30
Junio 2018	17,11	85,24	6,31	119,60

En el caso de Santiago, se trata de un año particularmente seco, a excepción de los meses de invierno, que presentan una pluviometría mayor, aunque baja comparada con los registros de años anteriores (Gráfica 156) . Al igual que sucedía en el caso 1, se produce un pico de lluvia importante en el mes de diciembre, que coincide con un día de fuertes tormentas.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Gráfica 156. Evolución de la pluviometría [mm] durante el período monitorizado, desde el mes de julio de 2017 hasta el mes de abril de 2018. Los días, del eje de abscisas se han representado en días julianos. Gráfica realizada con los datos proporcionados por la estación meteorológica

Los meses con mayor temperatura media durante el periodo monitorizado han sido julio y agosto de 2017. La temperatura comienza a descender a partir de agosto, pero el descenso es más acusado a partir del mes de octubre, apreciándose en los registros de temperatura interiores, como se explica en el apartado 6.2.2.

Las temperaturas medias mínimas se dan en los meses de febrero y marzo, pero sin bajar de los 0°. La temperatura máxima registrada es de 36°C, en agosto, y la mínima de -0,4 °C en marzo (Gráfica 157).

Gráfica 157 Evolución de la temperatura [°C] durante el período monitorizado, desde el mes de julio de 2017 y hasta el mes de abril de 2018. Los días, del eje de abscisas se han representado en días julianos. Gráfica realizada con los datos proporcionados por la estación meteorológica.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Gráfica 158 Evolución de la velocidad del viento [m/s] durante el período monitorizado, desde el mes de julio de 2017 y hasta el mes de abril de 2018. Los días, del eje de abscisas se han representado en días julianos. Gráfica realizada con los datos proporcionados por la estación meteorológica.

Los mayores vientos se producen en el mes de marzo, con una velocidad media de 11,73 m/s, coincidiendo además con el máximo acumulado en pluviometría. En los meses de agosto y septiembre se producen vientos de menor entidad, de entre 5 y 10 m/s (Gráfica 158).

Gráfica 159. Registros de (R_s) radiación solar [MJ/m^2] registrada entre los meses de julio de 2017 y abril de 2018, según la estación meteorológica. En el eje de abscisas se ha expresado el tiempo en días julianos.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Gráfica 160. Evolución de la humedad relativa (HR) durante el período monitorizado, desde el mes de julio de 2017 y hasta el mes de abril de 2018. Los días, del eje de abscisas se han representado en días julianos. Gráfica realizada con los datos proporcionados por la estación meteorológica.

6.2.1.d. DESCRIPCIÓN DE LA INSPECCIÓN Y MONITORIZACIÓN DEL CASO 2

Hipótesis establecidas para el caso 2

Tras una primera inspección del edificio se establecen las hipótesis que se deben responder. Todas las cuestiones tienen relación con el comportamiento higrotérmico del edificio y, por tanto, con condicionantes sobre el comportamiento evaporativo del mismo.

- ¿Cómo ventila la Capilla?
- ¿Es suficiente la ventilación?
- ¿Es el ambiente exterior propicio para la disipación de la humedad producida por la evaporación en el interior?
- ¿Afecta el cementerio y la zona enterrada al muro norte del edificio?

Para responder a estas hipótesis sobre la Capilla del Cristo de Conxo se estudian aquellos fenómenos –la contaminación por sales, la ventilación, la absorción capilar- que condicionan el comportamiento higrotérmico del edificio, y que se describen a continuación:

1º La capacidad de ventilación del edificio y concretamente de la Capilla

a) Descripción de los condicionantes para la ventilación

Se trata de una capilla de gran tamaño, bastante esbelta. Cuenta con un total de 4 ventanas con ventilación constante (Tabla 35), con una superficie media de huecos de 1m² cada una de ellas, y dos ventanas abatibles en el coro, que están cerradas todo el año. Esto supone un porcentaje menor a 1 % de hueco respecto a macizo, lo que sugiere un edificio con probable dificultad para ventilar. Por otro lado, en el camarín anexo se encuentran 2 ventanas en la planta baja, que comunica con la capilla, pero que se encuentran cerradas sin permitir ventilar todo el año.

Para acceder a la capilla se hace desde la puerta principal, que comunica con la iglesia. Al no encontrarse la puerta comunicada con el exterior tiene mayor dificultad para la ventilación natural, pues funciona como una habitación dentro de un espacio mayor. Además, por lo que se ha podido conocer, la capilla suele permanecer con la puerta cerrada a lo largo del día, a excepción de las horas de culto, o cuando se realiza la limpieza.

Se cree que las aberturas en la cúpula sirvieron en algún momento como tiro natural, pero a día de hoy, se encuentran cerradas. La simulación higrotérmica servirá para comprobar la incidencia de éstas en la ventilación del edificio.

b) Hipótesis sobre la ventilación natural

Mediante las inspecciones manuales se ha podido medir mediante anemómetro que el caudal de aire entrante a través de la puerta principal es bajo. Además, la capacidad de ventilación de las ventanas es limitada, pues no todas se pueden abrir (Tabla 1). El clima de Santiago de Compostela es otro condicionante importante, pues es muy húmedo la mayoría del año, lo que dificulta una ventilación efectiva.

c) Sistema de trabajo y análisis sobre la ventilación natural en Conxo

La dificultad para ventilar es algo que ya se observó en la primera campaña de monitorización realizada entre 2014 y 2015 durante los trabajos realizados para el Consorcio de Santiago, por lo que, en esta segunda campaña de toma de datos, con mayor número de dispositivos de recogida de datos, se pretende confirmar este hecho.

Al contrario del caso de estudio 1, esta capilla presenta mayor dificultad a la hora de realizar una hipótesis efectiva sobre cómo funciona su ventilación, debido a su morfología y condicionantes más complejos. Para poder averiguar la efectividad de la ventilación natural se emplean dos fuentes de datos: En primer lugar, la monitorización, que aporta un primer análisis de cómo fluctúa la temperatura y la humedad ambiental, por otra parte, se realizaron simulaciones por ordenador para poder entender su funcionamiento de manera global, estas se explicarán en el apartado 6.2.3. Esta es una fuente de datos muy interesante para casos más complejos como este, aunque presenta algunas limitaciones que se comentarán en el apartado correspondiente.

2º La contaminación por sales del solado de la capilla y su afección sobre la capacidad de evaporación de la Capilla

a) Descripción del solado, el estado de la lesión y su alcance

A continuación, se hace una descripción de la forma y alcance de la lesión por contaminación por sales que presenta la capilla. Como ya se ha explicado, el objetivo de la tesis no es el estudio de las lesiones debidas a la contaminación por sales, sino evaluar el comportamiento evaporativo del edificio. No obstante, debe tenerse en cuenta que existe esta lesión en la capilla y que condiciona la capacidad de evaporación de la envolvente, por lo que este factor debe ser tenido en cuenta a la hora de analizar los datos de monitorización y realizar los consiguientes cálculos.

La capilla presenta un oscurecimiento en todo el solado debido a la presencia de nitratos (Gráfica 154, Figura 193, Figura 204 y Figura 210), tal como revelaron las pruebas realizadas in-situ. La extensión de la contaminación se manifiesta también en las paredes, especialmente en el muro norte, que linda con el cementerio.

b) Hipótesis sobre cómo afecta la contaminación por sales a la evaporación y secado

Como se ve en las gráficas de los ensayos hídricos, la contaminación por sales hace que se trate de una piedra altamente higroscópica que absorbe el vapor de agua del ambiente con gran facilidad. Dada la atmósfera húmeda motivada por el clima de Santiago de Compostela, parece que la piedra tiene dificultad para evaporar el agua que retiene. Esto se suma la hipótesis anterior, en que el régimen de uso del edificio y la propia forma no facilitan la evaporación. Todo ello parece condicionar el comportamiento evaporativo del edificio, pero es necesario estudiar los datos de monitorización para cuantificar el nivel de afección de la lesión al comportamiento evaporativo global de la capilla, pues es un condicionante más dentro del conjunto.

c) Sistema de trabajo

Estudiando de manera conjunta la monitorización y la simulación ambiental del edificio se evaluará cuál es el nivel de afección de la contaminación por sales al comportamiento evaporativo del edificio.

3º La capacidad de evaporación y secado de los muros condicionada por las lesiones

El muro norte presenta lesiones debidas a una serie de filtraciones que se produjeron por el encuentro de las cubiertas de los nichos con el muro, en el punto en que se encuentran adosados éstos. Además, existían algunas filtraciones del terreno del cementerio al interior de la capilla que se solventaron con el drenaje perimetral realizado en el proyecto de intervención de la arquitecta Alicia Noya A pesar de este drenaje, durante los trabajos de monitorización se han detectado algunos puntos en los que se producen filtraciones.

a) Descripción de los muros de la Capilla del Cristo

Se desconoce el relleno de los muros, pero estudiando la forma en que está dispuesta la piedra, así como sus encuentros, espesores de muro, talla etc., se cree que está compuesta por tres hojas: una interior de pequeño espesor, otra exterior de mayores dimensiones y una hoja intermedia de relleno (Tabla 35, sección tipo del muro de la capilla). La hoja interior está bien trabajada, parece no tener grandes espesores y la hoja exterior, que soporta las inclemencias del tiempo, al contrario de la interior, es de una talla de menor calidad, tal como se aprecia en las imágenes (Figura 199). La hoja interior parece de construcción posterior al solado, como si se tratase de un revestimiento interior, por lo que no se conoce si existe buena continuidad y traba entre esta hoja y

las otras dos (Figura 211). Esto es un dato relevante en cuanto a cómo el muro absorbe el agua del terreno o de la lluvia.

Figura 211. Pilastra en la que se observa cómo el solado pasa bajo el cerramiento interior de la capilla.

Dadas las primeras inspecciones manuales que se realizaron antes de la campaña de monitorización, se estimó que los mayores focos de humedad se encontraban en el muro norte, y puntualmente en algún punto localizado del muro sur⁷. Esto correspondía con lo esperado, según apuntaba el estudio de antecedentes de la capilla. Se cree que algunas de las filtraciones procedentes del cementerio persisten en la cota del encuentro del suelo con el muro. No se han medido valores altos a la altura del encuentro de las cubiertas de los nichos con el muro, por lo que es posible que la filtración por las cubiertas haya remitido.

b) Hipótesis sobre la capacidad de evaporación del muro norte

La hipótesis que se plantea para realizar la monitorización de los muros es que, los mayores aportes de agua por parte de la envolvente se deben al muro norte, especialmente en la cota del pavimento.

⁷ Las campañas de inspección y primeras pruebas de monitorización se realizaron entre 2014 y 2016.

c) Sistema de trabajo y análisis (cuadrícula)

Se decide colocar la cuadrícula de monitorización en el muro norte, en la zona señalada sobre el plano (Figura 212), por ser la que zona que presenta mayor grado de humedad, y por tanto, susceptible de ser la zona de mayor aporte de evaporación del muro.

Descripción del sistema de monitorización completo en la Capilla del Cristo del Monasterio de Santa María de Conxo.

Tras establecer los tres bloques de trabajo anteriormente comentados, se determina la cantidad de dispositivos necesarios para la monitorización, contabilizando un total de 13 data-loggers. Éstos se dispusieron en ambiente y sobre los muros. Los data-loggers colocados en ambiente se disponen a diferentes alturas para evaluar el gradiente higrorotmico del edificio. Los data-loggers sobre pared se disponen en cuadrícula para hacer un seguimiento de los focos de evaporación. Además de la monitorización higrorotmica se realizan mediciones con anemómetro del aire entrante por puertas y ventanas.

A continuación, en la Tabla 39 se describe la cantidad y ubicación de todos los sensores colocados en este edificio. Éstos se pueden ver ubicados también sobre la planta (Figura 212) y las secciones (Figura 213 y Figura 214).

Tabla 39. Numeración de los equipos registradores de humedad y temperatura en la Capilla del Cristo de Conxo

UBICACIÓN DATALOGGERS CONXO			
UBICACIÓN EDIFICIO	CÓDIGO DESIGN BUILDER	Nº DT	ALTURA [m]
MURO NORTE TRANSEPTO	7845_W_3	DT3	3
		DT4	0
		DT6	1,5
		DT7	0
		DT8	1,5
		DT9	3
MURO NORTE NAVE	295_WALL_3_1_0	DT10	0
		DT11	1,5
		DT12	3
MURO SUR TRANSEPTO	6926_WALL_5_0_0	DT1	3
		DT2	0
AMBIENTE	6926	W	6
EXTERIOR	EXTERIOR	DT5	6
		DTC1	6

Figura 212. Planta Capilla del Cristo de Conxo. Ubicación de los registradores de temperatura y humedad. Planos redibujados por la autora de la tesis para la explicación de resultados en base a la planimetría existente de la arquitecta Alicia Noya.

Análisis general del comportamiento higrotérmico detectado

Se realiza una evaluación general del comportamiento higrotérmico del edificio y se localizan los puntos (focos) con comportamiento anómalo, que deben ser analizados con detalle, de la misma manera que se hizo en el caso 1 con la iglesia de Santiago de Peñalba.

Figura 213. Sección AA'. Ubicación de data-logger sobre muro Norte. Planos redibujados por la autora de la tesis para la explicación de resultados en base a la planimetría existente de la arquitecta Alicia Noya.

Figura 214 Sección BB'. Ubicación de data-logger sobre muro Sur. Planos redibujados por la autora de la tesis en base a la planimetría existente de la arquitecta Alicia Noya.

6.2.1.e. PARÁMETROS PARA LA SIMULACIÓN DEL CASO 2 (DESIGN BUILDER)

En primer lugar, es importante aclarar, que, aunque las gráficas de simulación CFD obtenidas de Design Builder se encuentran en el apartado 6.2.4, la simulación se ha empleado en algunas fases previas:

- En el apartado 6.2.3.b: para obtener datos sobre la velocidad del aire en el interior del edificio, que serán usados para el cálculo de evaporación de los muros.
- En el apartado 6.2.3.c.: para obtener datos sobre las renovaciones de aire que hace diariamente el edificio, que serán usados para el análisis de la capacidad de disipación de la humedad.

Por ello, se ha considerado necesario, antes de los cálculos de evaporación, contar cómo se ha realizado la simulación de la capilla y cómo se ha validado el modelo, que luego se empleará para los cálculos de los apartados 6.2.3.b y 6.2.3.c.

En este apartado se describen todos los elementos que influyen en la simulación del edificio. Por un lado, se han estudiado las propiedades hídricas y térmicas de los materiales que componen la envolvente, especialmente de los muros, ya que en los siguientes apartados serán la parte de la envolvente objeto de cálculo de la evaporación. Por otro lado, se ha estudiado el funcionamiento de puertas y ventanas, para conocer cómo influyen en la ventilación, así como la morfología y dimensiones generales del edificio. Otros parámetros como la ubicación, orientación del edificio y clima han sido de gran importancia para obtener resultados precisos en el análisis higrotérmico y la simulación. En el capítulo 5 “Metodología” se explicaban todos estos parámetros con detenimiento. En los apartados siguientes se enumeran los valores concretos para el caso 2 de la capilla del Cristo del Monasterio de Santa María de Conxo.

Propiedades de los materiales

Con los datos históricos e informes de reparaciones del edificio, la toma de datos in-situ y los ensayos sobre los materiales realizados en laboratorio se obtuvieron los parámetros necesarios para introducir en el programa, en lo que respecta a materiales.

Los muros se introducen en el programa como elementos de doble hoja de granito con un relleno interior (Tabla 1, ver sección tipo del muro). Como ya se explicaba en este mismo apartado en el caso 1 - Iglesia de Santiago de Peñalba, el programa tiene ciertas limitaciones a la hora de especificar los materiales que componen el muro. Esto no se debe a un error de precisión del programa, sino a dos factores: Por un lado, el objeto principal del programa es el estudio del ambiente del edificio, y con ese fin se emplea en este trabajo de investigación. Por otra parte, la composición irregular de este tipo de

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

estructuras históricas dificulta que se pueda conocer y definir con precisión la envolvente. En cualquier caso, dado que el objetivo final con que se utiliza este programa, no se verán afectados los resultados, tal como se ve en el apartado de validación.

El espesor medio de los muros es de $b = 126$ cm. El programa permite dibujar zonas con espesores irregulares, con lo que se puede detallar aquellos puntos en los que el muro tiene un grosor variable.

Como se ha explicado en el capítulo 5 “Metodología” y en el caso 1, el programa permite el cálculo con HAM, lo que resulta muy conveniente en este tipo de edificios, en los que el ambiente interior se ve altamente condicionado por las fluctuaciones a través de su envolvente. Para poder realizar estos cálculos es necesario conocer las propiedades de transmisión de calor y humedad de los materiales que existen en la envolvente. En la tabla 11 del capítulo de metodología se describían las propiedades de los materiales que es necesario conocer para la simulación. El programa cuenta con una base de datos de propiedades de los materiales más comunes, pero el cálculo resulta impreciso si no se adaptan estas propiedades a las reales que se han podido ensayar en las muestras del edificio. Algunas de ellas se han obtenido de los ensayos antes detallados. Otras, se han tomado de las tablas de datos que existen en diferentes fuentes validadas (Hens, Ojanen et al. 1996). Dado que los datos que figuran en las tablas se realizan sobre materiales no alterados, se plantea en este trabajo que una futura investigación debería abordar el estudio completo de todas las propiedades de muestras obtenidas de edificios

Se exponen a continuación los valores empleados para los materiales de la Capilla de Conxo:

Condiciones iniciales para la simulación

Las simulaciones se realizan, como en los casos anteriores, sin sistemas HVAC, pues la capilla no dispone de ninguno de ellos. El único factor que condiciona los intercambios higrotérmicos del ambiente interior con el exterior es la ventilación natural. Como se verá en el análisis higrotérmico de la capilla, las variaciones diarias se producen sobre todo motivadas por lento intercambio entre el interior y el exterior, a través de los muros, pero no se notan cambios rápidos de rango horario como los que se veían en el caso 1 para la iglesia de Santiago de Peñalba. Se ha podido saber que la capilla permanece cerrada la mayoría del tiempo, a excepción de las horas de limpieza (L-V de 10:00-12:00h), por lo que la respuesta de los data-loggers concuerda con lo esperado. Como se ha visto en el apartado 6.2.1, las ventanas de la iglesia son pocas y tienen poca capacidad de ventilación. La única puerta de acceso, es la que comunica por la iglesia, por lo que los mayores intercambios de aire se producen por ésta. Al no ser un hueco directo al exterior, la ventilación se complica.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Teniendo en cuenta todos estos aspectos, se han programado los datos para ventilación natural que se introducen en el programa de la siguiente manera:

En primer lugar, se han tenido en cuenta los horarios de apertura y cierre de la iglesia (Tabla 40), pues los intercambios de la capilla con el exterior que se puedan producir por la puerta se producen por medio de la iglesia, tal como se puede ver en el plano de planta. En segundo lugar, se ha programado la capilla para que se abra con su horario habitual de 10:00 a 12:00h.

Tabla 40. Horarios de verano (1 junio-30 septiembre) de la iglesia del monasterio de Santa María de Conxo (Santiago de Compostela).

L	M	X	J	V	S	D
09:00-12:00	09:00-12:00	09:00-12:00	09:00-12:00	09:00-12:00	09:00-12:00	09:30-10:00
18:00-20:30	18:00-20:30	18:00-20:30	18:00-20:00	18:00-20:00	18:00-20:00	20:00-21:00

**Días que la iglesia permanece cerrada*

Tabla 41. Horarios de invierno (1 octubre-31 julio) de la iglesia del monasterio de Santa María de Conxo (Santiago de Compostela).

L	M	X	J	V	S	D
*	*	08:30-12:00	08:30-12:00	08:30-12:00	08:30-12:00	09:30-10:00
*	*	18:00-21:00	18:00-21:00	18:00-21:00	18:00-21:00	20:00-21:00

**Días que la iglesia permanece cerrada*

Por otro lado, se realiza un pre-cálculo de las renovaciones que el edificio realiza, en base a las mediciones realizadas con anemómetro, los cálculos de volumen y dimensiones de huecos. Las fórmulas se han explicado extensamente en el capítulo 2 “Fundamentos teóricos”. Este pre-cálculo servirá al programa como condiciones iniciales para la simulación.

Otro de los parámetros importantes, son los caudales de aire de renovación que entran por puertas y ventanas (Tabla 42, Tabla 43). Estos parámetros pertenecen a las condiciones de contorno o iniciales que se deben introducir en el programa. En esta investigación se ha procedido mediante la medición con anemómetro de estos caudales. El tipo de anemómetro empleado permite realizar medición continua, a modo de data-logger (almacenando un dato por segundo) y almacenar los datos en un archivo de formato editable. Con estos datos, se ha realizado una media de valores horarios que será la que se introduce en el programa. Se ha realizado todas las mediciones necesarias para cada una de las simulaciones que se han llevado a cabo, atendiendo a lo especificado en la metodología de esta tesis.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Como se puede ver en la siguiente gráfica, la velocidad del aire en el interior de la capilla es muy baja. El día 16 de agosto de 2017 se realizó una prueba en la que, primero se midió el caudal entrante por la puerta de acceso de la capilla. Los valores obtenidos son bajos, siendo el máximo 0,04m/s. Al alejar el anemómetro de la puerta tan solo 3 metros, el aire reducía su velocidad a 0m/s. En el momento que se cierra la puerta, la circulación de aire se interrumpe. En la gráfica también se ha representado la temperatura, que se puede ver que es muy constante.

Gráfica 161. Velocidad de aire medido en la capilla del Cristo del Monasterio de Conxo el día 16/08/2017 durante una prueba de ventilación.

Tabla 42. Resumen de ventanas, St^a M^a de Conxo

VENTANAS	Dimensiones [cm]	Ubicación	Altura [cm]
V01	95 x 121	7845_W_3	551
V02	67 x 110	127_WALL_3_0_0	488
V03	40 x 77	295_WALL_3_1_0	553
V04	48 x 90	295_WALL_3_1_0	422
V05	95 x 121	6926_WALL_5_0_0	551
V06	67 x 110	127_WALL_5_0_0	488
V07	47 x 90	127_WALL_5_0_0	378
V08	47 x 90	127_WALL_3_0_0	378
V10	70 X 90	5155_WALL_2_0_0	378
V11	47 x 90	127_WALL_5_0_0	666
V12	47 x 90	127_WALL_3_0_0	666
V13	70 X 160	5155_WALL_2_0_0	581

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Tabla 43. Resumen de puertas, St^a M^a de Conxo

PUERTAS	Dimensiones [cm]	Ubicación
P01 (Iglesia)	183 x 287	6926_PARTITION_4_0_0
P02 (Sacristía)	90 x 190	6926_PARTITION_5_0_0
P03 (Coro)	100 x 185	6926_PARTITION_5_0_0
P04 (Camarín)	105 x 250	127_PARTITION_2_0_0
P05 (Camarín)	105 x 250	127_PARTITION_2_0_0

Por otra parte, la simulación debe iniciarse con unas condiciones de contorno de temperatura adecuadas a la realidad.

El período elegido para realizar las simulaciones va desde el mes de agosto de 2017 al mes de julio de 2018. En el apartado 6.2.4 “*Evaluación del comportamiento evaporativo mediante simulación por ordenador*” se resumen los valores empleados como condiciones de contorno para cada una de las simulaciones realizadas.

Los condicionantes del entorno próximo al edificio son importantes a la hora de realizar la simulación. Ya se ha comentado que uno de los principales condicionantes para la capilla es la iglesia, por lo que se ha modelado el cuerpo completo de iglesia y capilla para realizar la simulación. Por otro lado, adosado a la zona sur-este de la capilla, y detrás del claustro del monasterio se sitúa un edificio perteneciente al servicio de salud de la Xunta de Galicia. Este edificio deja en sombra el muro sur de la capilla (Figura 215).

Figura 215. Zona en sombra por el edificio construido en el lado sur.

En el lado norte se tiene en cuenta a la hora de la simulación que el terreno entierra una parte del muro y además se ubican los nichos adosados a éste (Figura 216).

Figura 216. Nichos adosados al muro norte de la capilla.

Como ya se comentaba en el desarrollo de las condiciones de simulación para el caso 1, el programa ofrece una amplia base de datos dentro de la cual existen archivos climáticos de diferentes localizaciones geográficas. En este caso, la ciudad más próxima que cuenta con archivo climático implementado es la ciudad de A Coruña, que se encuentra a 75Km. Como en el caso 1, se ha considerado necesario realizar un archivo climático que se ajuste lo máximo posible al clima de Santiago. El modo en que se preparan estos datos se cuenta en el capítulo 5 “*Metodología*”. En este caso, para los datos de temperatura y humedad se emplearon los datos de monitorización del exterior de la capilla. Los datos de radiación solar, pluviometría, viento, etc. se tomaron de la estación meteorológica más cercana. Santiago EOAS. La creación de este archivo climático propio proporcionó una mejora notable en los resultados de la simulación.

Validación de la simulación para el caso 2

Para comprobar la precisión del modelo calculado por ordenador, se comparan los datos de simulación con los obtenidos con la monitorización. En las Gráfica 162 y Gráfica 163 se representan los resultados obtenidos mediante simulación (en líneas discontinuas) comparados con los datos medidos con los data-loggers para ese mismo día. Los data-loggers representados corresponden con dos puntos medidos en ambiente a dos alturas diferentes, DT12 a 1 metro, y DTW a 6 metros. La simulación de la Gráfica 162 representa la media del grado de humedad ambiental⁸. En la gráfica se puede ver cómo la simulación indica que el valor medio del ambiente de la capilla se encuentra entre los

⁸ Esta simulación no recoge valores para el grado de humedad en el camarín, solo se ha representado el grado de humedad simulado en el ambiente de la capilla.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

valores de grado de humedad medidos a 6 metros y 1m, aunque se acerca más a los valores de 1m. La línea azul representa el grado de humedad medido en el exterior.

Gráfica 162. Evolución del grado de humedad (W) entre los días 13 de septiembre de 2017 y 19 de septiembre de 2017. En la gráfica se representa el grado de humedad medido por distintos data-loggers colocados en el ambiente interior del edificio (DT12 y DTW), el registro del exterior (DT5 Exterior) y la simulación promedio del ambiente interior.

En la Gráfica 163 representa la temperatura medida en dos puntos del ambiente DT12 y DTW a dos alturas diferentes. Como en la gráfica anterior, la simulación del ambiente de la capilla se ha representado con una línea discontinua. En este caso, vemos que las fluctuaciones son menores que en el caso de la humedad. La temperatura a las dos alturas medidas casi no varía, y tampoco lo hace la simulación, aunque parece que es un poco más sensible el resultado de simulación que el de los data-loggers, posiblemente por el ajuste de las propiedades de los materiales introducidos.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Gráfica 163. Evolución de la temperatura (T) entre los días 13 de septiembre de 2017 y 19 de septiembre de 2017. En la gráfica se representa la temperatura medida por distintos data-loggers colocados en el interior del edificio (DT12 y DTW), el registro del exterior (DT5 Exterior) y la simulación promedio del ambiente interior.

6.2.2 ANÁLISIS HIGROTÉRMICO DEL CASO 2

Introducción

El análisis higrotérmico de la capilla del Cristo del Monasterio de Santa María de Conxo se va a desarrollar en el mismo orden que el caso de estudio anterior.

En primer lugar, se presentan los valores medios diarios de temperatura (T), humedad relativa (HR) y grado de humedad (W) de los puntos monitorizados para la capilla. Estos valores se ordenan por meses, de manera que se pueda ver cómo evoluciona el edificio a todo el período monitorizado. En este caso de estudio, se presentan los datos monitorizados desde el mes de julio de 2017 al mes de junio de 2018. En el apartado 6.2.1 “Estudio y descripción del caso 2” se describían la cantidad y ubicación de los data-loggers.

En primer lugar, en el apartado 6.2.2.a que analiza las tendencias generales para todo el período monitorizado. Posteriormente, se analizan las tendencias clasificadas por estaciones, para ver los cambios higrotérmicos que se producen en el interior del edificio, en relación con los cambios estacionales. Al final de ese apartado se ofrece un resumen de conclusiones de aquellas tendencias de comportamiento del edificio en relación con los cambios estacionales. Con este primer análisis de tendencias generales se consiguen detectar aquellos puntos que presentan un comportamiento anómalo dentro del conjunto general. Estos puntos son objeto de un estudio más pormenorizado a lo largo del apartado siguiente 6.2.2.g, destinado al análisis de tendencias diarias.

Es necesario matizar, antes de comenzar que, para simplificar la lectura de los datos, y para facilitar el análisis y comprensión de los mismos, se ha tomado una semana representativa de cada mes.

6.2.2.a ANÁLISIS ESTACIONAL: EVOLUCIÓN DE LAS TENDENCIAS GENERALES.

En las gráficas de este apartado se presentan los datos higrotérmicos de una semana representativa de cada mes para todo el período monitorizado. Cada una de estas semanas ofrece una idea de la tendencia de comportamiento del edificio a lo largo de todo el mes.

El edificio empieza a calentarse en primavera, en la Gráfica 167 se puede ver cómo la temperatura empieza a tener un ascenso notable a partir del mes de abril. La temperatura más alta se alcanza en el mes de agosto, coincidiendo con las máximas más altas del período monitorizado en el exterior. En el mes de septiembre comienza a hacerse notable el descenso de la temperatura y los puntos monitorizados en el interior descienden acompañando al exterior. Pero si se observa la curva de descenso del exterior entre los meses de septiembre a enero, se puede ver cómo el descenso de los puntos del interior es más lento, lo que señala la inercia térmica del edificio, que ha ganado calor en los meses cálidos. La diferencia de temperatura ambiente a 1 metro de altura y a 6 metros es de menos de 1 °C de media a lo largo del año. La temperatura interior sobre el muro sur a 3m (DT1) y sobre el muro norte a esta misma altura (DT9) es muy similar a lo largo del año, lo mismo sucede a 0m (DT2 y DT10). En los meses más cálidos, los puntos con mayor temperatura son los que se encuentran a mayor altura. Al igual que pasaba en el caso de estudio 1 esta estratificación de pierde en los meses más fríos. Esta estratificación se analizará en detalle en los apartados siguientes.

Gráfica 167 Evolución de la temperatura media diaria [°C] medida en diferentes puntos del interior de la capilla del Cristo y en el exterior. Se detalla una semana representativa de cada mes de todo el período monitorizado, desde el mes de julio de 2017, hasta junio de 2018.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

En cuanto al grado de humedad (Gráfica 168) es más alto en el exterior en los meses en que empieza a aumentar la temperatura, desde febrero hasta agosto, superando en algunos momentos al interior.

Gráfica 168 Evolución del grado de humedad medio diario [g/kg] medido en diferentes puntos del interior de la capilla del Cristo y en el exterior. Se detalla una semana representativa de cada mes de todo el período monitorizado, desde el mes de julio de 2017, hasta junio de 2018.

Cuando la temperatura del exterior empieza a descender, lo hace también el grado de humedad exterior, entre los meses de septiembre hasta enero. La diferencia media en grado de humedad entre el interior y el exterior a lo largo del año es $\Delta W_{\text{ini-ext}} = 0,80 \text{ g/kg}$. Existen dos puntos que presentan un grado de humedad más elevado que el resto durante todo el período monitorizado. Ambos puntos se encuentran a 0m, en el encuentro de los muros con el solado. El de mayor W tiende a ser el ubicado en la pared norte (DT10) que linda con el cementerio adosado a ese lado y el segundo el de la pared sur (DT2). En los meses más fríos, desde diciembre hasta abril, ambos puntos presentan un W muy similar y con una curva con tendencia estable (plana). Esto se puede deber al descenso de la temperatura y también a períodos más largos en que la capilla puede permanecer cerrada, esto se analizará en el apartado siguiente. En los meses más cálidos empiezan a comportarse de manera diferente. En el mes de julio, el data-logger del muro sur (DT2) está 2g/kg más alto que el muro norte (DT10), en el mes de agosto se empiezan a igualar y en el mes de noviembre el data-logger del muro norte (DT10) ha superado al muro sur (DT2). En el mes de septiembre se produce un descenso acusado de DT10 en el muro norte, que acompaña al descenso del exterior y del resto de puntos de la capilla, pero este descenso es menor en DT2. Esto podría deberse a la ubicación de los data-loggers, ya que DT10 se encuentra en un rincón más cercano a la influencia de

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

la puerta y DT2 está en una esquina donde es posible que no se mueva el aire con tanta facilidad. Esta hipótesis se trató de comprobar con las simulaciones por ordenador, calculando la velocidad del aire en la zona de DT10. Adelantando el resultado que se detalla en el apartado 6.2.4, la velocidad calculada en esa zona es 0m/s, por lo que debe existir alguna causa ajena, la cual no se ha podido identificar. El resto de puntos representados en la gráfica muestran una estratificación del grado de humedad en altura, como sucedía con la temperatura. Los puntos con mayor grado de humedad son los ubicados a mayor altura. La estratificación es menor en los meses más fríos.

Tabla 44 Medias mensuales de grado de humedad interior ($W_{med.Int}$) grado de humedad exterior ($W_{med.Ext}$), temperatura interior ($T_{med.Int}$), temperatura exterior ($T_{med.Ext}$), y diferencias entre interior y exterior en grado de humedad ($\Delta W_{int-ext}$) y temperatura ($\Delta T_{int-ext}$).

Mes	Grado de humedad [g/kg]			Temperatura [°C]		
	$W_{med.Int}$	$W_{med.Ext}$	$\Delta W_{int-ext}$	$T_{med.Int}$	$T_{med.Ext}$	$\Delta T_{int-ext}$
Julio	12,21	11,39	0,82	20,09	21,67	1,58
Agosto	12,21	11,42	0,79	20,74	21,64	0,89
Septiembre	10,73	9,17	1,55	18,93	18,30	0,63
Octubre	10,73	9,26	1,47	19,97	17,18	0,80
Noviembre	9,52	7,84	1,68	16,14	14,12	2,02
Diciembre	7,14	6,40	0,74	10,70	8,81	1,89
Enero	6,94	6,17	0,77	9,95	8,14	1,81
Febrero	6,91	6,81	0,10	9,32	9,44	0,13
Marzo	6,72	5,78	0,93	9,41	9,02	0,38
Abril	7,55	7,15	0,40	10,66	11,58	0,92
Mayo	7,77	7,43	0,34	12,59	12,44	0,15
Junio	12,32	12,36	-0,04	18,14	21,60	3,46

Inercia hídrica

En la Gráfica 169 se observa que se cumple que, a mayor grado de humedad del exterior, mayor grado de humedad en el interior. Pero, si se observan las líneas de tendencia de cada mes se ve que casi todos los meses tienden a ser horizontales. Cuanto más horizontal es la línea de la función que define la relación W_{int} vs. W_{ext} , el coeficiente que define la pendiente más se aproxima a 0, esto significa que no existen fuerzas externas (Camuffo, Sturaro et al. 1999). Por tanto, se puede ver que en el caso de la capilla del Cristo de Conxo la influencia del grado de humedad exterior sobre el interior se encuentra altamente atenuada. En el caso de estudio 1 sucedía al contrario y en que los meses más cálidos la pendiente era mayor señalando una relación interior-exterior clara. En este caso, las fluctuaciones más notables se producen en el mes de septiembre, pues la pendiente de la recta es más acusada. En el resto de meses, en general, hay una tendencia evidente a amortiguar las variaciones del exterior.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Gráfica 169 Relación entre el grado de humedad interior (W_{int}) y el exterior (W_{ext}) en los diferentes meses del año monitorizado.

Haciendo la media mensual de valores de grado de humedad, se puede simplificar la gráfica anterior (Gráfica 170) trazando una diagonal que indica dónde $W_{int} = W_{ext}$. Todas las medias mensuales son cercanas a la diagonal, lo que indica que existe una relación directa entre el grado de humedad del exterior y el del interior, pero casi todos los valores de grado de humedad están por debajo de la diagonal $W_{int} = W_{ext}$, lo que indica que el grado de humedad es mayor en el exterior que en el interior casi todo el año. Esto es un dato interesante, porque indica que el aire que pueda entrar en el interior en casi todos los momentos del año puede no tener capacidad de disipar el vapor acumulado en el interior. La “calidad” de este aire y su relación con la capacidad de disipación de la humedad interior se evalúa en el apartado 6.2.3.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Gráfica 170 Tendencias estacionales del grado de humedad, valores medios interiores (W_{int}) frente a valores medios exteriores (W_{ext}) para todo el período monitorizado. Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

Inercia térmica

La relación entre la temperatura interior y exterior en la capilla viene marcada porque: *a mayor temperatura exterior, mayor temperatura interior.*

Las líneas de tendencia de cada mes (línea discontinua en la Gráfica 171) con una tendencia a la verticalidad indica que las fluctuaciones en el exterior son mayores que en el interior, lo que significa que existe una importante amortiguación de la temperatura por parte del edificio.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Gráfica 171 Relación entre la temperatura interior (T_{int}) y el exterior (T_{ext}) en los diferentes meses del año monitorizado. Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

El edificio presenta gran inercia térmica, pues casi todo el año el interior está más caliente que el exterior, se evidencia la inercia térmica, pues los meses más fríos del año, como noviembre o diciembre, el edificio está más caliente que el exterior debido al calor ganado durante los meses cálidos. A medida que el clima exterior se vuelve más frío, se acentúa más la diferencia entre el clima interior y el exterior.

Gráfica 172 Tendencias estacionales de temperatura, valores medios interiores (T_{int}) frente a valores medios exteriores (T_{ext}). Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

Localización de comportamientos alejados de las tendencias estacionales

La relación entre el ambiente interior del edificio y el clima exterior se produce de manera lógica, tal que: *A mayor temperatura mayor grado de humedad*. Esta relación dibuja una “nube de puntos” con forma vertical/ascendente (Gráfica 173). Los puntos del interior, representados con un aspa, presentan poca variación en temperatura interior respecto al exterior, oscilando alrededor de tres grados cada mes. Sin embargo, el grado de humedad interior es siempre más alto en el interior que en el exterior, presentando además mayor variación en el eje vertical que el exterior. Esto indica que existen puntos en el interior que están siempre más húmedos que los del exterior, por lo que se podría tratar de focos de evaporación¹. La dispersión de la nube de puntos es mayor en los meses más cálidos que en los más fríos. Lo que corresponde bien con las tendencias de los edificios a evaporar más en primavera o verano por el aumento del calentamiento de los cerramientos, además de un mayor intercambio a través de puertas y ventanas. Aunque, la nube de puntos del mes de noviembre parece marcar la transición entre el período más frío y el más cálido. Se trata de una nube de puntos que aún es dispersa, lo que podría asociarse a una posible evaporación que aún se mantiene a pesar de ser un mes de invierno. Esto corresponde con lo que se observaba en el análisis de tendencias generales, en el que se veía que el edificio presentaba inercia térmica que se hacía notar en meses como noviembre.

Gráfica 173 Relación del grado de humedad (W) con la temperatura (T) a lo largo de los diferentes meses del año. Medias mensuales. Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

¹ Estos puntos, alejados de la tendencia general, son lo que se localizan como “puntos anómalos” y que deben ser objeto de un análisis más detallado en los apartados siguientes.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Como ya se ha mencionado, existen puntos que presentan valores de grado de humedad por encima de la media de su mes correspondiente. Por ejemplo, en los meses de octubre (color verde en la gráfica) o noviembre (color gris en la gráfica) se observan claramente dos conjuntos de puntos de interior, que aparece mezclado con los puntos del exterior (rodeado con elipse negra sobre la gráfica), y otro con mayor grado de humedad, con valores que superan a la media del interior y del exterior (rodeado con elipse verde sobre la gráfica). En ambos meses, se trata del data-logger DT2, que se ubican en el muro sur a 0m, en el encuentro entre el muro y el solado.

6.2.2.b ANÁLISIS POR ESTACIONES: VERANO 2017

El mes de agosto de 2017 en Santiago de Compostela, según las temperaturas máximas y medias registradas, se trata de un mes más cálido de lo habitual, mientras que las medias están dentro del rango de valores normales. En cuanto a las precipitaciones, el carácter del mes quedó marcado por las intensas tormentas registradas entre los días 26 y 29 en distintos puntos de Galicia, aunque en los registros de Santiago de Compostela, solo aparecen el día 27, con una media pluviométrica inferior al rango de valores normales para la época. Por ello, MeteoGalicia² lo describe como un mes más seco de lo normal (Figura 217).

