

## **DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LA CELULOSA DE PAPEL RECICLADO. PROPUESTAS PARA SU USO COMO AISLANTE TÉRMICO DE EDIFICIOS EN EL NORDESTE ARGENTINO. POSIBLES PROCESOS PRODUCTIVOS.**

**M. Venhaus Held<sup>1</sup>, H. Alías<sup>2</sup>, G. Jacobo<sup>3</sup>, P. Martina<sup>4</sup>.**

Cátedra ESTRUCTURAS II. Área de la Tecnología y la Producción. Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU). Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) - Av. Las Heras 727 – 3500 - Resistencia – Chaco Tel.: +54 362 4425573 – e-mail: manu\_ven@hotmail.com

*Recibido 04/09/15, aceptado 07/10/15*

**RESUMEN:** Se exponen los resultados de un ensayo de conductividad térmica real de una probeta de celulosa proyectada, mediante el método del “aparato de placa caliente”, así como el proceso de producción experimental del material ensayado. Los objetivos incluyeron: validar los estudios y verificaciones teóricas que se hicieron respecto al empleo de los materiales de construcción derivados de la celulosa como aislantes, y generalizar pautas para su aplicación en la construcción regional del Nordeste Argentino (NEA). Los resultados obtenidos del ensayo, muy diferentes respecto a los valores teóricos tabulados, fueron aplicados a las verificaciones higrotérmicas de diferentes tecnologías constructivas analizadas, evaluando su comportamiento y registrando importantes variaciones en sus desempeños térmicos. Se reconoce que la producción artesanal de dicho material no resulta técnicamente posible. Para analizar la factibilidad real de su aplicación resultarían necesarias muestras concretas de los materiales ofrecidos comercialmente, que, por otra parte, no son de fabricación nacional.

**Palabras clave:** celulosa, papel periódico, desempeño higrotérmico, producción experimental, ensayo

### **INTRODUCCIÓN**

El presente trabajo se inserta en una investigación desarrollada en el marco de una Beca de Pregrado otorgada por la *Secretaría General de Ciencia y Técnica* de la *Universidad Nacional del Nordeste* (SGCyT - UNNE), denominada “*Aislación Térmica de Edificios mediante el uso de Celulosa (y sus derivados): Análisis de Propiedades, Desempeño y Propuesta de Aplicación a la Realidad Tecnológico – Constructiva y Económica del NEA*”. El mismo se centró en la investigación aplicada de materiales de construcción derivados de la celulosa, y de su aplicación en componentes constructivos de la envolvente perimetral de edificios, para estudiar la posibilidad de generalizar su uso en la construcción regional como mejoradores de la resistencia térmica total de los cerramientos. Fue desarrollado en la *Cátedra Estructuras II* de la *Facultad de Arquitectura y Urbanismo* (FAU) de la UNNE, dentro de un proyecto de investigación mayor (acreditado ante la SGCyT-UNNE), denominado “*Evaluación térmico-energética de las sedes edilicias de las Facultades de Arquitectura y Urbanismo, y de la de Ingeniería de la UNNE*”, declarado de interés por el *Honorable Consejo Directivo* de la FAU-UNNE (Resolución N° 0376/2009).

Numerosas investigaciones se han realizado al respecto del empleo de celulosa como aislante en la construcción, destacando las ventajas “ecológicas” del bajo impacto ambiental del ciclo de vida de las edificaciones que emplean este material (Meil y Salazar, 2009) y generando conciencia acerca de la importancia del balance energético de los materiales aislantes en sí mismos, más allá de su función principal de reducir el consumo de energía de las edificaciones. Sin embargo, son muy pocas las investigaciones aplicadas que analicen el empleo de los materiales derivados de celulosa en la

<sup>1</sup> Becario de Investigación – Secretaría General de Ciencia y Técnica – UNNE.

<sup>2</sup> Directora de Beca de Pregrado SGCyT - UNNE – Profesora Adjunta Cátedra *Estructuras II* – FAU – UNNE.

