

LAS ENVOLVENTES CONSTRUCTIVAS EN LA CONSTRUCCIÓN NO CONVENCIONAL DE EDIFICIOS DEL NORDESTE ARGENTINO Y EL PROBLEMA DE LOS PUENTES TÉRMICOS

Artículo
Recibido 10-12-2016
Aceptado 20-12-2016

BUILDING ENVELOPES IN NON-CONVENTIONAL BUILDING CONSTRUCTION IN NORTHEAST ARGENTINA AND THE PROBLEM OF THERMAL BRIDGES.

MANUEL VENHAUS HELD

Facultad de Arquitectura y Urbanismo - Universidad Nacional del
Nordeste (FAU-UNNE), Corrientes, Argentinas
manu_ven@hotmail.com

HERMINIA MARÍA ALÍAS SOTO

Facultad de Arquitectura y Urbanismo - Universidad Nacional del
Nordeste (FAU-UNNE), Corrientes, Argentinas
heralias2001@yahoo.com.ar

GUILLERMO JOSÉ JACOBO BROZZONI

Facultad de Arquitectura y Urbanismo - Universidad Nacional del
Nordeste (FAU-UNNE), Corrientes, Argentinas
gjjacobo@arqu.unne.edu.ar

RESUMEN

Este trabajo analizó el comportamiento térmico de las envolventes de edificios en el Nordeste Argentino (NEA), cuyos sistemas constructivos emplean materiales prefabricados elaborados en serie y mano de obra especializada, atendiendo particularmente al impacto de los puentes térmicos. El objetivo fue diagnosticar y desarrollar criterios de optimización del desempeño energético de estas envolventes. Se estudiaron, para ello, los tipos y subtipos de construcciones no convencionales y se seleccionaron muestras de aquellos más empleados en el NEA. Éstas fueron evaluadas con los procedimientos de cálculo establecidos por las normas IRAM, de la serie 11.600, así como también mediante simulaciones realizadas con el software THERM. Los valores que pudieron obtenerse con ambos procedimientos presentaron discrepancias promedio del 2,6%. Con el software es posible obtener un coeficiente ponderado de transmitancia que incorpora muro opaco y puente térmico y, con la graficación del flujo de calor a través del cerramiento, reconocer fácilmente los puntos más críticos, para concentrar las acciones de optimización en ellos.

Palabras clave

prefabricación, discontinuidades de la envolvente, programas de simulación, desempeño térmico.

ABSTRACT

This research analyzed the thermal performance of building envelopes in Northeast Argentina (NEA), whose construction systems use mass-produced, prefabricated materials and specialized workers. Particular attention was paid to the impact of thermal bridges. The objective was to diagnose and develop criteria to optimize the energy performance of these envelopes. To this end, the types and subtypes of non-conventional buildings were studied and samples of those most used in NEA were selected. These were evaluated using the calculation procedures established by the 11,600 series of the IRAM standards, as well as by simulations performed with THERM software. The values that were obtained with both procedures presented average discrepancies of 2.6%. With the software it is possible to obtain a weighted coefficient of transmittance that incorporates opaque walls and thermal bridges and, by graphing the heat flow through the element, easily recognize the most critical points, to thus concentrate optimization actions

Keywords

prefabrication, discontinuities of the envelopes, software, thermal performance.

INTRODUCCIÓN

El clima de la zona bioambiental en que se inscribe el Nordeste Argentino (NEA), la zona "I" -subzona "b"- , según la norma 11.603 del Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), es muy cálido, con altas temperaturas en verano e inviernos moderados. Ello, en combinación con altas humedades relativas, da lugar a sensaciones psicofísicas de discomfort en los usuarios de edificios. Considerando, por otro lado, que ciertas estadísticas demuestran que los edificios son responsables de más del 40% de la energía consumida en Argentina (Weber, 2013), que de esa energía la mayor parte es consumida para calefacción y refrigeración (es decir, para la climatización de los ambientes interiores), y que el 50% de ella es ganada o perdida a través de los cerramientos opacos del edificio, el presente trabajo busca analizar, evaluar, diagnosticar y proponer criterios para mejorar térmicamente las envolventes exteriores de edificios materializados mediante la tecnología y los materiales de la construcción no convencional, en los principales centros urbanos del NEA. Se considera muy importante y necesario aumentar la eficiencia energética de estos edificios a fin de lograr que sus espacios interiores reúnan condiciones higrotérmicas más cercanas a las del confort y, por lo tanto, demanden un uso menos intensivo de dispositivos electromecánicos de climatización artificial, disminuyendo así el consumo de energía.

