Cámaras de aireación como sistema de control de la humedad de capilaridad en edificios históricos. Criterios de diseño

Air cavities for the control of rising damp in historical buildings. Design criteria

MaríaTeresa Gil-Muñoz (*), Félix Lasheras-Merino (*)

RESUMEN

La cámara pasiva de aireación o de ventilación es un tratamiento posible frente a las lesiones causadas por humedad capilar en edificios construidos en suelos no saturados. Un diagnóstico preciso sobre el estado actual del cimiento o de los muros determinará la idoneidad de esta solución. El uso de unos criterios acertados para su diseño y dimensionado es necesario para tener un buen resultado, que ha de ir acompañado de un seguimiento y mantenimiento del sistema. Ante la carencia de unas pautas que definan estas recomendaciones, se expone la presente investigación como aproximación a la relación de aspectos y cuestiones a tener en cuenta en el diseño de este tipo de cámaras. Previamente se ha analizado en campo el funcionamiento de los distintos tipos de cámaras identificadas, además de los aspectos formales y constructivos que los caracterizan, así como sus condiciones de contorno y particulares, que sirven de base para estructurar los criterios de diseño de este tratamiento.

Palabras clave: Cámara de aireación; variables de diseño; humedad de capilaridad; suelo no saturado; patrimonio arquitectónico.

ABSTRACT

Passive air or ventilation cavities constitute a potential treatment against the pathology caused by capillary rising damp in buildings built on unsaturated soils. An accurate diagnosis regarding the damage to the foundation or walls will determine the suitability of this solution. In order to obtain good results, it is necessary to use correct criteria for its design and dimensioning, followed by monitoring and maintenance of the system. Given the lack of guidelines to define these recommendations, this research presents an approximation to the list of aspects and issues to be taken into account in the design of this type of cavities. There was a previous field analysis of the operation of the different types of cavities identified, as well as their formal and constructive features, and their boundary and particular conditions, which serves as the basis for structuring the design criteria of this treatment.

Keywords: Air cavities; design variables; rising damp; unsaturated soil.

(*) Universidad Politécnica de Madrid (UPM) - Escuela Técnica Superior de Arquitectura (ETSAM) - Grupo de Investigación Análisis e Intervención en el Patrimonio Arquitectónico (AIPA)

Persona de contacto: m.teresa.gil@gmail.com (M.T. Gil-Muñoz)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3674-2711> (M.T. Gil-Muñoz); <https://orcid.org/0000-0002-1252-5360> (F. Lasheras-Merino)

Cómo citar este artículo/Citation: MaríaTeresa Gil-Muñoz, Félix Lasheras-Merino (2021). Cámaras de aireación como sistema de control de la humedad de capilaridad en edificios históricos. Criterios de diseño. *Informes de la Construcción*, 73(563): e404. <https://doi.org/10.3989/ic.78292>

Copyright: © 2021 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 09/03/2020
Aceptado/Accepted: 07/12/2020
Publicado on-line/Published on-line: 03/09/2021

1. INTRODUCCIÓN

El presente artículo se enmarca en una investigación sobre la caracterización y los criterios de diseño de las cámaras de aire para el control de la humedad de capilaridad (1), siendo continuación del artículo publicado en el volumen 69(548): e233 de *Informes de la Construcción* (2), que aborda el análisis del funcionamiento de este sistema a nivel semi-cuantitativo.

En general, no hay unas pautas para diseñar este tipo de cámaras de aire, sino que es el criterio del proyectista el que se impone, apoyado en su experiencia y buena práctica de la construcción. Hasta ahora, la constatación del funcionamiento de algunos tipos de cámaras solo estaba avalada por el método de prueba y error. Por ejemplo, es el caso de San Baudelio en Casillas de Berlanga (Soria) (3) y el de San Salvador en Toro (Zamora) (4).

En este estudio se exponen los aspectos fundamentales a considerar para adoptar esta solución y se propone un procedimiento para su diseño. Dichos aspectos se refieren al contexto geográfico, hidrogeológico, ambiental y constructivo del terreno y del edificio, a la descripción de las lesiones del cimiento y del muro, y al estudio del origen del agua. Son cuestiones previas al proceso de diseño con las que particularizar los mecanismos de funcionamiento de cada cámara. Este procedimiento parte de un diagnóstico para detallar las condiciones constructivas que ha de incorporar la cámara, según los aportes de agua, definiendo los parámetros físicos del aire en la misma (condiciones de humedad y velocidad del aire), unas dimensiones mínimas de cámara y unos huecos o elementos que posibiliten el flujo de aire junto al cimiento o la base del muro y la estabilización de su proceso de deterioro.

Esta investigación es fruto del análisis de distintos casos en campo en la zona centro de la Península Ibérica y ha permitido determinar las variables básicas relevantes para el diseño de las cámaras de aireación o de ventilación como tratamiento de la humedad capilar del subsuelo.

Se diferencian los términos de aireación y de ventilación. Ambos conceptos conllevan un intercambio entre dos masas de aire. En el primer caso la difusión del vapor se produce por diferencia de presión (el flujo de aire es prácticamente imperceptible), y en el segundo el movimiento del aire está inducido de manera pasiva por tiro térmico o eólico (el flujo de aire es mayor, del orden de 0,10m/s a 0,25m/s).