<sup>3</sup> Director de Proyecto de Investigación SGCyT - UNNE – Profesor Titular Cátedra *Estructuras II* – FAU – UNNE.

<sup>4</sup> Docente – Investigador SGCyT - UNNE – GIDER – Departamento de Termodinámica – Facultad de Ingeniería – UNNE.

Construcción, tanto a nivel latinoamericano, como nacional y de la región nordeste argentina. Éstos materiales, que se fabrican a partir de **fibras de celulosa de papel reciclado**, registran en general (según los fabricantes y cuando son aplicados mediante la técnica del “proyectado”), un coeficiente de conductividad térmica teórica de **0,035 W/mK** y una densidad teórica promedio entre **30 y 60 kg/m<sup>3</sup>** (InnoDämm, 2014), aunque la conductividad resulta en este caso dependiente de la forma de aplicación. Este valor representa un excelente comportamiento térmico teórico, que colabora en crear condiciones de aislación térmica óptimas en las diferentes tipologías de cerramiento arquitectónico que lo empleen. Ello, sumado a su origen reciclado, el bajo impacto ambiental de su producción, al aprovechamiento máximo del material y la cobertura del 100% de las superficies, gracias al proyectado (única técnica utilizada en el ámbito nacional para su aplicación), lo vuelven una opción muy recomendable a la hora de elegir un material aislante para la construcción de obras nuevas, así como para la rehabilitación térmica de aquellas ya construidas (Aislantes Celulósicos S.A., 2014). No obstante, cabe mencionar también que presenta ciertos inconvenientes en relación a su comportamiento higroscópico y a la ausencia de una industria nacional de fabricación, lo que reduciría sus ventajas medioambientales, debido a las emisiones nocivas que generaría el transporte del material importado a la Argentina desde el exterior.

Se plantea por ello, como principal aporte del presente trabajo, generar antecedentes de experimentación concreta con el material celulósico en la región, buscando conocer su comportamiento real, con miras a poder recomendar y/o avalar su empleo en la construcción local. En este marco pueden también nombrarse como antecedentes las investigaciones y ensayos de materiales, abundantes y ampliamente utilizados en la industria y construcción regional, como la madera de algarrobo, llevados a cabo por el *Grupo de Investigación de Energías Renovables del Departamento de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería de la UNNE*, en el marco del proyecto de investigación “*Transferencia Combinada de Calor y Masa en Maderas Utilizadas como Material de Construcción Poroso e Higroscópico*” (SGCyT-UNNE), cuyos materiales, resultados y conclusiones fueron insumos para el desarrollo del presente.

## METODOLOGÍA

Para analizar el comportamiento concreto del material celulósico y sus derivados en la construcción, en el desarrollo de la investigación se propusieron estudios y ponderaciones de **ejemplos de intervenciones arquitectónicas** (internacionales, nacionales y regionales) en las que se verificaron técnicas eficientes de utilización del mismo en la aislación térmica edilicia. Por otro lado se diseñaron diferentes **propuestas preliminares de diseño tipológico técnico-constructivo** que aplicaran la tecnología de aislación celulósica en combinación con tecnologías constructivas de utilización habitual en la región. Tanto los *Ejemplos* como las *Propuestas de Diseño* fueron luego analizados en relación a la normativa de habitabilidad del Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), verificando teóricamente las **resistencias térmicas** mediante los procedimientos de cálculo que dicha normativa propone. Debe tenerse en cuenta que la Norma IRAM 11.601, en su última edición (del año 2002), no contempla el valor de conductividad térmica del material celulósico en su Anexo A de *Conductividades Térmicas de Materiales de Construcción* (específicamente en la Tabla A.1.). Por ello fue necesario emplear como dato de partida el **coeficiente de conductividad térmica teórico** del material derivado de la celulosa, tal como es **promocionado en el mercado comercial**. De los cálculos de transmitancia térmica efectuados sobre los ejemplos considerados (para la zona bioclimática Ib, correspondiente a la Ciudad de Resistencia), se obtuvo, para el 55% de dichos casos, niveles de confort *óptimos* o *deseables* para los muros (Nivel “A”, según Norma IRAM 11.605), tanto para invierno como para verano. En el restante 45% de los casos analizados se obtuvieron niveles *medios* (Nivel “B” según Norma IRAM 11.605). Seguidamente, con el objeto de validar las verificaciones teóricas efectuadas en las etapas previas, se realizó la verificación práctica de la **conductividad térmica real** ( $\lambda$ ) de una probeta de celulosa, mediante el procedimiento del “*aparato de la placa caliente*”. Esta tarea se considera primordial para obtener datos ciertos sobre el **comportamiento real** del material derivado de celulosa utilizado como aislante en las edificaciones y fundamentar las ventajas de su empleo, en pos de generalizar su aplicación en la construcción regional. Los procedimientos, resultados y conclusiones de esta etapa de la investigación son los que se exponen en el presente trabajo.