Los "sistemas constructivos no convencionales" se definen como aquellos que, por su empleo de materiales o técnicas novedosas, son poco conocidos y su uso no se encuentra ampliamente difundido en una determinada región. Estos sistemas, por lo general, se caracterizan por producir "edificios [,] reemplazando la mano de obra artesanal, con máquinas utilizadas por obreros especializados en su manejo, o con máquinas automáticas" (García Marquina, 2013). Los primeros antecedentes de construcción no convencional pueden encontrarse en el siglo XVI, pero sería a partir del XIX, cuando se persigue una mayor eficiencia en los procesos productivos, que este tipo de edificación experimentaría un desarrollo acelerado, especialmente en Europa y Estados Unidos. A pesar de su extendida implementación en países desarrollados, su empleo aún no es frecuente en la región del NEA (aunque se ha visto incrementada notablemente en los últimos años).

El estudio y las propuestas de optimización desarrolladas en el presente artículo centran especial atención en el impacto que tienen los puentes térmicos en el comportamiento higrotérmico general de los cerramientos exteriores. El IRAM los define como "heterogeneidades de un elemento constructivo que forman parte de la envolvente (pared, piso, techo, etc.) de un edificio [, y] que ocasionan mayor flujo de calor a través de ésta". Estas discontinuidades representan verdaderos puntos críticos que se extienden por

toda la envolvente de los sistemas constructivos no convencionales de mayor difusión y uso, principalmente representados por la construcción en seco, a través de algunas de las formas de los sistemas de entramado y emplacado. Las estructuras portantes de los edificios así materializados constituyen importantes puentes térmicos que ocasionan comportamientos estructurales, físicos, mecánicos e higrotérmicos diferenciales y frecuentemente causan patologías constructivas.

DESARROLLO Y RESULTADOS

A partir de un relevamiento de los principales tipos y subtipos de construcciones no convencionales y los materiales empleados para su elaboración en la región del Nordeste Argentino, se reconoció como principal exponente de los sistemas livianos el sistema con entramado de madera. Este subtipo, también llamado *balloon framing*, se constituye por la combinación de elementos portantes ligeros de madera, denominados soleras y montantes, distanciados unos 40 a 60 cm entre sí, formando bastidores portantes. Asimismo, se identificó el uso extendido del sistema liviano con entramado metálico, el cual deriva del primero y emplea para la constitución de los entramados perfiles metálicos galvanizados conformados en frío, con forma de "C" o "U". En ambos casos los bastidores que sirven de estructura se completan con variados elementos de cerramiento y revestimiento, utilizados como acabado y protección. El sistema liviano de paneles prefabricados fue otro sistema liviano reconocido. Está formado por paneles del tipo "sándwich" con estructura de madera para constituir tabiques interiores, exteriores y cielorrasos. La estructura interna de los paneles se materializa con bastidores de madera y su terminación interior es de placas de roca de yeso. La terminación exterior varía de acuerdo a la marca comercial, materializándose por lo general con placas cementicias de alto impacto, y pudiendo incluso conformarse con mamposterías, lo que otorga una imagen más tradicional.

En cuanto a los "sistemas de construcción no convencional pesados", se destaca el uso del sistema de grandes paneles, con paneles transversales de carga de hormigón armado, espaciados a 3,00 m, y paneles rigidizantes en la parte central de los edificios (Mac Donnel y Mac Donnel, 1999). Las terminaciones interiores se elaboran con placas de roca de yeso sobre estructuras metálicas.

Dentro del grupo de "sistemas industrializados *in situ*", se analizó como exponente principal al sistema de paneles aligerados con núcleo de poliestireno expandido y malla electro-soldada espacial. Este tipo de sistema industrializado abierto utiliza paneles de poliestireno expandido y mallas de acero prefabricados en forma modular que luego reciben la aplicación

a presión de un revoque estructural de hormigón en obra, el que provee tanto estructura como protección y terminación.