2. ESTADO DEL ARTE

Diferentes autores detallan algunas cuestiones referidas a ciertos tipos de cámaras: López Collado (5), De la Hoz Martínez (6), Jurado Jiménez (7), González Fraile (8) o Herrera Cardenete et al. (9). Fundamentalmente tratan aspectos formales y ocasionalmente hacen descripciones funcionales no contrastadas experimentalmente en campo.

En los proyectos y memorias finales de obra ocurre algo parecido: se detallan a nivel constructivo los sistemas propuestos o ejecutados y excepcionalmente se describe la función supuesta de la cámara o se muestra el cálculo que justifica el sistema adoptado, como es el caso del colegio convento de Trinitarios Descalzos en Alcalá de Henares en Madrid (10).

Aunque hay alguna investigación sobre el funcionamiento de sistemas activos tanto en laboratorio como en campo (11), y modelos numéricos (12) o simulaciones computacionales de casos reales (13), no existen estudios en campo que validen las soluciones definidas en proyecto para este tipo de cámaras pasivas adosadas al cimiento.

A nivel experimental, en laboratorio se tienen los estudios de Torres y Freitas (14), que utilizan sondas de humedad y de temperatura a distinta altura y profundidad del muro, demostrando que el contenido de humedad del muro se ve reducido entre un 15 y un 30% en función de su espesor (la humedad decrece cuanto mayor es el ancho del muro). También los trabajos de Pazderka et al. (15), quienes utilizan sondas de resistividad eléctrica y concluyen que con un cimiento saturado y un flujo de 0,05m/s el contenido de humedad promedio del muro se iguala al contenido de humedad del laboratorio (inferior al 43% que en el muro sin conducto).

3. OBJETIVOS

A diferencia de los trabajos citados, el objetivo de este artículo es definir unos criterios a atender en el diseño de las cámaras pasivas de aireación o de ventilación adosadas al cimiento de los edificios históricos, una vez que a través del diagnóstico se aprecie este sistema como solución al problema del muro sometido a humedad capilar en suelo no saturado. Estos criterios se concretan en unas condiciones de contorno y particulares de la cámara, así como en una propuesta de procedimiento para su diseño. Como resultados previos, se exponen las condiciones de diseño (ineficaces y eficaces) que permiten estructurar dicho alcance.

4. METODOLOGÍA

La metodología seguida, desarrollada ex profeso para el estudio de las cámaras pasivas de aireación, es la siguiente:

1. Clasificación tipológica de los sistemas de aireación y de ventilación para cimientos.
2. Estudio de los aspectos formales y constructivos de los distintos tipos de cámaras de aire en la península.
3. Análisis del funcionamiento en campo de los casos más representativos.
4. Definición de las variables de funcionamiento.

La clasificación tipológica de los sistemas de aireación, a partir de 120 casos analizados se desglosa a nivel formal y a nivel funcional. El primer nivel depende de los elementos constructivos que lo caracterizan (pavimento, solera, forjado, cimiento o zócalo). El segundo nivel obedece a las prestaciones técnicas a las que dan servicio (aireación/ventilación y secado del muro o cimiento, drenaje del terreno, y evacuación de pluviales de cubierta o del entorno inmediato). Una cámara de este tipo puede servir a una sola prestación o a varias, de manera integral o por separado (1). De su estudio se deduce que no todos los elementos constructivos o prestaciones técnicas identificados en cada caso son los más adecuados frente al problema que plantea la humedad capilar en los edificios intervenidos.

Para caracterizar el funcionamiento de los distintos tipos de cámara se han monitorizado en campo 12 de las 120 cámaras analizadas. Se han seleccionado por sus prestaciones técnicas, la información de proyecto existente, los recursos

técnicos y humanos disponibles y los permisos de la propiedad para su estudio. Se han medido diferentes parámetros físicos del aire interior y del entorno: contenido de humedad, presión barométrica, velocidad y dirección del aire y tasa de evaporación en el interior de la cámara.

Los instrumentos utilizados son: varios termohigrómetros (con precisión de hasta $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ y $\pm 2\%$ de humedad relativa), un barómetro (cuya precisión es de $\pm 2,5$ mbar), un anemómetro de hilo caliente (con una precisión de $0,01\text{m/s}$), una varilla de humo y dos evaporímetros de Piché. Los tres primeros son registradores. Con los termohigrómetros se han medido las condiciones del aire en el entorno de la cámara, a lo largo de su recorrido (en los extremos y en la mitad de cada tramo, siempre en el centro geométrico de la sección) y en la superficie del cimiento a la cámara (en la mitad de cada tramo, a la misma altura que los anteriores) así como en su cara contraria (si puede ser a la misma altura o en el encuentro del suelo pared). Con el barómetro, el anemómetro, la varilla de humo y el evaporímetro se han medido las condiciones de cada tramo de la cámara a mitad de su recorrido.