* Valores climáticos 1981-2010. Precipitación: 1931-2017 Temperatura: 1948-2017

SANTIAGO				
	AGOSTO 2017	VALORES CLIMÁTICOS*	valor máximo da serie	valor mínimo da serie
Tª media	20.4	19.9	23.2 (2003)	17.1 (1986)
Tª mínima media	14.6	14.6	7.4 (2003)	12.4 (1986)
Tª mínima absoluta	11.0 (día 8)	7.3 (29/08/1986)		
Tª mínima más alta	18.4 (día 17)	23.9 (20/08/1986)		
Tª máxima media	26.1	25.2	28.9 (2003)	21.7 (1986)
Tª máxima absoluta	36.2 (día 21)	39.7 (12/08/2003)		
Tª máxima más baixa	19.2 (día 30)	16.7 (30/08/1992)		
Precipitación acumulada	25	38-52	210 (2004)	1 (1998)
Días de chuvia (≥1mm)	3	5	15 (2004)	1 (1998)

Figura 217 Valores climáticos para la ciudad de Santiago de Compostela. Comparativa de los valores obtenidos en el período de agosto de 2017 con los registros históricos climatológicos.

² MeteoGalicia pertenece a la Dirección Xeral de Calidade Ambiental e Cambio Climático, Consellería de Medio Ambiente e Ordenación do Territorio. Xunta de Galicia. www.meteogalicia.gal

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Tomando una semana correspondiente a este período de finales de agosto (desde el 20 al 27 de agosto), donde se han producido temperaturas elevadas y algunas lluvias, se ve cómo a pesar de las altas temperaturas exteriores, la temperatura del interior de la capilla es muy estable, dibujando líneas horizontales en los registros de todos los puntos de pared, a excepción del ambiente interior que sí oscila en relación con el clima exterior (Gráfica 174). La diferencia de temperatura entre los distintos puntos es de unas décimas de grado³.

Gráfica 174 Evolución de la temperatura en una semana representativa del mes de agosto (del 20/08/2017 al 27/08/2017). Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

³ En el eje Y de la Gráfica 174 se ha puesto un intervalo desde 16 a 30 grados para que sea más fácil ver las diferencias de temperatura entre los distintos puntos.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Existe estratificación en la temperatura, siendo los puntos con mayor temperatura los que se encuentran ubicados en cotas más altas. Los puntos medidos sobre la pared sur están más calientes que los medidos sobre la pared norte.

Gráfica 175 Evolución del grado de humedad en una semana representativa del mes de agosto (del 20/08/2017 al 27/08/2017). Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

En cuanto a las variaciones del grado de humedad interior existe cierta oscilación en relación con el grado de humedad exterior, especialmente en las mediciones en ambiente (Gráfica 175). Estas variaciones se producen coincidiendo con las máximas de temperatura en el exterior, por lo que podría relacionarse con el calentamiento del ambiente y los materiales, que produce una evaporación. No se aprecian cambios en el grado de humedad relacionados con la apertura o cierre de puertas de la capilla como sí se veía en el caso 1 de la iglesia de Santiago de Peñalba.

Pueden agruparse los puntos monitorizados en dos conjuntos. Por un lado, los que presentan un grado de humedad más elevado (de mayor a menor DT2, DT10, DT7, DT6), todos ellos situados en cota 0, en el encuentro del solado con el muro. Al contrario de lo que se podría esperar, el punto que presenta mayor W no se encuentra en el muro norte –que es el más frío y el que está pegado al cementerio- sino en el muro sur (DT2).

Los puntos ubicados en pared, a mayor altura alejados del suelo se agrupan con un grado de humedad menor (de mayor W a menor DT8, DT1 y DT4 prácticamente igual a DT12 y DT11). De ello se deduce que la zona monitorizada en el muro sur presenta un grado de humedad más elevado que la media. En el muro norte, donde se ha ubicado una cuadrícula de puntos en detalle, la vertical del centro es la más húmeda, marcado en rojo sobre la sección (Gráfica 175, Figura 218 y Figura 219).

Que los puntos que tienen mayor grado de humedad sean los ubicados en el encuentro del solado con el muro tiene lógica, teniendo en cuenta dos factores: la presencia de agua

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

capilar. Hay que tener en cuenta, además, que el solado de esa capilla presenta un problema de contaminación por sales en las losas, como ya se ha explicado en el apartado 6.2.1. Por ello, es lógico que presente valores de W elevados. A esto se suma la mayor dificultad del aire para circular en los puntos en que se encuentran los data-loggers de suelo-muro, en muchos casos rincones, lo que supone mayor dificultad para disipar la posible evaporación de los muros y el solado.

Figura 218 Ubicación de los data-loggers en cuadrícula sobre el muro norte. Planos redibujados en base a planimetría del proyecto de Alicia Noya.

Figura 219 Ubicación de los data-loggers sobre el muro sur. Planos redibujados en base a planimetría del proyecto de Alicia Noya.

6.2.2.c ANÁLISIS POR ESTACIONES: OTOÑO 2017

En el mes de septiembre, tal como se veía en las Gráfica 167 y Gráfica 168 comienzan a descender las temperaturas y el grado de humedad. Según los informes de MeteoGalicia, el mes de septiembre fue más frío de lo habitual en Santiago de Compostela, motivado por situaciones intermedias entre altas y bajas presiones en las que llegaba aire húmedo y no demasiado cálido, haciendo que las temperaturas no llegasen a subir lo habitual durante el día. Las lluvias registradas en este mes fueron muy inferiores al rango habitual, por lo que lo caracterizan como un mes seco. En la Figura 220 izquierda se puede ver el porcentaje acumulado de lluvia respecto al valor normal, siendo 100% el valor normal. En este mapa se ve cómo Santiago de Compostela se encuentra muy por debajo de los valores normales para la época.

Figura 220 (Izquierda) Precipitación media acumulada en el mes de septiembre de 2017 en Galicia. Se puede ver cómo Santiago de Compostela (punto rojo sobre el mapa) presenta valores bajos, en torno a los 20mm. Fuente: Informe mensual MeteoGalicia. (Derecha) Porcentaje de precipitación acumulada con respecto a los valores normales del período 1981-2010 del mes de septiembre de 2017. Fuente: Informe mensual MeteoGalicia.

Seleccionando una semana tipo de este mes, se observa que, la temperatura media del exterior ha descendido de los 22,45 °C del mes de agosto a los 18,30 °C del mes de septiembre (Gráfica 176). Este descenso es acompañado por los puntos del interior, pero siguen conservando su estratificación en altura, de forma que los puntos que están más altos son los que presentan una mayor temperatura. Al igual que en el mes de agosto, las curvas de cada punto son prácticamente planas, lo que señala que no existen oscilaciones diarias en temperatura en el interior motivadas por la apertura o cierre de ventanas, como se observaba en el caso de la Iglesia de Santiago de Peñalba.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Gráfica 176 Evolución de la temperatura en una semana representativa del mes de septiembre (del 13/09/2017 al 19/09/2017). Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

En cuanto al grado de humedad, la tendencia de septiembre es contraria a la tendencia del mes de agosto. En el mes de agosto, el grado de humedad del interior tendía a dibujar una curva ascendente hacia la mitad de la semana (Gráfica 175). Este mes, el aire es más frío y más seco –tal como se describía en los informes de MeteoGalicia- lo que produce un descenso del grado de humedad exterior. Este descenso se produce también en todos los puntos del interior del edificio (Gráfica 177). En el mes de agosto se consideraba un conjunto de puntos (DT2, DT10, DT6 y DT7) que presentaban un grado de humedad alto diferenciado del resto de puntos. Éstos, además, presentaban una curva muy estable casi plana y sin variaciones.

Gráfica 177 Evolución del grado de humedad en una semana representativa del mes de septiembre (del 13/09/2017 al 19/09/2017). Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

De este conjunto de puntos, dos de ellos (DT2 en el encuentro suelo-muro sur y DT10, en el encuentro suelo-muro norte) presentan en el mes de septiembre un descenso y, además, con oscilación diaria, que produce una curva similar a la del ambiente. Dentro de este mismo conjunto, los puntos DT6 y DT7, son ahora, en el mes de septiembre, los puntos de mayor W. La curva de estos puntos se mantiene plana como en agosto.

Para comprender cuál es la situación de estos puntos pueden trasladarse al ábaco psicrométrico. En este caso, se han situado sobre el ábaco, en primer lugar, los puntos medidos en el exterior en la semana de agosto (azul oscuro), y los puntos del exterior en el mes de septiembre (azul claro).

Gráfica 178 Ábaco psicrométrico comparativo entre una semana representativa del mes de agosto y otra de septiembre de 2017, en el que se detallan algunos puntos seleccionados (DT2, DT6, DT7 y DT10) junto con el clima exterior. Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

Tal como se puede ver en la Gráfica 178, en septiembre se produce un descenso de la temperatura, pero también del grado de humedad. Sobre el mismo gráfico se han situado:

- El punto DT2 en el mes de agosto (rojo) frente a los puntos DT2 en el mes de septiembre (naranja). Tal como se puede ver, en el mes de agosto el punto 2 se encuentra sobre la línea del 100% HR casi todo el tiempo, lo que señala una saturación de humedad en ese punto. El clima más favorable de septiembre ha provocado que descienda (naranja) alejándose de la saturación, aunque sigue presentando valores de grado de humedad más elevados que los del ambiente interior, lo que significa que sigue siendo un foco de humedad.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

-Al punto DT10 le sucede lo mismo que al punto DT2. En el mes de agosto se encuentra sobre la línea de 100%HR, y en el mes de septiembre desciende.

Por otro lado, si se introduce en el ábaco los puntos DT6 y DT7 (Gráfica 179). Se puede ver que:

-DT6 y DT7 tienen, en el mes de agosto, un grado de humedad más elevado que en el mes de septiembre.

Gráfica 179. Psicrométrico comparativo entre los mismos puntos medidos en el mes de agosto y septiembre de 2017. Capilla del Cristo del Monasterio de Santa María de Conxo (Santiago de Compostela).

Sin embargo, se puede observar que la forma en que oscilan los valores de DT2 y DT10 en el psicrométrico es distinta de los puntos DT6 y DT7. Mientras que los primeros se mueven en vertical, oscilando en el eje del grado de humedad (eje Y), los segundos lo hacen siguiendo la curva de humedad relativa que presentaban en agosto.

Esto significa que en DT2 y DT10 hay alguna reacción sensible de rango diario que les hace perder humedad. Sin embargo, en los puntos DT6 y DT7, es una pérdida de grado de humedad más estable y paulatina relacionada con el cambio climático.

Esta mayor oscilación de DT2 y DT10 puede deberse a la combinación de dos factores. Por un lado, unas mejores condiciones climáticas con el descenso del W_{ext} , y una temperatura que aún es cálida⁴. Por otro lado, la propia ubicación de los puntos en el

⁴ Esta relación del clima con la capacidad de disipación de la humedad se explicaba anteriormente con el caso de estudio 1, donde se veía que existían días más favorables a la disipación de la evaporación de los muros, no siendo necesariamente los días de más calor en verano. Para este caso de estudio, se detallará de la misma manera en el apartado 6.2.3.

Los puntos DT6 y DT7 están en la zona del encuentro del muro con los nichos adosados al cementerio, donde hay una zona en que el muro de la capilla presenta un retranqueo, por lo que es posible que su ubicación sea aún más desfavorable a la ventilación que los puntos DT2 y DT10.

Figura 221 Ubicación de los puntos monitorizados. Señalados en rojo los puntos DT2 y DT10. Plano de planta de la Capilla del Cristo de Conxo. Parte central de la planta, en la zona monitorizada.

6.2.2.d ANÁLISIS POR ESTACIONES: INVIERNO 2017-2018

El mes de noviembre resultó ser más frío de lo normal en Galicia, siendo la ciudad de Santiago de Compostela una de las que presentó valores por debajo de la media, según los registros históricos. Fue también un mes más seco de lo habitual, con precipitaciones un 40% por debajo de la media (Figura 222).

Figura 222 (Izquierda) Precipitación media acumulada en el mes de noviembre de 2017 en Galicia. Se puede ver cómo Santiago de Compostela presenta valores entre un 55 y un 40% más bajos de lo habitual, según la escala gráfica referente a valores normales del período 1981-2010. Fuente: Informe mensual AEMET. (Derecha) Temperatura media registrada en el mes de noviembre de 2017 en Galicia. Se puede ver cómo Santiago de Compostela presenta valores un grado por debajo de lo normal, según la escala gráfica referente al período 1981-2010. Fuente: Resumen mensual AEMET.

Según los registros del ambiente interior de la capilla, la temperatura ha descendido cerca de 2 °C, desde los 18,30 °C del mes de septiembre, hasta los 16,39 °C en el mes de noviembre. La estratificación de la temperatura se sigue conservando estable, siendo los puntos más altos los de mayor temperatura.

Al igual que en el mes de agosto, vuelven a diferenciarse con más claridad dos conjuntos de puntos con grados de humedad similares. Un primer grupo con mayor W, de mayor a menor: DT10, DT7, DT6 y DT2⁵. Un segundo grupo, con un grado de humedad menor, muy similar para todos los puntos: DT1, DT12, DT4 y DT9. La distribución es la misma que en las estaciones anteriores, los puntos de suelo-muro son los que ofrecen mayor

⁵ Aparece en este conjunto el punto DT3, que se encuentra a 3m en el muro norte, en la zona en que se encuentra la cubierta de los nichos del cementerio con la capilla. Es posible que aumente el registro porque esté filtrando agua de lluvia al interior, pues no es habitual encontrar un valor puntual a una altura tan elevada.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

W, y los puntos de pared menor W. Este segundo grupo tiene unos valores de W más similares a los del registro de ambiente interior, por lo que no se puede considerar como valores altos de evaporación del muro.

Al igual que sucedía en el mes de agosto, el W_{ext} describe una curva con tendencia ascendente en los 4 primeros días, por lo que la tendencia del interior es la de ganar humedad. Además, la temperatura va en descenso, lo que enfría el edificio. Se produce una tendencia como la del mes de agosto, en la que ciertos puntos se agrupan en un conjunto con mayor W.

Para ver lo que sucede con mayor claridad, se han representado los puntos sobre el ábaco psicrométrico.

Gráfica 180. Ábaco psicrométrico comparativo entre el mes de agosto, septiembre y noviembre, en el que se puede ver la evolución del ambiente exterior y del punto D10 monitorizado.. Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

El punto DT10, con el descenso del W_{ext} del mes de septiembre pasaba de encontrarse en situación de saturación (sobre la curva del 100%HR) a una situación más favorable. En el mes de noviembre, con el descenso de las temperaturas a valores desfavorables para la evaporación, sin un descenso proporcional del grado de humedad, el punto vuelve a encontrarse en situación de saturación. La diferencia entre los tres meses estriba en que la nube de puntos del W_{ext} es más abierta, presentando valores muy bajos, con temperaturas más cálidas que permiten la evaporación. Sin embargo, los meses más fríos, o los más cálidos, pero húmedos dificultan la evaporación.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA Mª DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

En el caso de DT6 y DT7 el descenso se produce sobre la curva de humedad relativa sobre la que se encuentran, lo que seala un grado de humedad estable que cambia con la variaci3n estacional, manteniendo siempre un contenido de humedad alto, cercano a la saturaci3n. Como ya se ha explicado, estos puntos se encuentran en una zona de suelo-muro m1s retranqueada, con mayor dificultad para evaporar. Adem1s, est1n en la zona del encuentro del muro con los nichos adosados al cementerio, donde hay una zona en que el muro de la capilla presenta un retranqueo y tiene menor espesor.

Gr1fica 181. 1baco psicromtrico comparativo entre el mes de agosto, septiembre y noviembre, en el que se puede ver la evoluci3n del ambiente exterior y de los puntos D7, DT10 y DT6 monitorizados. Capilla del Cristo, Monasterio de Santa Mar1a de Conxo.

6.2.2.e ANÁLISIS POR ESTACIONES: PRIMAVERA 2018

En primavera se produjeron fuertes lluvias en el mes de abril, por encima de los normal incluso para la época (figura 223 izquierda). En este mismo mes, las temperaturas en Santiago de Compostela estuvieron dentro de los valores normales (figura 223, derecha).

Figura 223 (Izquierda) Porcentaje de precipitación acumulada con respecto a los valores del período 1981-2010 del mes de abril de 2018. (Derecha) Mapa de anomalía de temperatura media (°C) de abril respecto al período 1981-2010.

Como se veía en la Gráfica 167, a partir de febrero la temperatura exterior, y por tanto la interior, empieza a aumentar. En esa misma gráfica se puede ver cómo la curva de temperatura interior comienza a describir una línea ascendente clara en el mes de abril.

Gráfica 182 Evolución de la temperatura en una semana representativa del mes de abril (del 10/04/2018 al 16/04/2018). Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Se ha tomado una semana de abril para ver si las lluvias y el cambio en la tendencia de la temperatura están afectando al interior de la capilla (Gráfica 182 y Gráfica 183). Tal como se ve en la gráfica de evolución de temperatura de esa semana, todos los puntos tienen una temperatura similar, que además es muy estable, con poca variación incluso entre el día y la noche. Entre el punto que está registrando menor temperatura (DT3) y el que está registrando mayor temperatura (DT9) existe a penas un grado centígrado de diferencia (Gráfica 182).

Gráfica 183 Evolución del grado de humedad en una semana representativa del mes de abril (del 10/04/2018 al 16/04/2018). Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

En cuanto al grado de humedad sucede algo similar, la diferencia de grado de humedad entre los distintos puntos es pequeña. Los puntos más húmedos siguen siendo, como los meses anteriores, los puntos DT2 y DT10, seguidos por DT6 y DT3. Tal como se ve en este gráfico, la mayoría de los días, el grado de humedad del exterior supera al del interior, por tanto, aunque la temperatura comienza a ser más cálida, el edificio tiene mayor dificultad para disipar mediante ventilación natural la humedad que pueda estar produciendo (Gráfica 183).

Si se sitúan los puntos tomados en esta semana de abril sobre el psicrométrico se ve cómo el ambiente exterior llega a ser muy húmedo esta semana, dificultando la disipación antes comentada. El ambiente interior se encuentra en equilibrio con el exterior, superponiéndose su nube de puntos, pero con una tendencia más vertical, llegando a presentar valores un poco más bajos de grado de humedad, con una temperatura más estable. En todo caso, se trata de un ambiente interior húmedo, pues

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

llega a alcanzar valores próximos al 90% de HR. Esto propicia que algunos puntos estén en equilibrio con ese ambiente (DT9 y DT11, ambos ubicados en pared a cierta altura). El resto de puntos están muy cercanos a la saturación, incluso sobre la curva del 100% de HR.

Gráfica 184. Psicrométrico de la semana representativa de abril. Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

Como se sabe por los registros meteorológicos, el mes de mayo ha sido más seco que el de abril. Si se observa una semana tipo de mayo, se nota un pequeño descenso en W respecto a la gráfica del mes de abril. El descenso del exterior es acompañado por el del interior (Gráfica 185).

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Gráfica 185. Evolución del grado de humedad en una semana representativa del mes de mayo (del 01/05/2018 al 02/05/2018). Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

Tanto la temperatura media ($T_{med}= 14,8^{\circ}\text{C}$) como las máximas ($T_{max}=19,8^{\circ}\text{C}$) y mínimas ($T_{min}=12,9^{\circ}\text{C}$) estuvieron dentro de los valores normales para la época del año en el mes de mayo. La tendencia en este mes es ascendente para la temperatura exterior, acercándose al verano. A pesar de los picos de temperatura que superan los 20°C , el interior casi no experimenta oscilaciones térmicas diarias y la capilla se va calentando lentamente (Gráfica 186).

Gráfica 186. Evolución de la temperatura en una semana representativa del mes de mayo (del 01/05/2018 al 02/05/2018). Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

Si se representan en un gráfico los puntos medidos en el interior de la capilla de la semana representativa del mes de abril, sin separar los valores por la ubicación de los

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

data-loggers, se genera una nube de puntos como la que se ve en la Gráfica 187. En esa misma gráfica se han representado las nubes de puntos del interior para los meses antes comentados (agosto, septiembre y noviembre) de forma que se puede ver la evolución a través de las distintas estaciones del año. Junto con los puntos del interior se han dibujado también las nubes de puntos del exterior. En primer lugar, se aprecia cómo las nubes de puntos más abiertas, es decir, con valores más dispersos ayudan a rebajar el grado de humedad en el interior. Por otro lado, en el clima de Santiago de Compostela, no necesariamente los meses más cálidos son los más beneficiosos para la evaporación, pues se puede ver cómo los valores de grado de humedad del mes de agosto son elevados. Además, los meses más fríos tienden a producir un efecto de falta de respiración⁶ en el edificio, que provoca la falta de evaporación. Por tanto, se aprecia como más beneficioso una situación intermedia con un clima más cálido, pero no muy húmedo, como el que se produce en septiembre.

Gráfica 187. Ábaco psicrométrico que representa la evolución del clima exterior e interior de agosto, septiembre, noviembre y abril de 2017. Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

⁶ Así se refería ya Camuffo al fenómeno de la transferencia de humedad de los muros al ambiente y su movimiento en el edificio, como la capacidad de “respiración” del edificio (Camuffo 1983).

6.2.2.f ANÁLISIS POR ESTACIONES: VERANO 2018

Durante este mes se han producido fuertes lluvias, lo que hace que el grado de humedad del exterior aumente notablemente (Gráfica 188). Esto provoca un aumento en el interior especialmente en el punto DT1, que se ubica en pared en el muro sur. Es de suponer que este aumento, que además presenta una oscilación más pronunciada de lo habitual, con carácter diario, se debe al incremento del grado de humedad ambiental. En cuanto a los puntos DT6 y DT2, que están en el encuentro del muro con el solado, el incremento de grado de humedad es más paulatino y sin oscilaciones diarias. En este caso, los puntos están acumulando humedad, y cuando baja el grado de humedad exterior (en torno al día 25), estos puntos no descienden. Por tanto, parece que hay ciertas zonas del edificio que presentan mayor dificultad para evacuar el agua acumulada.

Gráfica 188. Evolución del grado de humedad en una semana representativa del mes de junio (21/06/2017 al 27/06/2017). Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

La temperatura experimenta un aumento correspondiente con la época del año, llegando a alcanzar hasta 28°C. Esto, unido al período de lluvias mencionado, hace que explica el aumento considerable del grado de humedad exterior. A pesar de las temperaturas, altas tratándose de Santiago de Compostela, y de las oscilaciones térmicas notables entre las horas centrales del día y la noche, el interior mantiene una estabilidad diaria que sigue siendo notable.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Gráfica 189. Evolución del grado de humedad en una semana representativa del mes de junio (21/06/2017 al 27/06/2017). Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

6.2.2.g CONCLUSIONES AL ANÁLISIS ESTACIONAL

Del estudio estacional realizado, se deducen las siguientes tendencias de comportamiento ambiental del edificio:

En general, el clima interior de la capilla es muy estable durante todo el año, y presenta pocas oscilaciones diarias que son especialmente leves en los puntos medidos sobre el muro o en suelo-muro. Por tanto, los cambios en el clima interior vienen principalmente inducidos por la evolución estacional del clima exterior.

En general, en todos los meses analizados el grado de humedad o temperatura entre los distintos puntos medidos es similar, existiendo poca diferencia entre ellos. Existe cierta estratificación en altura en la temperatura que se conserva a lo largo de todo el año, pero especialmente notable en los meses más cálidos.

La estabilidad ambiental interior puede deberse a falta de ventilación, bien sea por el régimen de uso de la capilla, que permanece cerrada durante casi todo el día, a excepción de horas de culto o limpieza. Por otro lado, a la propia morfología y ubicación de la capilla, que cuenta con pocos huecos para ventilación natural. Esto se analiza con mayor detenimiento en el apartado 6.2.4 mediante simulación por ordenador.

Existe un conjunto de puntos, todos ellos ubicados en el encuentro del solado con el muro, que presentan valores de humedad cercanos a la saturación (entre la curva del 90 y 100%HR), inducidos por la contaminación por sales que presentan las losas. A pesar de esto, no son valores de grado de humedad elevados, respecto al ambiente del edificio o a puntos medidos en pared en ningún momento del año. Esto puede significar que el solado tiene dificultades para evaporar el agua que absorbe, pues en ningún momento, ni siquiera en épocas del año más favorables a la evaporación llegan a presentar valores altos de grado de humedad. Esto debe ser tenido en cuenta en el análisis del comportamiento evaporativo de la capilla.

Los puntos medidos en pared presentan una leve oscilación diaria relacionada con las oscilaciones diurna-nocturna del exterior.

6.2.2.h ANÁLISIS DE LAS TENDENCIAS DIARIAS

Introducción

En el apartado anterior se extraía como principal conclusión que el clima interior es muy estable a lo largo de todo el año, sin aparentes variaciones diarias inducidas por la apertura y/o cierre de puertas.

En este apartado se analizan con más detalles las posibles variaciones diurnas y nocturnas sobre el edificio, tomando algunos días concretos como ejemplo.

Se analizan tres factores: la influencia del clima exterior sobre los cambios diarios, la influencia de los horarios de apertura sobre el ambiente de la capilla y el gradiente higrotérmico.

Influencia del clima exterior

En el análisis por estaciones del apartado anterior ya quedaba patente la evidente influencia del clima exterior sobre el interior, pero se trataba de un análisis con períodos de tiempo largos -1 semana típica de cada mes, por ejemplo-. Sin embargo, si se observa un día aislado, se ve cómo apenas existen variaciones. Incluso en el mes con las temperaturas más altas registradas, como es agosto, la temperatura del interior no varía durante el día, manteniéndose estable (Gráfica 190). El día 21 de agosto, por ejemplo, la temperatura en el exterior llega a alcanzar los 26 °C, sin embargo, la temperatura del interior no varía. Ese día la capilla ha estado abierta entre las 10:00 y las 12:00 horas mientras se realizaba la limpieza. Estas horas, marcadas en la gráfica, coinciden con el momento de mayor temperatura del día. Sin embargo, los registros de T y W no varían.

Gráfica 190. Evolución de la temperatura el día 21 de agosto. Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

También el grado de humedad es estable a lo largo de un día, variando ligeramente en unas pocas décimas de g/kg en los puntos medidos en ambiente o en pared a partir de 1,5 metros de altura, coincidiendo con las horas centrales del día, cuando la temperatura en el exterior es más alta (Gráfica 190). Es frecuente que el grado de humedad exterior llegue a superar el grado de humedad interior, en las horas centrales del día, cuando hay mayor temperatura, lo que tampoco favorece la disipación de la humedad interior (Gráfica 191). En el psicrométrico de ese día 21 se ve cómo el ambiente exterior mantiene un grado de humedad similar al del interior durante todo el día, incluso aumentando por encima de muchos puntos del interior, por tanto, no es propicio para rebajar el grado de humedad interior (Gráfica 192).

Gráfica 191. Evolución del grado de humedad el día 21 de agosto. Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

En un día en que el grado de humedad sea más bajo que el del interior, como el 25 de agosto (Gráfica 194 y Gráfica 193), el edificio tiene tendencia a rebajar también su grado de humedad (en ambiente y en pared sobre DT1, DT2, DT4, DT8 y DT12), a excepción de los puntos en suelo-muro (DT2, DT6, DT7 y DT10), que mantienen el grado de humedad constante. Pero, sigue sin apreciarse un descenso que corresponda con las horas en que se abre la capilla (entre las 10:00 y las 12:00 horas, para la limpieza). Al igual que se ha comentado anteriormente, podría ser que la ventilación no sea suficiente, cuestión que se analiza en el apartado 6.2.3 por medio del cálculo de renovaciones y el apartado 6.2.4 por medio de la simulación por ordenador.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Gráfica 192. Psicrométrico del día 21 de agosto. Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

Gráfica 193. Evolución de la temperatura el día 25 de agosto. Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Gráfica 194. Evolución del grado de humedad el día 25 de agosto. Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

Como ya se ha explicado en el apartado anterior, el mes de agosto no era el más favorable para la disipación de la humedad, porque, aunque hay momentos con un grado de humedad un poco más bajo, como el día 25, la mayor parte del mes los valores de grado de humedad exterior son inadecuados para el ambiente de la capilla, tal como se veía en la gráfica 12

Si se observa un mes más favorable, como era septiembre, en un día en el que el W_{ext} sea menor que el del interior, como por ejemplo el día 25, tampoco se observan cambios diurnos-nocturnos en el edificio (Gráfica 195 y Gráfica 196).

Gráfica 195. Evolución de la temperatura (T) el día 17 de septiembre. Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

Gráfica 196. Evolución del grado de humedad (W) el día 17 de septiembre. Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

Por tanto, se puede concluir que, en el caso 2 de la capilla del Cristo de Conxo, la influencia del clima exterior sobre el interior es evidente en períodos de varios días, o semanas. La influencia diurna-nocturna del exterior sobre el edificio es muy pequeña.

Influencia de los horarios de apertura de la iglesia:

Tal como se observaba en las gráficas anteriores, no se han detectado variaciones en el grado de humedad o la temperatura que tengan relación directa con la apertura o cierre de puertas. Como ya se planteaba en la hipótesis sobre ventilación del apartado 6.2.1, en la capilla el movimiento del aire es muy escaso ya que la mayor apertura, que es la puerta principal, tiene su acceso desde la iglesia. No existe ningún acceso directo al exterior, salvo las ventanas y muchas de ellas permanecen cerradas casi todo el año, las que están abiertas tienen una ventilación limitada.

Gradiente higrotérmico:

En la Gráfica 197 se comprueba cómo existe una marcada diferencia entre el grado de humedad del punto DT10, ubicado en la cota 0m al resto de puntos DT11 a 1,5 metros y DT12 a 3 metros. Estos dos últimos tienen un grado de humedad muy estable a lo largo del día, variando poco entre las horas de día y de noche y están muy igualados. El punto DT10 es el que menos varía a lo largo de las horas de día y de noche, superponiéndose entre sí los valores de cada hora, lo que hace pensar que se mantiene a una humedad relativa muy estable, lo que concuerda con la hipótesis antes planteada de la

contaminación por sales. Los puntos sobre muro están más húmedos que los del ambiente (puntos con asterisco⁷) pero la mayor diferencia no alcanza más de 1g/kg.

Gráfica 197. Estratificación en altura del grado de humedad (W), el día 21 de agosto, en la línea de data-loggers DT10 a DT12 colocados sobre el muro norte, en el interior de la Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo. El código "AI" indica el grado de humedad medio del ambiente interior registrado a la hora indicada en la leyenda.

Comparando el mes de agosto, con un mes más frío, como noviembre, vemos que el grado de humedad exterior presenta una oscilación menor. También la oscilación de los perfiles a lo largo del día es menor, y los valores de DT11 y DT12 se centran alrededor de 9,75g/kg. DT11 y DT12 siguen teniendo un grado de humedad mucho menor que el punto ubicado en el encuentro del solado con el muro, DT10.

⁷ En la Gráfica 197 los puntos con asterisco representan el valor de grado de humedad medio en el ambiente a cada una de las horas del día representadas. Se ha ubicado el valor de ambiente sobre 1m en el eje Y. Esto no significa que sea un ambiente medido a 1 metro de altura, sino que es la media entre el ambiente medido a 1,5 metros y 6 metros de altura. Se ha representado de esta manera para facilitar la lectura del gráfico y que no se superpongan los valores de ambiente con los de DT10, DT11 o DT12. Lo mismo se ha realizado sobre la Gráfica 199.

Gráfica 198. Estratificación en altura del grado de humedad (W) el día 2 de noviembre, en la línea de data-loggers DT10 a DT12 colocados sobre el muro norte, en el interior de la Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo. El código "AI" indica el grado de humedad medio del ambiente interior registrado a la hora indicada en la leyenda.

Existe estratificación en altura en la temperatura, de manera que, a mayor altura, mayor temperatura. Esto se cumple invariablemente para todos los puntos. Los cambios térmicos son muy pequeños entre el día y la noche, como sucedía con el grado de humedad. El punto en el suelo DT10 está más frío que el resto de puntos (Gráfica 199). El ambiente del edificio permanece en todo momento más caliente que los puntos medidos sobre muro y suelo-muro.

Las variaciones en temperatura en el mes de noviembre son mucho menores, de manera que los perfiles de algunas horas se solapan con las otras. Esto corresponde con lo observado en la gráfica de evolución de la temperatura, pues las curvas de variación térmica diarias son casi planas. Existe estratificación en altura, de forma que el punto que presenta mayor temperatura es el que está a mayor altura, aunque la diferencia térmica entre el punto a 3 metros y a 0 metros es mucho menor que en el mes de agosto.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Gráfica 199. Estratificación en altura de la temperatura (T) en la línea de data-loggers DT10 a DT12 colocados sobre el muro norte, día 21 de agosto, en el interior de la Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo. El código "AI" indica el grado de humedad medio del ambiente interior registrado a la hora indicada en la leyenda.

Gráfica 200. Estratificación en altura de la temperatura (T) en la línea de data-loggers DT10 a DT12 colocados sobre el muro norte, día 21 de agosto, en el interior de la Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo. El código "AI" indica el grado de humedad medio del ambiente interior registrado a la hora indicada en la leyenda.

6.2.3 CÁLCULO DEL COMPORTAMIENTO EVAPORATIVO

Según el primer análisis de los datos de monitorización medidos en el edificio (apartado 6.2.2 “Análisis higrotérmico”), se determinó que existen una serie de focos de humedad que se sitúan a la altura de suelo-muro en el muro norte que limita con el cementerio, y puntualmente en una zona del muro sur. En este primer análisis se detectaba que estos focos de humedad se reducen en el momento en que se asciende en altura en el muro. Los puntos monitorizados a mayor altura presentan un grado de humedad similar al del ambiente del edificio. Con objeto de cuantificar la cantidad de agua absorbida, y posteriormente evaporada al interior del edificio, se realizaron los cálculos que siguen a continuación. Como ya se explicaron detalladamente los métodos de cálculo tanto en el capítulo 4 “Fundamentos teóricos”, como en el apartado de cálculo de comportamiento evaporativo correspondiente al caso de estudio 1, se pasa directamente al cálculo.

6.2.3.a CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL PARA LA EVAPORACIÓN

Para poder realizar el cálculo de absorción del muro es necesario conocer los valores de sortividad de los materiales con los que está compuesto. Como se explicaba en el capítulo 5 “Metodología”, las muestras que se pueden extraer en este tipo de edificios no siempre son de tamaño y forma regular, por lo que limita los resultados o la precisión de algunos de los ensayos hídricos. Por esta razón, para poder determinar los valores de sortividad de manera correcta se ha procedido de la siguiente manera:

- Se han recogido los valores de porosidad, densidad, sortividad, etc. obtenidos por los diferentes investigadores que han trabajado con probetas del mismo material. En este caso, granito. Los ensayos sobre probetas regularizadas siguen estrictamente los protocolos estandarizados por las correspondientes normas.
- Los valores obtenidos por los diferentes autores se han comparado con los obtenidos en los ensayos realizados sobre muestras de la capilla, con objeto de realizar una relación entre unos y otros y establecer un valor de referencia adecuado.

Los valores ajustados se han empleado para el cálculo de la absorción del muro. A continuación se desarrolla y discute con detenimiento esta metodología empleada.

Ajuste de valores:

Como en el caso 1, mediante los ensayos EH2 y EH3 se ha determinado el valor de la densidad aparente (ρ_b), porosidad abierta (f_0) y densidad real (ρ_s) de las muestras de granito. Al tratarse de ensayos en los que el cálculo no depende estrictamente de la geometría de la probeta, se pueden determinar estos parámetros con muestras

irregulares del edificio (UNE-EN 13755 2008), UNE-EN 1936 2007). Los valores obtenidos se comparan con los que ofrecen otros autores.

Tabla 45. Características físicas obtenidas de los ensayos hídricos.

	X02	X03
Densidad aparente (ρ_b) [kg/m ³]	2140	2138
Densidad real (ρ_r) [kg/m ³]	2692,98	2530,65
Porosidad abierta (f_0) [%] *	2,64	2,15

Se han estudiado aquellos valores que más se ajustan a las propiedades físicas de las muestras del edificio. La sortividad se encuentra entre 0,40 y 0,61 para granitos con las mismas características de densidad y porosidad (Barrientos Rodríguez 2007) (Rojo, et al., 2000). (Iñigo Iñigo, Vicente Tabera et al. 1995).

Es necesario matizar que la absorción capilar de este granito es mucho mayor de lo normal para este tipo de rocas, debido a la contaminación por sales que presenta. Por tanto, es posible que la succión-evaporación del muro sea mayor de lo que se puede obtener con un granito sano. Se ha tomado un valor de sortividad de 0,61mm/min^{1/2}.

6.2.3.b CÁLCULO DE LA EVAPORACIÓN DE LOS MUROS

En este apartado se describen los cálculos de evaporación realizados en la capilla del Cristo del Monasterio de Santa María de Conxo. En el caso de estudio 1 los cálculos se acompañaban de una explicación de las fórmulas empleadas en cada fase de cálculo. En este caso, se pasa directamente al cálculo y discusión de los resultados obtenidos.

El procedimiento que se ha seguido en esta parte es el siguiente:

Primero se realizó el cálculo de la succión-evaporación en régimen estacionario para conocer el agua absorbida por el muro hasta llegar a una situación de equilibrio en que el agua absorbida es igual a la evaporada.

En segundo lugar, se realizó el cálculo en régimen dinámico. Con este cálculo se ha podido conocer la cantidad de agua que absorbe, se almacena y evapora en cada momento en el muro.

Para realizar estos dos primeros pasos se ha seguido la metodología de cálculo empleada por D'Agostino en la Cripta de la Catedral de Lecce (D'Agostino 2013b). Su método se basa en el empleo de las fórmulas ideadas por Hall y Hoff, en combinación con las ecuaciones de Penman para el cálculo del potencial de evaporación (Hall, Hamilton et

al. 2011). El trabajo de D’Agostino valida el empleo de las fórmulas de Hall y Hoff en casos de estudio reales, fuera de condiciones de laboratorio.

A este método se ha añadido un paso en este trabajo que es el cálculo de la “capacidad evaporativa” del edificio. Esto se traduce en la capacidad que tiene el edificio de disipar el agua evaporada por los muros en relación con la ventilación del mismo. Para poder conocer la capacidad de disipar el vapor de agua producido por los muros en el interior es necesario saber cómo entra el aire en el edificio, cómo se mueve y las renovaciones diarias que es capaz de realizar. Para ello, con el modelo 3D del edificio, realizado con Design Builder, se ha podido realizar la simulación y obtener los datos necesarios¹.

1º Cálculo de la evaporación de los muros en régimen estacionario.

Según explica la teoría de ascenso capilar capítulo 4, “*Fundamentos teóricos*” suponiendo un estado de equilibrio, tal que, el flujo de agua que entra en el muro por absorción capilar (U_{ee}), es igual a la cantidad de agua perdida por evaporación (E_{ee}). Por tanto, se puede decir que $U_{ee}=E_{ee}$. Esto hace que se pueda calcular la altura que alcanza el frente capilar estabilizado mediante la ecuación anteriormente vista:

$$h_{ee} = \left(\frac{bS^2}{e\theta_w} \right)^{1/2} \quad (40)$$

Para realizar el cálculo de h_{ee} , se toma un potencial de evaporación medio anual (Hall 2007, D’Agostino 2013a). Para calcular este potencial de evaporación se emplean los registros de la base de datos meteorológica. En este caso, se ha obtenido un $e = 0,3$ mm/d. Para el espesor (b) del muro, se ha considerado un valor $b=74$ cm. Hay zonas de la capilla que tienen un espesor mayor, pero en este caso se ha realizado el cálculo para el espesor del tramo de muro norte “7845_Wall_3” (Figura 212, plano de planta, apartado 6.2.1). Esta zona y el tramo sur “6926_Wall_5_0_0” tienen un retranqueo donde el espesor es menor y es dónde se ubican todos los data-loggers, a excepción de la fila DT10 a DT12, que se encuentra en una zona con un poco más de espesor. Interesa conocer la absorción-evaporación de las zonas de retranqueo del muro por ser las que han presentado los valores más elevados de grado de humedad, y por ello, las que se ha decidido monitorizar con más detalle. Además, el tramo norte “7845_Wall_3” se encuentra en contacto con el cementerio y, como ya se ha explicado, ha sufrido filtraciones de agua.

¹ En el capítulo 5 “Metodología” se explicaba que los cálculos con Design Builder se han validado mediante la comparación con los resultados obtenidos mediante monitorización. Para el caso concreto de la capilla del Cristo de Conxo, los resultados de validación se muestran en las gráficas 162 y 163.

Según los resultados de cálculo, el agua alcanza el equilibrio a una altura de $h_{ee}=0,98\text{m}$, a los 60 años del momento inicial de absorción (Gráfica 201). El tiempo que el muro tarda en estabilizarse depende del espesor del muro (ecuación 85), por tanto, en las zonas de mayor espesor como $b=142\text{cm}$ como la zona de los data-loggers DT10 a DT12 el agua tarda 90 años en estabilizarse, y puede alcanzar una altura $h_{ee}=1,42\text{m}$.

Teniendo este dato, se puede calcular el agua almacenada en el muro (C_{ee}). En este caso, para los tramos de menor espesor monitorizados, $C_{ee}=0,60\text{L}$ para los tramos de muro calculados.

Gráfica 201 Altura de ascenso capilar en función del tiempo. El agua alcanza el equilibrio a los 60 años, a una altura de 1 metro.

