

CLIMA, TECNOLOGÍA Y PATOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS ESTUDIO DE FACTORES DE RIESGO EN EDIFICIOS DE ALTA COMPLEJIDAD

John Martin Evans y Silvia de Schiller
Centro de Investigación Hábitat y Energía, Secretaría de Investigaciones,
Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad de Buenos Aires
Tel.: (+ 54 11-4789-6274 e-mail: evansjmartin@gmail.com / sdeschiller@gmail.com

RESUMEN

El trabajo analiza patologías detectadas, especialmente condensación intersticial con crecimiento de hongos sobre paneles de yeso, en varios edificios de alta complejidad en climas cálidos y húmedos, identificándose graves deficiencias constructivas. El trabajo presenta una metodología para analizar el problema, con el estudio de las condiciones climáticas, la definición de los requisitos de diseño, la inspección de elementos constructivos para detectar posibles fallas y recomendaciones para remediación de elementos dañados. Los estudios de la envolvente edilicia complementan la medición de calidad de aire interior y la evaluación del funcionamiento de sistemas de acondicionamiento de aire. El estudio comprende el relevamiento de condiciones constructivas de elementos exteriores y detección de patologías en la construcción en seco de múltiples capas y pantalla exterior contra lluvia. Los resultados demuestran la importancia de seleccionar tecnologías apropiadas, implementar una cuidadosa dirección de obra y la aplicación de protocolos de remoción basado en normas internacionales.

Palabras clave: patologías constructivas, temperatura de rocío, condensación intersticial, refrigeración.

INTRODUCCION

La creciente adopción de criterios internacionales de certificación de edificación sustentable demanda un cuidado especial y adecuación regional en contextos de desarrollo emergente y condiciones climáticas complejas, diferentes a las que le dieron origen en países industrializados, considerando, los tiempos de obra y etapas constructivas en función de la disponibilidad de materiales locales y mano de obra calificada y su relación a la selección de tecnologías adecuadas.

La introducción de sistemas de acondicionamiento artificial y tecnologías constructivas que requieren de la composición de elementos con múltiples capas de materiales, plantean nuevos desafíos para el control de la calidad del aire interior, especialmente en climas cálidos y húmedos, donde las condiciones higro-térmicas exteriores exceden la temperatura de rocío de las condiciones interiores de diseño. En la evaluación se detectaron graves fallas constructivas que dificultan el mantenimiento de presiones positivas en el interior del edificio. En Argentina, los problemas resultantes de la condensación intersticial y superficial (IRAM, 2000 y 2006) son considerados principalmente para condiciones de invierno. Así, la temperatura máxima en la Norma IRAM sobre condensación es 30°C, mientras en la misma norma, el gráfico psicométrico indica una temperatura máxima de solo 25° C (IRAM, 2000). La condensación intersticial y superficial tiende a formar hongos que pueden afectar la salud de los ocupantes, tanto en vivienda (Fisk, et al, 2007, HMSO, 1970) como en bibliotecas (Lee, 1988), oficinas (EPA, 1999), y escuelas (EPA, 2001). La formación de hongos puede ocurrir en climas fríos (Scott, 1994), templados (HMSO, 1970) y cálidos, siendo esta última la condición analizada en el presente trabajo.

En climas cálidos y húmedos, la combinación de las condiciones de humedad absoluta y alta temperatura en exteriores puede exceder la temperatura de rocío de los espacios interiores, según su temperatura de diseño. Con el ingreso de aire húmedo a través de la envolvente, y con perforaciones no previstas o por colocación de aberturas, se pueden dar condiciones para la formación de hongos, especialmente sobre placas de yeso con terminaciones de papel (EPA, 1991). La construcción en seco, conformada por múltiples capas con una pantalla exterior contra lluvia o 'rain-screen', cámara de aire de compensación de presión, capas aislantes, barrera o freno de vapor, capa de soporte para la barrera, cámara de aire y terminación interior, tiene la ventaja de rápido armado sin procesos húmedos, pero requiere una cuidadosa dirección de obra para asegurar la correcta colocación y continuidad de cada capa, a fin de evitar las patologías de hongos.