El procesado de los datos se ha hecho con Microsoft Excel, mediante el uso de valores estadísticos y gráficas de curva, de columnas o “*de caja y bigote*” (Tukey). El análisis de estos datos se ha realizado por comparación entre ambientes y superficies, para concretar el régimen de evaporación del cimiento y de cada tramo de la cámara, con respecto del clima local o del ambiente interior del edificio. Se ha establecido la incidencia del clima (temperatura, humedad y velocidad del aire) externo e interno en la evaporación de la cámara y del cimiento, así como la influencia de la superficie evaporante, del volumen de la cámara y de sus huecos (tamaño y orientación) o elementos (dimensiones y altura) de respiración.

Las variables que determinan el funcionamiento de la cámara se apoyan en el conocimiento de las condiciones de contorno externas a la cámara (referidas a las condiciones ambientales y a las condiciones constructivas del terrero y del edificio), y de las condiciones particulares específicas de la cámara (referidas a las acciones higrotérmicas y a las condiciones constructivas de la cámara) (16).

5. RESULTADOS

El estudio experimental en campo ha permitido comprobar la eficacia de las condiciones que se consideran de interés para el diseño de las cámaras de aireación o de ventilación. Estas se desglosan en criterios o condiciones de diseño ineficaces (inútiles o perjudiciales) y eficaces (válidas), acompañados de los casos más representativos de los 120 estudiados que ejemplifican lo expuesto.

5.1. Condiciones de diseño no eficaces

En cuanto a las **condiciones constructivas** de la cámara, hemos constatado la ineficacia y malos resultados de las siguientes soluciones:

- a. Utilizar muretes adosados al cimiento que impidan su transpiración.
Es el caso, entre otros, de la cámara oeste de la iglesia parroquial de Pinarejos (Segovia), conformada por dos muretes de medio pie de ladrillo que sirven de apoyo al techo de la cámara. En estos casos queda un pequeño hueco en-

tre el murete y el cimiento que se colmata fácilmente con escombros o mortero durante su ejecución (Figura 1a) que hemos verificado que reduce significativamente la transpiración del cimiento

- b. Impermeabilizar el murete de contención que delimita la cámara por su borde exterior y omitir su drenaje.

Por ejemplo, es el caso del muro oeste la iglesia del Santo Sepulcro y de los muros norte y oeste del palacio de los Castrillo, ambos en Toro (Zamora), donde las cámaras se ejecutaron para aislar el muro o cimiento del edificio del terreno contiguo sin incorporar un dren en el trasdós del murete.

Además, frente a una filtración, el suelo de la cámara no tiene pendiente y no se posibilita la salida del agua. En estos casos el agua percolada y las roturas o fugas de redes urbanas de abastecimiento o saneamiento pueden provocar el embalse de agua en el trasdós de la cámara y la filtración por su base.

- c. Conectar la cámara a la red de saneamiento sin la cota adecuada o no dotar a su desagüe de pendiente suficiente.

Esto se hizo, por ejemplo, en la iglesia parroquial de Villamor de los Escuderos (Zamora), el desbordamiento del arroyo en octubre de 2007 dio lugar a la inundación de la cámara perimetral, quedando cubierta de barro y paja, que no sucedió en el tramo norte que está más elevado (Figura 1b).

Debido a las **condiciones higrotérmicas** en las cámaras, tampoco es eficaz:

- d. La disposición de insuficientes huecos de ventilación, lo que lleva a que el ambiente de la cámara se sature y se condense en los paramentos del cimiento o de la cámara. Esto lo hemos observado en la iglesia parroquial de Vall de Almonacid (Castellón) y en la de Santiago de los Caballeros en Medina de Rioseco, en Valladolid (Figura 1c).

- e. Admitir aportes de escorrentía o pluviales en la cámara sin prever su evacuación.

Lo hemos advertido en la cámara del atrio de la catedral de Zamora, donde el agua filtrada queda retenida en el suelo de la cámara. No obstante, en algunos casos hemos comprobado que con bajos caudales de agua y altos de aire, la aireación o ventilación de la cámara puede ser suficiente para obviar estos aportes.

Y respecto del **mantenimiento** de la cámara:

- f. No dotar a las cámaras de dimensiones mínimas para el paso de una persona o de registros que posibiliten su limpieza y mantenimiento.

La iglesia de San Lorenzo de Toro (Zamora) no tiene registros para el mantenimiento de la cámara, al contrario que la iglesia de Santa Cruz la Real en Segovia. En ambos casos la tierra y la suciedad arrastrada por el agua u otros sucesos accidentales se acumulan con el tiempo hasta obstruir la evacuación del agua, lo que tampoco se resuelve por el desconocimiento de las condiciones de la cámara o incluso dejadez.

- g. No prever la accesibilidad ni programar el mantenimiento de los elementos mecánicos de ventilación y de bombeo, si se utilizan.

Ejemplos de cámaras monitorizadas con sistemas mecánicos de impulsión y extracción de aire son el claustro principal del monasterio de El Pualar en Rascafría (Madrid) y la iglesia del convento de Santo Tomás en Ávila, respectivamente.

Figura 1. **a)** Hastial oeste de la iglesia parroquial de Pinarejos (Segovia), murete adosado al muro de cimentación del edificio (17); **b)** Tramo sur de la iglesia parroquial de Villamor de los Escuderos (Zamora), malla de aireación tupida de barro y paja y canal de pluviales colmatado de tierra, 2016-06-14; **c)** Iglesia de Santiago de los Caballeros en Medina de Rioseco (Valladolid), condensación en el techo, 2003, fotografía cortesía de J. Represa (TRYCSA).