Para llevar a cabo la **verificación de la conductividad térmica real** de una probeta de celulosa producida a partir de papel de periódico desfibrado, se realizaron tres procedimientos consecutivos: en primera instancia se preparó la probeta con el material que se iba a ensayar; luego se estableció la densidad real de dicho material; y finalmente se llevó a cabo el ensayo propiamente dicho, mediante el procedimiento del “aparato de placa caliente”.

Ante la imposibilidad de contar con una muestra del material celulósico ofrecido en el mercado nacional, debido a la falta de respuesta por parte de las empresas distribuidoras ante la petición de proveerlo, y por no contar con una firma local que lo ofreciera y con la cual se pudiera establecer un mayor contacto, se realizó la probeta del material a ensayar con los propios medios de los investigadores autores del presente, y a partir de la bibliografía y antecedentes respecto a composición y procedimientos de tratamiento y transformación del material.

La densidad aparente del material preparado para el ensayo se determinó mediante el *cociente del peso sobre el volumen* de una muestra del mismo.

El procedimiento utilizado para el ensayo de conductividad térmica real fue el descrito por la **Norma IRAM 11.559** (“*Acondicionamiento térmico. Determinación de la resistencia térmica y propiedades conexas en régimen estacionario. Método de la placa caliente con guarda*”). El mismo comprende dos placas, una fría y una caliente, entre las cuales se coloca el material del cual se desea conocer la conductividad térmica. El procedimiento consiste en entregar calor a la placa caliente mientras se hace circular agua por la placa fría. El calor atraviesa la muestra del material ensayado hasta que ambas placas alcanzan el régimen permanente (o estacionario). En ese momento se miden las temperaturas de ambas caras (fría y caliente) de la probeta de ensayo y las potencias eléctricas entregadas por la placa caliente. Estos valores y las dimensiones de la probeta permiten calcular la conductividad térmica real. En el caso específico se trabajó con una probeta heterogénea, consistente en un recipiente que en su interior contenía el material del cual se deseaba conocer el coeficiente de conductividad térmica. Es por ello que para la determinación de la conductividad térmica del material a ensayar, se deben despreciar del valor total obtenido, los valores correspondientes al material de cerramiento del recipiente. La **fórmula de cálculo** se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{e}{\lambda} = \frac{e1 + e3}{\lambda m} + \frac{e2}{\lambda x} \Rightarrow \lambda x = \frac{e2}{\left( \frac{e}{\lambda} - \frac{2 * e1}{\lambda m} \right)} \quad (1)$$

Dónde:

$\lambda$  = Coeficiente de Conductividad Térmica Total de Probeta obtenida de ensayo, en joule/seg\*m\*°C

$\lambda m$  = Coeficiente de Conductividad Térmica del Material de Cerramiento del Recipiente, en joule/seg\*m\*°C

$\lambda x$  = Coeficiente de Conductividad Térmica Incógnita, en joule/seg\*m\*°C