Aislación hidráulica, térmica y acústica se incorporan en estos sistemas constructivos no convencionales como elementos constituyentes de las multicapas que caracterizan sus cerramientos. Por otro lado, la repetición de piezas estructurales para la conformación de los bastidores y estructuras portantes es otro factor característico de los sistemas reconocidos. Estas piezas interrumpen el normal desarrollo de las aislaciones térmicas en las multicapas, conformando las heterogeneidades conocidas como puentes térmicos. Salvando diferencias de materiales, escuadrías, formas y separación de estas estructuras intermedias en los distintos sistemas constructivos, puede decirse que representan alrededor del 10% de desarrollo normal de las envolventes. De allí la importancia de su ponderación y optimización.

NORMAS TÉCNICAS VIGENTES

Para el análisis del comportamiento general de las envolventes de los sistemas constructivos antes descritos, este fue evaluado de acuerdo a tres metodologías. En primer lugar, la muestra de sistemas constructivos fue analizada en base a las normas técnicas vigentes en los principales centros urbanos de la región. Se evaluó el cumplimiento de las condiciones técnico-constructivas que los reglamentos generales de construcción y los códigos de edificación locales y regionales establecen para la construcción no convencional. Estos se concentran en profundidad en la reglamentación del diseño de ambientes (dimensiones, iluminación, ventilación), en la imagen de las obras y en la conformación urbana que surge del conjunto de ellas. En cuanto a sistemas o materiales constructivos no convencionales, presentan una definición, clasificación y prescripción poco detallada y muy escueta. En forma generalizada, exigen la presentación del "certificado de aptitud técnica" (C.A.T.) para la obtención de permiso para uso de sistemas constructivos no convencionales. Dicho certificado, entregado por la Subsecretaría de Vivienda y Desarrollo Ambiental de la Nación, se otorga a todo material, elemento o sistema constructivo que considere "no tradicional". Su obtención implica la presentación de informes detallados sobre materias primas y procesos de fabricación empleados, así como la aplicación final de los materiales, componentes o sistemas. De igual modo, se exige la presentación de ensayos de conductividad térmica y resistencia al paso de vapor de agua. Algunos municipios, incluso detallan un mecanismo propio de certificación de aptitud técnica. Usualmente, estas se expiden por plazos de tres años, después de los cuales deben ser renovados. De esta manera se asegura la revisión y optimización constante de los sistemas constructivos que poseen estas certificaciones.

NORMAS DE HABITABILIDAD VIGENTES

Seguidamente, en este estudio se emplearon los procedimientos establecidos por la Normativa de Habitabilidad del IRAM, específicamente las normas IRAM de la serie 11.600, para evaluar los diferentes sistemas constructivos en estudio. En primer lugar, se determinó el coeficiente de transmitancia térmica (K) para cada sistema, de acuerdo a los métodos de cálculo del aislamiento térmico de edificios propuestos por la norma IRAM 11.601. El método procede de manera individualizada en el cálculo de la Transmitancia Térmica Lineal de la porción opaca del muro " K_{mo} " y de la porción de los puentes térmicos " K_{pt} ". Los valores obtenidos deben luego compararse con las transmitancias térmicas máximas admisibles establecidas por la norma IRAM 11.605 para cada una de las zonas bioambientales en que divide al territorio nacional. A partir de los valores obtenidos de estas verificaciones, pudo determinarse que el 80% de los sistemas constructivos analizados alcanza para verano el nivel A, es decir, el recomendado para las zonas bioambientales I y II, en que se inscribe el NEA. Para la situación de invierno, el 40% cumple con el nivel A y el 60% restante, con el nivel B (medio).

Una vez establecidas las transmitancias térmicas lineales de ambas porciones del cerramiento, se analiza la relación entre sus valores (K_{pt}/K_{mo}) para determinar la aptitud del cerramiento respecto a los puentes térmicos. La misma se logra si la transmitancia térmica de un puente térmico no supera en más del 50% el valor de transmitancia térmica del muro opaco, es decir, $K_{pt}/K_{mo} \leq 1,5$. En casos especiales, en que la distancia entre los puentes térmicos lineales es menor a 1,70 m., lo cual constituye el caso general de los bastidores de los sistemas constructivos no convencionales, la tolerancia se reduce al 35% ($K_{pt}/K_{mo} \leq 1,35$). Respecto a este punto, el 80% de los sistemas constructivos resultó insatisfactorio, pudiendo reconocerse la tendencia de disminución de la aptitud de los sistemas constructivos no convencionales respecto a los puentes térmicos cuanto menor es la transmitancia térmica de sus muros opacos, es decir, cuanto mayor resulta la diferencia o heterogeneidad entre ambas situaciones o secciones.