5.2. Condiciones de diseño eficaces

Hemos encontrado válidas soluciones como las indicadas a continuación, toda ellas adaptadas a las condiciones constructivas particulares del terreno y del edificio en cada caso:

- Consolidar previamente a la construcción de la cámara las capacidades portantes del suelo, del cimiento y del muro, para evitar su desmoronamiento.
Por ejemplo, y a tal fin, en la catedral de Sigüenza (Guadalajara) se sustituyó el colector urbano de la fachada sur porque sus pérdidas amenazaban la estabilidad del entorno de la cámara proyectada.
- Secar o estabilizar el contenido de humedad en el muro cuando la cota del suelo exterior es mayor que la interior, lo que suele suceder en edificaciones contra ladera o en calles o plazas recrecidas.
Esto se hizo, por ejemplo, en la cabecera de la iglesia de los Santos Justo y Pastor en Segovia; y en el muro norte de la iglesia de Santiago en Albarracín (Teruel), donde se ejecutó una cava entre los años 40-60 del siglo pasado por la Dirección General de Regiones Devastadas (Figura 2a).

Además, la adaptación a las condiciones ambientales del entorno puede requerir soluciones como las siguientes:

- Dimensionar la cámara con amplitud suficiente para evitar la saturación del aire. El tamaño de la superficie evaporante (cimiento y suelo en su caso) determina el volumen, la superficie de respiración (según su exposición a la radiación solar y a los vientos dominantes), y la presencia de elementos que potencien el flujo de aire.
Esto no se hizo en la cámara perimetral de la iglesia de San Lorenzo en Toro (Zamora); sus reducidas dimensiones y sus pequeñas rendijas de aireación hacen que esté permanentemente saturada.
- Dimensionar con generosidad los huecos o elementos de aireación y disponerlos adecuadamente a lo largo del reco-

rido de la cámara para facilitar la circulación del aire, es decir frente al viento los huecos de entrada y a barlovento los huecos de salida, y a distintas alturas para aprovechar las diferencias de temperatura y de presión de vapor (temperatura y presión de vapor se suponen mayores en el interior de la cámara respecto del exterior).

Así y por ejemplo, hemos comprobado que en la cámara del atrio de la catedral de Zamora el flujo del aire circula desde el tramo con orientación norte (más frío) al tramo con orientación este (más cálido).

- Colocar elementos mecánicos de extracción (en los huecos de salida) o de impulsión del aire (en los huecos de entrada) para aumentar el movimiento del aire y reducir la concentración de vapor. No obstante, la primera solución es mejor que la segunda porque la cámara en depresión puede introducir más aire exterior y más uniformemente a través de los huecos de entrada que si está en sobrepresión.

En cuanto a las **condiciones higrotérmicas** en la cámara hemos encontrado que son eficaces las soluciones siguientes:

- Diferenciar el funcionamiento de la cámara según su posición con el nivel freático. La cámara sólo es funcional en suelo no saturado o, a lo sumo, en la franja de fluctuación del freático, en cuyo caso el suelo de la cámara ha de ser permeable. Dejar la cara exterior del cimiento libre, en contacto directo con la cámara, permite su secado.
Un ejemplo de edificio construido sobre un acuífero superficial muy somero es la iglesia parroquial de Pinarejos (Segovia), aunque en la actualidad el acuífero está mermado por la explotación y su incidencia en el cimiento es menor.
- Evacuar y dimensionar la evacuación de aguas de escorrentía y de pluviales recogidas en la cámara si el diseño prevé estos aportes, salvo que estos aportes sean mínimos y se evaporen mediante la aireación o ventilación.
En las cámaras de drenaje-aireación, como la de la iglesia de Santa Cruz la Real en Segovia, los aportes de escorren-

tía subsuperficial del terreno son constantes a lo largo de todo el año, lo que reduce significativamente la capacidad de secado de la cámara. Sin embargo, en cámaras con pequeños aportes de pluviales, aunque no puedan evacuarlos en periodo de lluvias, pueden hacerlo en periodo seco si están bien concebidas, como ocurre en la cámara del atrio de la catedral de Zamora.

- h. Dar pendiente al solado o techo de la cámara desde el muro del edificio hacia el exterior para alejar en su caso la escorrentía superficial.

Es una solución ineludible en edificios contra ladera o en pendiente, como es la fachada norte de la iglesia de San Miguel de Lillo en Oviedo.

- i. Dar estanquidad al encuentro del techo de la cámara con el muro del edificio (cuidando el diseño y ejecución) evitando la filtración de agua (escorrentía superficial o pluviales). Este aspecto está relacionado con el vuelo del alero de cubierta y con la altura del edificio si las aguas pluviales caen libremente, y con la dirección de los vientos dominantes en periodo de lluvia.

Sirve de ejemplo el hastial oeste de la iglesia parroquial de Pinarejos (Segovia), afectado por la humedad al quedar expuesto a las precipitaciones y vientos dominantes con dirección oeste.