$e$  = Espesor Total de Probeta de Ensayo, en metros

$e1$  = Espesor del Material Superior de Cerramiento del Recipiente, en metros

$e2$  = Espesor del Núcleo Intermedio, en metros

$e3$  = Espesor del Material Inferior de Cerramiento del Recipiente, en metros

## DESCRIPCIÓN DE LA PRODUCCION INDUSTRIALIZADA DE AISLANTE CELULÓSICO

El papel de periódico, que sirve como materia prima, se somete a procesos físicos y químicos de tratamiento para la obtención de la celulosa aislante como describe Hermida Rodríguez (2013). El proceso, realizado en silos especiales, se inicia al llegar el papel a la planta de fabricación, donde es almacenado en grandes contenedores, en los cuales se retiran todos los elementos metálicos (ganchos y grapas) que contengan las hojas mediante potentes imanes. Posteriormente, la unidad cortadora realiza

un primer corte del papel en tiras de 5 cm. de espesor. Estas tiras son mezcladas por primera vez con las soluciones químicas. Ello las vuelve retardantes del fuego y resistentes a insectos, moho y a la putrefacción. Luego pasan a una máquina de desfibrilación, en la cual las tiras de papel son cortadas en trozos de 4 mm. Posteriormente son mezcladas por segunda vez con sales de boro o fosfatos de amoníaco y son llevadas a unidades de reducción de polvillo de celulosa, donde las fibras y el polvillo de celulosa son finalmente separados. Finalmente, son almacenadas y embaladas en forma de planchas o en copos sueltos, de acuerdo a la forma de distribución, comercialización y aplicación. Algunas industrias también incorporan en la fase de producción sustancias químicas como sulfatos de aluminio y polifosfatos de amonio (InnoDämm, op. cit.), lo cual mejora sus propiedades de conservación.

## PREPARACION DE LA PROBETA PARA EL CASO REAL ENSAYADO

La preparación del material a ensayar se desarrolló mediante la transformación, tratamiento y mezcla física y química de los componentes de acuerdo a los procesos de producción industrial antes descritos y en las proporciones indicadas, evaluándose los resultados obtenidos en cada etapa a partir de la revisión de la bibliografía. Como materia prima se utilizaron papel periódico en desuso, agua potable de provisión por red y bórax ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) en polvo, de venta libre en farmacias y de uso muy usual como insecticida. Se emplearon utensilios de uso cotidiano: tijeras, guillotinas, recipientes de diferentes tamaños, cucharas, medidores y guantes de látex.

La **transformación física** de las hojas de papel periódico utilizadas como materia prima (figura 1) consistió en cortarlas en pequeños trozos de aproximadamente 4 mm. de lado, con ayuda de tijeras y guillotinas.

Seguidamente se realizó el **preparado químico** que confiere protección a la materia prima (figura 2) contra los hongos e insectos. Para ello se disolvió borax en agua a temperatura ambiente. Las proporciones empleadas fueron 2,32 cc. de bórax en polvo por cada 100 cc. de agua. Esta proporción fue utilizada para respetar la relación de peso del producto terminado (Aislantes Celulósicos S.A., 2014) de 85% correspondiente al papel y el 15% correspondiente a los productos químicos (considerados seco), discriminando el peso del agua que se utilizó para diluirlo, pues en el producto final ésta se evapora.



*Figura 1: Materia prima (papel periódico), luego de la transformación física.*



*Figura 2: Componentes de la solución química con que se trató la materia prima.*

Finalmente, el **tratamiento químico** (figura 3) consistió en embeber los trozos de papel periódico cortado en la solución de borax. Para 5000 cc. de papel picado sin comprimir, se utilizaron 3 lts. de solución de borax. Esta proporción permitió cubrir toda la cantidad de papel y se lo dejó reposar por 16 horas. Luego se procedió a escurrir el agua del papel humedecido y desfibrarlo (desgarrarlo) manualmente, para obtener una consistencia similar a la que se ofrece en el mercado comercial. Al producto final se lo dejó reposar para que pierda humedad hasta contener una cantidad aproximada del 25%, punto en el cual puede ponerse en uso.