Este trabajo presenta ejemplos de serias patologías detectadas en edificios de alta complejidad, tanto funcional como constructiva, tales como laboratorios especializados que requieren exigentes condiciones de temperatura y humedad en los espacios interiores, alta calidad de aire con filtros especiales, y la extracción de aire y de compuestos químicos de los laboratorios. La extracción de aire en los gabinetes de estos laboratorios puede contribuir a formar una presión negativa respecto al aire exterior.

METODOLOGÍA

El trabajo se realizó en las siguientes cinco etapas:

- Análisis de las condiciones exteriores en meses de mayor temperatura y humedad relativa a fin de establecer las condiciones de diseño exterior y compararlas con las condiciones de diseño establecido para los espacios interiores.
- Definición de los requerimientos de diseño para establecer el comportamiento higro-térmico de la envolvente exterior, incluyéndose los valores de resistencia térmica y resistencia al paso de vapor de agua de las capas, con su secuencia desde el exterior al interior.
- Análisis de las características constructivas a fin de verificar el cumplimiento de los requisitos de diseño y detección de posibles fallas.
- Auditoría ambiental con campaña de mediciones de temperatura, humedad relativa, calidad de aire y presión relativa del aire en los espacios interiores.
- Verificación del funcionamiento de los equipos de acondicionamiento de aire, a fin de evaluar su funcionamiento, potencia de diseño, sistema de controles y capacidad para mantener una presión positiva en el edificio.

Con los resultados obtenidos de la aplicación de este procedimiento, se elaboraron las recomendaciones para corregir los problemas detectados. A continuación, se presentan los pasos seguidos en este proceso y los ejemplos representativos de los problemas detectados en proyectos de oficinas y laboratorios.

CONDICIONES AMBIENTALES

Las condiciones en laboratorios de alta complejidad y avanzada tecnología, requieren contar con las condiciones que se indican en la Tabla 1, mientras las condiciones de temperatura y humedad exterior surgen de los datos climáticos del lugar.

Tabla 1. Condiciones de diseño en verano.

Condiciones	Interiores	Exterior
Temperatura mínima de inyección de aire	19° C	-
Temperatura de los espacios interiores y exteriores	22° C	34°
Humedad relativa en espacios interiores	50 %	60%
Temperatura de rocío	11,1° C	24°
Renovaciones de aire	15 cambios por hora	-
Diferencia en presión entre interior y exterior	+7.5pa	-

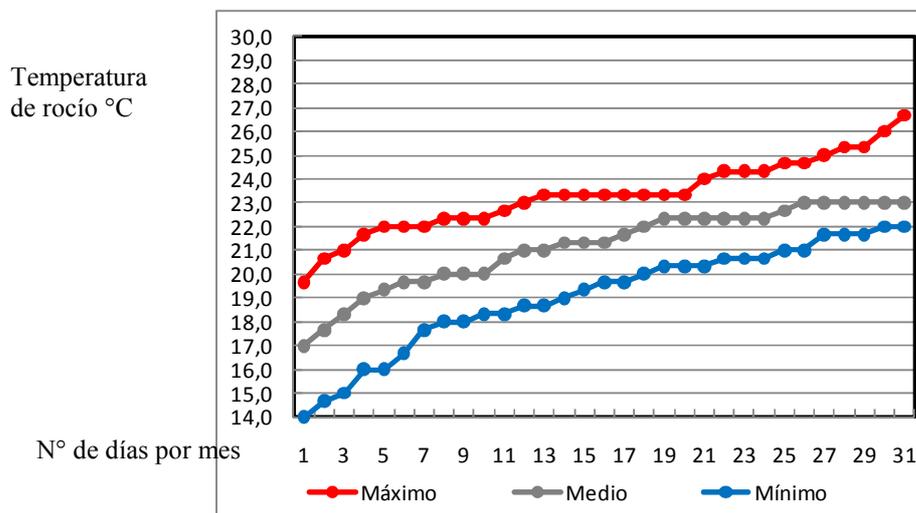


Figura 1. Temperatura de rocío en Iguazú, Misiones, valores máximos medios y mínimos promedios para enero, 2009-2011, en orden ascendente. Fuente: Wunderground.com, 2011

Las condiciones críticas ocurren cuando la temperatura de rocío exterior es superior a la temperatura interior de diseño. Como indica la Figura 1, en el mes de enero en Iguazú, Misiones, la temperatura máxima de rocío excede la temperatura interior durante 24 días del mes, y la temperatura media de rocío en 12 días del mes. Cabe aclarar que, sobre superficies con material orgánico, se puede formar moho cuando la humedad relativa supera 80 %. Con este criterio, la posibilidad de la formación de hongos ocurre cuando la temperatura de rocío exterior se mantiene por debajo de 18° C por periodos extendidos.