- j. Conducir el agua desde la cubierta a través de canalones y bajantes, pesebrones y gárgolas, incluso cadenas. Si la caída es libre se ha de tener en cuenta el vuelo del alero, la altura del edificio y los vientos dominantes en periodos de precipitación para minimizar el salpique en el muro o zócalo. También se ha de atender a la función de los botaguas a distintas alturas del muro, al estado de conservación del zócalo y a la pendiente del suelo (hacia el exterior), o a la presencia de elementos que desvíen la trayectoria del agua al tocar el suelo.

Ejemplos de edificios en los que se ha ampliado el vuelo de los aleros de cubierta para evitar la salpicadura en el zócalo del muro son el atrio de la iglesia de San Juan de los Caballeros en Segovia (Figura 2b), la capilla del Doncel y el patio del claustro en la catedral de Sigüenza o el claustro principal del monasterio de El Paular en Rascafría (Madrid).

En el entorno de la iglesia de Santa María Magdalena en Zamora hay adoquines salientes, inclinados hacia la calle, para desviar la salpicadura de cubierta (Figura 2c).

Y respecto del **mantenimiento**:

- k. Dotar a las cámaras de dimensiones mínimas y registros suficientes para su inspección y conservación.

Lamentablemente, hemos detectado muchas cámaras de reducidas dimensiones y sin registros para su inspección y mantenimiento. Asimismo, la limpieza y la revisión de los elementos mecánicos redundan en asegurar el funcionamiento previsto.

En definitiva, las cámaras son más eficaces cuanto más se limitan los aportes de agua y cuanto más se potencia el flujo de aire. La tasa de evaporación en la cámara queda supeditada al intercambio del aire interior con el del exterior, de forma que éste desplace al primero.

En los casos estudiados, mayoritariamente en la zona centro de la península, la velocidad promedio del aire en la cámara depende de su mecanismo de funcionamiento: de 0,25m/s si funcionan por tiro eólico (cámaras con elementos verticales como en las iglesias de San Salvador en Toro y la parroquial de Pinarejos), de 0,10m/s en cámaras que funcionan por tiro térmico (como en la catedral de Zamora), y de 0,01m/s en cámaras que funcionan por tiro higrúico, es decir por diferencias de presión de vapor (como en el palacio de los Castrillo en Toro). En los casos más eficaces, la evaporación promedio en la cámara varía entre los 40mm/día (iglesia de San Salvador en Toro) en el periodo más favorable, 25mm/día (catedral de Zamora y palacio de los Castrillo en Toro), y los 15mm/día en el periodo menos propicio, con precipitación pero sin aportes de agua. Esto se traduce en una tasa de evaporación promedio de la cámara y del cimientto en periodo seco de 3,6g/kg y de 0-1,5g/kg respectivamente.

6. DISCUSIÓN

Los casos analizados muestran que las condiciones higrotérmicas y constructivas de la cámara (condiciones particulares) se han de adecuar a las condiciones del entorno, del terreno y del edificio (condiciones de contorno). Estos parámetros influyen en la eficacia de las cámaras. A continuación se discuten y explican los principales criterios para su diseño.

6.1. Condiciones de contorno

Las acciones y las condiciones ambientales, referidas al clima local y al entorno próximo del edificio, determinan la idoneidad del sistema. Un clima húmedo no favorece el fin principal de la cámara de aireación o de ventilación, que necesita una corriente de aire permanente y suficientemente seco. El trazado urbano y el arbolado próximo, si es el caso, también modifican el microclima cercano a la cámara (temperatura, humedad, dirección e intensidad de los vientos dominantes)

Figura 2. **a)** Iglesia de Santiago en Albarracín (Teruel), cava en muro norte, 2016-05-01; **b)** Iglesia de San Juan de los Caballeros en Segovia, vuelo del alero ampliado, 2012-04-06; **c)** Iglesia de Santa María Magdalena en Zamora, adoquines salientes e inclinados hacia la calle, 2016-04-01.

y por tanto influyen en su funcionamiento según la exposición a este ambiente.

Condiciones constructivas del terreno como su cohesión y su hidrogeología (permeabilidad al agua, umbral de escorrentía del terreno, posición y fluctuación del nivel freático, etc.), son aspectos limitantes o condicionantes del diseño de la cámara. Además, algunas características del terreno como su cohesión, resistencia y permeabilidad pueden quedar afectadas por la ejecución de la cámara, siendo premisas ineludibles en el diseño. El umbral de escorrentía del terreno permite dimensionar la evacuación de los aportes de agua (precipitación, riego, etc.). La posición del nivel freático siempre ha de estar por debajo del cimientado o a lo sumo la cimentación se ha de encontrar en la zona de fluctuación del freático; la cámara de aire sólo tiene sentido en suelo no saturado.

También se ha de considerar la presencia de restos arqueológicos a preservar, ya que condiciona la profundidad de la cámara y puede alterar la circulación del agua o mantenerla embalsada.

Las condiciones constructivas del edificio (como el tipo de cimentación, profundidad y estado de conservación de los materiales) también son factores restrictivos a la hora de valorar la cámara de aireación o de ventilación como sistema de control de la humedad de subsuelo. Un cimientado de material suelto, confinado por el terreno, o una cimentación somera, no admiten la ejecución de una cámara de aire, que descalzaría al edificio. La cota de suelo de la cámara siempre ha de quedar por encima de la base de la cimentación del edificio si la cámara está en contacto con el cimientado; en el caso de estar por debajo de la cota de apoyo del cimientado se ha de separar lo suficiente de este.