Continuando con las evaluaciones, se aplicó la norma IRAM 11.625 para determinar los riesgos de condensación superficial e intersticial en la estación de invierno de las soluciones tecnológicas en estudio. Partiendo de las condiciones climáticas (temperaturas de diseño y humedad relativa) establecidas por la norma para la Ciudad de Resistencia, capital de la Provincia del Chaco, se consideraron los coeficientes de transmitancia térmica (K) obtenidos anteriormente y la resistencia al paso de vapor de agua de cada una de las capas constitutivas. Ninguno de los sistemas constructivos evaluados presenta riesgo de ocurrencia de condensaciones superficiales. No obstante, cada uno de ellos registró riesgo de ocurrencia de condensación intersticial, por lo general a partir del material aislante hacia las capas constitutivas exteriores

del cerramiento. La consecuente aparición de agua en las capas intersticiales de los cerramientos edilicios altera sus propiedades físicas y químicas, poniendo en riesgo su durabilidad, comportamiento mecánico e higrotérmico.

SIMULACIONES CON THERM 6.3.

Finalmente, los cerramientos tipológicos de los sistemas constructivos no convencionales usados habitualmente en el NEA fueron estudiados mediante simulaciones desarrolladas por el software THERM, en su versión 6.3. Se trata de "un programa de cálculo de calor en régimen estacionario que resuelve numéricamente la ecuación de transmisión de energía en dos dimensiones a través de la sección transversal de elementos de construcción, como ventanas, paredes, techos y puertas" (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013). El software, desarrollado en Estados Unidos, se encuentra disponible para su descarga gratuita, únicamente en idioma inglés. Además, utiliza para el desarrollo de los cálculos el método de elementos finitos, que propone la resolución de los problemas planteando una serie de ecuaciones algebraicas simultáneas y arroja valores aproximados de incógnitas en un número finito de localizaciones dentro del cuerpo. Los resultados obtenibles de las simulaciones incluyen valores numéricos de transmitancia térmica (*U-factors*), e información gráfica como vectores de flujo (*flux vectors*) o caminos preponderantes seguidos por el calor, isoterms (*isotherms*) o líneas de igual temperatura, y la transmisión del flujo de calor mediante escala de colores (*color infrared*).

Después de dibujar las geometrías de la sección transversal de los cerramientos tipológicos en THERM con la incorporación de plantillas DFX, se asignó a cada geometría el material correspondiente, a partir de una "biblioteca de materiales" creada con los mismos valores de conductividad térmica empleados en los cálculos de acuerdo a IRAM. Las simulaciones se realizaron considerando una situación de verano, que afecta en mayor medida al NEA, con un flujo de calor desde el exterior hacia el interior, en sentido horizontal por haber estudiado en detalle los cerramientos verticales. De acuerdo a estas premisas se determinaron las condiciones de contorno (o *boundary conditions*) del modelo simulado, aplicando para el exterior una temperatura máxima de diseño, establecida por la norma IRAM 11.603 en 39,8°C para resistencia, y una conductancia de la capa superficial de aire de 25,00 W/m²K, correspondiente a los 0,04 m²K/W de resistencia superficial exterior (*Rse*). Como condiciones interiores, se adoptó una temperatura ideal de diseño interior de 25°C para verano y 7,69 W/m²K como conductancia de la capa superficial de aire, equivalente a los 0,13 m²K/W de resistencia superficial interior (*Rsi*) establecida por IRAM. Una vez determinados todos estos parámetros, se procedió a la simulación de los cinco sistemas constructivos no convencionales seleccionados.