Como **condicionantes** de los resultados obtenidos en esta etapa pueden reconocerse fallas y falta de exactitud en el procesamiento de los diferentes componentes, principalmente por no contar con información suficiente, ni contar con los equipamientos e instalaciones utilizados industrialmente. En la imagen que se muestra más abajo se ilustra el material resultante de la prueba hecha de manera experimental (*figura 4*). A primera vista, puede reconocerse una diferencia en el grado de desfibración del producto obtenido manualmente respecto al ofrecido comercialmente, principalmente debido a las instalaciones especiales con que se cuenta en la producción industrial y con las que en este caso no se contó.

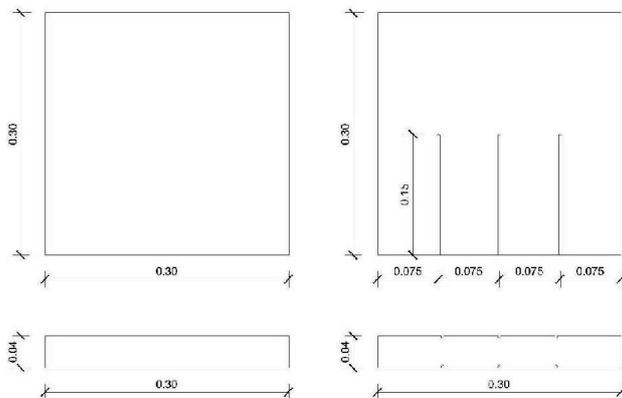


*Figura 3: Tratamiento químico de la materia prima.*



*Figura 4: Producto aislante celulósico obtenido luego de la producción experimental.*

Debido a la falta de cohesión (presentación en forma suelta) y consecuente falta de sostén propio del material, se debió utilizar recipientes que lo contengan al momento de la realización del ensayo. Para ello se emplearon dos ladrillos (cajas) de madera de algarrobo de 0.30 m. x 0.30 m. x 0.046m., uno de los cuales poseía, en cada una de sus caras mayores, ranuras de 4 mm. (profundidad) x 3 mm. (ancho) x 150 mm. (largo). Tres de dichas ranuras fueron practicadas en una de las caras mayores, y dos en la otra, sirviendo para la colocación en cada una de ellas de un termocupla para la determinación de la temperatura de la cara fría y caliente de la probeta una vez alcanzado el régimen estacionario. La *figura 5* ilustra esquemas de planta y vista de ambos ladrillos. Éstos fueron provistos por el *Departamento de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste*. Se emplearon estos ladrillos debido a que dicho departamento ya contaba con ensayos propios acerca de la conductividad térmica real de la madera de algarrobo. Ello, sumado al conocimiento del espesor de las tapas de las cajas (6 mm.), permitió discriminar, del valor de transmitancia térmica obtenido a partir del ensayo, los datos correspondientes a la madera, despejando los valores reales correspondientes al material derivado de celulosa.



*Figura 5: Esquemas de Planta y Vista de ladrillos para ensayo de conductividad.*



*Figura 6: Proceso de llenado de los ladrillos de ensayo con el material celulósico.*