2º Cálculo de la evaporación de los muros en régimen dinámico

En condiciones normales, el muro se encuentra en un estado en el que el agua no está en equilibrio $U_{ee} \neq E_{ee}$. El agua absorbida y la evaporada están en constante fluctuación debido a los cambios atmosféricos y del ambiente interior del edificio. Para realizar el cálculo, es necesario conocer el potencial de evaporación medido de manera dinámica. Esto supone conocer múltiples datos climáticos como temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, etc. Estos deben ser medidos en el lugar de manera continuada. Como ya se ha explicado en el capítulo de metodología, en esta investigación se han empleado dos fuentes: Por un lado, la monitorización realizada para este caso de estudio y, por otro, los registros de la base de datos meteorológica.

Los datos meteorológicos de los que se dispone son medias diarias, por ello, los cálculos de E_{PEN} se van a realizar como medias diarias. Los datos de monitorización están

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

tomados cada 10 minutos, con ello se realiza un promedio diario para poder relacionar los valores de T y HR con los parámetros climáticos. La velocidad del aire en el interior se toma de las simulaciones realizadas con Design Builder después de haber validado el modelo realizado.

El potencial de evaporación en el exterior (E_{PEN_ext}) para el período monitorizado empezó a aumentar en primavera, entre el mes de marzo y abril. Se mantiene elevado hasta el mes de octubre (Gráfica 202). El mes de octubre ha sido inusualmente cálido, alcanzando incluso más de 28°C, como ya se ha explicado en el apartado 6.2.1.d “Análisis del clima de Santiago de Compostela”. Una temperatura exterior máxima y humedad relativa elevadas, unido a velocidades del viento entre medias y altas, dan como resultado un valor alto para la componente aerodinámica de fórmula, lo que se traduce en un potencial de evaporación exterior elevado.

Gráfica 202. Evolución del potencial de evaporación en el exterior de la Capilla del Cristo (Monasterio de Santa María de Conxo) a lo largo del período monitorizado. Se desglosan cada uno de los términos de la ecuación de cálculo (E_{radS} , E_{radL} , E_{aero}) en la gráfica. El sufijo “ext” en la leyenda indica que se trata de los términos calculados con los datos de exterior. En esta gráfica se detallan los resultados para una semana representativa de cada mes, con objeto de facilitar la lectura de los datos.

El potencial de evaporación en el interior se calcula con el término aerodinámico ($E_{aero_int}^2$), que no cuenta con parámetros del ambiente exterior, como la radiación. Tal como se explicaba en el apartado 6.2.2 “Análisis higrrotérmico” el edificio gana calor gracias al calor del exterior de primavera y verano. El calor acumulado se mantiene en los meses que la temperatura exterior ha empezado a descender. Por ello, el potencial

² El sufijo “int” indica que se trata del término aerodinámico, empleando los datos de clima interior.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

de evaporación del interior presenta cierto retardo con respecto al exterior y no empieza a descender hasta el mes de diciembre (Gráfica 203).

Gráfica 203. Evolución del potencial de evaporación en el interior (E_{aero_int}) de la Capilla del Cristo (Monasterio de Santa María de Conxo) lo largo del período monitorizado. En esta gráfica de detallan los resultados para una semana representativa de cada mes, con objeto de facilitar la lectura de los datos.

Una vez calculado el potencial de evaporación, se puede calcular la variación del ascenso capilar (h) condicionado a este potencial de evaporación empleando la ecuación 38. También se puede calcular la cantidad de agua acumulada en el muro (C) en cada momento. Ambos parámetros se han representado en la Gráfica 204 para todo el período monitorizado. La altura media que adquiere el frente capilar es $h=0,92m$. La altura máxima que alcanza se produce en febrero, coincidiendo con el momento de menor potencial de evaporación del clima interior. La cantidad media de agua almacenada en el muro es $C=0,93L$ por metro lineal de muro³. El frente capilar es bastante estable a lo largo de los meses más cálidos, hasta noviembre. Cuando el edificio se empieza a enfriar, la altura aumenta, también lo hace la cantidad de agua acumulada (Gráfica 204).

³ Para el tramo calculado en el muro norte.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Gráfica 204. Evolución de la altura de ascenso capilar (h) y la evolución del agua contenida en el muro (C) en la Capilla del Cristo (Monasterio de Santa María de Conxo), durante el período monitorizado. En esta gráfica de detallan los resultados para una semana representativa de cada mes, con objeto de facilitar la lectura de los datos.

La cantidad de agua acumulada aumenta en los meses fríos, lo que corresponde con el descenso de la cantidad de agua evaporada (Gráfica 205). En los meses de julio hasta noviembre, la cantidad de agua evaporada (E_{out}) es 0,11L de media más que el agua absorbida (U_{in}). En los meses fríos la diferencia se reduce a 0,05L de media.

Gráfica 205 Evolución del flujo de entrada (U_{in}) y salida (E_{out}) del agua en el muro de la Capilla del Cristo (Monasterio de Santiago de Compostela). En esta gráfica de detallan los resultados para una semana representativa de cada mes, con objeto de facilitar la lectura de los datos.

Conclusión al cálculo de evaporación en estado dinámico

Igual que se comentaba en el caso 1, el cálculo supone que existe siempre un flujo de succión-evaporación a través del muro que es constante. En algunos momentos de año el flujo succión-evaporación es más significativo, coincidiendo con épocas más favorables para el movimiento del agua –como son los meses de primavera y verano- y, en otros momentos, el flujo es menor –como son los meses de invierno-.

Precisamente a partir del mes de diciembre, con el descenso de la temperatura, los flujos de succión y evaporación comienzan a descender. Entre los meses de febrero y abril, el caudal de succión (U_{in}) es más alto que el de evaporación (E_{out}). Esto mismo provoca que el agua acumulada aumente (Gráfica 204). En el mes de mayo, cuando el edificio de nuevo está ganando calor, la evaporación aumenta. En el mes de junio, sin embargo, fuera de lo esperado, aumenta la succión. El potencial de evaporación interior (E_{aero_int}) disminuye en este período, a pesar de que el potencial del exterior va en aumento, esto se debe a que el grado de humedad exterior aumenta por encima del interior ($W_{ext} > W_{int}$), dificultando la evaporación (Gráfica 168, apartado 6.2.2 “Análisis higrotérmico”). Observando los datos meteorológicos, se confirma que esto corresponde con una época de fuertes lluvias que se han producido en ese período, generando unas condiciones climáticas inadecuadas para la evaporación.

6.2.3.d EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EVAPORATIVO MEDIO DIARIO

Es necesario estudiar cómo se difunde este vapor de agua aportado por los muros (E_{out}) al ambiente, cómo se mueve y si es capaz de ser evacuado al exterior o por el contrario se queda acumulado en el interior.

Al tratarse de edificios sin sistemas de climatización, el único modo de disipar el vapor de agua que pasa al ambiente desde los muros es por medio de la ventilación natural. Por tanto, conociendo la producción de vapor de los muros, se pueden calcular las renovaciones de aire necesarias para evacuar el vapor de agua producido por los muros. Además, gracias al cálculo por ordenador con condiciones de contorno reales se puede calcular las renovaciones reales que hace el edificio al día. De esta forma, se puede conocer la capacidad de disipación de la humedad que tiene actualmente.

Para realizar estos cálculos se emplean las mismas fórmulas que se explicaron de forma desarrollada en el caso 1 (apartado 6.1.3). En este caso, se ha pasado directamente a explicar los resultados de cálculo.

Los condicionantes que se han tenido en cuenta para la ventilación natural de la capilla son los siguientes:

Por un lado, existe una ventilación constante pero reducida que se produce por las ventanas que tienen dos hojas de vidrio simple separadas para permitir la ventilación

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

(Tabla 35, apartado 6.2.1 “Descripción del edificio”). La mayoría de ventanas permanecen cerradas durante todo el año, a excepción de aquellas en las que se han colocado los data-loggers de exterior. Esto se ha tenido en cuenta a la hora de programar los horarios de apertura y la capacidad de ventilación de cada una de ellas.

Por otro lado, se ha tenido en cuenta los horarios de uso de la capilla. Todos los días se abre durante dos horas, de 10:00 a 12:00, para limpieza. Los domingos se abre una hora más, pero el resto del día la capilla permanece cerrada. En verano se producen algunas visitas puntuales a la capilla, por lo que ocasionalmente está más horas abierta. En todo caso, se trata de un régimen de ventilación muy reducido. Además, como ya se explicaba en el apartado 6.2.1, la puerta principal de la capilla no es exterior, sino que comunica con la iglesia principal, que a su vez tiene la ventilación limitada por una doble puerta.

Teniendo en cuenta todo esto, se ha calculado una tabla de renovaciones diarias (Tabla 46).

Tabla 46 Resumen de renovaciones, según los horarios de apertura de la Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo.

	Ventilacion natural [Renov/dia], según Design Builder						
	L	M	X	J	V	S	D
VERANO	1	1	1	1	1	1	1,2
INVIERNO	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1
	Infiltraciones [renov/dia]						
VERANO	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
INVIERNO	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
TOTAL VERANO	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,4
TOTAL INVIERNO	1	1	1	1	1	1	1,2

Comparando las renovaciones reales (R_r), calculadas con DB, con las necesarias (R_n), calculadas mediante la ecuación 87, sabemos si el edificio está siendo capaz de evacuar el vapor de agua que se produce en el interior.

Se puede clasificar el resultado según el siguiente enunciado:

- Si $R_r > R_n$ el edificio está siendo capaz de evacuar el vapor de agua producido por los muros.
- Si $R_r < R_n$ el edificio no es capaz de evacuar el vapor de agua producido por los muros, por tanto, se acumula en el ambiente interior.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Gráfica 206 Comparativa entre las renovaciones reales (R_r) y las renovaciones necesarias (R_n) para la capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo. En esta gráfica se detallan los resultados para una semana representativa de cada mes, con objeto de facilitar la lectura de los datos.

En la capilla, se producen algunos días en que $R_n > R_r$, lo que indica que la capilla no tiene suficientes renovaciones para disipar la evaporación producida por los muros en las condiciones en que se encuentra el aire entrante (Gráfica 206). Es necesario analizar por qué se producen estos días. Por ejemplo, en el mes de septiembre, aumentan las renovaciones necesarias respecto a meses más cálidos como agosto. Al contrario de lo que pudiera parecer, el edificio está evaporando mejor en el mes de septiembre porque las condiciones climáticas han mejorado (apartado 6.2.1 “Análisis higrotérmico”) y, por tanto, necesita un mayor número de renovaciones para disipar el vapor de agua. Sin embargo, si se observa el mes de diciembre se ve cómo las renovaciones necesarias son más altas que las de septiembre (Gráfica 206). Pudiera parecer que se trata de un mayor aumento de la evaporación, sin embargo, se veía en la Gráfica 205 cómo ha descendido E_{out} . En este mes se trata de que las condiciones climáticas son peores para la disipación de la humedad interior.

Aparentemente se da una situación en que $R_n < R_r$ por lo que podría decirse que el edificio es capaz de evacuar el agua producida por los muros la mayoría del año. Sin embargo, lo que sucede en muchos de los casos no es que sean suficientes renovaciones, sino que los muros están evaporando poco. Esto es lo que sucede en el mes de febrero (Gráfica 206). En este mes la evaporación llega a los mínimos del período monitorizado (Gráfica 205), siendo el mes más frío en el interior de la capilla, uno de los más fríos y más húmedos en el exterior (Gráficas 157 y 160 apartado 6.2.1).

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Por tanto, lo que debe averiguarse es cuándo se trata de una cantidad de evaporación significativa para la iglesia. Para ello debe cumplirse:

En primer lugar que la evaporación del muro sea mayor que la succión $E_{out} > U$,

En segundo lugar, y simultáneamente debe cumplirse que las renovaciones sean suficientes para disipar el agua que evaporan los muros $R_n < R_r$.

Por último, el aire que entra del exterior debe estar en condiciones de temperatura y humedad favorables para el secado. Por ejemplo, si el aire está más húmedo que el del interior aportará más humedad.

$$(E_{out} > U) + (R_r > R_n) + (W_{ext} < W_{int}) \quad (1)$$

Para facilitar la interpretación de la Gráfica 207 se ha separado el período monitorizado en dos Gráfica 208 y Gráfica 209. En éstas se ha marcado con color amarillo aquellos días que no cumplen la triple condición establecida por la ecuación 88.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Gráfica 208. Resultados de la comparación de las renovaciones del edificio (R_n y R_r) con la situación del clima exterior (días favorables para la ventilación = 2 en el eje Y; días semi-favorables para la ventilación = 1 en el eje Y; días no favorables = 0). Se muestra una semana representativa de cada mes para el período de Julio de 2017 hasta noviembre de 2017. En amarillo se han marcado aquellos días que no cumplen con la triple condición. Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo. En esta gráfica de detallan los resultados para una semana representativa de cada mes, con objeto de facilitar la lectura de los datos.

Gráfica 209. Resultados de la comparación de las renovaciones del edificio (R_n y R_r) con la situación del clima exterior (días favorables para la ventilación = 2 en el eje Y; días semi-favorables para la ventilación = 1 en el eje Y; días no favorables = 0). Se muestra una semana representativa de cada mes para el período de Diciembre de 2017 hasta Junio de 2018. En amarillo se han marcado aquellos días que no cumplen con la ecuación de la triple condición. Capilla del Cristo, Monasterio de Santa María de Conxo. En esta gráfica de detallan los resultados para una semana representativa de cada mes, con objeto de facilitar la lectura de los datos.

A diferencia del caso de estudio 1, en el que los días desfavorables se concentraban especialmente en invierno y el resto del año era más o menos favorable a la ventilación natural, en el caso de la capilla existen días a lo largo de todas las estaciones del año en los que no es recomendable la ventilación. Además, se trata de una cantidad importante de días, tal como se puede ver en las dos gráficas anteriores.

6.2.4 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EVAPORATIVO MEDIANTE SIMULACIÓN POR ORDENADOR

A lo largo de los apartados 6.2.2 “Análisis higrotérmico del caso 2” y 6.2.3 “Cálculo del comportamiento evaporativo del caso 2”, se enunciaron las hipótesis que se iban deduciendo a lo largo del estudio del edificio. En este apartado se realizan las comprobaciones por medio de la simulación.

Las simulaciones realizadas con el programa Design Builder han quedado validadas por medio de las gráficas 162 y 163 presentadas en el apartado 6.2.2. Por tanto, con la simulación verificada, se pueden emplear los resultados para comprobar los cálculos y análisis realizados en los apartados anteriores.

Tabla 47. Condiciones de contorno para las simulaciones de la Capilla del Cristo del Monasterio de Santa María de Conxo.

	SM01	SM02	SM03
	Agosto 2017	Noviembre 2017	Marzo 2018
$T_{SINT} [^{\circ}C]$	21,10	16,25	15
$T_{SEXT} [^{\circ}C]$	22	14,30	16
$T_{SV} [^{\circ}C]$	20	14,10	16
$T_{med} [^{\circ}C]$	21,50	16,30	17
$T_{ENT} [^{\circ}C]$	22,45	14,30	16,50

A continuación, se enuncian ordenadamente cada una de estas hipótesis y se va dando respuesta.

1ª Hipótesis: Existe gran estabilidad ambiental en el interior del edificio

Una de las razones para la estabilidad del ambiente interior es la gran inercia térmica de este edificio. Esto se ha comprobado con el análisis higrotérmico de los datos de monitorización en el apartado 6.2.2. Otra de las razones se exponía precisamente en este análisis como una hipótesis: Podría ser que la falta de ventilación sea causante de un clima interior sin variaciones. Mediante la simulación por ordenador se ha podido

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

comprobar esta hipótesis. Para ello se han realizado tres escenarios de simulación diferentes:

- **Escenario 1:** Día de verano, 21 de agosto. Con las condiciones de contorno reales que existían en la capilla para ese día (temperaturas recogidas ese día por los data-loggers) y horario de ventilación natural de ese día (10:00 – 12:00 horas).
- **Escenario 2:** Día de verano, 21 de agosto. Con las condiciones de temperatura reales, variando las horas de ventilación natural de la capilla (09:00 – 18:00 horas).
- **Escenario 3:** Día de verano, 21 de agosto. Con las condiciones de temperatura reales, variando las horas de apertura de ventilación natural de la capilla y la iglesia (09:00 – 18:00 horas).
- **Escenario 4:** Día de invierno, 1 de noviembre. Con las condiciones de temperatura reales, y horario de ventilación natural real (10:00 - 12:00).
- **Escenario 5:** Día de invierno, 1 de noviembre. Con las condiciones de temperatura reales, suponiendo la capilla completamente cerrada.
- **Escenario 6:** Día de invierno, 1 de noviembre. Con las condiciones de temperatura reales, suponiendo que la capilla y la iglesia están abiertas desde las 09:00 a las 18:00 horas.

Tabla 48. Detalles de cada una de las simulaciones desarrolladas en el apartado 6.2.3

ESCENARIO	HORARIO DE APERTURA VENTILACIÓN NATURAL		FECHA SIMULACIÓN
	CAPILLA	IGLESIA	
1	10:00 – 12:00	Horas culto	21 de agosto
2	09:00 – 18:00	Horas culto	21 de agosto
3	09:00 – 18:00	09:00 – 18:00	21 de agosto
4	10:00 – 12:00	Horas culto	1 de noviembre
5	Cerrada	Cerrada	1 de noviembre
6	09:00 – 18:00	09:00 – 18:00	1 de noviembre

Los resultados se discuten a continuación:

En la simulación de un día abierto con su horario habitual, como es el 21 de agosto, se puede ver cómo el aire en el interior no tiene prácticamente movimiento (Escenario 1, Gráfica 210 y Gráfica 211). Tal como se veía en el análisis higrotérmico, a pesar de que se trata de un día en que la capilla se abre en su horario normal, los registros de los data-loggers se mantienen planos en temperatura, y tan sólo varía ligeramente el grado de humedad en el ambiente interior (Gráfica 191, apartado 6.2.2).

Gráfica 210. Sección AA'. Distribución en sección transversal de la velocidad del aire el día 21 de agosto, suponiendo que la capilla está abierta en su horario normal de limpieza de 10:00 a 12:00h. (Escenario 1, Tabla 48)

Gráfica 211. Sección en planta de la capilla a 150cm de la cota de pavimento terminado. Distribución de la velocidad del aire el día 21 de agosto, suponiendo que la capilla está abierta en su horario normal de limpieza de 10:00 a 12:00h (Escenario 1, Tabla 48).

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Se ha realizado una simulación calculando que la capilla está abierta más horas, desde las 09:00 a las 18:00. Aun aumentando el tiempo de ventilación el aire se mantiene sin apenas movimiento. No se aprecian diferencias respecto a la simulación anterior (Escenario 2, Gráfica 212 izquierda).

Gráfica 212. Izquierda. Distribución del aire en la sección transversal de la capilla. Simulación del día 21 de agosto suponiendo que permanece abierta durante todo el día desde las 09:00 a las 18:00 horas (Escenario 2). Derecha. Distribución del aire en la sección transversal de la capilla. Los vectores indican las corrientes de viento que se producen cercanas a los paramentos, tal como se ve en la imagen. Simulación del día 21 de agosto suponiendo que tanto la capilla como la iglesia permanecen abiertas todo el día desde las 09:00 a las 18:00 horas (Escenario 3).

Esto podría deberse a que la iglesia, que también permanece cerrada excepto en las horas de culto, impidiendo la ventilación de la capilla. Para comprobar esta hipótesis, se ha simulado otro escenario en el que la iglesia también permanece abierta de forma continuada, las mismas horas que la capilla, desde las 09:00 a las 18:00 horas. En esa misma simulación también se ha programado que las ventanas de la cúpula de la capilla se mantengan abiertas, para evaluar si se produce tiro a través de la cúpula, que pudiera mejorar la ventilación natural. El resultado es una pequeña corriente de aire que discurre por las paredes, especialmente en el muro sur. Las ventanas del óculo, en caso de estar abiertas contribuirían a generar una pequeña entrada de aire, tal como prueba la simulación (Gráfica 212 derecha). El movimiento de aire es mucho menor en las capas más bajas de la capilla, por lo que es posible que su incidencia sea mínima.

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

También la temperatura cambia en el interior de la capilla. Con mayor ventilación se aprecia mayor estratificación de la temperatura en altura (Gráfica 213 derecha) que con menor ventilación (Gráfica 213 izquierda).

Gráfica 213 Izquierda. Distribución de la temperatura el día 21 de agosto, suponiendo que la capilla se abre en el horario normal (Escenario 1). Derecha. Distribución de la temperatura el día 21 de agosto suponiendo que la capilla y la iglesia se abren desde las 09:00 a las 18:00 horas (Escenario 3).

Como conclusión a la simulación de los escenarios 1, 2 y 3, obtenemos que:

- El aumento de las horas que la capilla permanece abierta ayuda a la entrada de aire exterior, siempre y cuando la iglesia permanezca abierta también.
- La apertura de las ventanas de la cúpula de la capilla ayudan a generar un tiro natural.
- En cualquier caso, el movimiento de aire que se genera es muy reducido, y su contribución es pequeña.

Por tanto, se demuestra la 1^a hipótesis: Existe gran estabilidad ambiental en el interior de la capilla. Aun aumentando la ventilación, la capilla tiene dificultad para generar un movimiento de aire suficiente para contribuir a la evaporación y disipación de la humedad ambiente.

No obstante, hay algunos períodos del año donde se ha observado que existe mayor movimiento de aire. Esto parece deberse al aumento del contraste térmico entre el interior y el exterior. Recordando lo mencionado en el apartado 6.2.2, la temperatura interior de la capilla desciende más lentamente que el exterior gracias a la inercia

térmica. Esto hace que, cuando entra el aire más frío, se genere más movimiento en el interior. Suponiendo un escenario de simulación de un día de invierno, como el 1 de noviembre, se puede ver que existe más circulación que en el mes de agosto (Gráfica 214).

Gráfica 214 Izquierda. Distribución del aire en la sección transversal de la capilla. Simulación del día 1 de noviembre suponiendo que la capilla y la iglesia abren en su horario normal (Escenario 4, Tabla 48). Derecha. Simulación del día 1 de noviembre con las mismas condiciones de contorno que el caso anterior, pero suponiendo que la capilla está cerrada (Escenario 5, Tabla 48).

Como en el caso de los meses de agosto, sigue siendo una circulación de aire pequeña, siempre cercana a las paredes, y que no llega a producir grandes flujos en todas las zonas del edificio, pero que ahora tiene una velocidad más elevada, motivada por un mayor contraste térmico. Se diferencian dos zonas claramente: una zona de mayor velocidad, cercana a las paredes (entre 0,22 y 0,32 m/s) y una zona más débil a la altura del suelo (alrededor de 0,11 o 0,16 m/s) que también se da a mayor altura. Existe una altura intermedia en la que apenas se mueve el aire (Escenario 4, Gráfica 214 izquierda). En contraste con la situación en que la capilla está abierta, se ha simulado ese mismo día con la capilla cerrada, en la que se puede ver cómo la velocidad del aire es 0m/s (Escenario 5, Gráfica 214 derecha).

CAPÍTULO 6 CASOS DE ESTUDIO – 6.2 CAPILLA DEL CRISTO, MONASTERIO STA M^a DE CONXO (SANTIAGO DE COMPOSTELA)

Si se observa un corte en planta a 60cm del suelo se ve cómo casi no existe movimiento de aire en esa cota. Se producen unas corrientes, asociadas con turbulencias en los rincones tanto del muro norte como del muro sur con una velocidad aproximada de 0,16m/s, que posiblemente sea insuficiente para ayudar a la evaporación y disipación de la humedad. Esto concuerda con lo detectado en aquellos data-loggers situados en el encuentro suelo-muro, que presentaban dificultad para disipar la humedad, especialmente teniendo en cuenta la contaminación por sales que existe en el solado (Gráfica 215). Realizando un corte a 6 metros de altura sí existe mayor velocidad del aire cercano a las paredes, como ya se veía en la sección (Gráfica 217).

Gráfica 215 Distribución de la velocidad del aire a 60cm de altura. Simulación día 1 de noviembre suponiendo horario normal de uso de la capilla (Escenario 4, Tabla 48).

Gráfica 216 Distribución de la velocidad del aire a 6 metros de altura. Simulación día 1 de noviembre suponiendo horario normal de uso de la capilla (Escenario 4, Tabla 48).

Simulando el mismo día 1 de noviembre, pero suponiendo que la iglesia y la capilla permanecen abiertas desde las 09:00 de la mañana hasta las 18:00 horas, no se han logrado aumentos importantes en la velocidad del aire a cotas bajas, como 60cm de altura (Escenario 6). Esto hace pensar que la capacidad de ventilación de la capilla tiene un límite, lógico teniendo en cuenta su forma y ubicación.

2ª Hipótesis: Existe estratificación en altura de la temperatura

En las gráficas de temperatura del análisis higrotérmico (apartado 6.2.2) se veía que existe estratificación de la temperatura, cumpliéndose que cuanto más alto el data-logger, más temperatura. Mediante la simulación se ha podido confirmar que esto sucede en todo el volumen de la capilla y en toda su altura. Esta situación se mantiene en todos los meses monitorizados, tal como revelan los datos de monitorización y confirman las simulaciones, tanto para los meses más cálidos (gráfica 14), como para los meses más fríos (gráfica 17). En esta última gráfica, correspondiente al 1 de noviembre, se puede ver que, el aire entrante enfría el interior, produciéndose una zona baja a una temperatura de entre 15 y 17°C.

Gráfica 217 Distribución de la temperatura en la sección transversal de la capilla. Resultados de la simulación del día 1 de noviembre, con horario normal de apertura de la capilla (Escenario 4, Tabla 48).

3^a Hipótesis: Algunos puntos monitorizados están en zonas más favorables al movimiento de aire que otros.

En el análisis higrotérmico se establecía como hipótesis que el data-logger 10, al estar en una zona más cercana a la puerta, podría tener más facilidad para evaporar, al estar más ventilado. Esto explicaría que tuviera más facilidad que otros puntos a la misma altura para rebajar su grado de humedad desde la saturación a una situación más cercana al equilibrio con el ambiente. No se ha podido comprobar que este punto esté en una posición más favorable a la circulación de aire, pues ninguna de las simulaciones realizadas refleja una velocidad más alta a esa zona que, por ejemplo, al punto donde se ubican los data-loggers 1 y 2 en el muro sur.

6.3. ERMITA DEL HUMILLADERO, ÁVILA

6.3.1. ESTUDIO Y DESCRIPCIÓN DEL CASO 3

- 6.3.1.a Contexto histórico sobre la construcción de la ermita*
- 6.3.1.b Características constructivas*
- 6.3.1.c Caracterización de los materiales*
- 6.3.1.d Estudio del clima de Ávila*
- 6.3.1.e Descripción de la inspección y monitorización del caso 3*
- 6.3.1.f Parámetros para la simulación del caso 3*

6.3.2. ANÁLISIS HIGROTÉRMICO

- 6.3.2.a Análisis estacional: Evolución de las tendencias generales*
- 6.3.2.b Análisis por estaciones: Invierno 2017-2018*
- 6.3.2.c Análisis por estaciones: Primavera 2018*
- 6.3.2.d Análisis por estaciones: Verano 2018*
- 6.3.2.e Conclusiones al análisis higrotérmico*

6.3.3. CÁLCULO DEL COMPORTAMIENTO EVAPORATIVO

- 6.3.3.a Cálculo de las propiedades del material para la evaporación*
- 6.3.3.b Cálculo de la evaporación de los muros*
- 6.3.3.c Evaluación del comportamiento evaporativo medio diario*
- 6.3.3.d Conclusiones al comportamiento evaporativo del caso 3*

6.3.4. SIMULACIÓN DE DIFERENTES ESCENARIOS DEL CASO 3

6.3.1. ESTUDIO Y DESCRIPCIÓN DEL CASO 3

6.3.1.a. CONTEXTO HISTÓRICO SOBRE LA CONSTRUCCIÓN DE LA ERMITA

La Ermita del Humilladero, ubicada en Ávila, fue construida entre el año 1548 y 1550 por encargo de la Hermandad de la Vera Cruz.

Figura 224. Vista general desde el lado NO de la Ermita del Humilladero.

Los humilladeros eran construcciones de uso devocional, situadas junto a las entradas a pueblos y/o ciudades. Es lógico pensar, pues, que el edificio fue siempre exento y que se encontraba extramuros.

Figura 225. Vista de la fachada Norte en el encuentro de la ermita con la sacristía.

Por las diferencias constructivas, y por el modo de resolver los encuentros de las fábricas, parece que el edificio se construyó en dos fases: inicialmente, el cuerpo de la Ermita, y posteriormente se le adosó la sacristía (Figura 225).

La ermita está parcialmente enterrada por sus lados Sur y Este, debido al desnivel existente entre la Avda., de Portugal y la Calle del Humilladero. En el lado Este, parte del muro está soterrado por la escalinata (Figura 225 y Figura 229).

Figura 226. Sección transversal, con la avd. de Portugal en la parte superior.

6.3.1.b. CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

Para poder realizar los trabajos de investigación, es necesario conocer la composición material, dimensiones y sistema constructivo del edificio. Todos estos datos serán aplicados en las diferentes fases de la investigación: ensayos, cálculos y simulación. Se describen a continuación los datos más relevantes sobre las características constructivas de este caso de estudio.

Cuerpo principal. Capilla

Figura 227. Planta principal ermita del Humilladero, Ávila.

Los muros del cuerpo de la capilla son de sillería de granito. El edificio es de planta cuadrada, con contrafuertes de granito en las cuatro esquinas (Figura 227). La cubierta de este edificio posiblemente se pensó para ser abovedada, pues están contruidos los cuatro arcos formeros y las jarjas de los arranques de los nervios de lo que podría ser la bóveda. Finalmente, quedó inacabada, o se decidió un cambio y se cubrió con tejado y artesanado de madera, cortando la parte superior de los arcos formeros (Figura 228).

Figura 228. Vista de la cubierta del Humilladero.

Los huecos se abren en tres de sus lados: Norte, Sur y Oeste. De los huecos actuales, sólo el Norte parece no haber sido modificado: consiste en una portada de medio punto, flanqueada por columnas que soportan un dintel y rematan en pequeños pináculos. El muro sur se encuentra parcialmente enterrado por el desnivel que existe en ese frente con la Avenida de Portugal (Figura 229).

Figura 229. Vista de la ermita desde la avd. de Portugal

Si se analiza la continuidad de las hiladas de sillería exteriores, se ve que son continuas hasta la línea de imposta decorativa que aparece en los contrafuertes, a media altura. A partir de ella, no hay correspondencia entre las hiladas de muro y contrafuerte. Esto ocurre con claridad en el contrafuerte NO, el SE, pero no es tan claro en los otros dos (Figura 229), en los que sí parece haber algo de continuidad. Se aprecia también que la portada Oeste, al ser recolocada en este edificio, ha generado un despiece irregular a su alrededor.

Posiblemente los paramentos interiores de la Ermita fueron revestidos, pues la sillería no tiene calidad para quedar vista, y así parecen sugerirlo los restos de pintura existentes.

En el año 1990 se llevaron a cabo unas obras de reparación motivadas por el deterioro del tejado. La estructura de madera se encontraba en mal estado y se estaba filtrando agua, que escurría al interior.

En los archivos de la Cofradía se explica que el tejado se levantó reparándose por completo. Se construyó un zuncho perimetral de hormigón, y el nuevo tejado sostenido por una estructura metálica. El artesanado se hizo nuevo.

Cuerpo añadido: Sacristía

A este primer edificio, se le añadió posteriormente el cuerpo que hoy es sacristía. No hay referencias sobre la fecha de su construcción, pero ya aparece en las fotos de 1860 (Figura 230)

Figura 230. Vista de Ávila 1860-1865. André Adolphe Eugène Disdéri. Fondo Fotográfico de la Universidad de Navarra. BUNAB20110002725

Inicialmente constaba de dos pisos: la planta baja, al nivel de la Ermita, y una planta alta, que sirve como local de reunión y archivo de la Cofradía. En las obras de 1990 (Proyecto de intervención a cargo de D. José Ramón Oria Martínez-Conde) se excavó un sótano, que es actualmente almacén. Para construirlo se debió reforzar interiormente la cimentación con un recercado de hormigón apoyado en la roca que debe servir de cimentación a todo el edificio. Posteriormente, se excavó por el interior la piedra misma para hacer el vaciado del sótano. La piedra que sirve de apoyo a la cimentación queda a la vista en uno de los muros.

Los muros del cuerpo de la Sacristía son de sillería careada, no muy regular en los lechos de las hiladas. Los sillares son mayores en el muro Sur que en el Norte.

El tejado es de madera, con cubierta a tres aguas. El vertido de agua de pluviales se realiza de forma directa, cayendo el agua al pavimento desde las cornisas.

La configuración del terreno, que se extrae del análisis histórico de imágenes, señala que existía un fuerte desnivel entre la actual Avda. de Portugal, y la Avda. de Madrid, que se salvaba mediante varios muros de contención. El solar de la propia Iglesia de San Vicente queda confinada por uno de ellos. (Figura 231)

Figura 231. Puerta de San Vicente hacia 1863, con la subida desde el Humilladero Se aprecia el muro de contención de la Avda. de Portugal, y las escaleras de bajada Foto: Auguste Muriel. 1863. Forma parte del álbum 22 de "Chemin de Fer du Nord de l'Espagne". 1864. Paris. Bibliothèque National. France. Gallica-Bnf-fr- Source: 30 : F. 24. Ávila.

Ya en las fotografías más antiguas (desde 1860) existía el desnivel que da origen a que la Ermita del Humilladero esté parcialmente enterrada por debajo de la cota de la Avda. de Portugal.

Figura 232. Vista del espacio entre San Vicente y el Humilladero, antes de su renovación. h. 1930 (posiblemente anterior) Ampliación de una Postal. Foto: José Mayoral. Colección José Luis Pajares

La Tabla 49 sintetiza los elementos constructivos anteriormente descritos. Esta tabla sirve como base para definir en el modelo tridimensional del edificio realizado por ordenador las características físicas de la realidad del edificio para conseguir precisión en la simulación.

Tabla 49 Características físicas de los principales elementos constructivos que componen la ermita del Humilladero de Ávila.

Elemento constructivo	Material	b [m]	Detalle constructivo e imágenes
Muros	Pilares y contrafuertes en las esquinas de granito, con entropaños de mampostería de granito y rellenos varios.	Mampostería b=0,20m Contrafuertes b=1,6x1,6m	<div> <p>01 - Muro de mampostería e=20cm 02 - Acera 03 - Zahorra 04 - Terreno</p></div> <div> </div>

b: espesor del elemento [m]

Elemento constructivo	Material	b [m]	Detalle constructivo e imágenes
Solado interior	Solado de losas de granito	0,10m
Ventana muro Sur	Carpintería de acero y vidrio laminar.	2,5x2,3m
Puerta muro oeste/ muro norte	Carpintería de acero con vidrio laminar y malla de protección solar.	3,25x7,7m

Elemento constructivo	Material	b [m]	Detalle constructivo e imágenes
Cubierta	Cubierta de teja sobre estructura y artesonado de madera

6.3.1.c. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

En el capítulo 5 “*Metodología*”, apartado 5.3.2 “*Parámetros materiales*”, se detallaba la cantidad de muestras tomada en cada edificio, a qué ensayo va destinada cada muestra, qué valores se obtienen de cada ensayo, y la finalidad de estos valores.

En la Tabla 50 se recogen la relación de muestras tomadas en el caso 3, la Ermita del Humilladero.

Tabla 50. Relación de muestras recogidas en la Ermita del Humilladero (Ávila)

Código	Fecha de toma	Material	Estado ¹	Lugar extracción	Ensayo ²
H01	11/09/2015	Granito	C, E	7344_5	EH4
H02	11/09/2015	Granito	C, E	7344_5	EH1, EH2, EH3
H03	11/09/2015	Granito	C, E	7344_5	EP1, EH2
H04	11/09/2015	Granito	C, E	7344_5	EP2

¹ La traducción de los códigos empleados para denominar el estado en el que se encontraba la muestras cuando se tomó en el edificio se recogen en la tabla 8 del capítulo 5 “*Metodología*”.

² La traducción de los códigos empleados para denominar los ensayos que se llevaron a cabo con cada una de las muestras se recogen en la tabla 8 del capítulo 5 “*Metodología*”.

Las muestras se tomaron en el muro sur bajo la ventana (Figura 233).

Figura 233. Ubicación sobre el plano de planta de los puntos de toma de muestras en el caso 3, Ermita del Humilladero.

En los apartados siguientes se detallan los resultados de los ensayos realizados en las muestras de este caso 3. En primer lugar, se explican los resultados de la caracterización petrográfica de una de las muestras de piedra. En segundo lugar, se explican los resultados obtenidos en los diferentes ensayos hídricos llevados a cabo en las otras muestras.

Caracterización petrográfica y mineralógica de la roca empleada en la Ermita del Humilladero.

Estos ensayos se llevaron a cabo en el Centro de Asistencia a la Investigación (CAI) de la Facultad de Ciencias Geológicas, de la Universidad Complutense de Madrid. Para estos ensayos se han empleado pequeñas cantidades de muestra, numeradas como H03 y H04, ambas de granito. El objetivo de estos ensayos era, conocer la composición mineral exacta de este granito, observar su estado de degradación y estructura porosa.

[EP1] Difracción de Rayos-X (DRX):

La muestra H03 se empleó para realizar ensayos de Difracción de Rayos-X (Figura 234). La técnica de DRX se explica en el capítulo 5 “Metodología”, y el procedimiento llevado a cabo para la preparación de las muestras del caso 1 y 3 se cuenta en el caso de estudio 1, Iglesia de Santiago de Peñalba, en su apartado correspondiente. En este caso, se van a describir simplemente los resultados del difractograma que se obtiene.

Figura 234. Preparación de la muestra H02 para colocar en portamuestras para ensayo DRX.

Los resultados del difractograma de la muestra H03 revelan la presencia de cuarzo en más de un 45%, feldespatos calco-potásicos y moscovita (0,7%). Los feldespatos presentan cierta alteración superficial.

Gráfica 218. Difractograma muestra H03

[EP2] Microscopía óptica de polarización (MOP):

Las imágenes muestran que se trata de un granito de grano medio a grande, compuesto por cuarzo y feldespatos mayoritariamente, con algunas micas en pequeña cantidad. Los feldespatos aparecen en algunos casos semialterados. El tamaño de los cristales es grande y no se aprecian zonados.

A- MUESTRA H04/01 - NP
B- MUESTRA H04/01 - NC
C- MUESTRA H04/02 - NP
D- MUESTRA H04/02 - NC

Figura 235. Imágenes lámina delgada muestra H04.

Ensayos hídricos

Los ensayos hídricos realizados para esta tesis, se llevaron a cabo en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.

Para la realización de los ensayos hídricos se emplearon 3 muestras (H01, H02 y H03), ambas de granito.

Como se ha explicado anteriormente, las muestras se han podido recoger durante los ensayos in-situ realizados en el muro sur. Una de las muestras se ha sometido a ensayos de absorción capilar y posteriormente a secado (H02). La otra muestra se ha sometido

a absorción de vapor de agua, mediante cámara húmeda (H01). Todos los resultados se comentan con detenimiento en los apartados siguientes.

Respecto al procedimiento seguido para realizar estos ensayos, es necesario matizar que, las muestras empleadas no cumplen con el estándar en cuanto a forma y tamaño que indica la norma. Al tratarse de un edificio histórico, las muestras que se han tomado son de pequeñas dimensiones. Además, en la mayoría de casos, el material que se extrae se encuentra degradado, por lo que es más difícil recoger una muestra con buena integridad material. Como ya se ha explicado en el capítulo 5 “Metodología”, se adaptan los ensayos a las posibilidades del material con el que se cuenta.

Tabla 51. Características físicas obtenidas de los ensayos hídricos realizados en muestras de material de la ermita del Humilladero, Ávila.

	H02
Volumen aparente (V_b) [mm]	15,67
Densidad aparente (ρ_b) [kg/m ³]	1870
Densidad real (ρ_r) [kg/m ³]	2370
Porosidad abierta (f_0) [%] *	1,69
Coefficiente de absorción A_b [%]	0,7

[EH1] Ensayos de absorción al agua por absorción capilar:

La norma que rige este ensayo es la UNE-EN 15801:2010. *Conservación del patrimonio cultural. Método de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad*. De manera complementaria, si se trata de materiales pétreos, se podría considerar la UNE-EN 1925: 1999. *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad*.

Dado que las muestras del edificio no son regulares, el cálculo del coeficiente de absorción capilar no tiene un valor fiable³. No obstante, puede emplearse el ensayo para conocer la curva de absorción capilar, que da como resultado el comportamiento de la piedra y el mortero del edificio frente al agua, aunque se trate de un dato más bien cualitativo, de la misma manera que se ha realizado para el caso de estudio 1 y 2.