Comparativamente, en Buenos Aires, las condiciones para formar condensación son menos frecuentes, pero las máximas temperaturas de rocío exceden 22° C en 10 días por mes, Figura 2. En Buenos Aires, la temperatura promedio de rocío se mantiene por debajo de 18° C durante 20 días en enero, y en Iguazú, durante 29 días.

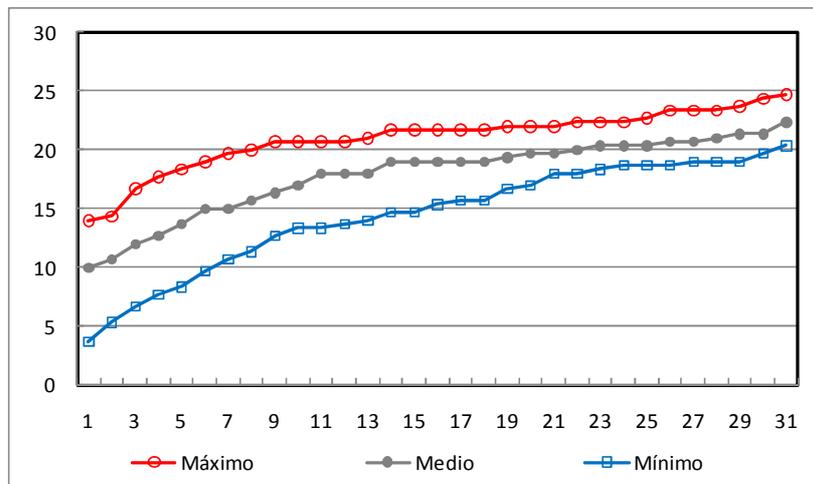


Figura 2. Temperatura de rocío en Buenos Aires, valores máximos, medios y mínimos promedios para enero, 2009-2011, en orden ascendente. La temperatura máxima de rocío excede 22°C en 10 días / mes.

REQUISITOS HIGROTÉRMICOS

Las esporas de moho pueden crecer en condiciones de alta humedad relativa, mayor a 80 %, y temperaturas entre 5 y 38°C, sobre superficies con nutrientes, tales como papel, madera, polvo de material orgánico y pequeños depósitos de aceite, producidos en cocinas y depositados sobre superficies interiores en locales adyacentes (EPA, 2011). También requiere la presencia de esporas de moho que flotan en el aire, pero dado su muy reducido tamaño, no es factible eliminar las esporas del aire interior. Es relevante notar que, en estas condiciones, colonias visibles pueden crecer en 24 horas.

A fin de evitar posibles patologías edilicias bajo las condiciones climáticas exteriores y las condiciones interiores de diseño, se establecieron los siguientes requisitos para la composición de la envolvente y las instalaciones termo-mecánicas, de modo de contar con:

- Un sistema de acondicionamiento de aire con capacidad suficiente para lograr la temperatura de diseño con 50 % humedad relativa y una presión positiva en el interior del edificio, suficiente para superar la presión de viento bajo condiciones normales de funcionamiento.
- Una barrera de vapor continua sobre la superficie de la envolvente opaca a fin de evitar el ingreso de vapor de agua desde el exterior hacia el interior donde pueda producirse ingreso de agua o humedad en contacto con las superficies más frías.
- Una barrera impermeable a la presión de viento ('*air-barrier*') y detalles complementarios aptos para evitar el ingreso de lluvia en combinación con viento y evitar daño en las capas constructivas que puedan sufrir deterioro en contacto con humedad, especialmente las placas de yeso y/o capas de aislantes térmicos absorbentes que pierden su capacidad aislante al mojarse. En este caso, la barrera de viento y la barrera de vapor de agua pueden combinarse en el mismo elemento. Dicha barrera combinada requiere contar con una capa resistente de apoyo, tal como una placa cementicia.
- Aislamiento térmico adecuado para lograr la disminución progresiva de la temperatura a través de las capas de la construcción y reducir la demanda de energía.

CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

Se muestra la construcción de muros exteriores con elementos prefabricados, Figura 3, que cumple con los requisitos higro-térmicos, siguiendo el empleo y forma de composición de las siguientes capas:

- **Pantalla contra lluvia**, ('*Rain Screen*'): Capa de revestimiento exterior con juntas sin sellar. Los paneles pueden ser de placas de piedra montados en elementos de hormigón premoldeado, paneles de terracota, paneles metálicos o paneles de hormigón.
- **Cámara de aire levemente ventilada**: Con presión de aire y de vapor de agua similar al aire exterior, en esta cámara se colocan los elementos con perfil 'U' para fijar la pantalla contra lluvia, requiriéndose un espesor mínimo de 20 cm. Esta cámara puede recibir agua de lluvia en cantidades limitadas pero el diseño debe permitir su drenaje hacia el exterior.

- **Capa de aislación térmica:** Preferentemente de baja permeabilidad con celdas cerradas, tales como poliestireno expandido o extruido. Con 10 cm de espesor se obtiene buena aislación térmica, cumpliendo con la Norma IRAM 11.605 (1996b) Nivel A para zonas bioambientales cálidas y muy cálidas, con color exterior claro o normal.
- **Barrera de agua y aire:** Este componente actúa como barrera de vapor de agua, barrera contra la penetración de agua de lluvia y control total al paso de aire, aún con alta presión de viento sobre la fachada.
- **Placa cementicia** (*'sheathing'*): Esta placa constituye la principal barrera física en la construcción, con un espesor de 12 mm. Alternativamente, se puede adoptar un muro de mampostería, por ejemplo, bloque de hormigón con revoque grueso sobre el lado exterior para aplicar la barrera de agua y aire.
- **Cámara de aire:** Esta cámara puede tener un espesor variable, aunque puede ser ventajoso permitir acceso para construcción y mantenimiento, con un espesor mínimo de 60 cm sumado al espesor de los perfiles 'C' para fijar las placas de yeso y la placa cementicia.
- **Placa de yeso:** Con el espesor convencional de 12,5 mm y una terminación interior de pintura o empapelado.

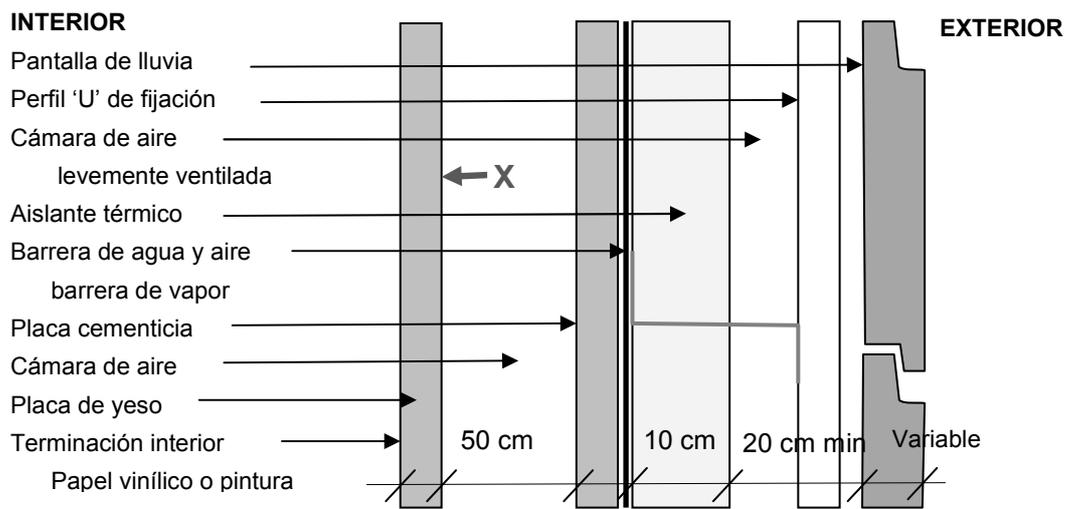


Figura 3. Construcción en seco con pantalla contra lluvia. La flecha con 'X' indica la posición donde se detectó condensación intersticial y hongos.