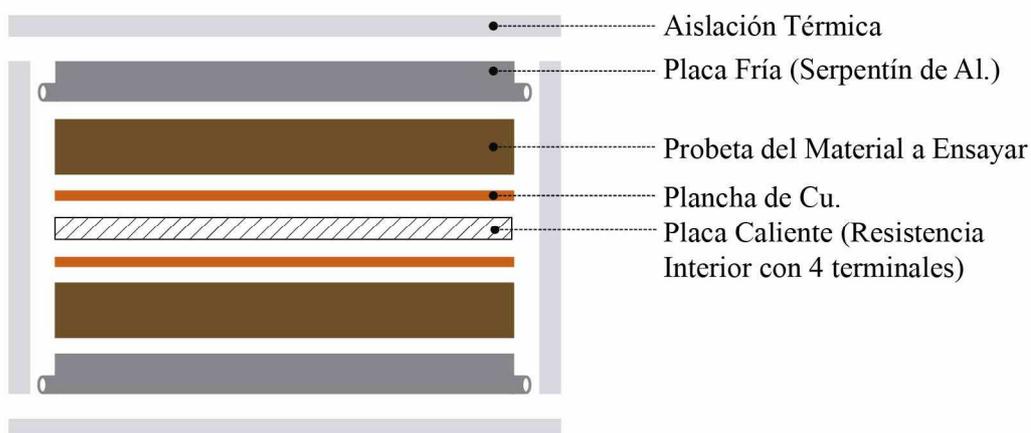
Para la **preparación final de la probeta**, se colocó el material así elaborado dentro de los ladrillos, llenando toda la superficie y cerrando bien las cajas mediante tornillos. Se emplearon un total de 8 tornillos de cabeza plana de 16 mm., 4 por cara, cuyas longitudes y masas son despreciables en cuanto a su potencial de transmitancia térmica. La *figura 6* ilustra el material dentro del ladrillo, previo a la cobertura del mismo con la tapa superior.

### DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL

Para la determinación de la **densidad aparente** del material elaborado se vertieron 100 cc. del mismo sin comprimir en un vaso de precipitado de vidrio. El mismo fue posteriormente pesado con una balanza analítica en la *Facultad de Ingeniería* de la UNNE. A partir del cociente del peso sobre el volumen del material que se quería ensayar, se determinó una densidad experimental de **98,02 Kg/m<sup>3</sup>**.

### ENSAYO DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA REAL

El ensayo se realizó en el *Departamento de Termodinámica* de la *Facultad de Ingeniería* de la UNNE el día 21 de marzo de 2015 entre las 10:30 hs. y las 20:30 hs. La temperatura promedio del laboratorio durante el ensayo fue de 28° C y la humedad relativa del 80%.



*Figura 7: Esquema del Aparato de Placa Caliente.*



*Figura 8: Aparato de Placa Caliente con la aislación de poliestireno expandido una vez finalizado el ensayo.*



*Figura 9: Equipos de Medición: Amperímetros y Voltímetros para determinación de pci y pce.*

De acuerdo al procedimiento propuesto por la Norma IRAM 11.559 para la determinación de la resistencia térmica en régimen estacionario mediante el “aparato de la placa caliente”, se entregó calor a la placa caliente mientras se hacía circular agua por la placa fría, transmitiéndose el calor a

través de la probeta del material ensayado ubicado entre ambas placas, la *figura 7* ilustra estas diferentes partes del dispositivo. Para la **conformación de la placa caliente** se utilizó una resistencia eléctrica que constituyó una única fuente caliente central y para colaborar a la distribución del calor en toda la cara caliente de la probeta se utilizó una plancha de cobre. Para la **conformación de la placa fría** se utilizaron dos fuentes frías formadas por serpentines de aluminio con agua en circulación, ubicados en los 2 extremos exteriores. El caudal de agua utilizada en la fuente fría fue de 2,1 lt/min en cada serpentín, es decir 4,2 lt/min en total. Para evitar pérdidas o ganancias de calor durante el proceso de ensayo, se conformó una envolvente para la probeta y ambas placas, construida en poliestireno expandido de 2 cm. de espesor.

## RESULTADOS

A partir de las mediciones realizadas una vez que las placas alcanzaron el régimen estacionario se pudieron obtener datos de temperatura final de equilibrio de placa caliente (*tpc*) igual a **71,22 °C** y temperatura final de equilibrio de la placa fría (*tpf*) igual a **33,49 °C**. Esto determinó una variación de temperatura entre ambas placas (*dt*) equivalente a **37,73°C**. Asimismo se registró una potencia eléctrica entregada a la placa caliente en su parte externa (*pce*) de **26,788 watt** y en su parte interna (*pci*) de **25,311 watt**. Con estos valores pudo determinarse la conductividad térmica del ladrillo entero a partir de la siguiente fórmula:

$$\lambda = \frac{e * (pce + pci)}{(2 * dt * sup)} = \frac{0,046 * (26,788 + 25,311)}{(2 * 37,73 * 0,09)} = 0,3528 \frac{joule}{seg * m * ^\circ C} \quad (2)$$