³ En el caso de estudio 1, en el apartado [EH1] se explicaba cómo otros investigadores realizan la caracterización hídrica de muestras para poder obtener las propiedades físicas de piedras y morteros.

Gráfica 219 Curva de absorción capilar de la muestra de piedra (H02) de la ermita del Humilladero.

De la muestra de granito (H02), se ha obtenido una curva de absorción muy alta, lo tiene relación con la alteración (Figura 235) y la contaminación por sales que se ha observado en el muro (Figura 237). La pendiente más pronunciada de la curva, que indica el momento de rápida absorción se produce entre 0 y los 30 primeros minutos. Al cabo de 1 hora la muestra de granito ya se encuentra saturada al alcanzar peso constante. El granito se caracteriza por ser una piedra con un índice de absorción bajo. A modo comparativo, se han ensayado muestras de granito en laboratorio que no se encuentra alterado (G2, G4 y G12). Si se comparan los resultados de los granitos “sanos” con la muestra del edificio se puede ver cómo ninguna de las muestras llega a alcanzar más de un 0,2% de cantidad absorbida de agua. Sin embargo, H02 aumenta hasta 0,9%.

Después de la saturación capilar, la muestra se sometió a absorción por inmersión hasta que se satura completamente. Una vez alcanzada esta situación, se coloca la muestra en una bandeja sin agua para ponerla a secar a temperatura constante, hasta que de nuevo alcanza peso seco constante. Los resultados de secado dibujan una gráfica en la que se ve que la muestra parte de un porcentaje de agua por peso de 2,17%. Seca al cabo de 23 horas.

Gráfica 220 Curva de secado a presión atmosférica y temperatura constante (20°C) de la muestra H02 de granito. Ermita del Humilladero.

[EH2] y [EH3] Cálculo de la densidad aparente, porosidad abierta, y ensayo de absorción bajo presión (Inmersión):

Cálculo de la densidad aparente (ρ_b):

En primer lugar, se seca la muestra en estufa hasta alcanzar peso constante, así se obtiene el peso seco (m_d). Para el cálculo de la masa saturada, por medio del ensayo de absorción capilar, se somete la probeta a succión de agua. Cuando ésta ha alcanzado peso constante, se sumerge en agua a presión atmosférica, teniendo sobre la muestra una columna de mínimo 5cm de agua, según indican las prescripciones del ensayo UNE-EN 13755:2008. El peso obtenido se considera como peso saturado (m_s). Para obtener el peso sumergido (m_h), se pesa la muestra con balanza hidrostática. La fórmula de cálculo se puede consultar en el capítulo 5 “Metodología”. Los resultados de cálculo se recogen en la Tabla 51

Calculo de la porosidad abierta (f_0):

El valor obtenido para la muestra H02 es de $f_0 = 1,69\%$, que es un valor bajo, pero más alto que algunos de los granitos que podemos encontrar estudiados en la literatura especializada. Esta alteración en las propiedades físicas tiene relación la degradación del material (Sanjurjo, Alves 2006, Iñigo Iñigo, Vicente Tabera et al. 1995).

[EH4] Ensayo de sorción higroscópica (Cámara húmeda):

La muestra H01 se ha empleado para realizar ensayos de absorción a vapor de agua, mediante cámara húmeda, siguiendo las estipulaciones de la norma *Prestaciones higrotérmicas de los productos y materiales para edificación. Determinación de las propiedades de sorción higroscópica UNE-EN ISO 12571:2002*. En el capítulo 5, metodología se explica el procedimiento llevado a cabo para realizar este ensayo, así como el material empleado.

Para las muestras recogidas, se ha obtenido una curva (Gráfica 221) con una absorción de vapor de agua baja, pero que crece a medida que aumenta la humedad relativa de la cámara húmeda. Esto seguramente se deba a un material contaminado por sales. La principal fuente de sales se debe a la ubicación de la capilla respecto a la avd. de Portugal, y al clima invernal de Ávila, que obliga al uso constante de sal en viales y aceras durante los meses de invierno.

En el caso concreto del muro sur, estas sales se ponen de manifiesto en los meses más secos, cuando las eflorescencias invaden el paramento sur, tanto en la zona de la sacristía como en la capilla (Figura 237).

Gráfica 221. Ensayo de Sorción Higroscópica para los materiales de la ermita del Humilladero.

En las gráficas siguientes (Gráfica 222, Gráfica 223 y Gráfica 224), cada una de ellas correspondiente a una de las cámaras (33%, 75%, 98% respectivamente), se puede ver la semejanza en el comportamiento de la muestra. Existe un primer momento de

pendiente relativamente elevada (TRAMO 1), seguidamente de una zona con cambio gradual de pendiente (TRAMO 2), y finalmente, un tramo horizontal (TRAMO 3). Esto se traduce en un momento inicial de rápida absorción de humedad respecto a $\sqrt{t}$. Cuanto más aumenta la HR de la cámara, más tarda en estabilizarse el contenido de humedad adsorbido por la muestra. Tal como se ve en la Gráfica 221, parece que la muestra es más reactiva a la sal de la cámara HR98%, es decir, a KNO_3 , al contrario de lo que se esperaba. Pues, al encontrarse el muro sur parcialmente enterrado bajo la acera, se esperaba encontrar un granito más contaminado por sal de deshielo, como la de la cámara 2. Los nitratos suelen pertenecer a la descomposición de materia orgánica, por lo que es posible que existe una contaminación que se deba a otra fuente, de la cual no se conoce el origen.

Gráfica 222 Curvas de absorción de vapor de agua (HR:33%): Contenido en agua (u) en función del tiempo ($\sqrt{t}$)

Gráfica 223. Curvas de absorción de vapor de agua (HR:75%): Contenido en agua (u) en función del tiempo ($\sqrt{t}$)

Gráfica 224. Curvas de absorción de vapor de agua (HR:98%): Contenido en agua (u) en función del tiempo ($\sqrt{t}$)

Conclusiones generales a los ensayos hídricos:

- Se ha encontrado que el granito se encuentra contaminado por sales higroscópicas, lo que hace que sea más sensible al agua de lo normal.
- Los valores obtenidos de las propiedades físicas en estas muestras difieren un poco de los valores que se suelen encontrar en granito, lo que debe ser tenido

en cuenta a la hora de hacer los cálculos de succión y evaporación del muro, así como para la simulación por ordenador del edificio.

6.3.1.d. ESTUDIO DEL CLIMA DE ÁVILA

El clima de Ávila se caracteriza por tener veranos cortos y cálidos en contraste con sus inviernos fríos. En general, se trata de un clima seco durante todo el año. La temperatura anual media varía entre -1°C y 29°C . La temporada cálida se extiende sobre mediados de junio hasta mediados de septiembre. La temporada fría se extiende desde mediados de noviembre a principios de marzo.

La época con mayor número de precipitaciones se produce entre finales de septiembre hasta mediados de junio, con una probabilidad media del 13% de día lluvioso. La temporada más seca en Ávila se produce entre junio y septiembre, con tan solo un 5% de probabilidad media de lluvia.

La velocidad del viento promedio por hora en Ávila tiene variaciones estacionales leves a lo largo del transcurso del año. La época del año más ventosa se produce entre octubre y mayo, mientras que la época de mayores calmas es entre mayo y octubre. El día promedio más calmado del año es el 26 de agosto. La dirección más frecuente del viento es la Oeste, con un porcentaje de probabilidad del 35%. La dirección Norte del viento se produce con un porcentaje máximo del 33%. El viento del Sur se produce con un porcentaje máximo del 30%, con mayor frecuencia en el mes de octubre.

Según el Atlas Agroclimático de Castilla y León de 2013 publicado en la página web de AEMET⁴, las medias anuales de los principales valores climáticos son las siguientes:

Temperatura media anual $10,8^{\circ}\text{C}$

Precipitación media anual: 395mm, con una media de 67 días de lluvia al año.

Radiación solar media anual entre 1.683,33 a $1.708,33\text{ kW/m}^2\cdot\text{año}$

Evapotranspiración media anual: 692mm

Detalles de la estación meteorológica:

La estación empleada para la toma de datos meteorológicos para la ermita es la de Muñogalindo (Ávila), situada a 20km de distancia. La ubicación es latitud $40^{\circ} 36' 13'' \text{ N}$, longitud $4^{\circ} 54' 5'' \text{ O}$. Se encuentra a una altitud de 1128msnm, similar a la de Ávila (1132msnm). Se considera como una buena precisión para obtener datos climatológicos. Se trata de la estación más cercana. Los componentes de la estación meteorológica son los mismos que los descritos en el caso de estudio 1.

⁴ Página web de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) www.aemet.es

Este documento emplea como fuente para realizar las medias anuales valores de los datos recogidos durante el trienio 1981 a 2010 de las estaciones meteorológicas de AEMET.

Figura 236 Imagen de la estación de Muñogalindo (Ávila)

Análisis de los datos climatológicos:

En la Tabla 52 se describen las medias mensuales de los principales parámetros climáticos. Las medias corresponden a los meses estudiados. La temperatura y la humedad relativa se han calculado mediante monitorización con registradores situados en dos puntos del exterior de la ermita, en dos orientaciones diferentes para asegurar una media más precisa.

Tabla 52 Medias mensuales de los principales parámetros para los meses estudiados en la ermita del humilladero de Ávila.

Mes	T [°C] media	HR [%] media	Pp [mm]	v [m/s] media
Diciembre 2017	3,10	83,56	96,58	223,61
Enero 2018	2,76	85,21	2,67	27,87
Febrero 2018	1,54	81,81	2,59	39,21
Marzo 2018	4,77	76,43	3,83	76,67
Abril 2018	8,97	74,36	2,92	53,67
Mayo 2018	11,47	75,46	1,74	41,55
Junio 2018	16,39	68,88	1,86	21,30

Para el caso de Ávila, este periodo ha sido bastante seco, especialmente entre los meses de enero y febrero (Gráfica 225), pero intensos en nevadas. Los momentos de mayores lluvias se producen en los meses de marzo y abril. El día de mayor lluvia se produce a finales de febrero.

Gráfica 225. Evolución de la pluviosidad [mm] durante el período monitorizado, desde el mes de diciembre de 2017 hasta el mes de abril de 2018. Los días, del eje de abscisas se han representado en días julianos. Gráfica realizada con los datos proporcionados por la estación meteorológica

Las temperaturas medias durante los meses de invierno han estado más cercanas a los 0°C que en los demás edificios monitorizados, recogiendo también las temperaturas mínimas más bajas, llegando a los 20°C bajo cero algunos días de enero (Gráfica 226).

Gráfica 226 Evolución de la temperatura [°C] durante el período monitorizado, desde el mes de diciembre de 2017 y hasta el mes de abril de 2018. Los días, del eje de abscisas se han representado en días julianos. Gráfica realizada con los datos proporcionados por la estación meteorológica.

A lo largo del periodo estudiado se da una velocidad media más o menos constante, cercana a los 3m/s durante los meses de invierno y primavera, alcanzando valores de hasta 8m/s, y pocos días por debajo de 1 m/s (Gráfica 227).

Gráfica 227 Evolución de la velocidad del viento [m/s] durante el período monitorizado, desde el mes de diciembre de 2017 y hasta el mes de abril de 2018. Los días, del eje de abscisas se han representado en días julianos. Gráfica realizada con los datos proporcionados por la estación meteorológica.

En cuanto a la dirección del viento (Gráfica 228), según los datos de la AEMET, el viento suele seguir las direcciones noroeste, con velocidades máximas entre los 15,30 y los 30 km/h, y sureste, con velocidades entre los 15 y los 30 km/h.

Gráfica 228 Rosa de los vientos de Ávila. Datos promedio tomados de los registros entre el año 2000 y 2011. Fuente: AEMET

En lo que respecta a la radiación solar del período monitorizado, la tendencia es ascendente desde el mes de diciembre hacia los meses de verano, en los que se alcanza el máximo de radiación solar.

Gráfica 229 Registros de (R_s) radiación solar [MJ/m^2] registrada entre los meses de diciembre de 2017 y abril de 2018, según la estación meteorológica. En el eje de abscisas se ha expresado el tiempo en días julianos.

6.3.1.e. DESCRIPCIÓN DE LA INSPECCIÓN Y MONITORIZACIÓN DEL CASO 3

Hipótesis establecidas para la monitorización del edificio

Las hipótesis planteadas para este caso de estudio son similares al caso 1, la Iglesia de Santiago de Peñalba, y caso 2, la Capilla del Cristo de Conxo. En los tres edificios existe algún muro afectado por una aparente filtración de agua del exterior, que es en el que se coloca la cuadrícula de registradores⁵. La diferencia en este caso, con respecto a los otros dos, es que el muro objeto del estudio se encuentra parcialmente soterrado por el desnivel de la calle (Ver Figura 226).

En el caso de la Ermita del Humilladero, se han realizado trabajos de toma de datos sobre el edificio a lo largo de dos momentos que se pueden diferenciar como: antes y después de la intervención que se realizó para resolver las lesiones por humedad que presentaba el edificio.

1º Antes de la intervención:

a) Estado del edificio previo a la intervención:

El edificio presentaba deterioro por arenización de los morteros de juntas. Las zonas más afectadas son las que quedan bajo el nivel del pavimento de la Avenida de Portugal y la escalera que baja adosada al muro Este de la Ermita (Figura 225 y Figura 238). En algunas zonas se observaron eflorescencias en las inspecciones realizadas en el mes de octubre (Figura 237). Las lesiones se extienden en todo el muro sur soterrado, tanto en la sacristía como en la capilla. En los días de lluvia se apreciaba en algunas zonas afloramiento de agua a través de las juntas del muro sur.

⁵ El método de análisis detallado en cuadrícula se explica en el capítulo 5 “Metodología”.

Figura 237. Eflorescencias en el muro sur. Imagen de la derecha: ampliación de la zona marcada en rojo en la izquierda.

El pavimento exterior presenta pendiente que escurre el agua en dirección contraria al encuentro con el muro de la Ermita. No obstante, existe una zona cercana al contrafuerte SE en la que el agua se encharcaba. Esto podía sugerir una zona con mayor índice de retención de agua, que pudiese filtrar al muro.

Figura 238. Sección longitudinal ermita del Humilladero, donde se puede ver la relación del muro este con la escalinata.

En las escaleras del lado Este de la ermita, había algunas juntas entre peldaños que estaban abiertas, debido a que los escalones habían sufrido algunas deformaciones con el tiempo. Esto podía estar suponiendo un punto de entrada de agua.

b) Hipótesis planteadas previas a la intervención:

Las preguntas que se debían responder en un primer momento eran:

¿Por qué puntos entra el agua?

¿Cómo se extiende?

¿Cómo afecta a los muros? ¿Dónde se produce y porqué la evaporación del agua que absorben los muros?

¿Son capaces de evaporar el agua?

¿Qué papel tiene el ambiente del edificio en esta evaporación?

Dada la ubicación de las lesiones, parece que el agua de lluvia entraba y se embolsaba en algún punto del muro, pasando al interior a través de las juntas del muro que se encuentra en contacto con el terreno.

Para poder relacionar la fuente de humedad con la precipitación atmosférica, es necesario hacer un seguimiento de las lesiones. Se deben localizar los focos exactos que son fuente de humedad sobre el muro, para poder realizar un seguimiento.

c) El sistema establecido para detectar los focos de evaporación:

Para poder localizar los focos se realizaron inspecciones mediante termohigrómetro Testo 625 de lectura instantánea varios días, antes y después de períodos de lluvia, en los meses de octubre, noviembre, febrero y marzo. Este método no proporciona datos directos sobre el contenido en humedad de los materiales, pero sí aporta información precisa sobre la humedad presente en dicha lámina superficial de aire, e indirectamente sobre la "intensidad" con la que muro puede estar evaporando (García-Morales, et al., 2012).

Figura 239. Ejemplo de las lecturas tomadas con termohigrómetro sobre el muro norte de la capilla. Las inspecciones constaron de un total superior a 400 puntos. Zona [7344_WALL_5_0_0]

Al encontrarse el muro parcialmente soterrado y tratarse de una posible lesión por filtración de agua de lluvia, la inspección con termohigrómetro se realizó de manera especialmente pormenorizada, dado que podían existir varios puntos de filtración, al contrario de lo que sucede cuando se trata de una filtración por capilaridad, que el agua asciende en altura de una manera más uniforme. (Figura 239).

Además de los termohigrómetros, en algunas de las inspecciones se emplearon otras técnicas complementarias⁶ como humidímetros de contacto, termografía infrarroja y tomografía de resistividad eléctrica. Los resultados de la combinación de todas las técnicas empleadas se recogen en la tesis doctoral de Laura López González⁷.

Tabla 53. Técnicas empleadas en cada inspección.

Fecha de inspección	Técnicas empleadas
10/10/2014	Termohigrómetro
21/10/2014	Termohigrómetro
14/11/2014	Termohigrómetro y otras TND
24/02/2015	Termohigrómetro y otras TND
12/03/2015	Termohigrómetro y otras TND

Para poder representar los resultados de los ensayos, se clasifican y numeran las diferentes zonas del edificio con una serie de códigos numéricos (Tabla 55 y Figura 240).

⁶ Todas las técnicas de inspección empleadas en este tipo de estudios son Técnicas No Destructivas (TND).

⁷ En la tesis doctoral de Laura López González, se sistematiza un modo de trabajo en el que los datos tomados mediante diferentes TND sobre un mismo punto se clasifican, asociando los datos tomados en cada punto a una o varias ortofotografías del edificio que se georreferencian.

Tabla 54. Descripción de los códigos empleados para denominar a los distintos tramos de muro en los que se ubican los data-loggers y se toman medidas manuales con termohigrómetro u otras TND.

UBICACIÓN EDIFICIO	CÓDIGO DE MURO
MURO NORTE CAPILLA	7344_WALL_3_0_0
MURO SUR CAPILLA	7344_WALL_5_0_0
MURO OESTE CAPILLA	7344_WALL_4_0_0
MURO DIVISOR SACRISTÍA - CAPILLA	7060_PARTITION_5_0_0
MURO SUR SACRISTÍA	7060_WALL_8_0_0
MURO ESTE SACRISTÍA	7060_WALL_9_0_0
AMBIENTE	7344
EXTERIOR	EXTERIOR

Figura 240. Plano de planta de la ermita del Humilladero sobre el que se ubican los códigos alfanuméricos asignados a cada tramo de muro.

d) Descripción de los resultados de estudios previos a la intervención

Las inspecciones realizadas los días 10/10/2014 y 21/10/2014 con termohigrómetro permitieron localizar los puntos que presentaban mayor grado de humedad sobre los muros y que debían ser estudiados en detenimiento.

En la Gráfica 230 se ve cómo los puntos de mayor evaporación se localizan sobre el muro sur (tramo 7344_Wall_5_0_0). Tal como se ve en las gráficas, el muro norte (tramo 7344_Wall_3_0_0) presenta un grado de humedad más bajo que el sur.

Gráfica 230 Grado de humedad (W) medido el día 10/10/2014 (primer día de inspección) en la ermita del Humilladero. En la gráfica se puede ver que los mayores focos se sitúan en el muro sur (7344_Wall_5_0_0) siendo muro sur semienterrado.

Gráfica 231 Grado de humedad (W) medido el día 21/10/2014 (segundo día de inspección) en la ermita del Humilladero. En la gráfica se puede ver que los mayores focos se sitúan en el muro sur (7344_Wall_5_0_0) siendo muro sur semienterrado.

En las imágenes inferiores (Figura 241, Figura 242, Figura 243 y Figura 244) se han clasificado los focos de evaporación mediante un código de color. Esta clasificación deriva de los valores de grado de humedad (W) representados sobre las Gráfica 230 y Gráfica 231 (Tabla 55). El cálculo de grado de humedad se obtiene con los datos de temperatura (T) y humedad relativa (HR) del termohigrómetro.

Tabla 55. Clasificación de colores asociados a los niveles de grado de humedad representados en las gráficas.

	Grado de humedad bajo
	Grado de humedad medio
	Grado de humedad intenso

Figura 241 .Izquierda. Muro sur de la ermita, en la zona [7344_WALL_5_0_0]. Resultados del día 10/10/2014 (primer día de inspección). Derecha. Misma zona, resultados del día 21/10/2014 (segundo día de inspección). Fuente: Estudio sobre Humedad Ermita del Humilladero (Ávila). Redactado por la arquitecta Soledad García Morales. Colaboradores: Laura López González y Raquel Otero Ortiz de Cosca.

Figura 242 Izquierda. Zona [7060_WALL_8_0_0]⁸ del muro sur de la sacristía. Resultados del día 10/10/2014 (primer día de inspección). Derecha. Zona [7060_WALL_8_0_0] del muro sur de la sacristía. Resultados del día 21/10/2014 (segundo día de inspección). Fuente: Estudio sobre Humedad Ermita del Humilladero (Ávila), redactado por la arquitecta Soledad García. Colaboradores: Laura López González y Raquel Otero Ortiz de Cosca.

Figura 243 Izquierda. Zona [7060_WALL_8_0_0] del muro sur de la sacristía. Resultados del día 10/10/2014 (primer día de inspección). Derecha. Zona [7060_WALL_8_0_0] del muro sur de la sacristía. Resultados del día 21/10/2014 (segundo día de inspección). Fuente: Estudio sobre Humedad Ermita del Humilladero (Ávila), redactado por la arquitecta Soledad García. Colaboradores: Laura López González y Raquel Otero Ortiz de Cosca.

⁸ Las zonas se describen con un código numérico que se encuentra en el plano de planta de la ermita.

Figura 244 Zona [7344_WALL_3_0_0] de la capilla, muro norte. Resultados de la inspección con termohigrómetro del día 10/10/2014. Fuente: *Estudio sobre Humedad Ermita del Humilladero (Ávila)*, redactado por la arquitecta Soledad García. Colaboradores: Laura López González y Raquel Otero Ortiz de Cosca.

Como se puede ver en las imágenes Figura 241 y Figura 242, el primer día de inspección se obtiene un grado de humedad no muy intenso sobre pared. El segundo día de inspección, después de las lluvias, los valores obtenidos en la inspección se intensifican. En las imágenes Figura 243 y Figura 244 del segundo día, tanto de la sacristía como de la capilla, se localizan dos zonas principales que presentan focos de intensidad elevada:

- En las zonas altas del muro, lo que sugería que la fuente de agua provenía de la acera, como se ha sugerido en los apartados anteriores, a modo de hipótesis.
- Algunos puntos en las zonas de encuentro del suelo con el muro, como sucedía el primer día de inspección, y que sugería una fuente de humedad más cercana a la cimentación, también en relación a la lluvia en forma de un agua que se embolsa.

Con las sucesivas inspecciones se pueden comparar las diferencias entre los niveles de grado de humedad a lo largo del tiempo. Se aprecia que el muro va dejando de evaporar en los meses más fríos, entre octubre y febrero, y vuelve a evaporar cuando empiezan a subir las temperaturas en el mes de marzo.

Gráfica 232 se cruzan datos de varios días para la ermita del Humilladero de temperatura y grado de humedad. Fuente: Estudio sobre Humedad Ermita del Humilladero (Ávila), redactado por la arquitecta Soledad García. Colaboradores: Laura López González y Raquel Otero Ortiz de Cosca.

Gracias al trabajo de toma de datos pormenorizada, la cuantificación del grado de humedad y con ayuda de la representación mediante sistema georreferenciado (Lopez-Gonzalez 2015, Lopez-Gonzalez, Otero-Ortiz de Cosca et al. 2016) se ha podido identificar una línea de evaporación horizontal ligeramente por debajo del nivel de la acera, la cual indica que el agua se acumula en ese punto y se filtra lentamente hacia el suelo de la capilla buscando los regueros a los que tiene acceso.

e) Conclusiones a los estudios previos a la intervención

En esta primera fase de estudio, ha permitido localizar los puntos que serían objeto de la posterior monitorización higrotérmica en cuadrícula. Al contrario de lo que sucedía en el caso de estudio 1, en el que el sistema de monitorización se diseña para recoger especialmente puntos de cota 0 (en el encuentro del suelo con el muro), en este caso es importante la monitorización en altura, pues han aparecido puntos con un grado de humedad elevado en zonas superiores (Figura 242), que pueden ser focos de evaporación importantes.

Como se ve en este caso, la inspección manual ha resultado fundamental para que el diseño de la monitorización sea eficiente y adecuado al estudio de las hipótesis planteadas.

Una vez localizados los posibles focos de evaporación que son objeto de estudio, se puede proceder a su seguimiento.

Con las conclusiones de este trabajo se realizaron varias ponencias en congresos internacionales y publicaciones en revistas científicas con objeto de dar difusión a los trabajos realizados (Lopez-Gonzalez, Otero-Ortiz de Cosca, Gomez-Heras, Garcia-Morales, and Sanz-Arauz 2016, Lopez-Gonzalez, Gomez-Heras et al. 2016, Lopez-Gonzalez, Otero-Ortiz de Cosca, Gomez-Heras, and Garcia-Morales 2016, Gomez-Heras, Garcia-Morales et al. 2015).

2º Después de la intervención:

a) Estado del edificio:

Durante el período que se ha trabajado en este edificio se llevaron a cabo labores para solventar el problema de las filtraciones por agua en el muro sur. Esto supone una ventaja y una desventaja para los resultados de este trabajo. Por un lado, la campaña de toma de datos previa a la intervención no es todo lo extensa que pudiera ser conveniente a la hora de poder comparar los valores con el estado posterior a la intervención. Por otra parte, precisamente la intervención tiene la ventaja de frenar una fuente de agua que circulaba a través del muro al interior, por lo que se pueden hacer hipótesis sobre cómo está secando ese muro, si los focos de humedad remiten o no en relación con el ambiente de la ermita, y cómo afecta esta modificación de valores higrotérmicos al ambiente y viceversa.

Algunos meses después de la intervención, en un primer análisis visual de los puntos por los que se filtraba el agua, se evidencia que las lesiones de humedad ya no son tan acusadas y las manchas de humedad que existían están desapareciendo lentamente. No se aprecian signos de acceso de agua tan intensos como los que se veían antes de la intervención, por lo que parece que la fuente de agua ha remitido. No obstante, aunque no tan intensos, se aprecia todavía un grado de humedad mucho más elevado en el muro sur que en el muro norte. La descripción detallada de los resultados se expone en el apartado 6.3.2 de análisis higrotérmico.

b) Hipótesis que se deben responder después de la intervención

Dado que el edificio está protegido de la filtración de agua que se estaba produciendo, se le supone una situación de evaporación de esta agua, condicionada a la capacidad del muro y de su ambiente de evaporarla y teniendo en cuenta los condicionantes climáticos.

Es posible que el uso que tiene el edificio afecte a la capacidad de evaporación del mismo, dado que el aire tiene pocas posibilidades de renovación, condicionadas a horarios puntuales de uso del edificio por parte de la Cofradía de la Vera Cruz. A pesar de tener una relación de hueco/macizo considerablemente mayor que el resto de casos estudiados, es posible que esté peor ventilado.

¿Cuánto influye la ventilación en la capacidad de evaporación del muro, a pesar de que ha remitido la fuente de humedad?

Además de esta cuestión, otra más general es: ¿Siguen existiendo focos de evaporación?

c) El sistema de monitorización higrotérmico establecido:

Al mismo tiempo que se realiza la monitorización de los focos de evaporación, es necesario realizar un seguimiento de varios puntos del edificio, como se explica en el capítulo 5 de metodología. De esta manera, se podrá realizar un estudio global del comportamiento ambiental del edificio ante el fenómeno de evaporación. En el caso de la Ermita del Humilladero, la disposición del sistema de monitorización empleado se explica en el siguiente apartado.

Descripción del sistema de monitorización realizado

Se coloca una cuadrícula de 8 registradores de temperatura y humedad en el muro sur, que como se ha explicado, se encuentra parcialmente soterrado y estaba afectado por humedad de del terreno. Además, se colocan data-loggers de ambiente, tanto en el interior –para evaluar el gradiente térmico y de humedad- como en el exterior del edificio, a modo de registro climático. Además del muro sur, se monitoriza un punto de referencia en el muro norte, a modo de contraste, de la misma manera que se hace en el resto de casos de estudio. La comparativa entre el muro sur y norte es interesante, pues es la en contraposición con un muro no soterrado en el mismo ambiente.

Tabla 56 Tabla de numeración y ubicación de los equipos registradores de humedad y temperatura (data-loggers) en la ermita de Humilladero .

UBICACIÓN DT HUMILLADERO			
UBICACIÓN EDIFICIO	CÓDIGO DESIGN BUILDER	Nº DT	ALTURA (m)
MURO NORTE	7344_WALL_3_0_0	DT04	0
MURO SUR	7344_WALL_5_0_0	DT1	3
		DT2	1,5
		DT3	0
		DT7	3
		DT10	0
		DT11	1,5
MURO SUR SACRISTÍA	7060_WALL_8_0_0	DT8	1,5
		DT12	0
AMBIENTE	7344	DT5	1,5
EXTERIOR	EXTERIOR	DT6	3
		DT9	6

En conjunto, esto permite evaluar el comportamiento evaporativo de la Ermita en función de los diferentes factores que le afectan.

Figura 245. Planta de ubicación de data-loggers en la ermita del Humilladero.

Figura 246 Sección AA' de ubicación de data-loggers en ermita de Humilladero.

Figura 247. Sección BB' de ubicación de data-loggers en ermita de Humilladero.

6.3.1.f. PARÁMETROS PARA LA SIMULACIÓN DEL CASO 3

Propiedades de los materiales

En primer lugar, es importante aclarar, que, aunque las gráficas de simulación CFD obtenidas de Design Builder se encuentran en el apartado 6.3.4, la simulación se ha empelado en algunas fases previas:

- En el apartado 6.3.3.b: para obtener datos sobre la velocidad del aire en el interior del edificio, que serán usados para el cálculo de evaporación de los muros.
- En el apartado 6.3.3.c.: para obtener datos sobre las renovaciones de aire que hace diariamente el edificio, que serán usados para el análisis de la capacidad de disipación de la humedad.

Por ello, se ha considerado necesario, antes de los cálculos de evaporación, contar cómo se ha realizado la simulación de la ermita y cómo se ha validado el modelo, que luego se empleará para los cálculos de los apartados 6.3.3.b y 6.3.3.c.

Con todos los datos históricos recogidos, así como la toma de datos in-situ y los ensayos sobre los materiales realizados en el laboratorio se obtuvieron todos los parámetros materiales que se consideran necesarios para introducir en el programa.

Los muros se introducen en el programa como elementos de doble hoja (Tabla 49, sección del muro sur de la Ermita). La hoja exterior, de granito, un relleno interior y otra hoja interior de sillares. En la zona del muro sur donde se ubica la cuadrícula de monitorización el espesor del muro es de unos 20cm. Esta dimensión se comprobó en las excavaciones que se hicieron en esa zona del muro, en la que también se pudo ver que existe un macizado de relleno en esa zona del muro (Figura 248). Este cambio de espesor se ha tenido en cuenta en el levantamiento del modelo, dejando esa parte del muro soterrado. En este caso de estudio el terreno tiene gran incidencia sobre los resultados de la simulación, especialmente en ese muro. El espesor medio de los muros es de $b = 90$ cm.

Figura 248 Excavación arqueológica en el muro sur, bajo la acera. En la imagen se puede ver el relleno del muro.

Como se ha explicado en el capítulo 5 “Metodología”, el programa permite el cálculo con HAM, lo que resulta muy conveniente, dado que los intercambios de energía y masa de este tipo de edificios están muy condicionados por la envolvente. En la tabla 11 del capítulo de metodología se describían las propiedades de los materiales que es necesario conocer para la simulación. Algunas de ellas se han obtenido de los ensayos antes detallados. Como ya se ha explicado en el caso de estudio 1 y 2, una futura línea a seguir, para complementar este método de trabajo podría ser la creación de tablas más precisas para la simulación de este tipo de edificios, con problemas de alteración material.

Condiciones iniciales para la simulación

Tabla 57. Parámetros climáticos característicos para Ávila.

PARÁMETROS CLIMÁTICOS CARACTERÍSTICOS DE LA UBICACIÓN GEOGRÁFICA	
Elevación sobre el nivel del mar	1132 m
Latitud y longitud	40.66, -4.69
Clasificación Koppen	Cfb
Zona climática ASHRAE	4A
Zona horaria	GMT +1:00
Inicio de invierno	Octubre
Final de invierno	Marzo
Inicio de verano	Abril
Final de verano	Septiembre

La ermita dispone de un sistema de calefacción centralizado que discurre bajo el solado de la capilla, pero actualmente no está en uso. En algunas ocasiones, cuando la cofradía se reúne se encienden unas estufas de gas durante unas horas. Esto se nota en los registros higrotérmicos de esos días concretos. Su incidencia sobre el ambiente general de la ermita es menor, pues pasan poco tiempo encendidas y enseguida se nota el descenso de la temperatura en el interior. Por tanto, a excepción de los momentos en que las estufas están encendidas, se considera el edificio como sin sistemas HVAC, y se ha simulado con este criterio.

En cuanto a la ventilación, es el caso de estudio, de los 3 desarrollados, que presenta mayor proporción de huecos, pues posee grandes ventanales en la parte de capilla. A pesar de esto, la ventilación natural en este edificio es muy reducida, al igual que en los otros dos casos de estudio, pues el ventanal del muro sur está formado por un vidrio fijo y el de Oeste sólo se abre en ocasiones puntuales. Además, la ermita permanece cerrada casi todo el tiempo, a excepción de los días puntuales en que se reúne la cofradía. Este régimen de uso se ha tenido en cuenta para programar la ventilación natural que se debe atribuir a la simulación. Como en los dos casos anteriores, se ha realizado un pre-cálculo de las renovaciones que el edificio es capaz de realizar, en base a las mediciones realizadas con anemómetro, el cálculo del volumen del edificio, y las dimensiones de los huecos. Las fórmulas se han explicado extensamente en el capítulo 2 “Fundamentos teóricos”.

A diferencia de los otros dos casos de estudio, no existe un horario exacto que se pueda estipular, sino que, con la colaboración de los miembros de la Cofradía de la Santa Vera Cruz se ha llevado un registro de los días en que ha habido actividad en la capilla, para poder identificar las tendencias higrotérmicas de la monitorización con la programación de la simulación.

Tabla 58. Resumen de ventanas ermita del Humilladero

VENTANAS	Dimensiones [cm]	Ubicación	Altura [cm]
V01	80 x 125	7060_WALL_8_0_0	200
V02	250 X 228	7344_WALL_5_0_0	200
V03	250 X 434	7344_WALL_3_0_0	0
V04	100 X 125	7060_WALL_9_0_0	502
V05	100 X 100	7060_WALL_8_0_0	502

Tabla 59. Resumen de puertas ermita del Humilladero

PUERTAS	Dimensiones [cm]	Ubicación
P01 (exterior)	500 X 815	7344_WALL_4_0_0
P02 (exterior)	90 X 237	7060_WALL_9_0_0
P03 (interior)	100 X 210	7060_P_5_0_0

Las condiciones de contorno son importantes, y la simulación debe iniciarse con los valores adecuados. En muchos casos ocurre que se emplean valores estimados muy generales. Esto supone resultados poco precisos, especialmente en el caso de este tipo de edificios, en los que las principales interacciones con el exterior se producen a través de la envolvente. Para evitar esta imprecisión, el procedimiento ha sido tomar lecturas de temperatura sobre todos los paramentos necesarios y en el ambiente interior y exterior en todos los momentos del año que fuese necesario para poder realizar las simulaciones, tal como se hizo en el caso 1 y 2. Con esto se consiguieron medidas más precisas. Por ejemplo, para la temperatura media interior (T_{med}) se ha realizado la media entre data-loggers colocados a distintas alturas y en distintos puntos del edificio.

En el apartado 6.3.4 “Simulación de diferentes escenarios del caso 3” se detallan los valores empleados para cada simulación resumidos en una tabla.

Los elementos que rodean al edificio son también un condicionante importante. En el caso de la Ermita del Humilladero se encuentra ubicada en la ciudad de Ávila, por lo que está rodeada de edificios más altos en el lado Sur y Este. En el lado norte y Oeste, discurre una plaza amplia, por lo que no tiene ningún elemento cercano que arroje sombra y la proteja del viento. Otros de los factores más notables es el que se viene comentando desde el principio de este capítulo, y es la ubicación del edificio en una zona con desniveles, que deja parte de la Ermita soterrada (Figura 226, Figura 229 y Figura 249). Todos estos elementos se han tenido en cuenta a la hora de hacer el levantamiento volumétrico para el cálculo.

Figura 249. Proceso de creación del desnivel del terreno dibujado en el entorno de la ermita, siguiendo las cotas indicadas por la planimetría para el estudio de la incidencia de éste sobre el edificio.

Figura 250. Proceso de creación del entorno con los edificios que rodean a la Ermita en las zonas Este y Sur.

Validación de la simulación para el caso 3

Para poder comparar la precisión del modelo simulado con el calculado, se comparan los datos que se obtienen de la simulación con los de monitorización. En este caso se presenta la comparativa de la simulación de una semana de enero con los datos de temperatura y humedad medidos esos mismos días en el edificio. Tanto la Gráfica 233 como la Gráfica 234 representan la simulación y monitorización del ambiente de la zona de capilla de la ermita. El DT5 presenta los datos de grado de humedad (Gráfica 233) y temperatura (Gráfica 234) medidos en un punto a media altura en el ambiente de la capilla. La línea discontinua representa esos mismos valores, pero resultados de la simulación. La línea azul representa la variación del exterior. Al igual que sucedía en el caso 1, la temperatura simulada presenta mayor diferencia con la medida en el edificio que en el caso del grado de humedad. Como ya se ha comentado antes, es posible que se deba a ciertas imprecisiones en cuanto a las propiedades térmicas de los materiales, complejas de definir por el problema de la heterogeneidad de los muros, y de los propios materiales, así como del estado de conservación de los mismos.

Gráfica 233. Resultados del grado de humedad media (W) obtenida para la simulación del ambiente interior ("Simulación ambiente DB" en discontinua verde) en comparación con el valor de grado de humedad medido mediante data-loggers ("Ambiente monitorizado DT" en línea marrón). Se ha representado también el grado de humedad exterior ("Exterior" en línea azul continua). Se representa en esta gráfica la semana del 13 de enero al 19 de enero de 2018. Ermita del Humilladero (Ávila).

Gráfica 234. Resultados de la temperatura media (T) obtenida para la simulación del ambiente interior ("Simulación ambiente DB" en discontinua verde) en comparación con el valor de temperatura medido mediante data-loggers ("Ambiente monitorizado DT" en línea marrón). Se ha representado también el grado de humedad exterior ("Exterior" en línea azul continua). Se representa en esta gráfica la semana del 13 de enero al 19 de enero de 2018. Ermita del Humilladero (Ávila).

6.3.2 ANÁLISIS HIGROTÉRMICO

Introducción

En este apartado se presentan los valores medios diarios de temperatura (T), humedad relativa (HR) y grado de humedad (W) de los puntos monitorizados en la ermita del Humilladero. Como en los casos de estudio anteriores, estos valores se ordenan por meses, de manera que se pueda ver cómo evoluciona el edificio en todo el período monitorizado. Se ha monitorizado de manera continuada desde el mes de diciembre de 2017 hasta junio de 2018. En el apartado anterior se describían la cantidad y ubicación de los data-loggers.

6.3.2.a ANÁLISIS ESTACIONAL: EVOLUCIÓN DE LAS TENDENCIAS GENERALES

En las gráficas de este apartado se presentan los datos higrotérmicos de una semana representativa de cada mes para todo el período monitorizado. Cada una de estas semanas ofrece una idea de la tendencia de comportamiento del edificio a lo largo de todo el mes.

El edificio empieza a calentarse a partir del mes de marzo, experimentando un ascenso importante de la temperatura que se hace notar en el mes de abril. La temperatura de los puntos monitorizados en el interior acompaña la tendencia en temperatura del exterior. La temperatura más baja del período monitorizado se alcanza en el mes de enero, tanto en el exterior como en el interior. Durante los meses más fríos, entre diciembre y marzo, el punto con más temperatura es el DT3 que se encuentra en el encuentro del solado con el muro (cota -2,07m Figura 251) ubicado en el muro sur. A éste le sigue el punto DT4, también en el encuentro solado-muro, pero en el muro norte. De lo que se deduce que, durante el invierno la zona más baja es la más caliente, al contrario de lo que encontrábamos en los otros dos casos de estudio anteriores, que la tendencia de la temperatura era que: cuanto mayor altura del punto, mayor temperatura. El siguiente punto con menor temperatura es DT2, ubicado a 1,5 metros de altura desde cota de pavimento interior terminado, ubicado sobre pared sur. El punto más frío durante los meses fríos es DT3, ubicado en pared a tres metros de altura desde cota de pavimento interior terminado (Figura 251). Por tanto, cuanto más se asciende en altura sobre la pared sur, más fría es la temperatura. Esto tiene sentido teniendo en cuenta que los puntos más altos se alejan de la zona del muro que está semienterrada, y además están cercanos a una ventana, lo que puede hacer que existan filtraciones de aire más frío.