Es importante destacar que el software THERM calcula la transmitancia térmica total del modelo dibujado. Esto significa que si en un mismo modelo se simula el

comportamiento de la sección transversal de un determinado sistema constructivo, incorporando tanto el muro opaco como al puente térmico, se obtienen gráficos que muestran de forma clara la influencia de las heterogeneidades en la transmisión de calor a través de los cerramientos. De esta manera, es también posible obtener un "coeficiente ponderado de transmitancia térmica", que representaría la "transmitancia promedio" del cerramiento, teniendo en cuenta la importante presencia de puentes térmicos en la construcción no convencional. Este procedimiento no obstante impide establecer las relaciones entre muro opaco y puente térmico (*K_{pt}/K_{mo}*) de acuerdo a la normativa de habitabilidad vigente del IRAM, descrita previamente, y determinar a partir de ella la aptitud del cerramiento respecto a los puentes térmicos. Tales consideraciones demandan la simulación de ambas porciones en modelos separados, lo cual, desde el punto de vista gráfico, resulta poco interesante, ya que la riqueza ilustrativa se pierde debido a la transmisión homogénea de calor que se evalúa. Debido a estas cuestiones se simuló con THERM 6.3, para cada sistema constructivo, un modelo de muro opaco aislado, otro únicamente con la porción de puente térmico y un último que incorpora ambos.

En cuanto a valores numéricos de transmitancia térmica obtenidos mediante THERM y a partir de IRAM, se registra una gran similitud en los resultados, existiendo una discrepancia promedio de 3,4% que se acrecienta conforme se complejiza la figura de la sección transversal. Esto implica que la categorización de acuerdo a las zonas bioambientales y la aptitud respecto a puentes térmicos (*K_{pt}/K_{mo} ≤ 1,35*) se mantienen. Si, en cambio, se considera la transmitancia térmica ponderada, los rendimientos de los sistemas constructivos disminuyen considerablemente. En este caso, el 40% de los sistemas constructivos alcanzaría el nivel A para verano y únicamente el 20% el mismo nivel para invierno, en tanto que el 40% se ubicaría en el nivel B para verano y el 60%, para invierno. Esto denota los errores en que se incurre al considerar para la categorización únicamente los valores de transmitancia térmica del muro opaco, olvidando la importante influencia de los puentes térmicos en el comportamiento general de los entramados estructurales. Si se analizan los resultados gráficos obtenidos con THERM, puede advertirse que al verse el aislante térmico interrumpido por un elemento estructural (puente térmico), las líneas isoterms tienden a bordear la heterogeneidad, acercándose a los límites del cerramiento. Por otro lado, se reconoce la concentración de vectores de flujo y, por lo tanto, de la transmisión del calor en los puentes térmicos, demostrando asimismo el poder de atracción del flujo que tienen sobre sectores de muro opaco.

A partir de lo expuesto, puede reconocerse -desde el punto de vista del comportamiento higrotérmico y energético general- como principal punto crítico de los sistemas constructivos no convencionales de uso habitual en la región, la inaptitud general de los cerramientos respecto a los puentes térmicos, dada la falta de proporcionalidad entre los valores de transmitancia térmica de las diferentes porciones del cerramiento.

OPTIMIZACIÓN

Identificada la principal falencia de los sistemas, se propusieron medidas de optimización del diseño de los sistemas constructivos, en aras de mejorar sus comportamientos frente a la transmisión del calor y, en especial, de atenuar el efecto de los puentes térmicos. En primer lugar, se planteó el reemplazo del material que constituía al puente térmico por uno de menor valor de conductividad, sin modificar sus propiedades mecánicas. Por ejemplo, las armaduras de acero pudieron ser reemplazadas por varillas de resina de vinil y fibra de vidrio. Otra medida aplicada fue la sustitución del material aislante de baja conductividad térmica por otro de conductividad mayor, sin que el cerramiento en general perdiera la clasificación obtenida respecto a IRAM 11.605 para las zonas bioambientales I y II. Asimismo, se procedió con la reubicación de la porción aislante dentro de las capas del cerramiento: se lo retiró de su ubicación usual en el espacio dejado por los entramados estructurales y se lo ubicó por delante del mismo, permitiendo cubrir y proteger

con aislación térmica todo el cerramiento. Esto, a su vez, permitió dejar los intersticios estructurales rellenos de aire y de menor resistencia térmica que los materiales aislantes colocados anteriormente en la misma posición, reduciendo considerablemente la diferencia de conductividad térmica entre ambas porciones del cerramiento. Las diferentes capas constitutivas de la sección transversal deben, igualmente, mantenerse unidas entre sí y para ello requieren elementos de fijación. Debido a esto, la continuidad estricta del aislante no siempre es posible ya que se constituyen puentes térmicos no solo por motivos estructurales generales de la edificación, sino por causas propias del cerramiento. Por tal razón, se buscó reemplazar este tipo de situaciones por componentes que empleen sistemas de fijación sin necesidad de estructuras intermedias, como las placas de roca de yeso de terminación interior, aplicadas como revoques secos con el uso de adhesivos, en vez de medios tabiques con estructura de perfiles galvanizados. Los resultados más relevantes de la aplicación de ambos medios de evaluación y en los casos originales y optimizados pueden observarse en la Tabla 1.