La construcción en seco requiere un cuidadoso control en la etapa de obra a fin de asegurar la continuidad de la barrera de agua y aire y la capa aislante. Las Figuras 4, 5, y 6 presentan una evaluación del riesgo de condensación en muros de este tipo, con las condiciones de diseño definidas anteriormente en los siguientes casos:

- Caso 1: Evaluación del riesgo de condensación en la construcción que cumple con los requisitos higro-térmicos, habiéndose incluido un aislante con celdas cerradas y baja permeabilidad, Figura 4, verificándose alta humedad relativa en la capa aislante, sin llegar a condensación intersticial.
- Caso 2: La misma construcción con aislante semi-rígido de mayor permeabilidad, Figura 5. La humedad relativa aumenta en la capa aislante, cercana al punto de rocío.
- Caso 2: La misma construcción con un revestimiento interior de papel vinílico y perforaciones en la barrera de vapor, Figura 6, detectándose alto riesgo de condensación sobre la superficie de la placa de yeso.

DETECCIÓN DE PROBLEMAS CONSTRUCTIVOS

En el relevamiento de varios edificios en climas cálidos y húmedos, con las mismas características constructivas, se detectó el crecimiento de hongos y moho sobre la superficie de paneles de roca-yeso que formaban el revestimiento interior.

Se realizó un estudio detallado de posibles causas de la patología y recomendaciones para la eliminación de los paneles afectados, considerando que las esporas pueden afectar la salud de los ocupantes, especialmente aquellos con dificultades respiratorias. Los problemas principales ocurrieron en varios edificios sobre el lado de la placa de yeso en contacto con la cámara de aire, indicado con 'X' en Figura 3.

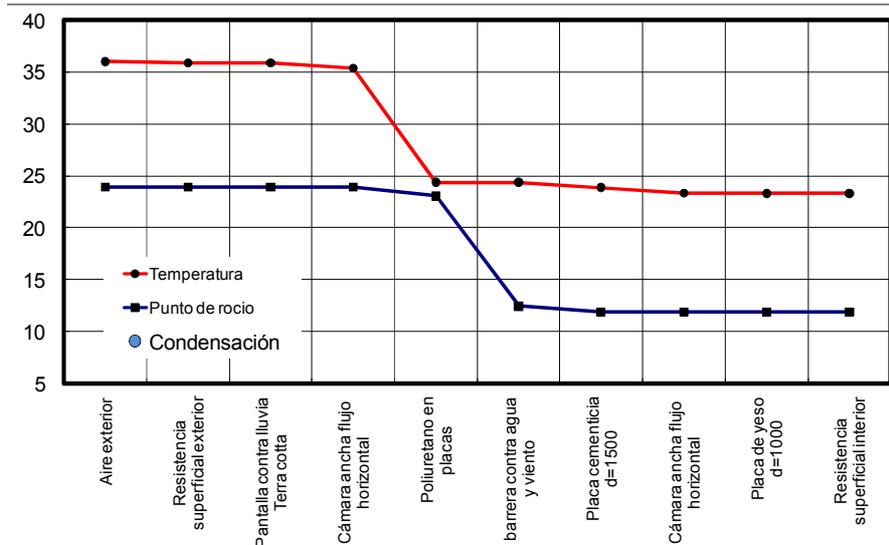


Figura 4. Temperatura bulbo seco y temperatura de rocío en cada capa de la construcción, en escala vertical, con aislación con celdas cerradas.