Las características constructivas del muro (como el tipo de fábrica), las cargas soportadas y la existencia de elementos de contrarresto de la esbeltez del muro también determinan la solución formal de la cámara como, por ejemplo, su recorrido y contrarrestos suplementarios.

La humedad de subsuelo en el cimientado o en el muro puede estar asociada a manchas de humedad activa, a una tasa de evaporación deficiente o a condensación. Las manchas de humedad activa, con origen en el subsuelo, pueden ser de origen estático o estacional; el diagnóstico ha de discriminar que la degradación del cimientado o base del muro no tenga su origen en otro tipo de humedad, como la escorrentía superficial o la salpicadura de cubierta. Una tasa de evaporación del muro deficiente no merma su contenido de humedad, sin embargo, minimiza la movilización de sales, lo que en principio favorece la preservación de los materiales constitutivos del muro. La condensación de vapor o la condensación higroscópica en la superficie del muro requieren de ventilación o de la retirada de sales en superficie, respectivamente.

6.2. Condiciones particulares

En relación a las acciones higrótérmicas, referidas a la permeabilidad del terreno y a la conducción de los diferentes aportes de agua (nivel freático, escorrentía del terreno, pluviales de cubierta, riego de jardines y fugas de redes urbanas), se han de definir las prestaciones técnicas de la cámara.

Respecto de las condiciones constructivas de la cámara, entendiendo que sus prestaciones principales son la aireación o ventilación y la evaporación del cimientado, se han de estudiar la dimensión, el recorrido y la orientación de los distintos tramos (por influencia de la insolación y los vientos dominantes); la dimensión y la posición (vertical u horizontal) de los huecos de aireación o ventilación; y la inserción o la comunicación con elementos (pasivos o activos) que potencien el movimiento del aire. Si la cámara ha de asumir otras prestaciones como son el drenaje o la evacuación de agua, se han de considerar la permeabilidad de los materiales constitutivos del muro de contención, las vías de entrada de agua, las pendientes para evacuación del agua, las válvulas antirretorno en la conexión al saneamiento y los registros pertinentes para el mantenimiento (o limpieza para evitar obstrucciones).

La caracterización del sistema permite la fundamentación del diseño en cada caso. El procedimiento de diseño propuesto se describe a continuación.

7. CONCLUSIÓN. PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO

Atendiendo a las condiciones de contorno y particulares de cada cámara, en primer lugar, se ha de definir su prestación técnica principal, como es reducir el contenido de humedad del cimientado o base del muro, o más concretamente:

1. Limitar los aportes de agua del suelo.
2. Evaporar el exceso de contenido de humedad del cimientado o base del muro.
3. Estabilizar las condiciones hídricas de los materiales constructivos en valores aceptables, de equilibrio con el ambiente.
4. Impedir la condensación de humedad del ambiente en su superficie.

La prestación técnica exigida a cada cámara se resuelve a través de diversos mecanismos de funcionamiento, como son:

- Intercambio del aire más húmedo de la cámara con el del clima local más seco, por empuje del viento, por diferencia de presión de vapor o por diferencia de temperatura, a partir de huecos o de elementos de la cámara preparados al efecto.
- Succión del aire húmedo de la cámara por efecto Venturi, para renovación del aire por depresión, a través del recorrido de entrada, circulación y salida del aire por elementos verticales en altura.
- Succión mecánica o depresión para extraer el aire húmedo de la cámara. No se consideran los elementos mecánicos de impulsión o sobrepresión en la cámara por su peor rendimiento.

En segundo lugar, se ha de determinar el contenido de humedad admisible en el cimientado o muro. El contenido de humedad mínimo es el propio de los materiales constitutivos en el ambiente normal del clima local (o la humedad de equilibrio de los materiales con el ambiente de referencia de la zona), sin aportes de agua y sin presencia de sales que lo modifiquen.

Según lo anterior, se propone el siguiente procedimiento de diseño de las cámaras de aireación o de ventilación:

1. Confirmar que el muro está afectado por humedad capilar en el momento de estudio o en su historia reciente y las condiciones de ésta. En procesos activos, son de ayuda el método de estudio de los focos de evaporación definido por García Morales et al (18), o las técnicas gravimétrica con toma de muestra y de contenido de humedad volumétrico de medición puntual o en continuo. El primero necesita de un termohigrómetro de medición puntual para conocer el contenido de humedad de la lámina de aire sobre la superficie del muro y de los ambientes contiguos para representar en plano los gradientes de evaporación en el muro. La gravimetría y el contenido de humedad volumétrico son técnicas invasivas, requieren la toma de muestras y el contacto o inserción de las sondas en el espesor del muro respectivamente; la gravimetría (método cuantitativo) consiste en la pesada de muestras con balanzas de precisión y el contenido de humedad volumétrico (método cualitativo) se mide *in situ* mediante sondas FDR (acrónimo inglés, que se traduce como reflectometría en el dominio de la frecuencia). En cualquier caso, los estudios se ciñen a un ciclo anual completo o a los dos periodos estacionales de mayor contraste o, al menos, al periodo estacional con mayor afectación en el muro.
2. Estudiar el origen de la humedad capilar, si es en suelo no saturado o en zona de fluctuación del freático, sin presión hidráulica, y si además existen otros aportes su origen y recorrido del agua. Estos aportes extra son principalmente de escorrentía del terreno, de pluviales de cubierta, de riego, o de redes urbanas. Su procedencia se define con el estudio de la topografía del entorno, la canalización de pluviales en el edificio, la incidencia del riego, o las fugas en el abastecimiento o saneamiento. En el caso de las fugas de redes urbanas se puede analizar el agua (la presencia de cloro se vincula al abastecimiento o la de nitratos con el saneamiento) o utilizar técnicas de inspección para detectar la avería. También se complementa con la caracterización físico-química de las fábricas afectadas y los productos de alteración de las mismas. El análisis de los productos de alteración como sales solubles higroscópicas puede ser en campo por contacto (cualitativo mediante varillas reactivas o semi-cuantitativo mediante conductivímetro, elaborando mapas de sales) o en laboratorio con toma de muestras (cuantitativo).
3. Diseñar las soluciones constructivas que eviten la entrada de agua a la cámara de aire, que normalmente se produce a través de los cerramientos de esta o a través de los huecos de respiración horizontales, y su evacuación para el caso en que el agua logre entrar. En algunos casos estas soluciones no están debidamente pensadas y no se dota de pendiente al suelo de la cámara, que queda sin evacuación posible. Los aportes de escorrentía, pluviales, riego o fugas de redes urbanas se pueden conducir de manera independiente, por ejemplo incorporando drenajes paralelos a la cámara de aire, conectados a pozos de gravas o al saneamiento con válvulas antirretorno, depende de la cantidad de aportación prevista.
4. Definir la velocidad mínima de evaporación del cimiento, igual a la velocidad de succión de agua del terreno en condiciones de equilibrio. En el cálculo se considera el periodo más desfavorable, en función del origen de la humedad y si es estacional.
5. Dimensionar la cámara según la evaporación requerida del cimiento y del suelo. Se considera el recorrido, la orientación de cada tramo (por efecto de la insolación), la localización, el tamaño y la posición de las entradas y sali-

das de aire (horizontal o vertical, influidas por el entorno urbano).

6. Dimensionar y exponer los huecos de la cámara a la entrada y salida de aire, a favor o en contra de los vientos dominantes respectivamente. Procurar la ventilación cruzada (en huecos verticales con orientaciones distintas o enfrentadas), el tiro eólico (mediante la conexión de un extremo de la cámara a un elemento vertical) o el efecto Venturi (mediante una disminución de sección de la cámara al elemento vertical o en el propio elemento vertical).

Limitados los aportes de agua a la cimentación y al muro, la profundidad de la cámara depende en parte de la cota de la base del cimiento (en algunos casos muy somero) o de la presencia de restos arqueológicos. La siguiente condición que determina la dimensión de la cámara es la cantidad de vapor a disipar, procedente del terreno. Según el contenido de humedad a evaporar se pueden adoptar distintos sistemas para conseguir que el cimiento o el muro se encuentren en equilibrio con las condiciones del clima local, si la cámara de aire es el tratamiento idóneo para preservar el cimiento o muro. En cualquier caso, la cámara debe ser registrable y accesible para su inspección y limpieza. En general, una cámara con estas condiciones y con suficientes huecos de ventilación bien dispuestos será eficaz.

8. EPÍLOGO

La investigación presentada ha caracterizado *in situ* (a nivel cualitativo y semi-cuantitativo) numerosas cámaras de aireación y de ventilación en la Península Ibérica, comprobando que muchas de las decisiones tomadas en la adopción de este sistema impiden o merman su funcionamiento. Del mismo modo, se ha constatado la idoneidad de otros muchos aspectos que lo avalan. Esto ha permitido proponer un procedimiento de diseño de las cámaras de aireación o de ventilación, apoyado en criterios contrastados, para tratar la humedad capilar de los edificios del patrimonio arquitectónico cimentados sobre suelo no saturado.

AGRADECIMIENTOS

A las instituciones: Instituto del Patrimonio Cultural de España; Consejería de Cultura y Turismo y Delegaciones Territoriales de la Junta de Castilla y León; Ayuntamiento de Pinarejos en Segovia; Arzobispado de Madrid; Obispos de Alcalá de Henares, Segovia y Zamora; Fundación del Patrimonio Histórico de Castilla y León, Fundación González Allende; Universidades de Alcalá en Madrid e Instituto de Empresa en Segovia; y Agencia Estatal de Meteorología.

A las empresas: REARASA Restauración de Edificios, Artesonados y Retablos Alonso S.A.; TRYCSA Técnicas para la Restauración y Construcciones S.A.; Mármol y Granitos CABANILLAS S.L.; y Construcciones ESTEJOSAN, S.L.

Y a las siguientes personas (no representadas por las instituciones y empresas nombradas): Eduardo Barceló de Torres, Francisco Jurado Jiménez, Pedro Lucas del Teso, Andrés Díez Herrero, José Carlos Sanz Belloso, Ángel Casaseca Benítez, Leocadio Peláez Franco y Manuela Andrés Temprano.