Situación Original		Situación Optimizada		Situación Original		Situación Optimizada	
Sistema Liviano con Entramado de Madera				Sistema Liviano con Entramado Metálico			
Cerramiento Tipo Balloon Frame con terminación exterior de Siding de Pino e interior de Machimbre de Pino		Reubicación del Aislante Térmico en la cara interna para abarcar al Puente Térmico		Cerramiento Tipo Steel Frame con term. ext. de Revestimiento Plástico e int. de Roca de Yeso		Reubicación del Aislante Térmico en la cara interna para abarcar al Puente Térmico	
Coeficiente de Transmitancia Térmica		Coeficiente de Transmitancia Térmica		Coeficiente de Transmitancia Térmica		Coeficiente de Transmitancia Térmica	
Muro Opaco s/ IRAM	Puente Térmico Ponderado s/ THERM	Muro Opaco s/ IRAM	Puente Térmico Ponderado s/ THERM	Muro Opaco s/ IRAM	Puente Térmico Ponderado s/ THERM	Muro Opaco s/ IRAM	Puente Térmico Ponderado s/ THERM
0,2624 W/m ² C	0,3220 W/m ² C	0,4826 W/m ² C	0,4812 W/m ² C	0,3896 W/m ² C	0,6004 W/m ² C	0,4530 W/m ² C	0,4919 W/m ² C
Nivel A (verano)	Nivel A (verano)	Nivel A (verano)	Nivel A (verano)	Nivel A (verano)	Nivel B (verano)	Nivel A (verano)	Nivel A (verano)
NO Apto respecto a Puentes Térmicos		SI Apto respecto a Puentes Térmicos		NO Apto respecto a Puentes Térmicos		SI Apto respecto a Puentes Térmicos	
Sistema Liviano de Paneles Prefabricados				Sistema de Grandes Paneles			
Panel Sandwich de Madera de Pino con term. ext. de Placa Cementicia e int. de Roca de Yeso		Reubicación del Aislante Térmico en la cara externa para abarcar al Puente Térmico		Cerramiento Panel Portante de H ⁹ A° con terminación exterior de Revoque a la Cal e interior de Placas de Roca de Yeso		Eliminación del Puente Térmico aplicando un Revoque Seco sobre Poliestireno Expandido	
Coeficiente de Transmitancia Térmica		Coeficiente de Transmitancia Térmica		Coeficiente de Transmitancia Térmica		Coeficiente de Transmitancia Térmica	
Muro Opaco s/ IRAM	Puente Térmico Ponderado s/ THERM	Muro Opaco s/ IRAM	Puente Térmico Ponderado s/ THERM	Muro Opaco s/ IRAM	Puente Térmico Ponderado s/ THERM	Muro Opaco s/ IRAM	Puente Térmico Ponderado s/ THERM
0,2755 W/m ² C	0,4243 W/m ² C	0,4698 W/m ² C	0,4641 W/m ² C	0,9731 W/m ² C	0,9856 W/m ² C	0,5294 W/m ² C	0,5296 W/m ² C
Nivel A (verano)	Nivel A (verano)	Nivel A (verano)	Nivel A (verano)	Nivel B (verano)	Nivel B (verano)	Nivel A (verano)	Nivel A (verano)
NO Apto respecto a Puentes Térmicos		SI Apto respecto a Puentes Térmicos		SI Apto respecto a Puentes Térmicos		SI Apto respecto a Puentes Térmicos	

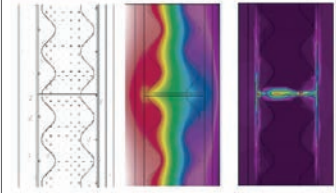
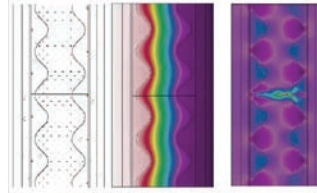
Situación Original		Situación Optimizada	
Sistema de Paneles Aligerados con Núcleo de Poliestireno y Malla Electro-soldada Espacial			
Cerramiento de Poliestireno Expandido y Malla Electro-soldada con Hormigón Proyectado.		Reemplazo del Acero por Vanillas de Resina de Vinil y Fibra de Vidrio.	
			