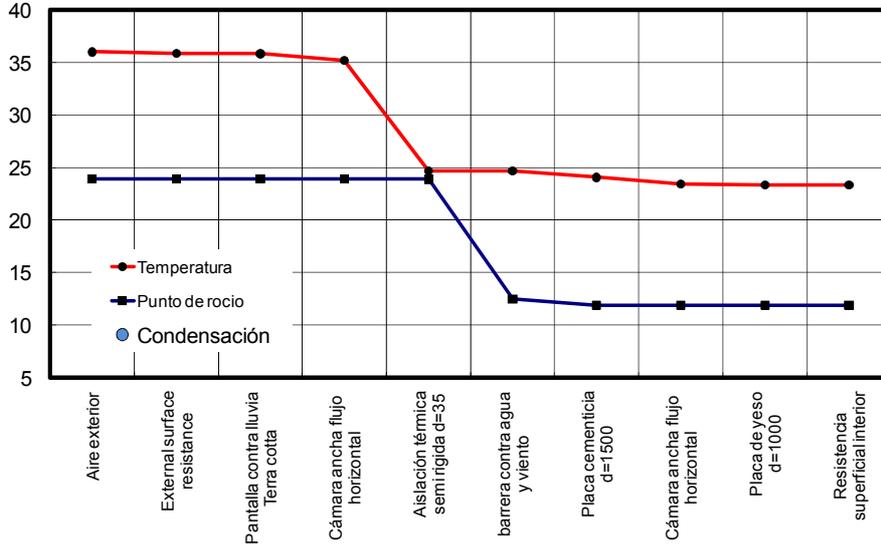


Figura 5. Temperatura bulbo seco y temperatura de rocío en cada capa de la construcción, en escala vertical, con aislación semi-rígida de fibra mineral. No hay condensación superficial o intersticial, pero las dos temperaturas se encuentran muy cercanas en la construcción con aislación semi-rígida.

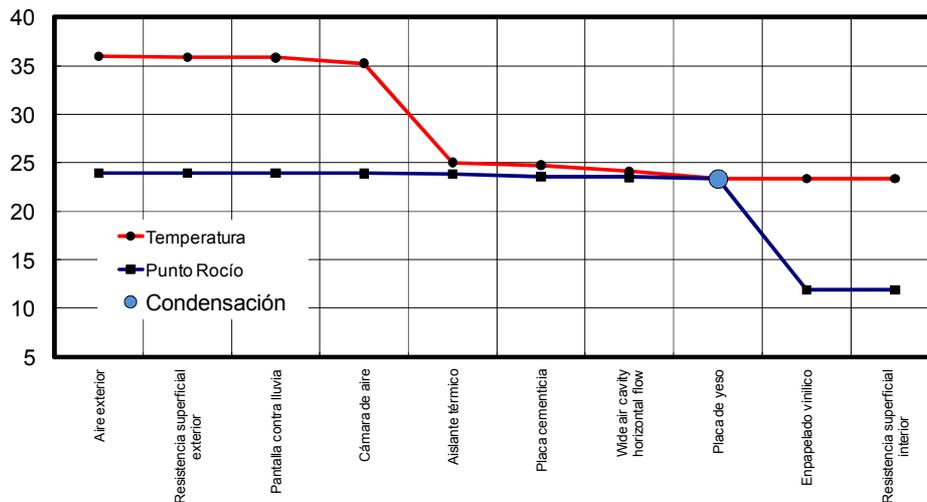


Figura 6. Temperatura bulbo seco y temperatura de rocío en cada capa de la construcción en escala vertical. Caso de una leve perforación de la barrera de vapor y papel vinílico sobre la placa de yeso.



Figura 7a y 7b. Crecimiento de hongos sobre placa de yeso en la cámara de aire interior.



Figura 8a y 8b. Reparaciones de la placa de yeso: el reemplazo de las secciones deterioradas, sin resolver el ingreso de aire de alta temperatura y alta humedad, no elimina la formación de condensación y hongos.



Figura 9: Perforación en la placa cementicia y de la barrera de vapor al fijar andamios.



Figura 10. Sección faltante de la capa aislante y la barrera de vapor.



Figura 12. Fallas del sellador en las juntas de la placa aislante.



Figura 13. Ingreso de aire en la junta de dilatación.

Las fallas detectadas en la continuidad de la barrera de vapor y la capa aislantes son suficientes para permitir el ingreso de aire hacia la cámara de aire interior, creando las condiciones de condensación.