En el mes de marzo esta tendencia comienza a invertirse, y el punto con mayor temperatura pasa a ser DT3 a 3 metros de altura desde la cota del pavimento interior terminado (Figura 251, Gráfica 235). Esto concuerda con el aumento de la temperatura del exterior. El punto DT2, ubicado en pared sur a mitad de altura (1,5 metros) es el que, a lo largo de todos los meses monitorizados, presenta la curva más estable, aumentando

o disminuyendo su temperatura con el exterior, pero siempre de manera más contenida al no estar influenciado por la ventana ni por el encuentro con el solado.

Gráfica 235 Evolución de la temperatura media diaria [°C] medida en diferentes puntos del interior y el exterior de la ermita del Humilladero. Se representa todo el período monitorizado, desde el mes de diciembre de 2017 hasta junio de 2018. En la gráfica figuran los datos de una semana representativa de cada mes.

Figura 251 Sección en la que se ve la zona semienterrada en el muro sur, y la ubicación de los dataloggers 1, 2 y 3 sobre este muro. Ermita del Humilladero (Ávila).

En cuanto al grado de humedad, el interior varía siguiendo la fluctuación del exterior. En los meses más fríos, el grado de humedad más elevado es el de DT3, en el encuentro solado-muro. En el momento en que empieza a aumentar la temperatura, a partir de marzo, DT1 empieza a aumentar su grado de humedad. Al aumentar la temperatura, especialmente al tratarse de un punto ubicado en el muro sur, aumenta el grado de humedad. En el mes de abril, el punto DT1 ya supera notablemente al DT3. Esto se debe a que, la humedad que pueda haber contenida bajo el pavimento de la calle y la zona del muro más cercana a la acera reciben el calor de los días más cálidos a partir de abril, por lo que tienen mayor facilidad para evaporar, lo que deriva en un aumento del grado de humedad.

El punto ubicado a una altura intermedia, DT2, mantiene un grado de humedad menor y más estable, como sucedía en este mismo punto con la temperatura, al encontrarse influenciado por la estabilidad de la zona semienterrada del muro.

Gráfica 236 Evolución del grado de humedad medio diario [g/kg] medido en diferentes puntos del interior y del exterior para la ermita del Humilladero. Se representa todo el período monitorizado, desde el mes de diciembre de 2017, hasta junio de 2018. En la gráfica figuran los datos de una semana representativa de cada mes.

Inercia hídrica

La relación general que existe entre el grado de humedad interior y exterior para todo el período monitorizado es que: A mayor grado de humedad exterior, mayor grado de humedad interior. Esto dibuja una gráfica en sentido diagonal ascendente desde los meses más fríos a los meses más cálidos (Gráfica 237).

Gráfica 237 Relación entre el grado de humedad interior (W_{int}) y el exterior (W_{ext}) en los diferentes meses monitorizados.

Una simplificación de la gráfica anterior se puede realizar calculando los valores medios de grado de humedad interior y exterior para cada mes monitorizado. De esta forma se obtiene una nueva gráfica en la que se puede ver fácilmente la inercia hídrica del edificio. La diagonal trazada en la gráfica indica la franja en la que $W_{int} = W_{ext}$. Los puntos que estén en esta diagonal indican meses en los que el grado de humedad en el interior y en el exterior es igual, lo que significaría que no existe atenuación hídrica interior-exterior. Para este edificio, a excepción del mes de mayo, el resto de meses existe mayor grado de humedad en el interior que en el exterior. La atenuación hídrica en este caso habla de un edificio que mantiene un grado de humedad más elevado en el interior pues tiene poca ventilación (Gráfica 238).

Los meses con mayor diferencia entre el interior y el exterior, para todo el período monitorizado, son marzo y abril. Esto corresponde con el aumento de la temperatura exterior (Gráfica 235) que aumenta el grado de humedad interior al calentarse el edificio y empezar a evaporar.

En el mes de marzo el edificio abre con más frecuencia que el resto del año, debido a los preparativos de las celebraciones religiosas de Semana Santa. Además, para las procesiones se abre la puerta Oeste, que conecta directamente con la parte de la capilla, lo que podría favorecer una ventilación más directa que la puerta Este, en la sacristía, que es la que generalmente se abre. En marzo el grado de humedad exterior es más bajo que el interior, y el aire aún es frío, lo que supondría una calidad de aire adecuada para la evaporación. Dado que hay mayor ventilación, se podría suponer que se produce una situación favorable durante este mes.

Para comprobar si el grado de humedad elevado que se ve en la Gráfica 238 efectivamente se debe a una situación de evaporación se ha estudiado el comportamiento higrotérmico durante esos días de mayor ventilación, que se detalla en el análisis primavera 2018.

Como se verá más adelante, el cálculo de la evaporación del muro y la respuesta del intercambio de aire con el exterior permite conocer si el comportamiento evaporativo de estos días era efectivo o no (apartado 6.3.3 estudio del comportamiento evaporativo del caso 3). Los resultados se muestran en el apartado correspondiente.

Además, se ha considerado interesante analizar la influencia de la apertura de la puerta oeste sobre el edificio mediante el análisis CFD. De esta manera se puede conocer el alcance y la influencia de la ventilación a través de esta puerta con mayor detalle (apartado 6.3.4).

Gráfica 238 Grado de humedad medio de cada mes para el interior (W_{int}) y el exterior (W_{ext}). Ermita del Humilladero.

Inercia térmica

La relación entre la temperatura interior (T_{int}) y exterior (T_{ext}), en general, es tal que: *A mayor temperatura exterior, mayor temperatura en el interior* (Gráfica 239). A medida que desciende la temperatura exterior desciende la interior, pero de manera más lenta. Por ejemplo, en el mes de junio hay valores de temperatura interior iguales a los de mayo, sin embargo, se ve un descenso de la temperatura exterior. El mes de abril, ha sido cálido. Algunos días tienen la misma temperatura que el mes de mayo o junio. Sin embargo, el interior está más frío porque aún no ha ganado suficiente calor desde el invierno. Los valores de los meses más fríos son de diciembre a marzo. Al contrario que

en los otros dos casos de estudio, la ermita presenta una nube de puntos dispersa en los meses más fríos. La dispersión es mayor en los valores de exterior, que oscilan entre los 0 y 8 °C. Si recordamos la gráfica 226 de la evolución de la temperatura exterior máxima, media y mínima (apartado 6.3.1), podemos recordar que había mucha dispersión, por ejemplo, enero presenta la temperatura mínima más baja de todo el período monitorizado, pero también la temperatura máxima más alta desde diciembre a marzo. El interior, es más estable y sus valores oscilan entre los 2 y 8 °C.

Gráfica 239 Relación entre la temperatura interior (T_{int}) y el exterior (T_{ext}) en los diferentes meses del año monitorizado. Ermita del Humilladero.

Comparando los valores medios de temperatura interior (T_{int}) frente al exterior (T_{ext}) para cada mes monitorizado se puede ver de manera sencilla cómo cambia la tendencia a través de las distintas estaciones. Cuando más cercanos se encuentren los puntos a la diagonal ($T_{int} = T_{ext}$) indica que existe una menor atenuación y que la temperatura del interior se parece a la del exterior. En este caso, existe atenuación en los meses más fríos, pues las medias mensuales de los meses de diciembre, enero, febrero y marzo se encuentran por encima de la diagonal, es decir, la temperatura interior es mayor que la exterior (Gráfica 240). Esto mismo sucedía en los dos casos de estudio anteriores. El edificio ha ganado calor durante los meses más cálidos y lo pierde lentamente durante los meses más fríos. En este caso de estudio, el edificio tiene mayor capacidad de atenuación que el caso 1, por ejemplo, en que los valores de los meses más fríos se acercaban más a la diagonal, lo que indicaba atenuación, pero menor que en este caso.

En abril, por ejemplo, vemos que la atenuación es menor, pues la temperatura del exterior es mayor que la del interior. El edificio ha ido perdiendo el calor acumulado en

los meses fríos, y cuando empieza a aumentar la temperatura en el exterior, que en este caso era en abril, como se veía en la Gráfica 235, el edificio está frío. Sin embargo, en el mes de mayo y junio, ya ha recuperado calor el interior.

Gráfica 240 Medias mensuales de grado de humedad, valores medios interiores (W_{int}) frente a valores medios exteriores (W_{ext}). Ermita del Humilladero.

Localización de comportamientos alejados de las tendencias estacionales

Si se confrontan los datos de temperatura y grado de humedad de cada mes, tanto para el interior (los puntos del interior están marcados con un aspa sobre la Gráfica 241) como para el exterior (los puntos del exterior están marcados con un círculo sobre la Gráfica 241), se obtiene una gráfica en la que lo primero que se ve es una relación clara entre la evolución del exterior y la del interior, tal como se veía en las Gráfica 235 y Gráfica 236. Cuanto mayor es la temperatura y el grado de humedad exterior, mayor es el del interior. En general la tendencia es ascendente hacia los meses más cálidos, que son los que tienen mayor temperatura y mayor grado de humedad, tanto en el exterior como en el interior.

Por otra parte, en todos los meses se puede observar que la tendencia es que el interior presente valores de grado de humedad más altos que los del exterior (la tendencia general a lo largo de los meses sigue la diagonal marcada con línea discontinua). En los meses más cálidos, mayo y junio, las nubes de puntos se dispersan, indicando una mayor oscilación higrotérmica. La nube de puntos del mes de mayo no cumple la tendencia de los otros meses. En mayo se produce una menor oscilación de la temperatura en el eje X, sin embargo, una mayor oscilación del grado de humedad en el eje Y. Este mes, que presenta un comportamiento anómalo, se analiza por estaciones para ver cuál es el

motivo de la oscilación del grado de humedad. El mes de abril y junio se presentan un conjunto de puntos que se salen de la nube de puntos general, y de la tendencia ascendente diagonal de todo el período monitorizado. Como sucedía cuando se analizó el caso 1, es necesario localizar dónde están ubicados estos puntos.

Gráfica 241 Relación del grado de humedad (W) con la temperatura (T) a lo largo de los diferentes meses del año. Medias mensuales. Ermita del Humilladero.

Los puntos que presentan comportamiento anómalo en el mes de junio son DT3, ubicado en el encuentro del suelo con el muro sur y DT7, localizado también en el muro sur a 3 metros. Concretamente, DT7 se acerca en algunos momentos a la saturación, como se puede ver, por ejemplo, en el día de 13 de junio (Gráfica 237, Figura 252). Esto indica un foco de humedad a la altura donde el muro semienterrado se encuentra con la acera. Esto indica una posible acumulación de agua de acera que genera un foco de humedad a esa altura. Esto ya había sido observado en los estudios previos a la monitorización realizados entre 2014 y 2015 antes descritos en el apartado 6.3.1. El foco detectado en DT3 se encuentra en el suelo, e la zona que ya en los estudios previos presentaba humedad antes de la intervención del drenaje de la acera. Es posible que este foco se deba a que aún existe algo de humedad en el terreno que está secando.

Gráfica 242 Psicrométrico con valores medios de temperatura (T) y grado de humedad (W), medidos el 13/06/2018, en la ermita del Humilladero.

Figura 252 En rojo ubicación de los data-loggers DT3 y DT7 en los que se localizan dos focos de humedad en el mes de junio.

El mes de mayo presentaba también una serie de puntos anómalos. Localizados sobre un gráfico psicrométrico se ve que ya DT7 y DT3 tenían un grado de humedad más elevado que el resto de los puntos (Gráfica 243). La diferencia con este mes y el mes de junio es posiblemente las lluvias que se producen a finales del mes de mayo y principios de junio (Gráfica 225 Pluviometría de la ermita del Humilladero, apartado 6.3.1), que sumadas al aumento de la temperatura hacen que se produzca un foco de humedad más intenso.

Gráfica 243 Psicrométrico con valores medios de temperatura (T) y grado de humedad (W), medidos el 13/05/2018, en la ermita del Humilladero.

6.3.2.b ANÁLISIS POR ESTACIONES: INVIERNO 2017-2018

Según los informes de la AEMET, el mes de diciembre en Ávila ha sido más frío de lo normal, calificado como extremadamente frío, con temperaturas que no alcanzan el valor mínimo registrado en el período de referencia 1981 – 2010. El mes de enero, ha sido un poco más cálido, con un 1°C por encima de lo esperado.

Si se observan los datos registrados en el edificio entre el 13 y el 19 de enero se ve que la temperatura exterior llega a alcanzar valores negativos entre el día 14 y el 15 que llegan casi a los -4°C. A excepción del registro de ambiente interior, el resto de puntos monitorizados se mantienen sin variaciones entre los 4 y 6°C sin verse afectados por los aumentos y caídas de temperatura del exterior, lo que de nuevo nos recuerda la inercia del edificio que se venía observando desde el análisis inicial.

Gráfica 244 Evolución de la temperatura (T) de la ermita del Humilladero en el período comprendido entre el 13/01/2018 y el 19/01/2018.

Con el aumento de la temperatura a valores positivos entre el día 16 y 17 aumenta también el grado de humedad en el exterior (Gráfica 245). Esto se hace notar en el interior, que sufre un aumento del grado de humedad progresivo en DT1 y DT2 (ubicados en pared sur a 3 y 1,5m respectivamente) en clara relación con el del exterior. No existen registros de que se haya abierto durante estos días la capilla para ninguna celebración, solamente se abrió puntualmente para realizar inspecciones en el sótano, por una pequeña fuga de agua proveniente de una instalación cercana que apareció en estas fechas. La apertura de la puerta de acceso desde la sacristía podría haber producido la entrada de humedad del exterior, que entre los días 16 y 17 era mayor que la del interior, pero de ser así, se habrían producido aumentos notables en fracciones de hora. Por lo que se puede ver en la gráfica 6, no existen aumentos concentrados en

horas. Por la forma de la curva de DT1 y DT2 el aumento del interior se debe más a un aumento de la temperatura.

También cabe pensar que la entrada de aire que se produce por la puerta de la sacristía es tan pequeña que los data-loggers colocados en la capilla no se ven afectados. Siendo así, sería importante tenerlo en cuenta si se quisiera ventilar adecuadamente la capilla, pues la puerta de acceso desde la sacristía es la que generalmente se abre y no parece afectar a la zona de la capilla. El alcance de la ventilación que se produce por la puerta Este de la sacristía se analiza en el apartado 6.3.4 mediante simulación por ordenador.

Gráfica 245. Evolución del grado de humedad (W) de la ermita del Humilladero durante el período comprendido entre el 13/01/2018 y el 19/01/2018.

6.3.2.c ANÁLISIS POR ESTACIONES: PRIMAVERA 2018

Los informes de la AEMET describen el mes de marzo como muy frío en toda la comunidad de Castilla y León, aunque la temperatura más alta del mes se registra precisamente en Ávila el día 28. Esto se puede observar también en los registros llevados a cabo en el exterior del edificio con los DT9 y DT6, cuya media es la línea azul “Exterior” sobre la Gráfica 246. También los informes definen marzo como un mes muy húmedo. En la gráfica 9 se puede ver cómo el grado de humedad medio ha pasado de los 4,5 g/kg del mes de enero a los 5,25 g/kg en el mes de marzo. Esto es lógico, dado el aumento también de las temperaturas que empiezan a aumentar en este mes, al acercarse a estaciones más cálidas. Es sobretodo en abril cuando se detecta el aumento de temperatura más notable (Gráfica 235). A partir del día 28 la temperatura del punto DT7 se diferencia de la media del resto de puntos, registrando alrededor de 1°C más que el resto.

Gráfica 246 Evolución de la temperatura (T) de la ermita del Humilladero en el período comprendido entre el 24/03/2018 y el 30/03/2018.

También el grado de humedad aumenta en DT7 en esas fechas (Gráfica 247). En general, los puntos DT7 y DT3 presentan un grado de humedad más alto que el resto de puntos, tal como se explicaba con las Gráfica 241, Gráfica 242 y Gráfica 243.

Gráfica 247. Evolución del grado de humedad (W) de la ermita del Humilladero durante el período comprendido entre el 24/03/2018 y el 30/03/2018.

Parte de este aumento de grado de humedad y temperatura en DT7 podría venir ayudado por el aumento de temperatura del exterior. Por otro lado, el documento que registra los horarios de uso del edificio, registra diferentes celebraciones religiosas en la capilla durante estos días. La puerta de acceso oeste de la capilla se abre los días 29 y 30 para las procesiones de Semana Santa. Esto podría provocar un aumento del grado de humedad interior. Sin embargo, cuando se observan los registros diarios, como por ejemplo el día 29 se ve que se producen picos de aumento de temperatura entre las 09:30 y las 10:00, coincidiendo con la hora en que se abre por la mañana la puerta oeste, y otro pico a las 17:30 horas, coincidiendo con la apertura por la tarde (Gráfica 248). Pero estos cambios no producen una incidencia prolongada sobre el edificio. Tal es así, que el grado de humedad de DT7 no se ve alterado y solamente el ambiente interior, DT2 y DT4 registran un pico que dura apenas una hora (Gráfica 249). De esto se deducen dos cosas. Por un lado, que la apertura de la puerta oeste (a pesar de ser un hueco de grandes dimensiones) tampoco es suficiente para mover el aire si se trata de una apertura que dura poco tiempo. Por otra parte, se comprueba que el aumento de DT7 no se debe a las fluctuaciones producidas por los intercambios a través de los huecos.

Gráfica 248 Evolución de la temperatura (T) de la ermita del Humilladero durante el día 29/03/2018.

Gráfica 249 Evolución del grado de humedad (W) de la ermita del Humilladero durante el día 29/03/2018.

El día 13 de mayo también se abre la puerta oeste de la capilla. Esto se nota en el descenso de la temperatura y del grado de humedad alrededor de las 10:30 horas de la mañana (Gráfica 249 y Gráfica 250).

A diferencia del día 29 de marzo, este día la temperatura del exterior es más baja que la del interior, también es más bajo el grado de humedad exterior que el interior. Ambos factores juntos suponen un día más favorable que el de marzo para la disipación de la humedad del interior. Es por esto que, a diferencia del día 29 de marzo, este día los data-

loggers experimentan un descenso más acusado de grado de humedad en el momento en que se abren las puertas (Gráfica 251).

Gráfica 250 Evolución de la temperatura (T) de la ermita del Humilladero durante el día 13/05/2018.

Gráfica 251 Evolución del grado de humedad (W) de la ermita del Humilladero durante el día 13/05/2018.

A pesar de este descenso, tanto la temperatura como el grado de humedad recuperan enseguida su tendencia cuando se cierra la puerta. Por tanto, el tiempo de ventilación es insuficiente a pesar de las condiciones favorables del clima exterior.

Mediante la simulación por ordenador se puede comprobar cuántas horas de ventilación son necesarias para que la entrada de aire modifique el grado de humedad del interior de manera significativa.

En un día cerrado, como por ejemplo el 24 de marzo, la temperatura en todos los puntos del interior se comporta de manera estable, con una temperatura muy similar entre ellos y con el ambiente interior (Gráfica 252). También el grado de humedad se presenta como estable (Gráfica 253).

Gráfica 252 Evolución de la temperatura (T) de la ermita del Humilladero durante el día 24/03/2018.

Gráfica 253 Evolución del grado de humedad (W) de la ermita del Humilladero durante el día 24/03/2018.

6.3.2.d ANÁLISIS POR ESTACIONES: VERANO 2018

Ha sido un mes cálido, según los informes climatológicos, con temperaturas dentro de los valores típicos para la época del año. La temperatura media medida en el exterior de la ermita ha sido de $19,07^{\circ}\text{C}$ en el mes de junio, y la del interior algo más baja $16,95^{\circ}\text{C}$. DT7 y DT3 continúan presentando valores más elevados de grado de humedad que el resto de puntos, que se encuentran en un equilibrio cercano al del ambiente interior (Gráfica 254).

Gráfica 254 Evolución del grado de humedad (W) de la ermita del Humilladero en el período comprendido entre el 13/06/2018 y el 19/06/2018.

Gráfica 255 Evolución de la temperatura (T) de la ermita del Humilladero en el período comprendido entre el 13/06/2018 y el 19/06/2018.

6.3.2.e CONCLUSIONES AL ANÁLISIS HIGROTÉRMICO

Se exponen a continuación las conclusiones más importantes extraídas del análisis higrotérmico de los datos de monitorización de la ermita. Estos resultados servirán para orientar los cálculos de los apartados siguientes.

Respecto al análisis estacional:

Del estudio estacional realizado, se deducen las siguientes tendencias de comportamiento higrotérmico del edificio:

- El edificio empieza a acumular calor en primavera y verano. Debido a su inercia térmica pierde el calor acumulado más lentamente de lo que se enfría el clima exterior.
- Se ha observado que se trata de un interior muy estable, con apenas variaciones diarias. Los cambios en temperatura y humedad vienen motivados por los cambios estacionales del clima exterior.
- Los puntos con comportamiento anómalo que reflejan focos de humedad se encuentran en la pared sur semienterrada. Esto corresponde con las previsiones realizadas en las inspecciones manuales previas a la monitorización. Los focos se localizan en DT7 y DT3. El primero en el encuentro del muro con la acera, el segundo en el encuentro del solado interior con el muro.
Estos focos se vuelven más intensos coincidiendo con los meses más cálidos. DT7 es más sensible a las variaciones diarias de temperatura debido a su ubicación cercana a la ventana, y alejado de la zona más enterrada del muro. DT3 es más estable y menos intenso.
- No se observa un grado de humedad elevado en la ermita, a excepción de los dos focos antes comentados. El resto de puntos monitorizados mantienen un grado de humedad similar al del ambiente.
- A diferencia de los otros dos casos de estudio, no se mantiene un gradiente higrotérmico en pared constante durante todo el año en el que se cumpla que a mayor altura mayor temperatura. En este caso, en los meses más fríos, los puntos que conservan mayor temperatura son los que están más bajos, como DT3. En los meses más cálidos, se invierte la tendencia, siendo los puntos más altos los que adquieren temperatura, por influencia del calentamiento del exterior. En esta tendencia parecen influir la ventana y el terreno en el lado sur.

Conclusiones al análisis diario:

En los apartados anteriores se presentaron gráficas de algunos días concretos en los que se veían las variaciones horarias que se producen en el interior del edificio, acompañando al análisis de la evolución del edificio a lo largo de las diferentes estaciones analizadas. A continuación, se exponen los detalles observados de este análisis diario:

- Se han podido localizar variaciones horarias en T y W debido a la ventilación por las puertas en algunos días en que se abre. Las mayores variaciones se producen por la apertura de la puerta oeste que comunica con la parte de capilla (Gráfica 248, Gráfica 249, Gráfica 250 y Gráfica 251). Se nota la influencia de esta puerta, pero el tiempo de apertura parece insuficiente. Estas variaciones son muy pequeñas y el edificio recupera rápidamente su tendencia. Los días en que se abre la puerta de acceso desde la sacristía los registros de los data-loggers no varían, lo que significa que la influencia de esta puerta es muy pequeña, o que el tiempo de apertura es insuficiente.
- Los días en que la ermita permanece cerrada no se producen variaciones (Gráfica 251 y Gráfica 252). En este caso, se observa un edificio más estanco que el caso 1, por ejemplo, en el que se observaban algunas variaciones de T y W en el interior motivadas por la infiltración a través de rendijas por puertas y ventanas.
- Al igual que en el caso de estudio 1, se cumple que un día favorable para la disipación de la humedad es aquel en que la temperatura del exterior es más baja que la del interior, y también lo es el grado de humedad (Gráfica 249 y Gráfica 250).

Por tanto, es necesario comprobar la influencia de la ventilación por medio de la simulación para comprobar si un mejor régimen de apertura de huecos mejoraría la disipación de aquellos focos de humedad activos en las épocas cálidas del año. Dado que no se trata de focos con gran intensidad, podría ser suficiente con un buen régimen de ventilación, buscando los días favorables. Esto se calcula en el apartado 6.3.3 siguiente.

6.3.3 CÁLCULO DEL COMPORTAMIENTO EVAPORATIVO

Según el análisis higrotérmico de la ermita (apartado 6.3.2), se determinó que existen algunos focos de humedad en el muro sur semienterrado. En las inspecciones manuales este muro ya ofrecía valores más altos de grado de humedad, por lo que se suponía que era el más húmedo. Según los resultados de monitorización, los focos más intensos son DT7 y DT3. El resto de puntos monitorizados en este muro están más húmedos que el ambiente, pero dentro de valores aceptables.

En este caso de estudio, según lo que señalan los datos tomados en el edificio, el agua parece provenir de la acera, y discurrir hasta la base del muro¹. En los dos casos de estudio anteriores el fenómeno de succión en el muro era diferente. La monitorización señalaba focos de humedad más intensos en la base de los muros, indicando filtración de agua capilar desde la base del muro y ascendiendo. En este caso, el agua provenía del terreno que estaba pegado al muro. Aunque ahora cuenta con un drenaje perimetral, es posible que los dos puntos localizados como focos de humedad se deban a agua retenida en el muro que está secando lentamente cuando las condiciones climáticas se lo permiten, o incluso a una pequeña filtración persistente desde la acera, que explicaría el foco DT7.

A efectos de cálculo de evaporación, se ha considerado este caso con una de sus caras no expuesta, al encontrarse soterrada. Esto modifica el valor de N en la ecuación 26. Aunque disponga de un drenaje que “frene” la influencia del terreno, sigue encontrándose por debajo del nivel de acera y rodeada de terreno, por lo que no cuenta con la capacidad evaporativa de un muro expuesto.

6.3.3.a CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL PARA LA EVAPORACIÓN

Al igual que se señalaba en los dos casos de estudio anteriores, hay que tener en cuenta la sortividad y la porosidad del material para el cálculo de la succión y la evaporación. Dado que ya se han detallado las fórmulas de cálculo tanto en el capítulo 4 “*Fundamentos teóricos*” como en los apartados de cálculo de evaporación para el caso 1 (apartado 6.1.3) y el caso 2 (apartado 6.2.3), se ha optado por contar los resultados de cálculo en este caso, siempre referenciando las fórmulas correspondientes.

Para el cálculo de la absorción del muro es necesario conocer los valores de sortividad de los materiales que componen el muro. Pero, tal como se ha explicado antes, no se puede obtener un valor fiable de sortividad de las muestras del edificio, al no tratarse de probetas regulares. Por tanto, al igual que en los casos anteriores, se ha realizado una estimación del valor de sortividad en base a los artículos científicos que recogen ensayos en granito, relacionándolos con aquellas propiedades que sí se han podido

¹ Esta hipótesis ya se planteaba y se comprobaba con las inspecciones manuales llevadas a cabo entre 2014 y 2015, antes de la intervención de drenaje perimetral realizada en el muro. Los resultados de estos trabajos se detallan en el apartado 6.3.1.

calcular en laboratorio. Los valores más ajustados se han empleado para el cálculo de la absorción del muro.

Ajuste de valores:

Como en los dos casos de estudio anteriores, mediante los ensayos EH2 y EH3 se determinaron los valores de densidad aparente (ρ_b) y real (ρ_r), así como de porosidad abierta (f_0) del granito.

Tabla 60 Características físicas obtenidas de los ensayos hídricos.

	H02
Densidad aparente (ρ_b) [kg/m ³]	1870
Densidad real (ρ_r) [kg/m ³]	2370
Porosidad abierta (f_0) [%]	1,69

Se han estudiado aquellos valores que más se ajustan a las propiedades físicas de las muestras del edificio. Los valores de sortividad encontrados en la literatura científica para granitos de características similares se entre 0,40 y 0,61 (García-Talegón, Iñigo et al. 1994, Iñigo Iñigo, Vicente Tabera et al. 1995, Rojo, Alonso et al. 2000, Barrientos Rodríguez 2007).

Hay que tener en cuenta que la absorción capilar de las muestras de granito tomadas en la ermita del Humilladero presentó un coeficiente de absorción capilar más alto de lo habitual para este tipo de rocas debido a la contaminación por sales que se extendía en el muro sur. Se ha tomado un valor de sortividad de 0,60mm/min^{1/2}.

6.3.3.b. CÁLCULO DE LA EVAPORACIÓN DE LOS MUROS

En este apartado se describen los cálculos de evaporación realizados en la ermita del Humilladero². El procedimiento empleado para el cálculo se realiza siguiendo los mismos pasos que en los casos 1 y 2.

En primer lugar, un cálculo en estado estacionario de la succión-evaporación del muro, que permite conocer la altura de ascenso capilar (h_{ee}), el tiempo que el muro tarda en alcanzar la situación de equilibrio (t_{ee}).

En segundo lugar, un cálculo en estado dinámico del mismo fenómeno de succión-evaporación. Se emplearon datos del clima que permiten un cálculo preciso de la evaporación en relación con las fluctuaciones climáticas interior – exterior.

Por último, se calcula la “capacidad evaporativa” del edificio. Esto se traduce en la capacidad que tiene el edificio de disipar el agua evaporada por los muros en relación con la ventilación del mismo. Para poder conocer la capacidad de disipar el vapor de agua producido por los muros en el interior es necesario saber cómo entra el aire en el edificio, cómo se mueve y las renovaciones diarias que es capaz de realizar. Para ello, con el modelo 3D del edificio, realizado con Design Builder, se ha podido realizar la simulación y obtener los datos necesarios³.

1º Cálculo de la evaporación de los muros en régimen estacionario.

Para realizar el cálculo de h_{ee} , se toma un potencial de evaporación medio anual (Hall 2007, D’Agostino 2013). Para calcular este potencial de evaporación se emplean los registros de la base de datos meteorológica. En este caso, se ha obtenido un $e = 2,5$ mm/d. Para el espesor (b) del muro, se ha considerado un valor $b=90$ cm.

Según los cálculos realizados, el agua alcanza el equilibrio a una altura de $h_{ee}=0,36$ m a los 6 años del momento inicial de absorción (Gráfica 256).

El tiempo que el muro tarda en estabilizarse depende del espesor del muro (Ecuación 26). Conociendo este dato, se puede calcular el agua almacenada en el muro (C_{ee}). En este caso, $C_{ee}= 0,05$ L por cada metro lineal de muro, para el tramo de muro sur calculado.

² Las ecuaciones empleadas para el cálculo se han explicado extensamente en el caso de estudio 1 y 2. Además, los principios básicos que fundamentan el cálculo se desarrollaron en el capítulo 2 “Fundamentos Físicos”. En este caso, se pasa directamente a exponer los resultados para el caso de estudio 3.

³ En el capítulo 5 “Metodología” se explicaba que los cálculos con Design Builder se han validado mediante la comparación con los resultados obtenidos mediante monitorización. Para el caso concreto, se muestran las gráficas de validación en el apartado 6.3.1.

Gráfica 256 Altura de ascenso capilar en función del tiempo. El agua alcanza el equilibrio a los 10 años, a una altura de 46cm. Ermita del Humilladero.

En las zonas de los contrafuertes, el espesor es mayor ($b=1,60\text{m}$), por lo que el agua asciende hasta los 50 cm, donde se estabiliza, al cabo de 10 años, según los cálculos.

2º Cálculo de la evaporación de los muros en régimen dinámico

En condiciones normales, el muro se encuentra en estado dinámico $U_{ee} \neq E_{ee}$. El agua absorbida y la evaporada están en constante fluctuación debido a los cambios atmosféricos y del ambiente interior del edificio. Por tanto, para realizar los cálculos correspondientes se calcula primero el potencial de evaporación del ambiente mediante los datos climáticos recogidos⁴.

En el caso de la ermita del Humilladero, el tiempo monitorizado se extiende desde diciembre de 2017 a junio de 2018. En ese tiempo, el potencial de evaporación en el exterior (E_{PEN_ext}) empezó a aumentar a partir del mes de marzo (Gráfica 257). Se produce un pico en uno de los días de enero, provocado por el término aerodinámico de la fórmula (E_{aero}) coincidiendo con un día más ventoso de lo normal tal como reflejan los datos registrados por la estación meteorológica. El mes de diciembre, presenta el potencial de evaporación más bajo, correspondiendo con las temperaturas exteriores más bajas (Gráfica 226 de temperatura exterior (E_{radS} , E_{radL}) y Gráfica 227 de viento, apartado 6.3.1). La influencia de los parámetros de calor sobre el cálculo del potencial de evaporación aumenta con el ascenso paulatino de las temperaturas al acercarse los meses más cálidos.

⁴ En el capítulo 5 “Metodología” se explica cómo se realiza la toma de datos necesaria para el cálculo del potencial de evaporación.

El potencial de evaporación en el interior se calcula con el término aerodinámico (E_{aero_int}). El potencial de evaporación aumenta en el interior de manera notable en los meses de mayo y junio, alrededor de los 0,68mm/d, cuando la ermita acumula calor de los días más cálidos. Entre los meses de diciembre hasta abril se mantiene muy estable y más bajo, alrededor de los 0,30mm/d (Gráfica 258). De este cálculo se deduce que las condiciones de evaporación del ambiente interior son más favorables a partir del mes de mayo. El potencial de evaporación del clima exterior era tan alto en abril como en mayo. En el interior, el calentamiento es más lento, y el edificio tarda más en adquirir un ascenso favorable.

Con el potencial de evaporación del interior se puede calcular la variación de ascenso capilar en estado dinámico (Ecuación 26). También se puede calcular la cantidad de agua acumulada en el muro (C) (Gráfica 259). La altura media que adquiere el frente capilar es $h=0,71m$. La cantidad media de agua almacenada en el muro es $C=0,93L$ por metro lineal de muro⁵. El frente capilar aumenta en los meses más fríos, alcanzando su máximo en el mes de febrero, coincidiendo con el momento de menor potencial de evaporación del clima interior (Gráfica 258). En los meses más cálidos el frente se reduce alrededor de 20cm. La cantidad de agua acumulada en el muro también se reduce acorde con el descenso de la altura.

Gráfica 257. Evolución del potencial de evaporación en el exterior de la ermita del Humilladero a lo largo del período monitorizado. Se desglosan cada uno de los términos de la ecuación de cálculo (E_{radS} , E_{radL} , E_{aero}) en la gráfica. El sufijo “ext” en la leyenda indica que se trata de los términos calculados con los datos de exterior. Se ha reflejado sobre la gráfica una semana representativa de cada mes monitorizado con objeto de facilitar la lectura de los datos.

⁵ Para el tramo calculado en el muro norte.

Gráfica 258. Evolución del potencial de evaporación en el interior (E_{aero_int}) de la ermita del Humilladero a lo largo del período monitorizado. Se ha reflejado sobre la gráfica una semana representativa de cada mes monitorizado con objeto de facilitar la lectura de los datos.

Gráfica 259 Evolución de la altura de ascenso capilar (h) y la evolución del agua contenida en el muro (C) en la ermita del Humilladero, durante el período monitorizado. Se ha reflejado sobre la gráfica una semana representativa de cada mes monitorizado con objeto de facilitar la lectura de los datos.

En los meses que el frente capilar aumenta, entre diciembre y abril, el muro está absorbiendo más de lo que está evaporando ($E_{out} < U_{in}$). Sin embargo, en los meses en que se produce el descenso más evidente del frente capilar, mayo y junio, la cantidad de agua evaporada por el muro es mayor que la que absorbe ($E_{out} > U_{in}$)⁶.

⁶ A diferencia de los otros dos casos de estudio, la evaporación por unidad de área de la región mojada ocurre solamente por una cara del muro, por lo que la fórmula de la evaporación se transforma, para una sola cara de evaporación ($N=1$).

Gráfica 260 Evolución del flujo de entrada (U_{in}) y salida (E_{out}) del agua en el muro de la ermita del Humilladero. Se ha reflejado sobre la gráfica una semana representativa de cada mes monitorizado con objeto de facilitar la lectura de los datos.

Conclusión al cálculo de evaporación en estado dinámico:

El cálculo de succión-evaporación del muro parte de la suposición de que existe un flujo que es constante. En algunos momentos de año este flujo es más significativo, coincidiendo con épocas más favorables para el movimiento del agua –como son los meses de primavera y verano- y, en otros momentos, el flujo es menor –como son los meses de invierno-. Este comportamiento se ha podido observar en el caso de la ermita, al igual que en los dos casos de estudio anteriores.

En este caso se ha observado un desarrollo de la succión en invierno (U_{in}) muy estable que viene motivada por la estabilidad climática del interior de la ermita, tal como se veía en el apartado 6.3.2. Los meses más cálidos presentan curvas con variaciones mayores, debido a una mayor incidencia de la temperatura que comienza a calentar la ermita. Esto mismo motivaba la aparición de focos de humedad como el DT7 y DT3, que señalan agua que está evaporando (apartado 6.3.2).

6.2.3.c EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EVAPORATIVO MEDIO DIARIO

Además de haber calculado el flujo a través del muro, para conocer el comportamiento evaporativo del edificio completo, es necesario estudiar cómo se difunde este vapor de agua aportado por los muros al ambiente (E_{out}), cómo se mueve y si es capaz de ser evacuado al exterior o por el contrario se queda acumulado en el interior.

Como en los casos 1 y 2, al tratarse de edificios sin sistemas de climatización, el único modo de disipar el vapor de agua que pasa al ambiente desde los muros es por medio de la ventilación natural. Por tanto, conociendo la producción de vapor de los muros (E_{out}), se pueden calcular las renovaciones de aire necesarias (R_n) para evacuar el vapor de agua producido por los muros. Además, gracias al cálculo por ordenador, bajo condiciones de contorno reales se puede calcular las renovaciones reales (R_r) que hace el edificio cada día. De esta forma, se puede conocer la capacidad de disipación de la humedad que tenía durante el período de monitorización (diciembre de 2017 a junio de 2018).

Para realizar estos cálculos se emplean las mismas fórmulas que en los casos 1 y 2. En este caso, se ha pasado directamente a explicar los resultados de cálculo.

Los condicionantes que se han tenido en cuenta para la ventilación natural de la capilla son los siguientes:

- El edificio es muy estanco, pues las carpinterías están en buen estado, especialmente las del espacio de la capilla. No se han localizado variaciones por filtraciones por rejillas. No existen ventanas que permanezcan abiertas 24 horas.
- Los horarios de uso de la ermita son variables. El uso más frecuente de debe a las reuniones de la Cofradía de la Vera Cruz. Los días en que se reúne la Cofradía, suele emplearse como acceso la puerta Este, en la sacristía. Como ya se ha señalado en el apartado 6.3.2, según los resultados de monitorización no se producen variaciones en T y W en los data-loggers cuando se abre esa puerta. Por otra parte, las celebraciones religiosas son puntuales, aunque sí se abre la puerta Oeste, con acceso directo a la capilla. En esos casos, se ha observado que se produce algo más de movimiento de aire en los data-loggers.
- Según los datos de monitorización, y por lo que se ha podido saber gracias a las informaciones de la Cofradía, el edificio permanece muchos días cerrado. Esto se refleja en registros de temperatura y grado de humedad muy estables.

Todos estos datos han servido para adaptar cada simulación realizada a los horarios de apertura de la ermita, teniendo en cuenta cuánto tiempo y qué puertas están abiertas. Dado que en este caso no hay horarios establecidos como los del caso 1, se han tenido que ajustar las condiciones de ventilación natural de cada simulación una por una.

Gráfica 261. Comparativa entre las renovaciones reales (R_r) y las renovaciones necesarias (R_n) para la ermita del Humilladero. Se ha reflejado sobre la gráfica una semana representativa de cada mes monitorizado con objeto de facilitar la lectura de los datos.

Comparando las renovaciones reales (R_r), calculadas con DB, con las necesarias (R_n), calculadas mediante la ecuación 87 (apartado 6.1.3), Se puede clasificar el resultado según las siguientes posibilidades:

- Si $R_r > R_n$ el edificio está siendo capaz de evacuar el vapor de agua producido por los muros.
- Si $R_r < R_n$ el edificio no es capaz de evacuar el vapor de agua producido por los muros, por tanto, se acumula en el ambiente interior.

En la ermita, la mayoría de los días $R_n < R_r$, lo que significa que la mayoría de los días el edificio no tiene capacidad de evacuar la evaporación producida por los muros. Se confirma lo que ya se predecía con el análisis higrotérmico: los días que el edificio ventila el intercambio de aire no es suficiente. Sabiendo además que el edificio permanece cerrado la mayoría de los días, y que se trata de un edificio muy estanco, el resultado mostrado por la Gráfica 261, corresponde con lo esperado. Solamente en el mes de febrero las renovaciones reales superan a las necesarias. Pero, según los resultados de la Gráfica 260, en este mes la succión del muro es menor que la evaporación. Tal como se puede comprobar en el análisis higrotérmico, este mes el edificio no presenta puntos con un grado de humedad elevado, como los meses de mayo o junio, lo que corresponde con una baja evaporación. Por tanto, que el edificio sea capaz de disipar la humedad de los muros responde a una baja producción.