Coeficiente de Transmitancia Térmica		Coeficiente de Transmitancia Térmica	
Muro Opaco s/ IRAM	Puente Térmico Ponderado s/ THERM	Muro Opaco s/ IRAM	Puente Térmico Ponderado s/ THERM
0,5090 W/m2°C	2,5319 W/m2°C	0,5082 W/m2°C	0,5868 W/m2°C
Nivel A (verano)	No califica	Nivel A (verano)	Nivel B (verano)
NO Apto respecto a Puentes Térmicos		NO Apto respecto a Puentes Térmicos	

Tabla 1. Comparación de situación original y optimizada de los sistemas constructivos no convencionales analizados.
 Fuente: Elaboración de los autores.

Los gráficos ilustrados en cada situación corresponden a un detalle de la sección transversal del sistema en estudio (izquierda), a la Escala Colorimétrica de Gradiente de Temperatura (centro) y a la Escala Colorimétrica de Magnitudes de Flujo (derecha). En ambas escalas, los colores fríos (azules y morados) corresponden a temperaturas y flujos de calor bajos, mientras los colores cálidos (amarillos y rojos) representan temperaturas y flujos de calor altos.

Si se analizan los resultados obtenidos de la aplicación de los criterios de optimización, puede observarse en todos los casos que el gradiente de temperatura a través de la sección transversal se vuelve más regular, respecto a la situación original. La generación de isotermas más paralelas, que ya no bordean la heterogeneidad, denota la atenuación del efecto del puente térmico. Las variaciones en el valor de coeficiente ponderado de transmitancia térmica, por su lado, siguen distintas tendencias. En algunos casos, el valor en la situación optimizada disminuye respecto a la original, correspondiendo a la eliminación del puente térmico o al reemplazo del material altamente conductor térmico que lo conformaba, por otro de menor poder de transmisión del calor. En otros casos, el valor aumenta en la situación optimizada, lo cual en principio podría considerarse indeseado, ya que las ganancias y pérdidas térmicas a través del cerramiento también se incrementarían. Ello, sin embargo, implica una disminución de la diferencia entre la transmitancia térmica de la porción de muro opaco y la del puente térmico, lográndose en el 80% de los casos la aptitud respecto a los puentes térmicos, frente al 20% registrado en la situación original, con lo cual se consigue, ciertamente, el objetivo principal del presente trabajo. No obstante, los valores de transmitancia térmica en la situación optimizada se mantienen dentro de los márgenes del nivel A (óptimo) propuesto por la norma IRAM 11.605.

Otro fenómeno observado principalmente en los sistemas que emplean elementos de madera como estructura principal de los entramados, es que al reubicar el material aislante las heterogeneidades se convierten en los puntos del cerramiento en que se producen los menores flujos de calor, ya que, debido a su masa, ofrecen mayor resistencia al paso de temperatura que las cámaras de aire ubicadas en sus intersticios en reemplazo del material aislante que lo ocupaba anteriormente. Así, la lógica de muro opaco y puente térmico se invierte.

CONCLUSIONES

Los sistemas de construcción no convencional de empleo más usual en el Nordeste Argentino incorporan, desde la etapa de diseño, consideraciones de confort ambiental y aislación térmica, que los dotan de comportamientos higrotérmicos y energéticos generales buenos, verificados a partir de distintas metodologías. Sin embargo, las tipologías constructivas que pudieron analizarse cuentan, por su naturaleza estructural, con un gran número de puentes térmicos, que dejan de ser "anomalías" en el desarrollo de las envolventes para convertirse en elementos preponderantes. La influencia negativa que éstos tienen en el paso de energía calórica a través de las secciones transversales no siempre es considerada al momento de diseñar, volviéndose problemas crónicos de las soluciones construidas. Es por ello que los puentes térmicos deben ser considerados elementos principales y no excepciones en la construcción no convencional, y su mitigación debe, asimismo, constituirse en un imperativo desde el proceso de diseño de sistemas industrializados que contemplan principios de racionalidad, mecanización y automatización, buscando no solo la menor conductividad térmica posible en la porción opaca, sino un estudio de la relación y proporcionalidad entre ésta y los puentes térmicos.