Se identificaron tres mecanismos que promueven el ingreso de aire cálido y húmedo a través de las interrupciones en la continuidad de la barrera de aire y agua:

- Continuidad horizontal de cámaras de aire, la cual facilita el ingreso de aire y su circulación, especialmente donde estas cámaras conectan distintas fachadas del edificio, con diferencias en la presión de viento.
- Conductos verticales continuos que permiten la circulación de aire en las cámaras de aire de la fachada producido por el 'efecto chimenea'.
- Los núcleos de ascensores producen el 'efecto pistón' que succiona aire a través de las ventilaciones para escape de humo en el nivel superior.

Se considera que el uso de tecnologías constructivas avanzadas, en proyectos con plazos de obra muy limitados y mano de obra sin experiencia previa en tecnologías con construcción en seco, que ha contribuido a las fallas detectadas.

Otro problema puede surgir cuando se humedece con lluvia elementos tales como placas de yeso, antes de su colocación, aunque en los edificios inspeccionados, no se encontró evidencia de moho producido por esta causa. Otro problema con la discontinuidad en las capas constructivas de la envolvente es la penetración de barreras contra incendio (Wikipidea, 2011), especialmente en conductos verticales que conectan distintos pisos.

Las mediciones de presión de aire interior pueden confirmar el comportamiento deficiente de la envolvente y problemas en el mantenimiento de presión positiva con el equipo de ventilación artificial del sistema de acondicionamiento de aire. En los edificios en estudio, las mediciones indicaron que, debido a las perforaciones en la barrera de aire y agua, el equipo no mantuvo la presión interior positiva de diseño.

Las mediciones de la temperatura interior durante un periodo de varios días con intervalos de 10 minutos indicaron problemas de sobre-enfriamiento de los espacios, con 22° C y hasta 20° C de temperaturas interiores bulbo seco. Estas condiciones aumentan el riesgo de condensación, disminuyen la sensación de confort y aumentan la demanda de energía. Como resultado de los estudios, mediciones e inspecciones realizadas, se elaboraron las siguientes recomendaciones:

- Programa de remediación de las fallas constructivas en las envolventes edilicias.
- Proceso de remoción de las placas de yeso con problemas de moho y condensación.

Debido a los riesgos para la salud, se deben tomar precauciones especiales cuando las superficies con hongos exceden 2 m², preferentemente con contratistas experimentados, equipamiento especializado y entrenamiento adecuado. Los protocolos de remoción deben cumplir con recomendaciones y normas internacionales, por ejemplo: EPA (2001), IICRC (2008), NYCDHMH (2008), colocando barreras divisorias de polietileno u otro film de muy baja permeabilidad para asegurar que las esporas no ingresen en los sectores ocupados de los edificios. Los operarios deben usar EPP, Equipamiento de Protección Personal, por ejemplo: mascarar con un respirador N-95, guantes y antiparas, para evitar el contacto de las esporas con ojos o pulmones. Las placas dañadas deben colocarse en bolsas cerradas para su deposición final en lugares autorizados.

CONCLUSIONES

La formación de hongos pueden afectar la salud de los ocupantes de edificios, y la primer línea de defensa es el control de la alta humedad y eliminación del riesgo de condensación intersticial. Este problema se evidencia en climas cálidos y húmedos donde la temperatura de rocío del aire exterior excede la temperatura interior, condiciones que ocurren con cierta frecuencia en las Zonas Bioambientales Ib y IIb (IRAM 1996a) y ocasionalmente en Buenos Aires.

En Argentina, las Normas IRAM no contemplan el riesgo de condensación en edificios con refrigeración y épocas cálidas con alta humedad absoluta del aire exterior. Por lo tanto, se considera importante alertar a proyectistas y contratistas sobre los riesgos que puedan ocurrir en condiciones y casos similares.

Es relevante notar que el problema se acentúa en edificios con refrigeración ubicados en climas húmedos de bajas latitudes como el Caribe y América Central, el Norte de Brasil y costa de Colombia, Ecuador y Venezuela, así como en edificios de localidades con climas desérticos marítimos del Mar Rojo y Golfo Pérsico, también susceptibles a problemas de hongos, a pesar de la muy baja precipitación.