En el mes de marzo, por el contrario, la evaporación del muro ha aumentado, igualándose con la succión. También han aumentado las renovaciones reales que realiza el edificio, porque el edificio ha permanecido más días abierto, pero sigue sin ser

suficiente, pues el aumento de horas de ventilación no corresponde con el aumento de la evaporación (Gráfica 260 y Gráfica 261).

6.3.3.d CONCLUSIONES AL COMPORTAMIENTO EVAPORATIVO DEL CASO 3

Además de esto, hay que considerar la calidad del aire que entra, pues hay días en los que las condiciones de temperatura y humedad del exterior no son adecuadas para la evacuación de la humedad, sino que aumentan la humedad en el interior, como ya se ha comprobado que pasaba en el caso 1 y 2.

Recordando la triple condición que se estableció para el caso 1 y 2:

$$(E_{out} > U) + (R_r > R_n) + (W_{ext} < W_{int}) \quad (88)$$

Para evaluar esta situación se realiza la Gráfica 262, en la que, junto a las renovaciones para cada día, se han marcado los días que son favorables para la ventilación según sus condiciones de temperatura y humedad. Los días más favorables se producen en abril y junio. En junio se producen porque el edificio ha ganado calor, y la temperatura interior es más alta que la del exterior. Además, el ambiente exterior es más seco. Todo ello ayuda a la disipación de la humedad interior. En la mayor parte del año se da una situación semifavorable, pues el aire exterior no es lo suficientemente seco para facilitar una evacuación eficiente de la humedad interior.

Gráfica 262. Resultados de la comparación de las renovaciones del edificio (R_n y R_r .) con la situación del clima exterior (días favorables para la ventilación = 2 en el eje Y; días semi-favorables para la ventilación = 1 en el eje Y; días no favorables = 0). Se muestra una semana representativa de cada mes para todo el período monitorizado. Ermita del Humilladero. Se ha reflejado sobre la gráfica una semana representativa de cada mes monitorizado con objeto de facilitar la lectura de los datos.

En la gráfica siguiente se han marcado con color amarillo aquellos días desfavorables para la ventilación, para facilitar la interpretación de la Gráfica 262. Como se puede observar, los días negativos para la ventilación son algunos pocos aislados. En el mes de mayo y junio no existe ningún día desfavorable. Empleando estos resultados como guía, se podría aumentar el número de días y de horas que la ermita ventila para mejorar las renovaciones reales, dado que son muy bajas comparadas con las necesarias (Gráfica 261).

Además de deducir de los cálculos que la ermita necesita más ventilación, la simulación por ordenador de diferentes escenarios de ventilación ayudan a comprobar la efectividad de un aumento de horas de ventilación y la efectividad de las aberturas, todo ello en relación con unas condiciones de contorno reales.

Es por eso, que se realiza un último apartado dedicado a la simulación computacional para comprobar todas las hipótesis a comprobar que se han ido estableciendo a lo largo de los apartados 6.32 y 6.3.3.

Gráfica 263. Resultados de la comparación de las renovaciones del edificio (R_n y R_r) con la situación del clima exterior (días favorables para la ventilación = 2 en el eje Y; días semi-favorables para la ventilación = 1 en el eje Y; días no favorables = 0). Se muestra una semana representativa de cada mes para el período de Diciembre de 2017 hasta Junio de 2018. En amarillo se han marcado aquellos días que no cumplen con la ecuación 88. Ermita del Humilladero. Se ha reflejado sobre la gráfica una semana representativa de cada mes monitorizado con objeto de facilitar la lectura de los datos.

6.3.4. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO EVAPORATIVO MEDIANTE SIMULACIÓN POR ORDENADOR

En este apartado se recopilan todas las hipótesis que se han ido exponiendo a lo largo de los apartados 6.3.2 y 6.3.3. Cada una de las hipótesis se enumera como un enunciado al que se da respuesta desarrollando la explicación de los resultados obtenidos con la simulación.

En la tabla siguiente se detallan los valores empleados como condiciones de contorno en cada una de las simulaciones realizadas en el edificio.

Tabla 61. Valores de las condiciones de contorno introducidas en el programa Design Builder para realizar las simulaciones de la ermita del Humilladero. Un código “SMnº” ha sido asignado a cada simulación realizada.

	SM01	SM02	SM03
	8 diciembre 2017	29 marzo 2018	13 junio 2018
T_{SINT} [°C]	6,28	7,32	15,70
T_{SEXT} [°C]	4,68	3,47	19
T_{SV} [°C]	3,93	3,02	18
T_{med} [°C]	4,57	3,48	17,95
T_{ENT} [°C]	5,19	4,01	19,70

1º La influencia de la ventilación de la puerta de acceso desde la sacristía es muy pequeña, los data-loggers no registran cambios cuando está abierta.

Debe analizarse cuál es la influencia de esta puerta, si la falta de ventilación se debe a que permanece poco tiempo abierta, o si su tamaño o su posición influyen en la ventilación.

Los días que la capilla está abierta, el aire del interior se enfría (Gráfica 264 derecha). Si la capilla está cerrada, el aire se mantiene más cálido, pues no entra aire más frío del exterior (Gráfica 264 izquierda y Gráfica 265). La diferencia entre la temperatura de la simulación abierta y cerrada es tan solo de unas décimas. La influencia de la puerta es muy reducida.

Gráfica 264 Izquierda. Distribución en planta de la temperatura, suponiendo la ermita cerrada. Derecha. Distribución en planta de la temperatura. Simulación del día 8 de diciembre de 2018, en que la ermita ha estado abierta. Ermita del Humilladero.

Gráfica 265 Distribución de la temperatura en sección para el día 8 de diciembre, suponiendo la puerta de acceso de la sacristía abierta. Ermita del Humilladero.

La velocidad del aire cuando se abre la puerta produce un efecto prácticamente nulo en la zona de capilla. La simulación refleja un movimiento de aire mayor en la sacristía, que está motivado por efecto de las diferencias de temperatura entre el aire frío que entra del exterior y el cálido del sótano, produciendo turbulencias en esa zona. El efecto de estas se reduce a una zona de la sacristía sin incidencia para el resto del edificio (Gráfica 265 y Gráfica 266).

Gráfica 266 Izquierda. Distribución de la velocidad del aire en la sección AA'. Derecha. Distribución en planta de la velocidad del aire. Simulación del día 8 de diciembre, con puerta de acceso desde la sacristía abierta Ermita del Humilladero.

2º La puerta oeste de acceso desde la capilla tiene mayor influencia en el ambiente interior según los registros de los data-loggers. Conviene analizar la influencia de la puerta oeste.

Gráfica 267 Izquierda. Distribución de la velocidad del aire con la puerta oeste abierta el día 29 de marzo. Derecha. Distribución de la velocidad del aire con las puertas oeste y este abiertas al mismo tiempo.

El día 29 de marzo se abrió la puerta oeste de la ermita a las 11:30 durante una hora aproximadamente, y a las 20:30 horas durante otra hora aproximadamente. Tal como muestra la simulación se genera un movimiento de aire de 0,22m/s de media, pero el resto del ambiente de esa zona casi no se mueve (Gráfica 267 izquierda.). En la sección AA' (Gráfica 268 Izquierda) se puede ver que el aire se mueve cerca de la puerta y por rozamiento en las cotas más bajas, cercano al suelo. Tal como se preveía por los resultados de las gráficas de monitorización se nota una variación en la temperatura y

el grado de humedad en algunos de los registros, pero al cerrar las puertas el edificio retoma su tendencia original (Gráficas 246 y 247, apartado 6.3.2 “Análisis higrotérmico”). Se produce una turbulencia en la zona de acceso al sótano por la diferencia de temperatura de entre 0,22 y 0,27m/s.

Se ha realizado otra simulación atribuyéndole a la ermita las mismas condiciones de contorno de ese día, pero suponiendo que la puerta de acceso oeste y este están abiertas el mismo tiempo y de manera simultánea, lo que genera un aumento de la velocidad del aire en el interior, pero que, según el resultado de la simulación, tiene una incidencia pequeña sobre el edificio, pues en la mayor parte del espacio dedicado a capilla sigue sin moverse el aire (Gráfica 267 derecha y Gráfica 268 derecha).

Gráfica 268 Izquierda. Distribución de la velocidad del aire en sección AA', día 29 de marzo con puerta oeste abierta. Derecha. Distribución de la velocidad del aire en sección BB', día 29 de marzo simulando las dos puertas abiertas.

3º Según las Gráfica 262 y Gráfica 263 de este apartado, el mes de junio es el más favorable para la disipación de la humedad producida por los muros.

Según los cálculos anteriores, el mes más favorable para la evaporación y disipación de la humedad es junio. Según el análisis higrotérmico, tomando la semana tipo desde el 13 al 19 de junio, el grado de humedad exterior se mantiene más bajo que el del interior, lo que resulta en un aire exterior seco, beneficioso para el edificio. Además, el aumento de temperatura en esta época del año calienta los muros facilitando la evaporación de los mismos.

Una vez considerados todos estos condicionantes higrotérmicos, se completa el estudio analizando cómo se mueve el aire en el interior. Para ello, se ha llevado a cabo la simulación de un día en el que la ermita ha estado abierta en este mes.

El día 13 de junio se abre la ermita durante dos horas por la tarde. Se abre únicamente la puerta Este, de acceso desde la sacristía. Por la tarde, la temperatura exterior ($T_e=21^\circ\text{C}$ de media) es más alta que la del interior ($T_{\text{med}}=16^\circ\text{C}$ en la zona de la capilla).

En un corte realizado en planta a 50 cm del pavimento terminado se ve que la zona de la sacristía se mantiene más fría, lo que se debe a su orientación, al encontrarse en una zona menos soleada por la cercanía de los edificios y a que dos de sus paredes permanecen semienterradas por el nivel de la acera y la escalinata (Gráfica 269 derecha).

Gráfica 269 Izquierda. Distribución de la temperatura en altura para la simulación del día 13 de junio. Derecha. Distribución en planta de la temperatura en planta, corte realizado a 50cm del pavimento terminado. Ermita del Humilladero (Ávila).

Debido a esta diferencia térmica se produce un pequeño movimiento de aire desde la sacristía a la capilla, generando un punto de corriente más alta en la zona de puerta de acceso, aunque se trata realmente de una velocidad baja de 0,27m/s (Gráfica 270 izquierda).

Gráfica 270 Izquierda. Distribución de la velocidad del aire en sección BB'. Derecha. Distribución de la velocidad del aire en sección AA'. Simulación del día 13 de junio.

Ese aire que pasa de una estancia a otra se calienta y asciende, generando un movimiento cercano al muro de partición (Gráfica 270 izquierda). El contraste térmico que se produce por el calor acumulado por la cubierta durante el día produce algunas turbulencias en las capas altas (Gráfica 270 izquierda y Gráfica 272). Precisamente en el muro donde se han detectado los niveles de mayor grado de humedad (muro sur de la capilla) se observa que el movimiento de aire en la zona enterrada es cero, justamente donde sería beneficioso el efecto de la ventilación para ayudar a la evaporación. Sin embargo, en la zona alta, donde se produce calentamiento, existe movimiento de aire por contraste térmico (Gráfica 272).

En general se observa que la falta de ventilación cruzada impide diferencias de presión que contribuyan a evacuar el aire caliente del interior a través de la puerta Este de la sacristía. Como se puede ver en la Gráfica 271, la puerta tiene muy poca incidencia en el movimiento del aire de la ermita, produciéndose solamente un pequeño flujo en torno a la puerta. En el resto de la ermita, la velocidad del aire es prácticamente 0 m/s.

Por tanto, a pesar de que las condiciones climáticas son buenas, la falta de ventilación cruzada impide un movimiento de aire mayor en el interior, generándose corrientes muy débiles y solo en algunas zonas. Esto corresponde con lo observado en la Gráfica 263, donde las renovaciones necesarias (R_n) son mucho mayores que las reales (R_r) que se están produciendo en el edificio esos días.

Gráfica 271 Distribución en planta de la velocidad del aire. Simulación del día 13 de junio.

Gráfica 272. Distribución de la velocidad del aire en sección transversal CC'. Simulación del día 13 de junio. Ermita del Humilladero.

7. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- 7.1. Resultados respecto a la capacidad de evaporación del edificio
- 7.2. Resultados acerca de la capacidad de disipación del agua evaporada por el edificio
- 7.3. Resultados sobre la calidad del aire de ventilación para la disipación
- 7.4. La triple condición para la evaporación efectiva
- 7.5. La simulación de dinámica de fluidos como herramienta para la comprobación de la evaporación del edificio histórico
- 7.6. Conclusiones generales

7. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Introducción

En este capítulo se detallan los resultados y deducciones más relevantes obtenidos a lo largo de todas las fases de análisis y cálculo, para cada uno de los tres casos de estudio.

El capítulo se divide en cinco apartados:

En primer lugar, se realiza una interpretación de los resultados obtenidos acerca *de la capacidad de evaporación del edificio*, detallando cuáles han sido los factores que han determinado las fluctuaciones del flujo de succión-evaporación en cada caso de estudio.

En segundo lugar, se discuten los resultados de cálculo *sobre la capacidad de renovación del aire*, en función de factores como las horas de ventilación, o la morfología del edificio. Describiendo el potencial de disipación que tiene cada edificio para evacuar el agua evaporada por los muros al exterior.

En tercer lugar, se analiza cómo las características del clima en cada caso han condicionado la *calidad del aire de ventilación*. Las características climáticas de la zona en que se encuentra cada edificio proporcionan un aire más o menos favorable. Las conclusiones a este análisis se exponen en este tercer punto.

En cuarto lugar, se hace un balance general de los tres puntos anteriores. Se exponen las conclusiones acerca de la *efectividad de la evaporación* en cada uno de los tres casos de estudio.

Por último, se resumen los puntos más relevantes acerca de los *cálculos de simulación* realizados para cada caso de estudio, que completan el análisis de los puntos anteriores.

Previo al desarrollo de este capítulo, es necesario aclarar que, aunque los tres casos de estudio se han elegido por tener características en común, no por ello los resultados obtenidos del cálculo son comparables entre sí. Las diferencias entre los distintos climas, diferentes morfologías de edificio y distintos materiales hacen que, caso particular, se comporte de manera diferente. En este capítulo se realiza la interpretación de resultados comentando los tres edificios en paralelo, precisamente con el objetivo de poner de manifiesto los distintos resultados que se obtienen. Esto subraya la importancia de tener en cuenta todas las variables siempre que se estudie el comportamiento evaporativo de un edificio histórico.

7.1. RESULTADOS RESPECTO A LA CAPACIDAD DE EVAPORACIÓN DEL EDIFICIO

La capacidad de evaporación de cada edificio está condicionada por el microclima que lo rodea, pero también por la inercia del edificio. En la iglesia de Santiago de Peñalba, se pudieron observar dos períodos diferentes. En los meses cálidos, que iban de mayo a noviembre, la evaporación de los muros se mantenía superior a la succión ($E_{out} > U_{in}$). En un segundo momento, coincidiendo con los meses más fríos, los muros de la iglesia absorbieron más agua de la que evaporaban. El punto de inflexión se produce entre los meses de noviembre y diciembre (Gráfica 134, apartado 6.1.3). Según los registros meteorológicos y de monitorización del exterior, el descenso de temperatura exterior no se produce en noviembre, sino que venía descendiendo desde el mes de septiembre. Sin embargo, se producen dos factores que mantienen la evaporación de los muros más alta hasta noviembre. Por un lado, el mes de octubre fue más cálido de lo habitual. Por otro lado, la inercia térmica del edificio, que se había observado ya en el análisis higrotérmico, hace que la temperatura interior se mantenga, manteniendo alto el potencial de evaporación (E_{aero}), y por tanto, también la capacidad de evaporación de los muros.

En el caso de la capilla del Cristo, el agua evaporada es mayor que la absorbida ($E_{out} > U_{in}$) hasta el mes de enero. El período de mayor evaporación se prolonga durante dos meses más que en el caso anterior por dos razones. Por un lado, las temperaturas medias de los meses fríos en los que se produce el cambio –entre noviembre y enero– fueron más altas en Santiago de Compostela que en Peñalba de Santiago. Además, la capilla del Cristo tiene una gran estabilidad e inercia térmica, tal como se observaba en el análisis higrotérmico. La tendencia se invierte entre enero y abril ($E_{out} < U_{in}$). De nuevo, con el aumento de las temperaturas de la primavera, en mayo la evaporación vuelve a ser mayor. Pero, en Santiago de Compostela ha estado lloviendo durante los meses de enero a junio (Gráfica 156, apartado 6.2.1). Esto provoca, que, fuera de lo esperado para la época de verano, el mes de junio la succión sea mucho mayor que la evaporación ($E_{out} < U_{in}$). Por tanto, la climatología de Santiago de Compostela produce períodos mucho más variables y complejos que requieren un análisis más detallado, pues no todos los momentos del año que se pudieran considerar buenos para la evaporación lo son. Esto ya se había observado en el análisis higrotérmico, pues el grado de humedad exterior es más alto casi todo el año (Gráfica 168, apartado 6.2.2), lo que producía pocos momentos favorables para la ventilación de capilla.

7.2. RESULTADOS ACERCA DE LA CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DEL AGUA EVAPORADA POR EL EDIFICIO

Además de calcular la cantidad de agua evaporada, debe tenerse en cuenta la capacidad del edificio para “evacuar” esa agua al exterior por medio de la ventilación. Para ello, se ha realizado una comparativa entre las renovaciones reales (R_r) y renovaciones necesarias (R_n) en cada caso de estudio. Los tres edificios se comportan de manera

diferente condicionados por su morfología (tamaño de huecos, orientación, etc.) y sus horarios de ventilación.

En el caso de la iglesia de Santiago de Peñalba, casi todo el año las renovaciones que hizo diariamente fueron suficientes para la disipación de la cantidad de vapor de agua que se ha calculado que evaporan los muros¹ ($R_r > R_n$) (Gráfica 135, apartado 6.1.3). Esto es gracias a la combinación de varios factores. En primer lugar, se trata de un edificio con un horario de ventilación muy amplio, permaneciendo abierto durante ocho horas al día, cinco días a la semana. Además, de los tres edificios, es el que menos litros de agua absorbe por metro lineal de muro (menor U_{in}). Esto se debe a la combinación de las condiciones climáticas favorables, que aseguran un alto potencial de evaporación en los meses cálidos, y las características de porosidad y sortividad de los materiales del muro².

En contraste con lo que sucede en la iglesia, en el caso de la ermita del Humilladero, el edificio presentaba mayor dificultad para renovar el aire, con valores de $R_r < R_n$ (gráfica 261, apartado 6.3.3) para todo el período monitorizado, incluso para los meses más cálidos por las pocas renovaciones que experimentaba, pues permanece muchos días cerrado. Los datos del análisis higrotérmico ya mostraban un edificio muy estable, con pocas fluctuaciones diarias, siendo las mayores fluctuaciones las estacionales (6.3.2.b “Conclusiones al análisis higrotérmico del caso 3”). Este edificio necesita más renovaciones, ya que su evaporación es alta (E_{out}), comparada con la que se produce en los otros dos casos de estudio. Esto se debe a las características del clima (T y HR), que le confieren un potencial de evaporación alto (Gráfica 203, apartado 6.2.3).

En el caso de la capilla del Cristo de Conxo, las renovaciones que el edificio hacía diariamente, aparentemente, eran suficientes para la mayor parte del año monitorizado, como en el caso de estudio anterior. Sin embargo, el análisis higrotérmico, mostraba un edificio con puntos cercanos a la saturación casi todo el año, algo que es contrario a lo que se espera de un edificio que está disipando la humedad correctamente. Esto se debe a la contaminación por sales, que altera y dificulta la evaporación normal. Este factor no está contemplado en el modelo de cálculo de succión-evaporación como una variable. El análisis conjunto de los datos de monitorización y los cálculos de evaporación ayudaron a identificar este factor para evitar un diagnóstico incompleto.

¹ Las renovaciones que el edificio hace son suficientes la mayor parte del año. Sin embargo, esto no significa que el edificio sea capaz de disipar la humedad adecuadamente. Como se comenta más adelante, se ha analizado también la “calidad” del aire entrante, para analizar si es un aire con capacidad de evacuar el vapor de agua acumulado en el interior o no.

² Como ya se ha explicado en los cálculos de succión-evaporación (apartado 6.1.3), se ha tenido en cuenta tanto la piedra como el mortero en este muro. Al tratarse de una fábrica de mampostería muy irregular con importante proporción de mortero, se ha considerado necesario tener en cuenta su influencia sobre la succión-evaporación, pues en los ensayos hídricos, las muestras de mortero demostraron tener una capacidad de succión y de secado elevadas.

7.3. RESULTADOS SOBRE LA CALIDAD DEL AIRE DE VENTILACIÓN PARA LA DISIPACIÓN

Además de tener en cuenta las renovaciones de aire, se ha analizado la “calidad” del aire que entra. Es decir, si el aire entrante es seco, se trata de un aire favorable para la disipación de la humedad interior. Si, por el contrario, el aire es húmedo, se acumula mayor cantidad de humedad en el interior del edificio al ventilar. El efecto que produce la ventilación en las condiciones higrotérmicas del ambiente interior se pudo observar claramente en el análisis higrotérmico, especialmente en el caso de estudio 1, de la iglesia de Santiago de Peñalba, donde la ventilación tenía mayor incidencia sobre el edificio. Los días en que el grado de humedad exterior era más alto que el interior, los puntos monitorizados en el interior tendían a aumentar su grado de humedad (Gráfica 101, apartado 6.1.2). Sin embargo, los días en que el W exterior era más bajo, al abrir las puertas, se producía un descenso pronunciado del W (Gráfica 113 y 118, apartado 6.1.2). En el caso de la capilla del Cristo de Conxo, la mayor parte del año, el grado de humedad exterior es más alto que el interior, por lo que la calidad del aire no es la adecuada para la ventilación (Gráfica 168, apartado 6.2.2). En el caso de la ermita del Humilladero, el análisis higrotérmico revela unas condiciones climáticas más favorables para la disipación de la humedad interior. En algunos días, en que el grado de humedad exterior era más bajo, al ventilar, el grado de humedad interior se reduce, aunque, la ventilación parece no ser suficiente, pues el grado de humedad interior recupera su tendencia enseguida, al cerrar la puerta.

7.4. LA TRIPLE CONDICIÓN PARA LA EVAPORACIÓN EFECTIVA

De todo este análisis se pudo deducir que *se debe cumplir una triple condición para poder hablar de días en los que se produzca una “evaporación efectiva”*. Los muros deben evaporar, además, el régimen de ventilación debe permitir que las renovaciones sean suficientes para evacuar el aporte de vapor de los muros, y la calidad del aire entrante debe ser la adecuada.

$$(E_{out} > U) + (R_r > R_n) + (W_{ext} < W_{int})$$

El resultado de esta triple condición se condensó en un análisis gráfico para los tres casos de estudio. En el caso de la iglesia de Santiago de Peñalba, reveló que, los meses de comportamiento evaporativo más efectivo fueron octubre, mayo o junio. Pero que, incluso en junio, existe algún día en que se producen condiciones inadecuadas para la ventilación. También se pudo deducir que, en febrero y marzo, al contrario de lo que se esperaba de meses en los que el E_{aero} había descendido, existen algunos días con condiciones favorables para la evaporación, y para su disipación.

En el caso de la capilla del Cristo, existen pocos días en los que se cumplan las condiciones óptimas. En general, lo que se produce la mayoría de los días, es una condición *semifavorable*, en la que las renovaciones son suficientes, y el grado de

humedad no es demasiado alto, o no lo es durante todo el día, permitiendo una ventilación parcial durante algunas horas. En abril y mayo, justamente cuando el edificio comienza a ganar calor para evaporar y empieza a aumentar el potencial de evaporación, se producen períodos de varios días seguidos en los que no se dan las condiciones favorables para la evaporación, porque el grado de humedad exterior aumenta por encima del interior.

En la ermita del Humilladero, no se produce ningún día que cumpla la triple condición. Cuando las condiciones exteriores son adecuadas, las renovaciones no son suficientes porque el edificio permanece cerrado, o la ventilación que tienen es insuficiente para realizar los intercambios de aire suficientes. Esto se produce, por ejemplo, en el mes de junio o abril (Gráfica 153, apartado 6.3.2). En el momento en que las renovaciones son suficientes, las condiciones del clima exterior no son adecuadas. Esto se produce, por ejemplo, en febrero.

7.5. LA SIMULACIÓN DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMO HERRAMIENTA PARA LA COMPROBACIÓN DE LA EVAPORACIÓN DEL EDIFICIO HISTÓRICO

Además de todo este análisis, la simulación de dinámica de fluidos (CFD) realizada mediante el software Design Builder, ha servido para realizar comprobaciones que no serían posibles sin el cálculo en 3D.

Se pudo comprobar, por ejemplo, para el caso de la ermita del Humilladero, que los días en que se abre el edificio no ventila suficiente, tal como se esperaba después de haber realizado el análisis higrotérmico y el cálculo de renovaciones. Los resultados de simulación revelaron que el aire que entra por la puerta de acceso este (de la sacristía), es insuficiente para mover el aire interior. Las velocidades de aire más altas se producen por turbulencias debidas a las diferencias de temperatura entre el sótano y la sacristía.

Dada esta situación, se simuló un nuevo escenario, suponiendo que se abriesen la puerta de la sacristía y la oeste. La hipótesis es que así se podría producir ventilación cruzada que produjese mayor movimiento de aire. Sin embargo, el resultado es que la zona en que mayor movimiento de aire se produciría es la sacristía, por las mayores diferencias térmicas, al contar con el sótano, y dos de sus muros semienterrados. Por lo que, la zona de mayor evaporación detectada con el análisis higrotérmico, que es el muro sur semienterrado de la zona de capilla, no se vería afectada por el movimiento del aire. Al no incrementar la velocidad del aire en esta zona más húmeda, tampoco mejoraría la capacidad de evaporación del muro. Esto significa que es necesario buscar una estrategia de ventilación mejor para la zona de la capilla, que, además, no cuenta con ventanas practicables, y la única puerta accesible al exterior en ese lado en la actualidad es la oeste.

Por otra parte, también se pudo observar en la simulación que el efecto de la ventilación actual a través de las puertas es limitado en altura.

Por último, de la comparativa entre las simulaciones de invierno y verano, se concluye que, en la ermita, los meses cálidos son los más favorables para un mayor movimiento del aire interior.

En el caso de la capilla del Cristo de Conxo, el análisis higrotérmico sugería un edificio con poco o ningún movimiento de aire. Esto se pudo comprobar en las simulaciones, donde incluso en un día abierto, con horario de uso normal, como el 21 de agosto, la velocidad del aire en la capilla era 0 m/s, a excepción de algunas zonas cercanas al muro sur donde el aire se movía por la diferencia de temperatura con el muro a 0,16 m/s.

Ante este resultado se estableció como hipótesis que las horas de ventilación no eran suficientes. Pues el edificio solo está abierto cuando se limpia, durante dos horas por la mañana. Para comprobar esto, se simuló un incremento de las horas de apertura de la capilla de 2 a 8 horas. La ventilación mejora, pero de manera muy limitada, pues, la ubicación de la capilla en el edificio, con única salida de aire a través de la puerta principal de la iglesia, dificulta la ventilación, teniendo que estar las dos puertas simultáneamente abiertas para que se produzca una corriente adecuada. Al pensar que se trataba de un problema de forma, se realizó una simulación suponiendo que se produce ventilación a través de los óculos de la cúpula, para intentar provocar efecto Stack en el interior de la capilla, entre la puerta y la cúpula. El resultado tampoco fue muy favorable, pues la altura del edificio es bastante elevada, y la velocidad del aire que se puede producir a través de las puertas de acceso y hasta la bóveda no es suficiente. El mayor aumento de la velocidad del aire en el interior se debe a ciertos períodos del año donde se produce mayor contraste térmico entre el interior y el exterior. Dando como resultado turbulencias cercanas a los muros, pero con una incidencia muy limitada sobre la evaporación.

En el caso de la iglesia de Santiago de Peñalba, el análisis higrotérmico ya reflejaba que, dentro de los tres casos de estudio, era el que presentaba mayores fluctuaciones de régimen diario entre el interior y el exterior. Esto llevaba a pensar que se trataba de un edificio más ventilado que en los otros dos casos. Pero, era necesario comprobar el alcance de la ventilación, pues, también en el análisis higrotérmico se detectaron algunos puntos con un grado de humedad elevado, cercanos a la saturación (Gráfica 95 y 96, apartado 6.1.2) que hacía suponer que algunas zonas del edificio podían no ventilar adecuadamente. Esto se pudo comprobar mediante las simulaciones, que demostraron que la velocidad del aire en la zona de la cabecera y las capillas norte y sur es 0 m/s (Gráfica 146, apartado 6.1.3). También el análisis higrotérmico sugería que el aire húmedo se quedaba acumulado en la parte alta de la iglesia, pues los valores de W eran altos en una zona entre los 4 y 6m de altura. Esto parecía algo lógico, teniendo en cuenta la forma de las ventanas y la proporción esbelta del edificio. La simulación CFD confirmó que efectivamente esto sucedía y que la ventilación que tiene incidencia sobre el edificio

es la que se produce a través de las puertas, no de las ventanas (Gráfica 147, apartado 6.1.3).

7.6. CONCLUSIONES GENERALES A LA INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Como conclusión final a la interpretación de los resultados globales, se puede afirmar que la combinación de las tres técnicas es capaz de generar un conocimiento sobre el comportamiento evaporativo del edificio muy completo.

Del análisis de cada uno de los casos de estudio, se extraer tres conclusiones importantes:

-La observación de los datos derivados del análisis higroutérmico no es suficiente para evaluar la cantidad de evaporación de un muro, pero sí es fundamental para detectar las tendencias de comportamiento y los momentos en que el edificio tiene mayor potencial para una evaporación efectiva.

-La ventilación es un factor determinante en la capacidad de evaporación del edificio y en la disipación del vapor de agua interior al exterior.

-Los resultados de cálculo de evaporación no son suficientes para estudiar la capacidad de evaporar de un edificio, puesto que ésta no solo está condicionada por la cantidad de agua evacuada o absorbida por los muros, sino también por la capacidad de su ambiente de disiparla al exterior, o no. Por ello, deben estudiarse ambos factores en conjunto.

-El uso de herramientas de simulación por ordenador ha permitido calcular con mayor precisión la incidencia del clima sobre el edificio y, en particular, la ventilación.

8. CONCLUSIONES

- 8.1. Conclusiones respecto a la metodología
- 8.2. Conclusiones respecto a los resultados de análisis y cálculo

8 CONCLUSIONES

Introducción

En este trabajo se estableció la definición de *comportamiento evaporativo del edificio* bajo la que se combinaron los fenómenos de succión-evaporación de los muros con la difusión del vapor de agua al ambiente y su evacuación al exterior. El objetivo es unir el estudio de la dinámica del agua en los muros (calculado mediante “Sharp Front Theory”) con el estudio del ambiente de edificio. La hipótesis de la que se partía era que, combinando ambiente y envolvente se puede realizar un estudio completo a escala global del edificio.

Para ello, se establece una metodología de toma de datos y análisis que se basa en la combinación de las técnicas de monitorización higrotérmica del edificio, con la caracterización de materiales y la simulación por ordenador. Para demostrar su validez y aplicabilidad en casos reales, se ha puesto en práctica en los tres casos de estudio anteriormente detallados.

En este capítulo se explican las principales conclusiones que se han extraído, tanto de los resultados de cálculo en los edificios, como de la propia metodología.

8.1 CONCLUSIONES RESPECTO A LA METODOLOGÍA

-El método se ha ideado para ser aplicable en edificios, bajo condiciones de contorno reales, evitando hacer supuestos bajo condiciones controladas de laboratorio. Éste ha quedado validado con la obtención de todos los datos esperados, aplicado en tres casos de estudio diferentes.

- El protocolo de inspección manual, que se llevó a cabo previa monitorización, permite conocer las diferencias higrotérmicas que existen entre las distintas zonas del edificio asegura la colocación del número necesario de data-loggers. Con estos datos se pudieron establecer las condiciones de contorno para la simulación con valores de T y HR precisos, que mejoran notablemente los resultados obtenidos.

-Se ha podido ajustar la cantidad y disposición de equipos cruzando datos obtenidos en las pruebas de simulación con los datos de monitorización hasta conseguir una precisión de cálculo adecuada para validar el modelo. Por tanto, debe haber un trabajo compensado entre ambas técnicas.

-El trabajo conjunto de monitorización y simulación, ha permitido reducir el número de data-loggers que se deben colocar para obtener los datos necesarios de todo el edificio, optimizando los recursos empleados para esta investigación, de manera que el programa es capaz de calcular las condiciones interiores y exteriores completas del edificio.

Emplear un número elevado de equipos complica la obtención y procesamiento de datos, además de incrementar los costes. Una de las instalaciones más costosas era la colocación de varios anemómetros en cada edificio. La simulación ambiental por ordenador permite crear mapas de distribución de velocidad de viento exterior y de aire interior, en cada punto del espacio, lo que ha permitido simplificar la campaña de medición de velocidad del aire en el interior. Además, hay que tener en cuenta que, aunque se disponga de varios anemómetros en el edificio, el movimiento del aire en el interior no se puede conocer con precisión si no es con un programa de cálculo.

8.2 CONCLUSIONES RESPECTO A LOS RESULTADOS DE ANÁLISIS, CÁLCULO Y SIMULACIÓN

-La morfología y los sistemas constructivos de este tipo de edificios —muy masivos y con pocos huecos— no facilita la ventilación natural, dificultando la evaporación y disipación de la humedad al exterior.

- En relación con el punto anterior, se ha observado que, en algunos casos, aunque el edificio permanece abierto ventilando un número de horas suficiente, su morfología le impide mover el aire en ciertas zonas del interior. En esos puntos donde el aire no se mueve, la monitorización ha revelado que se produce una tendencia a la saturación de vapor de agua que devuelve como resultado un grado de humedad elevado. Esto no significaba necesariamente que exista una mayor evaporación, sino que existe una mayor dificultad para disipar el vapor de agua.

- El sistema constructivo y la composición material determinan los resultados del cálculo de succión-evaporación del muro. Los resultados de los ensayos de caracterización de las muestras de material mostraron que la composición heterogénea de algunos sistemas constructivos puede llevar a que los materiales presenten coeficientes de absorción muy variables, lo que condiciona la succión y evaporación. Este trabajo subraya la importancia del estudio de la composición material del sistema constructivo, con la posterior caracterización material necesaria para realizar unos cálculos de evaporación lo más ajustados posible a la realidad.

-La heterogeneidad de este tipo de construcciones, hacen que la succión y la evaporación no sea igual en todas las zonas de un muro. La dificultad que supone conocer la composición interna de este tipo de muros, hacen que el resultado del cálculo de succión-evaporación sea un valor general, aproximado para todo el muro.

La monitorización en cuadrícula ha permitido hacer un seguimiento de distintos puntos del mismo paño de muro. Esto, unido a los mapas de distribución de velocidad del aire obtenidos de la simulación, ha permitido matizar los cálculos de evaporación identificando zonas en las que el edificio evaporaba con mayor o menor facilidad en función de los condicionantes higrotérmicos y de ventilación.

-Los materiales alterados condicionan la capacidad de evaporación, no solo del material, sino del edificio en su conjunto¹.

En el modelo de cálculo existente de succión-evaporación no se incluye ninguna variable que tenga en cuenta el grado de alteración del material. Por ello, en este trabajo se realizó una toma de muestras en todos los edificios, realizando los ensayos correspondientes, con el objetivo de conocer las propiedades físicas del material y hacer una aproximación más precisa del comportamiento de succión y evaporación de los muros. El grado de alteración de los materiales se pudo conocer gracias a la caracterización petrofísica, y su comportamiento frente al agua gracias a los ensayos hídricos.

-La composición de este tipo de edificios, con materiales tradicionales porosos, supone que existe una fluctuación entre el interior y el exterior que se produce a través de la envolvente. Se ha calculado que el aporte de vapor al interior en determinados momentos del año, cuando la evaporación es mayor, puede llegar a ser elevado. Por tanto, el estudio completo de las condiciones higrotérmicas interiores de estos edificios debe incluir el cálculo de la transmisión a través de la envolvente. De esta forma, se distingue además entre el aporte de humedad por la entrada de aire a través de los huecos y el que es aportado por los muros.

- Se ha comprobado que existe una relación entre el potencial de evaporación del interior del edificio y la inercia térmica de éste.

El análisis de los datos de monitorización de temperatura (T) interior y exterior permitió conocer la inercia térmica de cada edificio. Comparando este dato con el potencial de

¹ El análisis mediante ábacos psicrométricos permitió ver cómo algunos puntos medidos con data-logger se encuentran cercanos a la saturación (HR cercana al 100%) de manera constante durante todo el año, presentando dificultad para el secado, lo que señala una alteración del material por la contaminación por sales higroscópicas.

evaporación interior (E_{aero_int}) permitió comprobar que esta tipología de edificios conserva parte de su potencial de evaporación, a pesar del descenso de temperatura exterior que se produce en invierno, gracias al lento descenso de la temperatura interior.

-La cuantificación de la cantidad de agua evaporada por los muros (E_{out}) ha permitido calcular la cantidad de “*renovaciones necesarias*” (R_n) que necesita el edificio para evacuar el vapor de agua producido por los muros.

-Al disponer de los datos climáticos, dimensiones del edificio y datos higrotérmicos del ambiente interior, se ha podido calcular, mediante simulación, la cantidad de “*renovaciones reales*” (R_r) que es capaz de realizar el edificio, atendiendo a todos estos condicionantes. Éstas, se han comparado con las necesarias (R_n), lo que permite evaluar la capacidad real que tiene el edificio para disipar la humedad interior. Esto posibilita la formulación de estrategias de mejora de la ventilación, lo cual deriva en una conservación preventiva más efectiva para los bienes patrimoniales.

-La comparativa entre el cálculo de renovaciones diarias del edificio con el estudio de la calidad del aire entrante, permite conocer qué días, o incluso qué horas concretas, son favorables para una ventilación efectiva en cada caso estudiado.

-Los resultados de las simulaciones ambientales de los edificios calculados fueron más precisas teniendo en cuenta la transferencia conjunta de calor y humedad a través del muro, con la simulación del ambiente. Lo que demuestra que, aun tratándose de simulaciones ambientales, en este tipo de edificios, cuya envolvente está formada por materiales porosos en equilibrio dinámico con el clima, la influencia de los intercambios a través del muro condiciona el estado del ambiente del edificio.

- Ha quedado demostrada la utilidad de las herramientas de simulación por ordenador como complemento a la monitorización higrotérmica, pues es el único modo de comprobar los siguientes puntos:

a) La cantidad de aire que es capaz de renovar el edificio, condicionado a su morfología. Este es el único modo de cualificar la influencia de la morfología sobre el comportamiento evaporativo y, como ya se ha visto en los puntos anteriores, es un condicionante importante para la disipación de la humedad al exterior. En consecuencia, determina el comportamiento evaporativo del edificio.

b) La distribución de la velocidad del aire en el interior y en el exterior del edificio. De este modo se simplifica la toma de datos y facilita el cálculo del potencial de evaporación al contar con el valor de velocidad del aire en todos los puntos del espacio, pudiendo realizar una media más precisa que si solo se emplea la medición con anemómetro.

c) La influencia de los horarios de ventilación y/o la orientación de las aberturas.

Variando las condiciones iniciales de la simulación (ampliando o reduciendo las horas de ventilación, el porcentaje de apertura de huecos o la cantidad de huecos abiertos) se ha podido responder a muchas de las hipótesis planteadas en el análisis higrotérmico y que no pueden ser comprobadas sino es por medio de la simulación de distintos escenarios.

9. NUEVAS VÍAS DE INVESTIGACIÓN

- 9.1. Continuación al estudio del cálculo de evaporación
- 9.2. Mejoras en los modelos de simulación para el edificio histórico
- 9.3. Precisiones a la caracterización de materiales para los cálculos de evaporación y simulación

9. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A lo largo del desarrollo de esta investigación, se encontraron vías de trabajo abiertas que podrían continuar el estudio del comportamiento evaporativo de los edificios históricos. Son especialmente interesantes aquellas que tienen que ver con la mejora y el aprovechamiento de los datos que se pueden obtener de la simulación por ordenador, pues, como se ha podido ver en el capítulo 2 “Antecedentes y estado de la cuestión” es una de las vías de investigación emergentes.

A continuación, se exponen las principales conclusiones a este respecto, organizadas en tres líneas: continuación al estudio del cálculo de evaporación, mejoras en el desarrollo de los modelos CFD para el edificio histórico, mejoras en el método de caracterización de materiales para los cálculos de evaporación y simulación.

9.1. CONTINUACIÓN AL ESTUDIO DEL CÁLCULO DE EVAPORACIÓN

El cálculo de succión-evaporación de los muros por medio de Sharp Front Theory desarrollada por C. Hall y W. Hoff (Hall, Hamilton et al. 2011), ha demostrado tener buena precisión de cálculo para su uso en edificios reales, tal como ha validado D’Agostino (D’Agostino 2013). No obstante, hay algunas consideraciones que se podrían incorporar al cálculo.