Las consideraciones aquí mencionadas y las propuestas de optimización de los sistemas constructivos planteadas y verificadas, pretenden una factibilidad de aplicación por parte de los diferentes diseñadores en la región. Sin embargo, deben acompañarse por una revisión, ampliación y mayor exigencia y control en el cumplimiento efectivo de la normativa de habitabilidad y técnico-constructiva vigentes, en especial si se entiende que las mejoras en los rendimientos de los diferentes sistemas constructivos significan en la mayoría de los casos aumentos de los costos iniciales -los únicos que, por lo general, son tomados en cuenta, olvidando las disminuciones en costos de mantenimiento a largo plazo que pueden lograrse. En una industria tan competitiva como la de la construcción, ello genera pérdida de competitividad, más cuando no todos los actores aplican o son obligados a aplicar iguales criterios de diseño. Resulta necesario, en tal sentido, un cambio de paradigma que contemple principalmente costos económicos y ambientales de todo el ciclo de vida de las edificaciones, sobre todo ante la crisis ecológica mundial y el déficit energético que vive la región.

El uso de un software de simulación, en este caso específico THERM 6.3, se estima una herramienta muy útil y confiable para el cálculo de la transmitancia térmica de las secciones transversales, como complemento a la normativa de habitabilidad vigente en la Argentina, aunque no la suplanta, ya que para poder establecer iguales relaciones a las obtenidas con la norma IRAM (K_{pt}/K_{mo}) deben desarrollarse una serie adicional de operaciones. El software tampoco calcula los riesgos de condensación superficial e intersticial de los diferentes cerramientos, verificaciones muy importantes en la determinación de sus comportamientos higrotérmicos. Otra desventaja reconocida aquí, considerando usuarios de habla no inglesa, es que en la actualidad el software y sus manuales de uso únicamente se encuentran disponibles en idioma inglés. No obstante, se advierten, en definitiva, dos grandes ventajas en la aplicación de este tipo de software. En primer lugar, la posibilidad de obtener un coeficiente ponderado de transmitancia térmica, que incorpora ambas porciones del cerramiento y determina un valor de transmitancia térmica promedio que puede aplicarse a toda la envolvente. En segundo, se trata de una herramienta muy útil para diseñadores por proveer información muy valiosa de orden gráfico. Dicha información no es aportada por IRAM y es de gran utilidad para el reconocimiento claro del comportamiento de las secciones transversales de los cerramientos y, en especial, de la influencia que ejercen los puentes térmicos en el comportamiento higrotérmico y energético.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GARCÍA MARQUINA, Esteban. *Estudio-Diagnóstico sobre las posibilidades del desarrollo de una edificación residencial industrializada dirigida a satisfacer las necesidades de vivienda pública y muy especialmente en alquiler en la comunicada autónoma del País Vasco*. España: Eraikal, Departamento de Vivienda, Obras Públicas y Transporte del Gobierno Vasco, 2013.

INSTITUTO ARGENTINO DE RACIONALIZACIÓN DE MATERIALES (IRAM). *Norma 11.549: Aislamiento térmico de edificios. Vocabulario*. Tercera edición. Buenos Aires, Argentina, 2002.

LAWRENCE BERKLELEY NATIONAL LABORATORY (LBNL). *Therm 6.3 / Window 6.3 NFRC Simulation Manual*. Berkeley, California, Estados Unidos [en línea]. [Consultado 12 septiembre 2016]. Disponible en: <https://windows.lbl.gov/software/NFRC/SimMan/NFRCsim6.3-2013-07-Manual.pdf>

MAC DONNEL, Horacio y MAC DONNEL, Horacio Patricio. *Manual de Construcción Industrializada*. Buenos Aires: Editorial Revista Vivienda S.R.L., 1999.

WEBER, fabricante de morteros industriales para la construcción. *SATE aislación térmica por exterior* [en línea]. [Consultado 3 diciembre 2015]. Disponible en: <http://www.weber.es/sate-aislamiento-termico-por-el-exterior/ayuda-y-consejos/por-que-aislar-y-por-que-hacerlo-por-el-exterior.html>