Dónde:

$\lambda$  = Coeficiente de Conductividad Térmica Total de Probeta obtenida de ensayo, en joule/seg\*m\*°C

*e* = Espesor Total de Probeta de Ensayo, en metros

*pce* = Potencia eléctrica entregada a la placa caliente en su parte externa, en Watt

*pci* = Potencia eléctrica entregada a la placa caliente en su parte interna, en Watt

*dt* = Diferencia de Temperatura entre Placa Caliente y Fría, en °C

Conociendo la conductividad térmica de la madera de algarrobo utilizada en las tapas superior e inferior de los ladrillos, obtenida en ensayos anteriores, igual a **0,263 joule / seg \* m \* °C**. Teniendo una superficie de transferencia de calor igual a **0,09 m<sup>2</sup>**. Considerando que el espesor de la pared superior de madera de algarrobo (*e1*) es de **0,006 m.**, el espesor del núcleo de preparado de material celulósico (*e2*) es de **0,034 m.** y el espesor de la pared inferior de madera de algarrobo (*e1 = e3*) es de **0,006 m.**, el espesor total del ladrillo es igual a **0,046 mm**. Partiendo del caso teórico de trabajar con una pared de 3 capas (*e1+e2+e3*) atravesada por un flujo de calor transversal en régimen estacionario o permanente y pudiendo determinar experimentalmente el coeficiente de conductividad del ladrillo entero. Se pudo calcular el **coeficiente de conductividad térmica del preparado de celulosa** (incógnita), a partir del cálculo en función de la conductividad total, discriminando la conductividad de las tapas de madera. De esta manera, la conductividad térmica del material celulósico se expresa en la siguiente fórmula:

$$\lambda_x = \frac{e2}{\left(\frac{e}{\lambda} - \frac{2 * e1}{\lambda_m}\right)} = \frac{0,034}{\left(\frac{0,046}{0,3528} - \frac{2 * 0,006}{0,263}\right)} = 0,4011 \frac{joule}{seg * m * ^\circ C} \quad (3)$$

Dónde:

$\lambda$  = Coeficiente de Conductividad Térmica Total de Probeta obtenida de ensayo, en joule/seg\*m\*°C

$\lambda_m$  = Coeficiente de Conductividad Térmica de Madera de Algarrobo obtenida en ensayos

anteriores, en  $\text{joule/seg} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$

$\lambda x$  = Coeficiente de Conductividad Térmica Incógnita, en  $\text{joule/seg} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$

$e$  = Espesor Total de Probeta de Ensayo, en metros

$e_1$  = Espesor de la pared superior de madera de algarrobo, en metros

$e_2$  = Espesor del núcleo de preparado de material celulósico, en metros

Esto implica que la conductividad térmica real del material celulósico obtenida de manera experimental a partir del método del “*aparato de placa caliente*” es de **0,4011 W/mK**. Por otro lado, a partir de la observación del material una vez finalizado el ensayo, puede mencionarse que no hubo cambio sustancial, ni en su aspecto ni en su consistencia, debido a los efectos del flujo de calor que lo atravesó durante el ensayo.

## DISCUSIÓN

En primer lugar cabe destacar que **el valor de conductividad térmica real obtenido a partir del ensayo (0,4011 W/mK) difiere en gran medida de la conductividad térmica “teórica” del material (0,035 W/mK)**, que los fabricantes promocionan para la comercialización del producto aislante celulósico importado. El valor obtenido representa un valor **once veces mayor**, siendo entonces equiparable térmicamente (según éste valor), a materiales como las placas de roca de yeso.

Asimismo puede notarse que la **densidad aparente** del material ensayado es mucho mayor a la densidad teórica del material ofrecido comercialmente, teniendo este último una densidad promedio entre **30 y 60  $\text{kg/m}^3$**  y el material de elaboración propia **98,02  $\text{kg/m}^3$** . Éste fue, decididamente, un factor altamente influyente en los resultados que pudieron obtenerse a partir del ensayo.