Durante los cálculos de evaporación realizados en los casos de estudio presentados en esta investigación, se pudo ver que existen momentos en que el potencial de evaporación del exterior se reduce hasta valores negativos, como sucede en el caso de la Iglesia de Santiago de Peñalba. Esto indica que el clima no es propicio a la evaporación en esos días. Al observar los registros meteorológicos de la AEMET se pudo ver que durante ese período se produjeron fuertes nevadas en la zona. La acumulación de nieve podría producir una fuente de agua adicional al acumularse junto al muro y derretirse lentamente. Este fenómeno no se menciona en ningún trabajo científico hasta el momento.

Por otra parte, ninguno de los trabajos que emplean el modelo para el cálculo en edificios reales, fuera de las condiciones de laboratorio, miden las variaciones de temperatura y contenido de humedad del terreno. No se habla de las propiedades del terreno, a pesar de que el modelo expuesto por Hall y Hoff permite el transporte de humedad del terreno junto con la estructura del muro (Hall, Hamilton et al. 2011). Tampoco se realizan caracterizaciones por medio de estudios geotécnicos. El cálculo se limita al muro, sin tener en cuenta cómo es la estructura porosa del terreno, el contenido de humedad de cada una de las capas de éste, o la profundidad del nivel freático. Algo que podría estudiarse, al igual que se ha monitorizado higrótérmicamente el edificio, se podría hacer una monitorización y caracterización del terreno que completase el estudio, pudiendo realizar ajustes al cálculo de succión-evaporación del muro.

9.2. MEJORAS EN LOS MODELOS DE SIMULACIÓN PARA EL EDIFICIO HISTÓRICO

Los programas que permiten combinar la simulación ambiental del edificio (mediante cálculos CFD) y las fluctuaciones a través de la envolvente (mediante cálculos HAM) son los desarrollados más recientemente, pues ambos cálculos se realizaban de manera separada. Esta herramienta ha generado una línea de investigación con gran potencial para el ámbito de la edificación.

Hasta el momento, existen pocos trabajos de investigación realizados en edificios históricos, si lo comparamos con el global en edificación, y sobre todo en otras disciplinas como la ingeniería. En arquitectura, y especialmente en el estudio de edificios patrimoniales, la gran mayoría de trabajos de simulación, no emplean o no detallan el cálculo combinado de CFD con los intercambios a través de la envolvente. En esta investigación se ha podido comprobar que, justamente esta frontera, es donde se producen las mayores fluctuaciones, especialmente porque los edificios históricos se encuentran en equilibrio dinámico con su ambiente y todos los intercambios se sustentan a través de una envolvente que es porosa. Las simulaciones realizadas sin tener en cuenta los intercambios a través de la envolvente no son del todo precisas, como se ha podido comprobar.

Aquellos que trabajan con la envolvente, lo hacen generalmente considerando los intercambios térmicos, pero como ya se ha comentado en el capítulo 2, los intercambios térmicos están muy condicionados por la presencia de humedad, por lo que la simulación está incompleta.

Una de las futuras líneas de investigación que se abren en este punto, es el desarrollo de modelos mejorados que incorporen ambos factores, aplicable no solo al estudio del comportamiento evaporativo, como el que se ha llevado a cabo en este trabajo, sino al resto de estudios que se realizan en edificios históricos, como los de confort de los ocupantes o estudios de conservación de los bienes muebles.

9.3. PRECISIONES A LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES PARA LOS CÁLCULOS DE EVAPORACIÓN Y SIMULACIÓN

Para la simulación de la transferencia de calor y humedad a través de la envolvente ha sido necesario atribuir las propiedades físicas necesarias a los materiales. El propio programa cuenta con una base de datos en la que incluye algunos “materiales tipo” con las propiedades ya atribuidas¹. Esta base de datos dispone tan solo de unos pocos materiales de construcción tradicionales similares a los que se puedan encontrar en un edificio histórico, con valores más bien generales, sin diferenciaciones entre un granito,

¹ Las propiedades de los materiales que figuran en la base de datos de Design Builder proceden de las tablas realizadas por K. Kumaran para la International Energy Agency (Kumaran 1996)

una caliza o un mármol, por ejemplo. El resto, son materiales empleados en el ámbito de “obra nueva”. Por tanto, se consideró que era necesario incluir características más precisas para realizar la simulación, especialmente si tenemos en cuenta que no todas las piedras se comportan igual, sobre todo si están contaminadas por sales higroscópicas, algo que se puede ver fácilmente con los resultados de los ensayos hídricos, donde los granitos alterados de la capilla del Cristo y de la ermita del Humilladero absorben mucho más que un granito sano, o que el mármol de la iglesia de Santiago de Peñalba.

El problema que se planteó, y que aquí se plantea como una oportunidad de investigación, es que resulta complejo obtener datos fiables de muestras de material en edificios históricos. Como se ha comentado en el capítulo 5 “Metodología”, la caracterización de muestras de material de los edificios ha resultado compleja, en lo que se refiere a ensayos físicos e hídricos por la dificultad que supone obtener muestras regulares y de tamaño adecuado en una construcción histórica, en todos los casos, un bien protegido. Por ello, algunos de los ensayos de las normas han tenido que adaptarse. Algunos de los valores, especialmente las propiedades térmicas se han obtenido de las tablas disponibles en la literatura científica. Lo que se plantea es la posibilidad de mejorar el método de ensayo, de manera que puedan llegar a establecerse tablas de rangos de valores adecuados para la simulación de este tipo de edificios.

El estudio en profundidad de los materiales y los métodos de obtención de sus propiedades para simulación sería beneficioso también para el cálculo de la succión-evaporación de los muros. En el caso de la sortividad, necesaria para estos cálculos, existe la misma dificultad. La obtención de este valor por medio de muestras del edificio es complicada, porque requiere el ensayo con probetas regulares para que el valor de absorción capilar –condicionado por la geometría de la muestra- sea correcto. Las muestras de un edificio que presenta alteraciones en sus materiales rara vez va a ser regular, sobre todo teniendo en cuenta que las muestras deben ser de pequeñas dimensiones para no alterar los valores patrimoniales del bien.

10. BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.W.M. VAN SCHIJNDEL, 2009. Integrated modeling of dynamic heat, air and moisture processes in buildings and systems using SimuLink and COMSOL. *Building Simulation*, 2(2), pp. 143-155.

ABUKU, M., JANSSEN, H. and ROELS, S., 2009. Impact of wind-driven rain on historic brick wall building in a moderately cold and humid climate: Numerical analyses of mould growth risk, indoor climate and energy consumption. *Energy and Buildings*, (41), pp. 101-110.

AHRENHOLZ, B., NIESSNER, J., HELMING, R. & KRAFCZYK, M., 2011. Pore-scale determination of parameters for macroscale modeling of evaporation processes in porous media. *Water resources research*, 47(7).

ALBERO, S., GIAVARINI, C., SANTARELLI, M.L. and VODRET, A., 2004. CFD modeling for the conservation of the Gilded Vault Hall in the Domus Aurea. *Journal of Cultural Heritage*, 5, pp. 197-203.

ALEJANDRE SANCHEZ, F.J., MARTIN DEL RIO, J.J., ESPINOSA GAITAN, J. and ONTIVEROS ORTEGA, E., 2011. Sobre la elección de arenas y cales en la elaboración de morteros y sus propiedades. II Jornadas FICAL. Forum Ibérico de la Cal. , Abril 2011 2011, Universitat Politècnica de Catalunya, Grup de Recerca GICITED.

ALEXANDRIS, S. and KERKIDES, P., 2003. *New empirical formula for hourly estimations of reference evapotranspiration*.

ALFANO, G., CHIANCARELLA, C., CIRILLO, E., FATO, I. and MARTELOTTA, F., 2006. Long-term performance of chemical damp-proof courses: Twelve years of laboratory testing. *Building and Environment*, 41(8), pp. 1060-1069.

AL-HAZMY, M.M., 2006. *Analysis of coupled natural convection–conduction effects on the heat transport through hollow building blocks*.

ALONSO, F.J., 2010. La porosidad como propiedad física: Densidad y porosidad. *Departamento de Geología, Universidad de Oviedo*, .

ALONSO, F.J., ESBERT, R.M. and ORDAZ, J., 1987. Comportamiento hídrico de calizas y dolomías. *Boletín Geológico y Minero*, , pp. 555-576.

ALONSO, F.J., ESBERT, R.M. and ORDAZ, J., 1987b. Caracterización del sistema poroso de calizas y dolomías. *Boletín Geológico y Minero*, 98(2), pp. 226-237.

ALONSO, J., 1986. Caracterización petrofísica y alterabilidad de calizas y dolomías. Tesis doctoral. *Departamento de Petrología, Facultad de Geología, Universidad de Oviedo*, , pp. 309 pp.

ALTERIO, S., BARBARO, S., CLAUDIO-CAMPIONE, F., CAMPODONICO, A. and NICASTRI, E., 2010. Microclimate management for the preservation of cultural heritage. *Conservation Science in Cultural Heritage*, 10, pp. 71-100.

ANAND, K.B., VASUDEVAN, V. and RAMAMURTHY, K., 2003. *Water permeability assessment of alternative masonry systems*.

ANDRETTA, M., COPPOLA, F. and SECCIA, L., 2016. Investigation on the interaction between the outdoor environment and the indoor microclimate of a historical library. *Journal of Cultural Heritage*, (17), pp. 75-86.

ASCIONE, F., DE ROSSI, F. and VANOLI, G.P., 2011. Energy retrofit of historical buildings: theoretical and experimental investigations for the modelling of reliable performance scenarios. *Energy and Buildings*, 43(8), pp. 1925-1936.

ASCIONE, F., BIANCO, N., DE MASI, R.F., DE'ROSSI, F. and VANOLI, G.P., 2015. *Energy retrofit of an educational building in the ancient center of Benevento. Feasibility study of energy savings and respect of the historical value*.

ASHRAE, 2016. *Standard 90.1-2016 Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*. Standard edn. United States.

ASHRAE, 2002. *ASHRAE Guideline 14-2002: Measurement of Energy Demand and Savings*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

ASTM-C-1585-04, 2004. *Standard test method for measurement of rate of absorption of water*.

AWBI, H.B., 1989. *Application of computational fluid dynamics in room ventilation*.

AYAD, S.S., 1999. *Computational study of natural ventilation*.

AZIMIYAN, A., 2017. Application of statistical methods for predicting uniaxial compressive strength of limestone rocks using nondestructive test. *Acta Geotechnica*, 12(2), pp. 321-333.

BALOCCO, C. and GRAZZINI, G., 2009. Numerical simulation of ancient natural ventilation system of historical buildings. A case study in Palermo. *Journal of Cultural Heritage*, (10), pp. 313-318.

BALOCCO, C. and GRAZZINI, G., 2007. Plant refurbishment in historical buildings turned into museum. *Energy and Buildings*, (39), pp. 693-701.

BALOCCO, C., PETRONE, G., MAGGI, O., PASQUARIELLO, G., ALBERTINI, R. and PASQUARELLA, C., 2016. *Indoor microclimatic study for Cultural Heritage protection and preventive conservation in the Palatina Library*.

BAO, J. and WANG, L., 2017. *Capillary imbibition of water in discrete planar cracks*.

BARBERO-BARRERA, M.D.M., 2011. *Mejora del comportamiento térmico de morteros de cal aditivados*. Madrid: Tesis Doctoral.

BARRIENTOS RODRIGUEZ, V., 2007. *Caracterización geotécnica de los serrines de granito y algunas aplicaciones en ingeniería civil*, Universidade da Coruña.

BECHERINI, F., BERNARDI, A. and FRASSOLDATI, E., 2010. *Microclimate inside a semi-confined environment: Valuation of suitability for the conservation of heritage materials*.

BENAVENTE, D., GARCÍA DEL CURA, M.A. and ORDÓÑEZ, S., 2003. *Salt influence on evaporation from porous building rocks. Construction and Building Materials*, Volumen 17, pp. 113-122.

BERGER, J., GASPARIN, S., DUTYKH, D. and MENDES, N., 2017. Accurate numerical simulation of moisture front in porous material. *Building and Environment*, 118, pp. 211-224.

BERGER, J., GUERNOUTI, S., WOLOSZYN, M. and BUHE, C., 2015. Factors governing the development of moisture disorders for integration into building performance simulation. *Journal of Building Engineering*, 3, pp. 1-15.

BERGER, J., MAZUROSKI, W., MENDES, N., GUERNOUTI, S. and WOLOSZYN, M., 2016. 2D whole-building hygrothermal simulation analysis based on a PGDreduced order model. *Energy and Buildings*, (112), pp. 49-61.

BERNARDI, A., CAMUFFO, D., DEL MONTE, M. and SABBIONI, C., 1985. Microclimate and weathering of a historical building. The Ducal Palace in Urbino. *Science of the total environment*, 46, pp. 243-260.

BJERG, B., SVIDT, K., ZHANG, G., MORSING, S. and JOHNSEN, J.O., 2002. *Modeling of air inlets in CFD prediction of airflow in ventilated animal houses*.

BLOCKEN, B. and CARMELIET, J., 2010. *Overview of three state-of-the-art wind-driven rain assessment models and comparison based on model theory*.

BOUKENDIL, M., ABDELBAKI, A. and ZRIKEM, Z., 2017. *Numerical simulation of coupled heat transfer through double hollow brick walls: Effects of mortar joint thickness and emissivity*.

BOZ, Z., ERDOGDU, F. and TUTAR, M., 2014. *Effects of mesh refinement, time step size and numerical scheme on the computational modeling of temperature evolution during natural-convection heating*.

BRIMBLECOMBE, P., BLADES, N., CAMUFFO, D., STURARO, G., VALENTINO, A., GYSELS, K., VAN GRIEKEN, R., BUSSE, H.J., KIM, O., ULRYCH, U. and WIESER, M., 1999. The indoor Environment of a Modern Museum Building, The Sainsbury Centre for Visual Arts, Norwich, UK. *Indoor air*, (9), pp. 146-164.

BROCKEN, H.J.P., 1998. *Moisture transport in brick masonry: the grey area between bricks*. Eindhoven University: PhD Thesis.

BRÜGGERHOFF, S., WANGE, G., MORAT, P., LE MOUËL, J. and PERRIER, F., 2001. *First results of using combined mass and temperature measurements to study the water flow at the rock-atmosphere interface*.

BS EN 15251, 2007. *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*.

BUSTAMANTE, R. and SANCHEZ-DE ROJAS, M.I., 2007. Estudio de los enlucidos de yeso de la iglesia de San Pedro de los Francos de Calatayud. *Materiales de Construcción*, 57(286), pp. 53-64.

CAMUFFO, D., STURARO, G. and VALENTINO, A., 1999. Thermodynamic exchanges between the external boundary layer and the indoor microclimate at the Basilica of Santa Maria Maggiore, Rome, Italy: the problem of conservation of ancient works of art. *. Boundary Layer Meteorology*, 92(2), pp. 243-262.

CAMUFFO, D., 2014. *Microclimate for Cultural Heritage*. Segunda edición edn. Elsevier.

CAMUFFO, D., 1984. Condensation-evaporation cycles in pore and capillary systems according to the Kelvin model. *Water, air, and soil pollution*, 21(1-4), pp. 151-159.

CAMUFFO, D., 1983. Indoor dynamic climatology: investigations on the interactions between walls and indoor environment. *Atmospheric Environment*, 17(9), pp. 1803-1809.

CAMUFFO, D., 1982. Microclima all'interno della Cappella di Giotto: scambi termodinamici tra gli affreschi e l'ambiente. *Studi sullo stato di conservazione della Cappella degli Scrovegni in Padova* Special issue of the Bollettino d'Arte edn. Rome: Ministero dei Beni Culturali ed Ambientali. Poligrafico dello Stato, .

CAMUFFO, D., BERNARDI, A., STUARDO, G. & VALENTINO, A., 2002. The microclimate inside the Pollaiuolo and Botticelli rooms in the Uffizi Gallery, Florence. *Journal of Cultural Heritage*, 3(2), pp. 155-161.

CAMUFFO, D. and BERTOLIN, C., 2012. Towards standardisation of moisture content measurement in cultural heritage. *E-Preserv.Sci.*, 9, pp. 23-35.

CAMUFFO, D. and BERTOLIN, C., 2011. From Historical Climate to Comfortable Climate in Historic Buildings. How Shall Energy Efficiency Cope with this Revolution?. In *Energy Efficiency in Historic Buildings*, 2011, Gotland University Press, pp. 9-19.

CAMUFFO, D., PAGAN, E., RISSANEN, S., BRATASZ, L., KOZLOWSKI, R., CAMUFFO, M. and DELLA VALLE, A., 2010. An advanced church heating system favourable to artworks: A contribution to European standardisation. *Journal of Cultural Heritage*, (11), pp. 205–219.

CAMUFFO, D., 2018. *Standardization activity in the evaluation of moisture content*.

CANNISTRARO, G., CANNISTRARO, M. and RESTIVO, R., 2012. Thermo Hygrometric monitoring using wireless sensors: study of Seventeenth-Century Church's. *Science Series Data Report*, 4(4), pp. 101-123.

CARBONARA, G., 2015. *Energy efficiency as a protection tool*.

CARRILHO DA GRAÇA, G., CHEN, Q., GLICKSMAN, L.R. and NORFORD, L.K., 2002. *Simulation of wind-driven ventilative cooling systems for an apartment building in Beijing and Shanghai*.

CERIOTTI, M. Y OTROS, 2009. *Monitoring heritage buildings with wireless sensor networks: The Torre Aquila deployment*. In *International Conference on Information Processing in Sensor Networks*. San Francisco, CA, USA, IEEE.

CHATZITHOMAS, C.D. and ALEXANDRIS, S.G., 2015. *Solar radiation and relative humidity based, empirical method, to estimate hourly reference evapotranspiration*.

CHEN, Q., 1995. COMPARISON OF DIFFERENT $k-\epsilon$ MODELS FOR INDOOR AIR FLOW COMPUTATIONS. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 28(3), pp. 353-369.

CHEN, Q., 2009. *Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications*.

CHEN, Q. and XU, W., 1998. *A zero-equation turbulence model for indoor airflow simulation*.

CHOO, J. and SUN, W., 2018. *Cracking and damage from crystallization in pores: Coupled chemo-hydro-mechanics and phase-field modeling*.

CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN (CTE), 2008. *Catálogo de elementos constructivos del CTE*. Madrid: Instituto Eduardo Torroja de ciencias de la construcción (CSIC).

CORGNATI, S.P., FABI, V. and FILIPPI, M., 2009. A methodology for microclimatic quality evaluation in museums: Application to a temporary exhibit. *Building and Environment*, (44), pp. 1253-1260.

CORGNATI, S.P. and PERINO, M., 2013. *CFD application to optimise the ventilation strategy of Senate Room at Palazzo Madama in Turin (Italy)*.

- CORNARO, C., PUGGIONI, V.A. and STROLLO, R.M., 2016. Dynamic simulation and on-site measurements for energy retrofit of complex historic buildings: Villa Mondragone case study. *Journal of Building Engineering*, (6), pp. 17-28.
- CORTÉS SANTOS, J.L., 2011 (Ed. 2013). La Iglesia de Santiago de Peñalba (León): Nuevos datos arqueológicos. In: MURCIA,GRUPO DE INVESTIGACIÓN "ANTIGÜEDAD Y CRISTIANISMO" ÁREA DE HISTORIA ANTIGUA.UNIVERSIDAD DE, ed, *Mozárabes. Identidad y Continuidad de su historia*. Murcia: Ediciones de la Universidad de Murcia, pp. 231-279.
- CRAWLEY, D.B., HAND, J.W., KUMMERT, M. and GRIFFITH, B.T., 2008. *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*.
- D'AGOSTINO, D., 2013. Moisture dynamics in an historical masonry structure: The Cathedral of Lecce (South Italy). *Building and Environment*, (63), pp. 122-133.
- D'AGOSTINO, D. and CONGEDO, P.M., 2014. CFD modeling and moisture dynamics implications of ventilation scenarios in historical buildings. *Building and Environment*, (79), pp. 181-193.
- D'AGOSTINO, D., CONGEDO, P.M. and CATALDO, R., 2014. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of microclimate for salts crystallization control and artworks conservation. *Journal of Cultural Heritage*, (15), pp. 448-457.
- D' AGOSTINO, D., CONGEDO, P.M. and CATALDO, R., 2013. *Ventilation Control using Computational Fluid-dynamics (CFD) Modelling for Cultural Buildings Conservation*
- D'AMBROSIO, F.R., MAZZARELLA, L. and ROMAGNONI, P., 2015. Special Issue: Historic, historical and existing buildings: designing the retrofit. An overview from energy performances to indoor air quality. *Energy and Buildings*, (95), pp. 1-218.
- DE BERARDINIS, P., ROTILIO, M., MARCHIONNI, C. and FRIEDMAN, A., 2014. Improving the energy-efficiency of historic masonry buildings. A case study: A minor centre in the Abruzzo region, Italy. *Energy and Buildings*, (80), pp. 415-423.
- DEJIAN, L., GUILIAN, W., LIQIANG, H., PEIYU, L., MANCHAO, H., GUOXING, Y., QIMIN, T. and CHENG, C., 2011. *Analysis of microscopic pore structures of rocks before and after water absorption*.
- DELGADO, J.M.P.Q., DE FREITAS, V.P. and GUIMARÃES, A.S., 2016. Water movement in building walls: interfaces influence on the moisture flux. *Heat and Mass Transfer*, 52(11), pp. 2415-2422.
- DELL'ISOLA, M., D'AMBROSIO, F.R., GIOVINCO, G. and IANNIELLO, E., 2012. Experimental Analysis of thermal conductivity for building materials depending on moisture content. *International Journal of Thermophysics*, 33(8-9), pp. 1674-1685.

DERLUYIN, H., JANSSEN, H. and CARMELIET, J., 2011. Influence of the nature of interfaces on the capillary transport in layered materials. *Construction and Building Materials*, 25(9), pp. 3685-3693.

DERLUYN, H., MOONEN, P. and CARMELIET, J., 2014. *Deformation and damage due to drying-induced salt crystallization in porous limestone*.

DIAZ-GONÇALVES, T., BRITO, V., VIDIGAL, F. & MATIAS, L., 2015. Evaporation from Porous Building Materials and its cooling potential. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(8).

DI TURI, S. and RUGGIERO, F., 2017. *Re-interpretation of an ancient passive cooling strategy: a new system of wooden lattice openings*.

DING, W. and UEMATSU, Y., 2017. Large eddy simulation of unsteady aerodynamic behaviour of long-span vaulted roofs. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 18(10), pp. 793-806.

DOLS, W.S., WANG, L., EMMERICH, S.J. and POLIDORO, B.J., 2015. Development and application of an updated whole-building coupled thermal, airflow and contaminant transport simulation program (TRNSYS/CONTAM). *Journal of Building Performance Simulation*, 8(5), pp. 326-337.

DOS SANTOS, G.H. and MENDES, N., 2009. *Heat, air and moisture transfer through hollow porous blocks*.

EDIS, E., FLORES-COLEN, I. and DE BRITO, J., 2015. *Quasi-quantitative infrared thermographic detection of moisture variation in facades with adhered ceramic cladding using principal component analysis*.

ENERGYPLUS, U.S.D.O., 2017. *EnergyPlus Version 8.8.0 Documentation. Auxiliary Programs*.

ESBERT, R.M., MARCOS, R.M., ORDAZ, J., MONTOTO, M., SUAREZ-DEL RIO, L.M., RUZ-DE RRANGADOÑA, V.G., CALLEJA, L., ALONSO, F.J. and RODRIGUEZ-REY, A., 1989. Petrografía, propiedades físicas y durabilidad de algunas rocas utilizadas en el patrimonio monumental de Catalunya, España. *Materiales de Construcción*, , pp. 37-47.

ESBERT, R.M., 2007. Alteración de rocas graníticas utilizadas en edificación. *Materiales de Construcción*, 57(288), pp. 77-89.

FABBRI, K. and PRETELLI, M., 2014. *Heritage buildings and historic microclimate without HVAC technology: Malatestiana Library in Cesena, Italy, UNESCO Memory of the World*.

FABRIZIO, E. and MONETTI, E., 2015. Methodologies and advancements in the calibration of building energy models. *Energies*, 4(8), pp. 2548-2574.

FALCHI, L., SLANZI, D., BALLIANA, E., DRIUSSI, G. and ZENDRI, E., 2018. *Rising damp in historical buildings: A Venetian perspective*.

FERCHAL, C., RITZ, J.P., CALTAGIORNE, J., VOUVÉ, P., MALAURENT, P. and BRUNET, J., 2002. Modélisation des écoulements et transfer de masse et de chaleur à Lascaux: apports à la gestion microclimatique du site, L'art avant l'histoire: la conservation de l'art préhistorique, *10es journées de la Section française de l'institut international de conservation, Paris, 23-24 May 2002, SFIIC 2002*, pp. 35-42.

FERNANDEZ-NAVAJAS, A., MERELLO, P., BELTRAN, P. & GARCIA-DIEGO, F. J., 2013. Software for storage and management of microclimatic data for preventive conservation of Cultural Heritage. *Sensors*, 3(13), pp. 2700-2718.

FERROUKHI, M.Y., DJEDJIG, R., BELARBI, R., LIMAM, K. and ABAHRI, K., 2015. *Effect of Coupled Heat, Air and Moisture Transfers Modeling in the Wall on the Hygrothermal Behavior of Buildings*.

FITZNER, B., HEINRICHS, K. and LA BOUCHARDIERE, D., 2002. Limestone weathering of historical monuments in Cairo, Egypt. *Geological Society Special Publication- Natural Stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies*, 205, pp. 217-239.

FORT-GONZALEZ, R., 1996. *El agua en los materiales pétreos: comportamiento hídrico. Cursos de Verano de El Escorial*. Madrid: Editorial Complutense.

FRANCO, G., MAGRINI, A., CARTESEGNAC, M. and GUERRINI, M., 2015. Towards a systematic approach for energy refurbishment of historical buildings. The case study of Albergo dei Poveri in Genova, Italy. *Energy and Buildings*, (95), pp. 153-159.

FRANZEN, C. and MIRWALD, P., 2004. Moisture content of natural stone: static and dynamic equilibrium with atmospheric humidity. *Environmental Geology*, 46(3-4), pp. 391-401.

FRANZEN, C. and MIRWALD, P.W., 2009. *Moisture sorption behaviour of salt mixtures in porous stone*.

FRANZONI, E., 2014. Rising damp removal from historical masonries: A still open challenge. *Construction and Building Materials*, 54, pp. 123-136.

FRANZONI, E., BANDINI, S. and GRAZIANI, G., 2014. *Rising moisture, salts and electrokinetic effects in ancient masonries: From laboratory testing to on-site monitoring*.

FRANZONI, E., SANDROLINI, F. and BANDINI, S., 2011. *An experimental fixture for continuous monitoring of electrical effects in moist masonry walls*.

FREITAS, V.P., ABRANTES, V. and CRAUSSE, P., 1996. Moisture Migration in Building Walls- Analysis of the interface phenomena. *Building and Environment*, 31(2), pp. 99-108.

FREITAS, V.P., GUIMARAES, A.S. and DELGADO, J.M.P.Q., 2011. The "Humivent" Device for Rising Damp Treatment. *Recent Patents on Engineering*, 5(3), pp. 233-240.

GANGLIANO, A., LIUZZO, M., MARGANI, G. and PETTINATO, W., 2017. Thermo-hygrometric behaviour of Roman thermal buildings: the "indirizzo" Baths of Catania (Sicily). *Energy and Buildings*, (138), pp. 704-715.

GARCIA-DIEGO, F., FERNANDEZ-NAVAJAS, A., BELTRAN, P. and MERELLO, P., 2013. Study of the Effect of the Strategy of Heating on the Mudejar Church of Santa Maria in Ateca (Spain) for Preventive Conservation of the Altarpiece Surroundings. *Sensors*, 13(9), pp. 11407-11423.

GARCIA-MORALES, S., OTERO-ORTIZ DE COSCA, R. and ALLEGUE CASTELOS, H., 2016. *Investigación sobre el oscurecimiento húmedo que afecta a la capilla del Cristo del Monasterio de Santa María de Conxo*. Oficina Técnica. Consorcio de Santiago.

GARCIA-MORALES, S., LOPEZ-GONZALEZ, L. and COLLADO-GOMEZ, A., 2012. Metodología de inspección higrotérmica para la determinación de un factor intensidad de evaporación en edificios históricos. *Informes de la Construcción*, 64, pp. 69-78.

GARCIA-TALEGON, J., IÑIGO, A.C. and VICENTE, M.A., 1994. Granitos empleados en Ávila - España. Composición química de las distintas variedades. *Materiales de Construcción*, 44(233), pp. 23-37.

GOMEZ-HERAS, M., GARCIA-MORALES, S., LOPEZ-GONZALEZ, L. and OTERO-ORTIZ DE COSCA, R., 2015. Combining indoors thermo-hydric survey, thermal imaging and Electrical Resistivity Tomography through GIS for the characterization of moisture in historic buildings, *European Geosciences Union General Assembly*, 12-17 April 2015, Geophysical Research Abstracts.

GRANELL RUIZ, R., 2014. *Análisis del flujo ambiental y propuesta metodológica para simulaciones CFD aplicadas a la ventilación natural de invernaderos*, Departamento de Ingeniería rural y agroalimentaria. Unidad de Ingeniería Hidráulica. Universitat Politècnica de València.

GRINZATO, E., BISON, P.G. and MARINETTI, S., 2002. *Monitoring of ancient buildings by the thermal method*.

GUIMARÃES, A.S., DELGADO, J.M.P.Q., AZEVEDO, A.C. and DE FREITAS, V.P., 2018. *Interface influence on moisture transport in buildings*.

GUIMARAES, A.S., DELGADO, J.M.P.Q. and DE FREITAS, V.P., 2017. Case Studies of Rising Damp Treatment in Historical Buildings. *Diffusion Foundations*, 10, pp. 107-119.

GUIMARÃES, A.S., DELGADO, J.M.P.Q. and FREITAS, V.P., 2012. Numerical simulation of Rising Damp Phenomenon. *Defect and Diffusion Forum*, 326-328, pp. 48-53.

GUIMARÃES, A.S., DELGADO, J.M.P.Q. and DE FREITAS, V.P., 2016. *Treatment of rising damp in historic buildings: Experimental campaign of wall base ventilation and interface effect analysis*.

GUIMARÃES, A.S., DELGADO, J.M.P.Q. and FREITAS, V.P., 2012. Rising damp in walls: Evaluation of the level achieved by the damp front. *Journal of Building Physics*, 37(1), pp. 6-27.

GUMMERSON, R.J., HALL, C. and HOFF, W.D., 1980. *Water movement in porous building materials—II. Hydraulic suction and sorptivity of brick and other masonry materials*.

HACQUEBORD, A., LUBELLI, B., VAN HEES, R. and NIJLAND, T., 2013. Evaluation of Spreading and Effectiveness of Injection Products against Rising Damp in Mortar/Brick Combinations. *Procedia Chemistry*, 8, pp. 139-149.

HAGHIGHAT, F., LI, Y. and MEGRI, A.C., 2001. *Development and validation of a zonal model — POMA*.

HAJDUKIEWICZ, M., GERON, M. and KEANE, M.M., 2013. *Formal calibration methodology for CFD models of naturally ventilated indoor environments*.

HALL, C. and HOFF, W.D., 2002. *Water transport in brick, stone and concrete*. London, UK: Taylor & Francis.

HALL, C., HOFF, W.D. and NIXON, M.R., 1984. Water movement in porous building materials - VI. Evaporation and drying in brick and block materials. *Building and Environment*, 19(1), pp. 13-20.

HALL, C. and HOFF, W.D., 2009. *Water transport in brick, stone and concrete*. Second Edition edn. CRC Press, Taylor & Francis Group.

HALL, C. and KAM-MING TSE, T., 1986. Water movement in porous building materials - VII. The sorptivity of mortars. *Building and Environment*, 21(2), pp. 113.

HALL, C., HAMILTON, A., HOFF, W.D., VILES, H.A. and EKLUND, J.A., 2011. Moisture dynamics in walls: response to micro-environment and climate change. *Proceedings of the Royal Society*, (467), pp. 194-211.

HALL, C., 2007. *Anomalous diffusion in unsaturated flow: Fact or fiction?* .

HALL, C., 1977. *Water movement in porous building materials—I. Unsaturated flow theory and its applications*.

HALL, C. and HOFF, W.D., 2007. Rising damp: capillary rise dynamics in walls. *Proceedings of the Royal Society*, (463), pp. 1871-1184.

HALL, M.R. and ALLISON, D., 2010b. Evaporative drying in stabilized compressed earth materials using unsaturated flow theory. *Building and Environment*, 45(3), pp. 509-518.

HALL, M.R. and ALLISON, D., 2010a. *Heat and Mass Transport Processes in Building Materials*. Cambridge: Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings, Woodhead Publishing.

HALL, M. and DJERBIB, Y., 2004. *Moisture ingress in rammed earth: Part 1—the effect of soil particle-size distribution on the rate of capillary suction*.

HE, J. and HOYANO, A., 2011. *Experimental study of practical applications of a passive evaporative cooling wall with high water soaking-up ability*.

HENS, H., 2009. IEA-ECBCS Annex 41. Whole Building Heat, Air and Moisture Response (LO-09-007). In ASHRAE Transactions, 2009.

HENS, H., OJANEN, T., KÜNZEL, H.M. and ALI MOHAMED, F., 1996. *IEA. Annex 24. Heat, air and moisture transfer through new and retrofitted insulated envelope parts (Hamtie). Final report. 1: Task 1: modelling. Addendum: common exercises, summary reports*. Leuven : KUL. Departement burgerlijke bouwkunde. Laboratorium bouwfysica, 1996: International energy agency.

HERRAEZ, J.A., DE SALAMANCA, G.E., PASTOR ARENAS, M.J. and GIL MUÑOZ, T., 2014. *Manual de Seguimiento y Análisis de Condiciones Ambientales*. NIPO: 030-14-078-7 edn. Instituto del Patrimonio Cultural de España. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Secretaria General Técnica. Subdirección General de Documentación y Publicaciones.

HOŁA, A., MATKOWSKI, Z. and HOŁA, J., 2017. *Analysis of the Moisture Content of Masonry Walls in Historical Buildings Using the Basement of a Medieval Town Hall as an Example*.

HOU, S., LIU, F. and BIAN, H., 2017. Coupled heat and moisture transfer in hollow concrete block wall filled with compressed straw bricks. *Energy and Buildings*, 135, pp. 74-84.

HOWLAND, J.J. and MARTIN, A.R., 2013. Study about the capillary absorption and the sorptivity of concretes with cuban limestones aggregates. *Materiales de Construcción*, 63(312), pp. 515-527.

HUIJBREGTS, Z., SCHELLEN, H., VAN SCHIJNDEL, J. and ANKERSMIT, B., 2015. *Modelling of heat and moisture induced strain to assess the impact of present and historical indoor climate conditions on mechanical degradation of a wooden cabinet*.

HUSSAIN, S. and OOSTHUIZEN, P.H., 2013. *Numerical investigations of buoyancy-driven natural ventilation in a simple three-storey atrium building and thermal comfort evaluation*.

I'ANSON, S.J. and HOFF, W.D., 1986. *Water movement in porous building materials—VIII. Effects of evaporative drying on height of capillary rise equilibrium in walls*.

IGEA, J., 2011. *Caracterización de los materiales de construcción del mudéjar aragonés. Diseño de nuevos morteros para su aplicación en restauración*, Facultad de Ciencias. Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza.

IGEA, J., LAPUENTE, P., MARTINEZ-RAMIREZ, S. and BLANCO-VARELA, M.T., 2012. Caracterización de morteros mudéjares de la iglesia de San Gil Abad (Zaragoza, España): investigación de la tecnología de fabricación de morteros históricos de yeso. *Materiales de Construcción*, 62(308), pp. 515-529.

INARD, C., BOUIA, H. and DALICIEUX, P., 1996. *Prediction of air temperature distribution in buildings with a zonal model*.

IÑIGO IÑIGO, A.C., VICENTE TABERA, S., RIVES ARNAU, V. and VICENTE HERNÁNDEZ, M.A., 1995. Porosidad libre en granitos alterados: comentarios a las normas. *Materiales de Construcción*, 45(238), pp. 47-53.

IZARD, J.L. and GUYOT, A., 1980. *Arquitectura bioclimática*. Barcelona: Gustavo Gili.

JANSSEN, H., DERLUYN, H. and CARMELIET, J., 2012. Moisture transfer through mortar joints: a sharp-front analysis. *Cement and Concrete Research*, 42(8), pp. 1105-1112.

JANSSEN, H., BLOCKEN, B. and CARMELIET, J., 2007. Conservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, (50), pp. 1128-1140.

JAREEMIT, D. and SREBRIC, J., 2015. A Characterization of time-dependent air infiltration rates in retail stores using calibrated multi-zone model. *Science and Technology for the Built Environment*, 21(4), pp. 420-428.

JOHANNESSON, B. and JANZ, M., 2009. *A two-phase moisture transport model accounting for sorption hysteresis in layered porous building constructions*.

JOHANNESSON, B. and NYMAN, U., 2010. A Numerical Approach for Non-Linear Moisture Flow in Porous Materials with Account to Sorption Hysteresis. *Transport in Porous Media*, 84(3), pp. 735-754.

KALAGASIDIS, A.S., WEITZMAN, P., NIELSEN, T.R., PEUHKURI, R., HAGENTOFT, C. and RODE, C., 2007. The International Building Physics Toolbox in Simulink. *Energy and Buildings*, (39), pp. 665-674.

KALAMEES, T., VÄLI, A., KURIK, L., NAPP, M., ARÜMAGI, E. and KALLAVUS, U., 2016. The influence of the indoor climate control on risk for damages in naturally ventilated historic churches in cold climate. *International Journal of Architectural Heritage*, 10(4), pp. 486-498.

KARACA, Z., 2010. *Water absorption and dehydration of natural stones versus time*.

- KARAGIANNIS, N., KAROGLU, M., BAKOLAS, A., KROKIDA, M. and MOROPOULOU, A., 2017. Drying kinetics of building materials capillary moisture. *Construction and Building Materials*, 137, pp. 441-449.
- KARAGIANNIS, N., KAROGLU, M., BAKOLAS, A. and MOROPOULOU, A., 2016. *Effect of temperature on water capillary rise coefficient of building materials*.
- KARAGIANNIS, N., KAROGLU, M., BAKOLAS, A., KROKIDA, M. and MOROPOULOU, A., 2017. *Drying kinetics of building materials capillary moisture*.
- KAROGLU, M., MOROPOULOU, A., KROKIDA, M.K. and MAROULIS, Z.B., 2007. *A powerful simulator for moisture transfer in buildings*.
- KASAGI, N., TOMITA, Y. and KURODA, A., 1992. Direct numerical simulation of passive scalar field in a turbulent channel flow. *Journal of Heat Transfer*, 114(3), pp. 598-606.
- KHALIL, E.E., 2017. Calidad del aire interior: aplicación de CFD para la prevención de las tumbas del Valle de los Reyes, Luxor, 4ª conferencia internacional sobre investigación en física de edificios IBPC, Estambul 2017.
- KHAN, F.A., FISCHER, C. and STRAATMAN, A.G., 2015. *Numerical model for non-equilibrium heat and mass exchange in conjugate fluid/solid/porous domains with application to evaporative cooling and drying*.
- KONDO, K., MURAKAMI, S. and MOCHIDA, A., 1997. *Generation of velocity fluctuations for inflow boundary condition of LES*.
- KONIORCZYK, M. and GAWIN, D., 2012. *Modelling of salt crystallization in building materials with microstructure – Poromechanical approach*.
- KONIORCZYK, M., GAWIN, D. and SCHREFLER, B.A., 2018. *Multiphysics model for spalling prediction of brick due to in-pore salt crystallization*.
- KUMARAN, K., 1996. *Heat, air and moisture transfer through new and retrofitted insulated envelope parts (Hamtie). Final report. Task 3: Material properties*. Volume 3. Canada: International Energy Agency. Energy conservation in buildings and community systems.
- KUMARAN, K., 1996. *Heat, air, and moisture transfer in insulated envelope parts. Final Report. Task 3: Material properties*. International Energy Agency. Energy conservation in buildings and community systems. 3. Canada: Acco Leuven.
- KÜNZEL, H.M., HOLM, A., ZIRKELBACH, D. and KARAGIOZIS, A.N., 2005. Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope. *Solar Energy*, (78), pp. 554-561.