Se reconoce el aporte de la metodología de evaluación de edificios presentada en este trabajo y la relevancia de los ejemplos analizados de fallas detectadas en edificios donde el ingreso de aire exterior en cámaras de aire con superficies de menor temperatura ha producido serios problemas de crecimiento de hongos. El trabajo permitió identificar tres mecanismos que aumentan el riesgo de ingreso de aire en las envolventes edilicias, y elaborar recomendaciones para la remoción de placas de yeso y otros elementos dañados por humedad y moho, una contribución al mejoramiento de la calidad ambiental y un aporte a la sustentabilidad constructiva.

RECONOCIMIENTOS

El trabajo se inscribe en el marco de los proyectos de investigación UBACyT A017 'Evaluación y certificación de edificios energéticamente eficientes' y UBACyT A013 'Calificación y acreditación de sustentabilidad en arquitectura y urbanismo', Programación Científica 2008-2011 de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad de Buenos Aires.

Los autores agradecen las contribuciones de Ing. Armando Chamorro de CIH Soluciones y del Ing. Ron Bailey de Bailey Engineering Corporation, quienes realizaron valiosos estudios complementarios de la calidad de aire interior, mediciones de temperatura y presión y de criterios de diseño y funcionamiento de las instalaciones de aire acondicionado central.

REFERENCIAS

- EPA (1991), Building air quality, A Guide for Building Owners and Facility Managers, Environmental protection Agency, Washington. Appendix C: Moisture, Mold and Mildew
- EPA (2001), Mold Remediation in Schools and Commercial Buildings, Environmental Protection Agency, Washington.
- Fisk, W. J., Lei-Gomez, Q., y Mendell, M. J. (2007), Meta-analyses of the associations of respiratory health effects with dampness and mold in homes, *Indoor Air*, Volume 17, Issue 4, pages 284–296, August 2007.
- HMSO, (1970) Condensation in Dwellings. Part 1, A Design Guide, Her Majesties Stationary Office, London.
- IICRC (2008), IICRC S520, Standard and Reference Guide for Professional Mold Remediation, Institute of Inspection, Cleaning and Restoration Certification, Vancouver, Washington.
- IRAM (1996a), Norma IRAM 11.603:1996. Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la Republica Argentina, IRAM, Buenos Aires.
- IRAM (1996b) Norma IRAM 11.605:1996. Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramiento opacos.
- IRAM (2000), Norma IRAM 11.630:2000. Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higro-térmicas. Verificación de condensación superficial e intersticial en puntos singulares de muros exteriores, pisos y techos de edificios en general, IRAM, Buenos Aires.
- IRAM (2006), Norma IRAM 11.625:2006. Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higro-térmicas. Verificación de condensación superficial e intersticial en los paños centrales de muros exteriores, pisos y techos de edificios en general, IRAM, Buenos Aires..
- Lee, M. W., (1988) Prevention and treatment of mold in library collections with an emphasis on tropical climates: a RAMP study, General Information Programme and UNISIST. Paris, Unesco, 1988. EPA (2011), Environmental Protection Agency, <http://www.epa.gov/iedmold1/moldresources.html>.
- NYCDHMH (2008), Guidelines on Assessment and Remediation of Fungi in Indoor Environments, New York City Department of Health and Mental Hygiene, New York.
- Scott, G (1994). Moisture, ventilation and mould growth. Preventive conservation: practice, theory and research. Preprints of the contributions to the Ottawa Congress, 12-16 September 1994. pp. 149-153.
- Wikipedia (2011), <http://en.wikipedia.org/wiki/Drywall>, 10/08/2011.
- Wunderground.com (2011), <http://www.wunderground.com/> (datos meteorológicos).

ABSTRACT

The paper analyzes pathologies found in various buildings with advanced construction systems located in a warm and humid climate. These serious pathologies were associated with interstitial condensation with growth of fungi on plasterboard panels. A methodology for the evaluation of this problem is presented, including the study of climate parameters, the definition of design requirements, the inspection of building elements to detect possible building faults and recommendations to remove damaged material. The study of the building envelope complements the measurement of the indoor air quality and the performance of the air conditioning installations. The study includes a survey of the condition of the external skin of buildings with dry, multiple layer construction and an external rain screen. The results show the importance of appropriate technological solutions, careful site supervision and the application of removal protocols following international standards.

Key words: building pathologies, mould growth, dew point, interstitial condensation, refrigeration.