DISPONIBILIDAD DE DATOS DEPOSITADOS

Archivo Digital UPM, <http://oa.upm.es/55603/> (1).

REFERENCIAS

- (1) Gil-Muñoz, M.T. (2019). *Criterios de diseño y caracterización de las cámaras de aireación, para el tratamiento y prevención de las humedades de capilaridad en edificios de interés patrimonial* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, doi: 10.20868/UPM.thesis.55603
- (2) Gil-Muñoz, M.T. y Lasheras-Merino, F. (2017). Cámaras de aireación como sistema de control de la humedad de capilaridad en edificios históricos. Análisis de funcionamiento. *Informes de la construcción*, 69(548): e233, doi: <https://doi.org/10.3989/id.55476>
- (3) Yusta Bonilla, F. (2000). *Proyecto de restauración de la ermita de San Baudelio. Casillas de Berlanga -Soria-*. Manuscrito no publicado, Archivo General del Instituto del Patrimonio Cultural de España, Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, Madrid.
- (4) Lucas del Teso, P. (1994). *Proyecto modificado de acondicionamiento N.1 de la iglesia de San Salvador de Toro (Zamora), como museo sacro*. Manuscrito no publicado, Unidad de Archivo de la Consejería de Cultura y Turismo, Junta de Castilla y León, Valladolid.
- (5) López Collado, G. (1976). *Las ruinas en construcciones antiguas: causas, consolidaciones y traslados*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.
- (6) De la Hoz Martínez, L. (2005). Restauración de la iglesia parroquial de Santiago Apóstol. Santa Lucía. Cartagena (Murcia). En *Actas de las XVI Jornadas de patrimonio histórico. Intervenciones en el patrimonio arquitectónico, arqueológico y etnográfico de la Región de Murcia* (pp. 40-53). Murcia: Servicio de Patrimonio Histórico, Gobierno de la Región de Murcia.
- (7) Jurado Jiménez, F. (2007). *Intervenciones en estructuras de edificios históricos*, 36pp. Recuperado de <http://www.franciscojurado.es/articulos.htm>.
- (8) González Fraile, E. (2012). Galerías de ventilación para desecar las humedades en los zócalos de los monumentos. *Papeles del Patal. Revista de Restauración Monumental*, 5: 189-206.
- (9) Herrera Cardenete, E., Martínez Ramos, R. y Herrera Fiestas, E. (2012). Tratamiento de humedades ascensionales en la restauración de la Basílica de la Virgen de las Angustias de Granada. En *XI Congreso internacional de rehabilitación del patrimonio arquitectónico y edificación: 12 a 14 de julio de 2012* (pp. 382-388). Servicio de Publicaciones de la Fundación Centro Internacional para la Conservación del Patrimonio (CICOP).
- (10) García Morales, S. (1995). *Informe sobre humedades del Colegio de Trinitarios de Alcalá de Henares*. Manuscrito no publicado, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, 20 pp. (Expediente 16.863).
- (11) Freitas, V.P. y Guimarães, A.S. (2008). Characterization of a hygro-regulated wall base ventilation system for treatment of rising damp in historical buildings. En *Proceedings of the 8th symposium on building physics in the nordic countries: 16 a 18 de junio de 2008* (pp. 911-919).
- (12) Guimarães, A.S. (2011). Dimensionamento de sistemas de ventilação da base das paredes para tratamento da humidade ascensional (Tese de Doutoramento). Porto: Universidade do Porto.
- (13) Ťažký, L. y Sedláková, A. (2014). Remedial method against moisture problems - Church of St. Abdon and Sennen in Gemersky Jablonec. *Journal of civil engineering*, 9(2): 77-84, doi: <https://doi.org/10.2478/sspjce-2014-0018>
- (14) Torres, M.I.M. y Freitas, V.P. (2010). "The influence of the thickness of the walls and their properties on the treatment of rising damp in historic buildings". *Construction and building materials*, 24: 1331-1339, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.004>
- (15) Pazderka, J., Hájková, E., Jiránek, M. (2017). Underground air duct to control rising moisture in historic buildings: improved design and its drying efficiency. *Acta Polytechnica*, 57(5): 331-339, doi: <https://doi.org/10.14311/AP.2017.57.0331>
- (16) Gil-Muñoz, M.T. y Lasheras-Merino, F. (2018). Design variables in ventilated air cavities for the control of rising damp in cultural heritage buildings. En *7 Euro-American Congress on construction pathology, rehabilitation technology and heritage management: 15 a 17 de mayo de 2018* (pp. 1228-1226). REHABEND 2018 Congress.
- (17) Sanz Bermúdez, J.A. (2002). *Restauración de la iglesia parroquial de Pinarejos (Segovia). Memoria final*. Manuscrito no publicado, Delegación de Patrimonio, Obispado de Segovia, Castilla y León.
- (18) García Morales, S., López González, L. y Collado Gómez, A. (2012). Metodología de inspección higrotérmica para la determinación de un factor de intensidad de evaporación en edificios históricos. *Informes de la Construcción*, 64(extra): 69-78, doi: 10.3989/ic.11.073