- KÜNZEL, H.M., KARAGIOZIS, A. and HOLM, A., 2001. A hygrothermal design tool for architects and engineers. *Moisture Analysis and Condensation Control in Building Envelopes. ASTM Manual Series 50: Chapter 9*, .
- KÜNZEL, H.M. and KIESSL, J., 1995. *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components : One- and Two-dimensional Calculation Using Simple Parameters*. Stuttgart: IRB Verlag.
- KÜNZEL, H.M. and KIESSL, K., 1996. Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40(1), pp. 159-167.
- KUZNIK, F., RUSAOUËN, G. and BRAU, J., 2007. *Experimental and numerical study of a full scale ventilated enclosure: Comparison of four two equations closure turbulence models*.
- KYLILI, A., FOKAIDES, P.A., CHRISTOU, P. and KALOGIROU, S.A., 2014. *Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review*.
- LA GENNUSA, M., RIZZO, G., SCACCIANOCE, G. and NICOLETTI, F., 2005. Control of indoor environments in heritage buildings: experimental measurements in an old Italian museum and proposal of a methodology. *Journal of Cultural Heritage*, , pp. 47-155.
- LAMBERTUS SCHELLEN, H., 2002. *Heating Monumental Churches. Indoor climate and Preservation of Cultural Heritage*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.
- LANKESTER, P. and BRIMBLECOMBE, P., 2012. Future thermohygrometric climate within historic houses. *Journal of Cultural Heritage*, (13), pp. 1.
- LECCESE, F. Y OTROS, 2014. A new acquisition and imaging system for environmental measurements: an experience on the Italian cultural heritage. *Sensors*, 14(5), pp. 9290-9312.
- LEISSNER, J. and KIIAN, R., 2014. *Climate for Culture. Built cultural heritage in times of climate change*. Final Report. Brussels: .
- LEWIS, T. and LAMOUREUX, S.F., 2010. Twenty-first century discharge and sediment yield predictions in a small high Arctic watershed. *Global and Planetary Change*, 71(1-2), pp. 27-41.
- LI, Q., RAO, J. and FAZIO, P., 2009. *Development of HAM tool for building envelope analysis*.
- LITTI, G. and AUDENAERT, A., 2018. *An integrated approach for indoor microclimate diagnosis of heritage and museum buildings: The main exhibition hall of Vleeshuis museum in Antwerp*. *Energy and Buildings*, Volumen 162, pp. 91-108.
- LITTI, G., KHOSHDEL, S., AUDENAERT, A. and BRAET, J., 2015. *Hygrothermal performance evaluation of traditional brick masonry in historic buildings*.

LIU, P., LIN, H. and CHOU, J., 2009. *Evaluation of buoyancy-driven ventilation in atrium buildings using computational fluid dynamics and reduced-scale air model*.

LOPEZ-GONZALEZ, L., 2015. *Aplicación de herramientas GIS para la cartografía y correlación de datos de ensayos no destructivos en el diagnóstico de edificios históricos*, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid.

LOPEZ-GONZALEZ, L., GOMEZ-HERAS, M., OTERO-ORTIZ DE COSCA, R. and GARCIA-MORALES, S., 2016. Electrical Resistivity Tomography in the characterization of wetting patterns of historical masonry. *European Geosciences Union General Assembly*, 17-22 April 2016 2016, Geophysical Research Abstracts.

LOPEZ-GONZALEZ, L., OTERO-ORTIZ DE COSCA, R. and GOMEZ-HERAS, M., 2016. 4D GIS strategies to monitoring of moisture flows on the Heritage Building. *Environ Earth Science*, 75(1113),.

LOPEZ-GONZALEZ, L., OTERO-ORTIZ DE COSCA, R., GOMEZ-HERAS, M. and GARCIA-MORALES, S., 2016. Relationships between evaporation and moisture content in historical masonry, *European Geosciences Union General Assembly*, 17-22 April 2016, Geophysical Research Abstracts.

LOPEZ-GONZALEZ, L., OTERO-ORTIZ DE COSCA, R., GOMEZ-HERAS, M., GARCIA-MORALES, S. and SANZ-ARAUZ, D., 2016. Evaporative behaviour study in the hermit Humilladero by hygrothermal survey techniques. Euro-American Congress sobre "Construction pathology, rehabilitation technology and heritage management", 24-27 May. 2016 2016, pp. 128.

LUBELLI, B., VAN HEES, R.P.J. and BOLHUIS, J., 2018. *Effectiveness of methods against rising damp in buildings: Results from the EMERISDA project*.

LUCCHI, E., 2017. *Review of preventive conservation in museum buildings*.

LUCIANI, A., 2013. *Historical climates and conservation environments. Historical perspectives on climate control strategies within museums and heritage buildings*, Politecnico di Milano. Dipartimento di Architettura e Studi Urbani (DASTU) Doctoral Programme in Preservation of Architectural Heritage.

LUIKOV, A. V., 1975. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies (review). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18(1), pp. 1-14.

M.P.Q DELGADO, J., BARREIRA, E., M.M. RAMOS, N. and DE FREITAS, V.P., 2012. *Hygrothermal Numerical simulation tools applied to building physics*. Springer Science & Business Media.

MA, Z., COOPER, P., DALY, D. and LEDO, L., 2012. Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. *Energy and Buildings*, (55), pp. 889-902.

MARTINES-LOPEZ, E. & LIRA-CORTES, L., 2016. Evaluación de los factores de influencia en el modelo de Luikov durante el secado de ladrillo. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(1), pp. 35-44.

MARTÍNEZ MARÍN, E., 2000. *Hidráulica*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Servicio de Publicaciones.

MARTÍNEZ MOLINA, A., TORT AUSINA, I. and SOOLYEON CHO, V., J.L., 2016. Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, .

MARTINEZ-GARRIDO, M.I., APARICIO, S., FORT, R., ANAYA, J.J. and IZQUIERDO, M.A.G., 2014. Effect of solar radiation and humidity on the inner core of walls. *Construction and Building Materials*, (51), pp. 383-394.

MARTINS, J., DIONISIO, A. and NEVES, O., 2017. *Agar Gel for Açã Limestone Desalination*.

MASON, G., 1974. *Rising damp*.

MAZZARELLA, L., 2015. *Energy retrofit of historic and existing buildings. The legislative and regulatory point of view*.

MCALLISTER, D., WARKE, P., MCCABE, S. & GOMEZ-HERAS, M., 2016. Evaporative moisture loss from heterogeneous stone: Material-environment interactions during drying. *Geomorphology*, Issue 273, pp. 308-322.

MCHAHON, T.A., PEEL, M.C., LOWE, L., SRIKANTHAN, R. and MCVICAR, T.R., 2013. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using meteorological data: a pragmatic synthesis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, pp. 1331-1363.

MEGRI, A.C. and YU, Y., 2015. *New calibrated zonal model (POMA+) for temperature and airflow predictions*.

MENDES, N., WINKELMANN, F.C., LAMBERTS, R. and PHILIPPI, P.C., 2003. *Moisture effects on conduction loads*.

MENDES, N., OLIVEIRA, R.C.L.F. and HENRIQUE DOS SANTOS, G., 2003. Domus 2.0: A whole-building simulation program. In: Eighth International IBPSA Conference, 2003, pp. 863-870.

MENÉNDEZ, B., 2017. *Estimation of salt mixture damage on built cultural heritage from environmental conditions using ECOS-RUNSALT model*.

MERELLO, P., GARCIA-DIEGO, F., BELTRAN, P. and SCATIGNO, C., 2018. High Frequency Data Acquisition System for Modelling the Impact of Visitors in the Thermo-Hygrometric Conditions of Archeological Sites: A Casa di Diana (Ostia Antica, Italy) Case Study. *Sensors*, 18(2), pp. 348.

MESAS-CARRASCOSA, F. J. Y OTROS, 2016. Monitoring Heritage Buildings with Open Source Hardware Sensors: A Case Study of the Mosque-Cathedral of Córdoba. *Sensors*, 16(10).

MOIN, P. and MAHESH, K., 1998. DIRECT NUMERICAL SIMULATION: A Tool in Turbulence Research. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 30(1), pp. 539-578.

MONETTI, V., DAVIN, E., FABRIZIO, E., ANDRÉ, P. and FILIPPI, M., 2015. Calibration of building energy simulation models based on optimization: a case study. *Energy Procedia*, (78), pp. 2971-2976.

MORENO, F., VILELA, S.A.G., ANTUNES, Â.S.G. and ALVES, C.A.S., 2006. *Capillary-rising salt pollution and granitic stone erosive decay in the parish church of Torre de Moncorvo (NE Portugal)-implications for conservation strategy*.

MUÑOZ-GONZÁLEZ, C.M., LEÓN-RODRÍGUEZ, A.L. and NAVARRO-CASAS, J., 2016. *Air conditioning and passive environmental techniques in historic churches in Mediterranean climate. A proposed method to assess damage risk and thermal comfort pre-intervention, simulation-based*.

MUÑOZ-GONZÁLEZ, C.M., LEÓN-RODRÍGUEZ, A.L. and NAVARRO-CASAS, J., 2015. La monitorización y simulación: herramientas para la mejora de la preservación, confort y ahorro energético de espacios patrimoniales. *Revista PH Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 88, pp. 251-253.

MURAKAMI, S., 1997. *Current status and future trends in computational wind engineering*.

MURAKAMI, S. and MOCHIDA, A., 1988. *3-D numerical simulation of airflow around a cubic model by means of the k- ϵ model*.

NAVARRO, R., CRUZ, A.S., ARRIAGA, L. and BALTUILLE, J.M., 2017. Caracterización de los principales tipos de mármol extraídos en la comarca de Macael (Almería, sureste de España) y su importancia a lo largo de la historia. *Boletín Geológico y Minero*, 128(2), pp. 345-361.

NGUYEN, A., REITER, S. and RIGO, P., 2014. *A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis*.

NIELSEN, P.V., 2015. *Fifty years of CFD for room air distribution*. . *Building and Environment*, Issue 91, pp. 78-90.

NORREFELDT, V., GRÜN, G. and SEDLBAUER, K., 2012. *VEPZO – Velocity propagating zonal model for the estimation of the airflow pattern and temperature distribution in a confined space*.

OBERKAMPF, W.L. and TRUCANO, T.G., 2002. *Verification and validation in computational fluid dynamics*.

O'BRIEN, P.F., BELL, E., PAVIA SANTAMARIA, S., BOYLAND, P. and COOPER, T.P., 1995. *Role of mortars in the decay of granite*.

OETELAAR, T., JOHNSTON, C., WOOD, D., HUGHES, L. and HUMPHREY, J., 2013. A computational investigation of a room heated by subcutaneous convection - A case study of a replica Roman bath. *Energy and Buildings*, (63), pp. 59-66.

OLARIO, P. and ALESSIO, E., 1995. Applicazione di un software CFD per caratterizzare il movimento dell'aria nella Mole Antonelliana: risultati e verifiche sperimentali, *Atti del 50º Congresso Nazionale ATI (Associazione Termotecnica Italiana)* 1995, pp. 949-959.

ORDAZ, J. and ALONSO, F.J., 1983. Características del sistema poroso de la arenisca de Villamayor (Salamanca). *Trabajos de Geología*, (13), pp. 84-92.

ORDAZ, J., ALONSO, F.J. and ESBERT, R.M., 1990. Caracterización física de adobes de Castilla-León. 6th International Conference on the Conservation of Earthen Architecture, 1990, The Getty Conservation Institute.

ODIN, L., HERVIEU, F., MICHEL, C., PERRIN, C., ANDREASSIAN, V., ANCTIL, F. and LOUMAGNE, C., 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303(1-4), pp. 290-306.

OZCELIK, Y. and OZGUVEN, A., 2014. Water absorption and drying features of different natural building stones. *Construction and Building Materials*, 63, pp. 257-270.

PASQUARELLA, C., BALOCCO, C., PASQUARIELLO, G., PETRONE, G., SACCANI, E., MANOTTI, P., UGOLOTTI, M., PALLA, F., MAGGI, O. and ALBERTINI, R., 2015. *A multidisciplinary approach to the study of cultural heritage environments: Experience at the Palatina Library in Parma*.

PEDERSEN, C.R., 1992. *Prediction of moisture transfer in building constructions*.

PEDLEY, T.J., 1997. Introduction to Fluid Dynamics- Lectures on Pankton and Turbulence. *Sc. Mar.*, 61(1), pp. 7-24.

PEL, L., SAWDY, A. and VORONINA, V., 2010. *Physical principles and efficiency of salt extraction by poulticing*.

PENMAN, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London*, 193, pp. 120-145.

QIU, X., 2003. *Moisture transport across interfaces between building materials*. Concordia University: PhD Thesis.

RAIMONDO, M., DONDI, M., MAZZANTI, F., STEFANIZZI, P. and BONDI, P., 2007. *Equilibrium moisture content of clay bricks: The influence of the porous structure*.

RAIMONDO, M., DONDI, M., GARDINI, D., GUARINI, G. and MAZZANTI, F., 2009. *Predicting the initial rate of water absorption in clay bricks*.

RAMPONI, R. and BLOCKEN, B., 2012. *CFD simulation of cross-ventilation for a generic isolated building: Impact of computational parameters*.

RAMSDEN, M., 2008. *Thermal comfort in UK Churches*. University of East London, School of Computing and Technology.

REDA TAHA, M.M., EL-DIEB, A.S. and SHRIVE, N.G., 2001. Sorptivity: a reliable measurement for surface absorption of masonry brick units. *Materials and Structures*, 34, pp. 438-445.

RIMINESI, C., SANSONETTI, A. and SCALA, A., 2018. *Assessment of the effectiveness of a dehumidification system by emission of electromagnetic fields: Proposal of a protocol*.

RIRSCH, E., 2010. Rising Damp in Masonry Walls and the Importance of Mortar Properties. *Construction and Building Materials*, (24), pp. 1815-1820.

ROBERTI, F., OBEREGGER, U.F. and GASPARELLA, A., 2015. Calibrating historic building energy models to hourly indoor air and surface temperatures: Methodology and case study. *Energy and Buildings*, (108), pp. 236-243.

ROBERTI, F., OBEREGGER, U.F., LUCCHI, E. and TROI, A., 2017. *Energy retrofit and conservation of a historic building using multi-objective optimization and an analytic hierarchy process*.

RODRIGUEZ-NAVARRO, C. and DOEHNE, E., 1999. Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern. *Earth Surface Processes and Landforms*, (24), pp. 191-209.

ROJO, A., ALONSO, F.J. and ESBERT, R.M., 2000. Influencia de las características mineralógicas y texturales en el comportamiento hídrico de las rocas graníticas. V Congreso Geológico de España, 2000, Geotemas.

ROSINA, E., SANSONETTI, A. and ERBA, S., 2017. *Focus on soluble salts transport phenomena: The study cases of Leonardo mural paintings at Sala delle Asse (Milan)*.

ROYAPOOR, M. and ROSKILLY, T., 2015. Building model calibration using energy and environmental data. *Energy and Buildings*, (95), pp. 109-120.

SAAVEDRA, J., MADRUGA, F. and MARTIN PATINO, M.T., 1983. Clasificación de la arenisca de Villamayor (Salamanca) por sus características tecnológicas y estructura interna. *Boletín Geológico y Minero*, 104-106, pp. 655-663.

SABIR, B.B., WILD, S. and O'FARREL, M., 1998. A water sorptivity test for mortar and concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 31, pp. 586-574.

SAHIN, C.D., COŞKUN, T., ARSAN, Z.D. and GÖKÇEN AKKURT, G., 2017. *Investigation of indoor microclimate of historic libraries for preventive conservation of manuscripts. Case Study: Tire Necip Paşa Library, İzmir-Turkey. Sustainable Cities and Society*, Issue 30, pp. 66-78.

SANCHEZ-TORIBIO, M.I., 1992. *Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración*. Logroño: Sociedad Española de Geomorfología. Geoforma Ediciones.

SANDROLINI, F. and FRANZONI, E., 2007. Repair systems for the restoration of ancient buildings – dampness rise problem. *Restor Build Monuments*, 13(3), pp. 161-171.

SANDROLINI, F. and FRANZONI, E., 2006. *An operative protocol for reliable measurements of moisture in porous materials of ancient buildings*.

SANJURJO, J. and ALVES, C.A.S., 2006. Degradación de rocas graníticas empleadas como material de construcción en edificios históricos de A Coruña (NW España). *Cadernos La. Xeolóxico de Laxe*, 31, pp. 11-28.

SARDELLA, A., DE NUNTIIS, P. and BONAZZA, A., 2018. *Efficiency evaluation of treatments against rising damp by scale models and test in situ*.

SASS, O. and VILES, H.A., 2010. Two-dimensional resistivity surveys of the moisture content of historic limestone walls in Oxford, UK: implications for understanding catastrophic stone deterioration. *Limestone in the built environment: present-day challenges for the preservation of the past*, 331, pp. 237-249.

SAWDY, A. and PRICE, C., 2005. *Salt damage at Cleeve Abbey, England: Part I: a comparison of theoretical predictions and practical observations*.

SCHELLEN, H.L. and MARTENS, M.H.J., 2008. A sound indoor climate for a museum in a monumental building. In *Symposium Building Physics in honour of Prof. Hugo Hens*, 2008, pp. 1-8.

SHEN, L., HAN, Y., CAI, C., DONG, G., ZHANG, J. and HU, P., 2017. LES of wind environments in urban residential areas based on an inflow turbulence generating approach. *Wind and Structures*, 24(1), pp. 1-24.

SHIELL, C.D., 2018. *The thermo-hygrometric environment in cathedrals in Ireland*, Trinity College Dublin. School of Engineering. CIVIL, STRUCTURAL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING, 2018.

SHOKRI-KUEHNI, S.M.S., VETTE, T., WEBB, C. and SHOKRI, N., 2017. New insights into saline water evaporation from porous media: Complex interaction between evaporation rates, precipitation, and surface temperature. *Geophysical Research Letters*, 44(1), pp. 5504-5510.

SILVA, H.E. and HENRIQUES, F.M.A., 2014. *Microclimatic analysis of historic buildings: A new methodology for temperate climates*.

SMILES, D.E., 1998. *Water flow in filter paper and capillary suction time*.

STEEMAN, H.J., JANSSENS, A., CARMELIET, J. and DE PAEPE, M., 2009. Modelling indoor air and hygrothermal wall interaction in building simulation: Comparison between CFD and a well-mixed zona model. *Building and Environment*, (44), pp. 572-583.

STEEMAN, H.-., VAN BELLEGHEM, M., JANSSENS, A. and DE PAEPE, M., 2009. *Coupled simulation of heat and moisture transport in air and porous materials for the assessment of moisture related damage*.

STEEMAN, M., JANSSENS, A., STEEMAN, H.J., VAN BELLEGHEM, M. and DE PAEPE, M., 2010. *On coupling 1D non-isothermal heat and mass transfer in porous materials with a multizone building energy simulation model*.

STESKENS, P., 2009. *Modelling of the hygrothermal interactions between the indoor environment and the building envelope*. DTU Civil Engineering. Department of Civil Engineering.

SUMITANI, Y. and KASAGI, N., 1995. Direct numerical simulation of turbulent transport with uniform wall injection and suction. *AIAA Journal*, 33(7), pp. 1220-1228.

SUN, K., HONG, T., TAYLOR-LANGE, S.C. and PIETTE, M.A., 2016. A pattern-based automated approach to building energy model calibration. *Applied Energy*, 165, pp. 214-224.

TARIKU, F., 2008. *Whole building heat and moisture analysis*. Canada: .

TARIKU, F., KUMARAN, K. and FAZIO, P., 2011. Determination of indoor humidity profile using a whole-building hygrothermal model. *Building Simulation*, (4), pp. 61-78.

TARIKU, F., KUMARAN, K. and FAZIO, P., 2010. *Transient model for coupled heat, air and moisture transfer through multilayered porous media*.

TENWOLDE, A. and PILON, C.L., 2007. The effect of indoor humidity on water vapor release in homes, *Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X International Conference*, Dec. 2-7, Clearwater, FL, 2007 2007.

THORNTHWAITE, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), pp. 55-94.

TORRES, I., 2018. *New technique for treating rising damp in historical buildings: Wall base ventilation*.

TORRES, I. and FREITAS, V.P.D., 2010. *The influence of the thickness of the walls and their properties on the treatment of rising damp in historic buildings*.

TORRES, M.I.M. and DE FREITAS, V.P., 2007. Treatment of rising damp in historical buildings: wall base ventilation. *Building and Environment*, (42), pp. 424-435.

UNE-EN 1015-10:2000/A1, 2007. *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido*. Madrid: AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación.

UNE-EN 13755, 2008. *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica*. AENOR.

UNE-EN 15026:2007, 2007. *Comportamiento higrotérmico de componentes de edificios y elementos constructivos. Evaluación de la transferencia de humedad mediante simulación numérica. (English version: Hygrothermal performance of building components and building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation)*. Brussels: European Committee for Standardization.

UNE-EN 15758, 2011. *Conservación del patrimonio cultural. Procedimientos e instrumentación para la medición de las temperaturas del aire y de las superficies de los objetos*. Aenor.

UNE-EN 16242, 2014. *Conservación del Patrimonio Cultural. Procedimientos e instrumentos para la medición de la humedad en el aire y los intercambios de humedad entre el aire y el patrimonio cultural*. Aenor.

UNE-EN 1936, 2007. *Métodos de ensayo para la piedra natural. Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total*

UNE-EN 933-4, 2008. *Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 4: Determinación de la forma de las partículas. Coeficiente de forma*. .

UNE-EN ISO 10456, 2012. *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*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

UNE-EN ISO 10456, 2001. *Materiales y productos para la edificación. Procedimientos para la determinación de los valores térmicos declarados y de diseño*. Madrid: Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).

UNI 10829 , 1999. *Condizioni ambientali di conservazione: misurazione ed analisi*. s.l.:s.n.

VALERO, M.A., MERELLO, P., FERNANDEZ-NAVAJAS, A. and GARCIA-DIEGO, F., 2014. Statistical Tools Applied in the Characterisation and Evaluation of a Thermo-Hygrometric Corrective Action Carried out at the Noheda Archaeological Site (Noheda, Spain). *Sensors*, 14, pp. 1665-1679.

VALIANTZAS, J.D., 2006. Simplified versions for the Penman evaporation equation using routine weather data. *Journal of Hydrology*, (331), pp. 690-792.

VALIANTZAS, J.D., 2015. *Simplified limited data Penman's ETO formulas adapted for humid locations*.

VALIANTZAS, J.D., 2013. *Simplified forms for the standardized FAO-56 Penman–Monteith reference evapotranspiration using limited weather data*.

VAN BELLEGHEM, B., MONTOYA, R., DEWANCKELE, J., VAN DEN STEEN, N., DE GRAEVE, I., DECONINCK, J., CNUUDE, V., VAN TITTELBOOM, K. and DE BELIE, N., 2016. *Capillary water absorption in cracked and uncracked mortar – A comparison between experimental study and finite element analysis*.

VAN BELLEGHEM, M., STEEMAN, M., JANSSEN, H., JANSSENS, A. and DE PAEPE, M., 2014. *Validation of a coupled heat, vapour and liquid moisture transport model for porous materials implemented in CFD*.

VAN BELLEGHEM, M., STEEMAN, M., WILLOCKX, A., JANSSENS, A. and DE PAEPE, M., 2011. *Benchmark experiments for moisture transfer modelling in air and porous materials*.

VAN HOOFF, T. and BLOCKEN, B., 2010. *Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation modelling on a high-resolution grid: A case study for the Amsterdam ArenA stadium*.

VANHELLEMONT, Y., BOLHUIS, J., DE BOUW, M., DUBOIS, S., LUBELLI, B., MIEDEMA, L. and VAN HEES, R., 2018. *Are electrokinetic methods suitable for the treatment of rising damp?* .

VARAS MURIEL, M.J., FORT, R., MARTÍNEZ GARRIDO, M.I. and ZORNOZA INDART, A., 2014. Fluctuations in the indoor environment in spanish rural churches and their effects on heritage conservation: Hygrothermal and CO2 conditions monitoring. *Building and Environment*, (82), pp. 97-109.

VARAS-MURIEL, M.J., FORT, R., MARTINEZ-GARRIDO, M.I., ZORNOZA-INDART, A. and LOPEZ-ARCE, P., 2014. Fluctuations in the indoor environment in Spanish rural churches and their effects in heritage conservation: hygro-thermal and CO2 conditions monitoring. *Building and Environment*, 82, pp. 97-109.

VECCHIATTINI, R., 2018. *Moisture monitoring experience in the old town of Genoa (Italy)*.

VILLI, G., PERETTI, C., GRACI, S. and DE CARLI, M., 2013. Building leakage analysis and infiltration modelling for an Italian multi-family building. *Journal of Building Performance Simulation*, 6(2), pp. 98-118.

VISCO, G. Y OTROS, 2012. Microclimate monitoring in the Carcer Tullianum: temporal and spatial correlation and gradients evidenced by multivariate analysis; forst campaign. *Chemistry Central Journal*, 6(2).

VOS, B.H. and TAMMES, E., 1969. *Moisture and moisture transfer in porous materials*. BI-69-96. Delf, Holland: Institute TNO for Building Materials and Building Structures.

VYHLIDAL, T. and BROSTRÖM, T., 2014. Recomendaciones de mitigación de mejores prácticas en el microclima para la conservación preventiva y el mantenimiento. Proyecto de clima para la cultura, 2014.

VYHLIDAL, T. and BROSTRÖM, T., 2012. New algorithms for optimal control of the relative humidity and temperature using equal-sorption humidity control as well as approaches including combinations of active and passive climatisation, *Deliverable report D7.1 of the Climate for Culture project 2012*.

WANG, H. & ZHAI, Z., 2016. Advances in building simulation and computational techniques: A review between 1987 and 2014. *Energy and Buildings*, Issue 128, pp. 319-335.

WANG, H. and ZHAI, Z., 2012. *Analyzing grid independency and numerical viscosity of computational fluid dynamics for indoor environment applications*.

WANG, L. and CHEN, Q., 2007. Theoretical and numerical studies of coupling multizone and CFD models for building air distribution simulations. *Indoor air*, 17(5), pp. 348-361.

WANG, L. and CHEN, Q., 2007. Validation of a Coupled Multizone-CFD Program for Building Airflow and Contaminant Transport Simulations. *HVAC&R Research*, 13(2), pp. 267-281.

WILSON, M.A., HOFF, W.D. and HALL, C., 1995. *Water movement in porous building materials—XIII. Absorption into a two-layer composite*.

WILSON, M.A., HOFF, W.D. and HALL, C., 1995. *Water movement in porous building materials—XIV. Absorption into a two-layer composite (SA < SB)*.

WOLOSZYN, M. and RODE, C., 2008. *IEA ANNEX41 whole building heat, air and moisture response – subtask1: modelling principles and common exercises*.

WOLOSZYN, M. and RODE, C., 2008. Tools for performance simulation of Heat, Air and Moisture conditions of whole buildings. *Building Simulation*, (1), pp. 5-24.

WOUBISHET ZEWDU TAFSESE, 2012. Improving Accuracy with Minimal Computational Effort through Coupled Building Envelope and CFD Model, *Proceedings of eSim 2012: The Canadian Conference on Building Simulation*, May, 1-4 2012, pp. 48-60.

YOUNG, M.E., URQUHART, D.C.M. and LAING, R.A., 2003. *Maintenance and repair issues for stone cleaned sandstone and granite building façades*.

YUTAKA, G., GHAZI WAKILI, K., OSTERMEYER, Y., SASIC KALAGASIDIS, A. and WALLBAUM, H., 2016. Hygrothermal performance of a vapor-open envelope for subtropical climate, field test and model validation. *Building and Environment*, 110, pp. 55-64.

ZARZO, M., FERNÁNDEZ-NAVAJAS, A. & GARCIA-DIEGO, F., 2011. Long-Term Monitoring of Fresco Paintings in the Cathedral of Valencia (Spain) Through Humidity and Temperature Sensors in Various Locations for Preventive Conservation. *Sensors*, 11(9), pp. 8685-8710.

ZHAI, Z.J., ZHANG, Z., ZHANG, W. and CHEN, Q.Y., 2007. Evaluation of Various Turbulence Models in Predicting Airflow and Turbulence in Enclosed Environments by CFD: Part 1—Summary of Prevalent Turbulence Models. *HVAC&R Research*, 13(6), pp. 853-870.

ZHANG, H., YOSHINO, H., IWAMAE, A. and HASEGAWA, K., 2015. *Investigating simultaneous transport of heat and moisture in hygroscopic materials by a semi-conjugate CFD-coupled approach*.

ZHANG, L., ZHANG, R., ZHANG, Y., HONG, T., MENG, Q. and FENG, Y., 2017. *The impact of evaporation from porous tile on roof thermal performance: A case study of Guangzhou's climatic conditions*.

ZHANG, Z., ZHANG, W., ZHAI, Z.J. and CHEN, Q.Y., 2007. Evaluation of Various Turbulence Models in Predicting Airflow and Turbulence in Enclosed Environments by CFD: Part 2—Comparison with Experimental Data from Literature. *HVAC&R Research*, 13(6), pp. 871-886.

ZHANG, Z., THIERY, M. and BAROGHEL-BOUNY, V., 2015. *Numerical modelling of moisture transfers with hysteresis within cementitious materials: Verification and investigation of the effects of repeated wetting-drying boundary conditions*.

ZHUANG, Y.J., YU, H.Z. and ZHU, Q.Y., 2016. *Experimental and numerical investigations on the flow around and through the fractal soft rocks with water vapor absorption*.

ZOTARELLI, L., DUKES, M.D. and MORGAN, K.T., 2013. Interpretation of soil moisture content to determine soil field capacity and avoid over-irrigating. *U.S.Department of Agricultura, UF/IFAS Extension Service, University of Florida*, .

ZOTARELLI, L., DUKES, M.D., ROMERO, C.C., MIGLIACCIO, K.W. and MORGAN, K.T., *Step by step calculation of the Penman-Monteith evapotranspiration (FAO-56 Method)*.

SITIOS WEB

- Energy Plus [consulta 20/10/2016].

Disponible en www.energyplus.net

- Design Builder [consulta 20/10/2016]

Disponible en: www.designbuilder.co.uk

- ANSYS Fluent [consulta 12/11/2015]

Disponible en <https://www.ansys.com/es-es/products/fluids/ansys-fluent>

- COMSOL Multiphysics [consulta 12/11/2015]

Disponible en: <https://www.comsol.com/>

- Manual de referencias de cálculo de EnergyPlus [consulta 05/10/2016]

Disponible en: www.energyplus.net

- Comisión Europea [consulta 16/11/2015]

Disponible en: https://cordis.europa.eu/project/rcn/61586_en.html

- Fraunhofer [consulta 03/05/2014]

Disponible en: <https://www.fraunhofer.de/en.html>

11. SÍMBOLOS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ORGANISMOS

AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and A-C Engineers
CAI	Centro de Asistencia a la Investigación, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid
ETSAM	Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid
IEA	International Energy Agency
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design (US Green Building Council)
SAI	Servicio de Preparación de Rocas y Materiales Duros (SAI) Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad de Zaragoza
UPM	Universidad Politécnica de Madrid

SIGLAS O TÉRMINOS CIENTÍFICOS

CFD	Computational Fluid Dynamics
DB	Design Builder
DES	Direct Numerical Simulation
EP	Energy Plus
GUI	Graphical User Interface
HAM	Heat Air and Moisture
MDT	Minor Damage Testing
MEB	Microscopía Óptica de Barrido, o SEM, en sus siglas en inglés
msn	Metros sobre el nivel del mar
NDT	Non Destructive Testing
SEM	Scanning Electron Microscopy
SIG	Sistema de Información Georreferenciada ¹
POMA	Pressurized zonal model with air-diffuser
RD	Rising Damp (Teoría del ascenso capilar)
SF	Sharp Front (Frente húmedo)
PE	Potencial de evaporación
RANS	Reynolds-Averaged Navier Stokes
LES	Large Eddy Simulation

PARA LA DENOMINACIÓN DE LA MONITORIZACIÓN Y LA SIMULACIÓN

A	Ambiente interior
E	Ambiente exterior
P	Sobre pared
SP	Sobre el encuentro Suelo-pared (muro)
DTnº	Número de data logger (registrador de temperatura y humedad) al que se refiere el texto
DB	Resultado de la simulación con Design Builder
SMnº	Indica el número de simulación (SM) realizada para el edificio que se está tratando

¹ También conocidos en sus siglas en inglés GIS (Georeferenced Information System)

PARA LA DENOMINACIÓN DE LOS ENSAYOS

<i>EH1</i>	<i>Absorción capilar</i>
<i>EH2</i>	<i>Densidad aparente, porosidad abierta, densidad real (picnómetro)</i>
<i>EH3</i>	<i>Absorción bajo presión (inmersión)</i>
<i>EH4</i>	<i>Sorción higroscópica</i>
<i>EP1</i>	<i>Difracción de Rayos X (DRX)</i>
<i>EP2</i>	<i>Microscopía electrónica de polarización (MOP)</i>

SIGLAS FÓRMULAS (ALFABETO LATINO)

<i>A</i>	Área	mm ² ⁽²⁾
<i>A_e</i>	Área de entrada de aire	m ²
<i>A_b</i>	Coefficiente de absorción de agua a presión atmosférica	%
<i>AC</i>	Coefficiente de absorción de agua por capilaridad	kg/(m ² .s ^{1/2})
<i>b</i>	Espesor	cm
<i>C</i>	Cantidad de agua retenida en el muro	L/m
<i>C_c</i>	Coefficiente de correlación	-
<i>C_p</i>	Calor específico	J/kg.K
<i>C_i</i>	Coefficiente del flujo de la masa de aire	m ³
<i>c^w</i>	Calor específico del agua =4,180 J/kg°C a 20 °C	
<i>D</i>	Déficit de presión de vapor	kPa
<i>D^w</i>	Coefficiente de transporte líquido / Difusión de la humedad en el material	m ² /s
<i>E_{ee}</i>	Caudal de evaporación estable (en equilibrio dinámico)	
<i>E_{out}</i>	Flujo de evaporación del agua del muro hacia el ambiente interior	L/m.d
<i>e</i>	Tasa de evaporación por unidad de superficie (potencial de evaporación)	mm/min
<i>E</i>	Caudal de evaporación	
<i>F_p</i>	Factor producción	
<i>F_{ee}</i>	Flujo estable (en equilibrio dinámico)	L/m.d
<i>f</i>	Porosidad total	%
<i>f₀</i>	Porosidad abierta	%
<i>f_v</i>	Función del viento	
<i>g</i>	Aceleración debida a la gravedad	m/s ²
<i>h</i>	Altura	m
<i>h_{ee}</i>	Altura de equilibrio del frente húmedo (en equilibrio dinámico)	m
<i>HR</i>	Humedad relativa	%
<i>HR_{ext}</i>	Humedad relativa exterior	%
<i>HR_{int}</i>	Humedad relativa interior	%
<i>i</i>	Volumen de agua absorbida acumulada	[m ³ /m ²]
<i>Q</i>	Caudal de agua	m ³ /s
<i>Q_i</i>	Cantidad de agua absorbida por unidad de superficie del flujo de entrada	kg/(m ²)
<i>Q_a</i>	Caudal de aire	
<i>k^w</i>	Conductividad térmica en función de la humedad	W/mC
<i>k^T</i>	Conductividad térmica en función de la temperatura	

² Las unidades de área dependerán de la fórmula y lo que se esté calculando. Las unidades serán mm² cuando se trata de cálculos con muestras o probetas de laboratorio

L	Longitud	m
M	Peso molecular del agua pura; 18,01528 g/mol	
M'	Peso molecular de la sal	g/mol
m	masa del agua pura	g
m'	masa de la sal depositada	g
m_2	Masa del picnómetro con agua	g
m_d	Peso seco	g
m_e	Masa de la probeta triturada y secada	g
m_h	Masa de la probeta sumergida	g
m_i	Tasa de masa de aire en el enlace	kg/s
m_l	Masa del picnómetro con agua y probeta triturada	g
m_s	Peso saturado	g
$m_{s,i}$	Masa de la probeta saturada del mortero endurecido sumergido en agua	kg
$m_{s,sat}$	Masa de la probeta de mortero endurecido saturada	kg
MG	Módulo granulométrico	-
n	Número de horas de sol	
P	Longitud del perímetro interior de muros	m
P_i, P_m	Presiones de entrada y salida	Pa
P_n	Peso natural	g
P_s	Peso saturado	g
P_0	Peso seco	g
P_m	Peso sumergido	g
R	Desortividad	mm/min ^{1/2}
r	Radio del capilar o poro	mm ⁽³⁾
RA_n	Porcentaje retenido acumulado en el tamiz "n"	%
R_a	Radiación solar extraterrestre	MJ.m ⁻² /d
Re	Número de Reynolds	-
R_{nt}	Radiación solar neta	MJ.m ⁻² /d
R_n	Renovaciones de aire necesarias	Renov/d (⁴)
R_s	Radiación solar entrante	MJ.m ⁻² /día
S	Sortividad(⁵)	mm/min ^{1/2}
SI	Coefficiente de forma	-
SI_i	Porcentaje en masa de las partículas no cúbicas de la fracción granulométrica i	%
T	Temperatura	°C
t	tiempo	(⁶)
T_d	Temperatura de rocío	°C
T_e	Temperatura media del exterior	°C
T_{ENT}	Temperatura del aire entrante	°C

³ Puede medirse en μm , depende del autor.

⁴ Las unidades de tiempo del denominador podrán ser días u horas, dependiendo de la fórmula de cálculo. Se especifican para cada caso.

⁵ Algunos autores lo denominan coeficiente de succión capilar. En la norma UNE-EN 1925:1999 figura como el coeficiente de penetración de agua por capilaridad (B), que se puede calcular a partir del ensayo normalizado de absorción capilar de esta misma norma.

⁶ Las unidades del tiempo (t) dependerán de la fórmula de cálculo que se esté empleando. Se especifican las unidades para cada caso.

T_{med}	Temperatura media del ambiente interior	°C
T_{SINT}	Temperatura superficial interior	°C
T_{SEXT}	Temperatura superficial exterior	°C
T_{SV}	Temperatura superficial de ventanas	°C
U	Tasa de absorción a través de la cara de acceso del agua	
u	Contenido de humedad en masa por masa de una probeta o muestra ⁷	kg/kg
v	Velocidad del viento	m/s
V	Velocidad del agua	m/s
V_g	Porcentaje de masa de la fracción granulométrica i de la muestra ensayada	%
V_i, V_m	Velocidades del flujo de aire de entrada y salida	m/s
V_R	Velocidad aparente del líquido	m/s
V_s	Volumen de la probeta de mortero endurecido	m ³
V_l	Volumen del líquido	m ³
V_{an}	Volumen de aire necesario	m ³
V_b	Volumen aparente (de una probeta o muestra de material)	mm
V_{ed}	Volumen interior del edificio	m ³
w	Contenido de humedad del material	Kg/m ³
W	Contenido en humedad ⁸ / Grado de humedad	g/kg
W_{ext}	Grado de humedad exterior	g/kg
W_{int}	Grado de humedad interior	g/kg
Z	Potencial gravitacional	Pa
z_i, z_m	Altura a la que se encuentran la entrada y salida del aire	m

SIGLAS FÓRMULAS (ALFABETO GRIEGO)

α	Albedo	
β	Ángulo de contacto	°
Υ	Coeficiente psicrométrico	[kPa/°C]
γ	Tensión superficial	N/m
ΔP	Diferencia total de presión entre los nodos n y m	Pa
ΔP_i	Diferencia de presión a lo largo del enlace	Pa
δ	Coeficiente de difusión de vapor	kg/msPa
δ_p	Permeabilidad al vapor de agua	kg/(m.s.Pa)
θ_w	Contenido de humedad del material	-
ι	Días julianos	
κ	Coeficiente de permeabilidad (Ley de Darcy)	-
Λ	Calor latente de evaporación	MJ/kg
λ	Conductividad térmica	W/m.K
μ	Viscosidad del aire	Pa.s
ρ	Densidad	kg/m ³
ρ_a	Densidad del aire	g/mm ³
ρ_b	Densidad aparente	kg/m ³

⁷ Notación según la Norma UNE-EN 12571:2013 “Prestaciones higrotérmicas de los productos y materiales para edificación. Determinación de las propiedades de sorción higroscópica”

⁸ En la mayoría de los artículos científicos la denominación que encontramos es “contenido en humedad”, así lo expresa también el manual de cálculo de EnergyPlus. En otros artículos encontramos la denominación de “grado de humedad” (García-Morales, Lopez-Gonzalez et al. 2012).

ρ_r	Densidad real de la probeta	kg/m ³
ρ_{rh}	Densidad del agua	kg/m ³
σ	Potencial hidráulico	Pa
ν	Número de iones en los cuales una molécula de sal se disocia en agua	
φ	Función del potencial termodinámico	
ϕ	Transferencia de humedad en el material	-
χ	Contenido de humedad en volumen por volumen	m ³ / m ³
Ψ	Potencial hídrico no gravitacional o potencial mátrico	Pa

OPERADORES MATEMÁTICOS

∂	Operador de derivadas parciales
Δ	Incremento
∇	Gradiente