La falta de especificidad en el proceso de mezclado y procesado de los diferentes componentes del material en la producción artesanal llevada a cabo, puede reconocerse como una de las posibles causas por la cual se registran las diferencias tan importantes entre los valores teóricos y experimentales de conductividad térmica del material derivado de celulosa. La falta de equipamiento específico y de los medios precisos para la transformación de la materia prima determinaron que prácticamente se trabajara con el papel de periódico en forma virgen, simplemente cortado en trozos y tratado mínimamente con algunos componentes químicos, no pudiéndose obtener una verdadera transformación de la estructura, densidad y composición de la materia prima. Asimismo, no pudo encontrarse la manera de lograr la cohesión necesaria para que el material se adhiriera a las superficies y permanezca en dicha posición, aspecto que también impacta en la densidad y el comportamiento higrotérmico del material, así como en los aspectos técnicos vinculados a su uso en la construcción de edificios. Éstos puntos constituyen líneas de indagación en las cuales se sigue trabajando.

De considerarse los datos de conductividad térmica obtenidos de manera experimental, el material perdería verdaderamente su función de aislante térmico y los comportamientos higrotérmicos de los *Ejemplos de intervenciones arquitectónicas* analizados, así como los de las *Propuestas tipológicas de diseño técnico-constructivo* elaboradas, variarían significativamente. Con el objeto de realizar una valoración comparativa de los comportamientos con ambos valores de conductividad térmica (teórica y real) se presentan a continuación dos de las Propuestas Tipológicas diseñadas, evaluadas en relación a la normativa de habitabilidad vigente, calculando la **transmitancia térmica (K)** de los componentes con uno y otro valor de conductividad, mediante los métodos de cálculo propuestos por la Norma IRAM 11601, y comparándola con los valores máximos de transmitancia térmica (para condiciones de verano e invierno para muros y techos, según el nivel de confort al que se apunte), establecidos por la Norma IRAM 11605 para la zona bioambiental correspondiente (I: muy cálida).

Considerando las tipologías constructivas de mayor difusión en la región NEA y la manera en que estas podrían ser combinadas con la tecnología del material celulósico, se diseñaron las **Propuestas preliminares de diseño técnico-constructivo** que empleen la celulosa y sus derivados como mejoradores de la resistencia térmica total de los cerramientos. Una primera **Propuesta tipológica de cerramiento horizontal (figura 10)** partió de la tecnología tradicional de techo de tejas sobre estructura de madera, dejando el entablonado a la vista, a manera de cielorraso, obteniéndose un

espesor total del componente de 0,21 m. Para la aplicación de la celulosa se interpuso entre las capas tradicionales del entablonado de machimbre y la aislación hidráulica, una capa de 0,05 m. de espesor del aislante mencionado. Se propusieron listones de madera de pino de 2" x 2" colocados en sentido transversal a la pendiente para establecer el espesor y poder enzararlo una vez proyectado. Dichos listones también serían de utilidad en la contención del material elaborado artesanalmente, dada la imposibilidad de obtener, con las técnicas empleadas, la cohesión y consiguiente auto-sustentación característica del material ofrecido comercialmente.

- ① Teja Cerámica Colonial Cobija
- ② Cámara de Aire Débilmente Ventilada
- ③ Alfajía Clavadora de Teja Cobija - 1" x 4"
- ④ Teja Cerámica Colonial Canal
- ⑤ Clavadora de Teja Canal - 1" x 2"
- ⑥ Cámara de Aire NO Ventilada
- ⑦ Listón de Escurrimiento - 1/2" x 1/2"
- ⑧ Membrana Asfáltica - esp. 4 mm.
- ⑨ Celulosa Proyectada - esp. 0,10 m.
- ⑩ Listón de Madera de Pino - 2" x 2"
- ⑪ Papel Kraft - 500 g/m2
- ⑫ Entablonado de Machimbre de Madera de Pino - esp. 1/2"

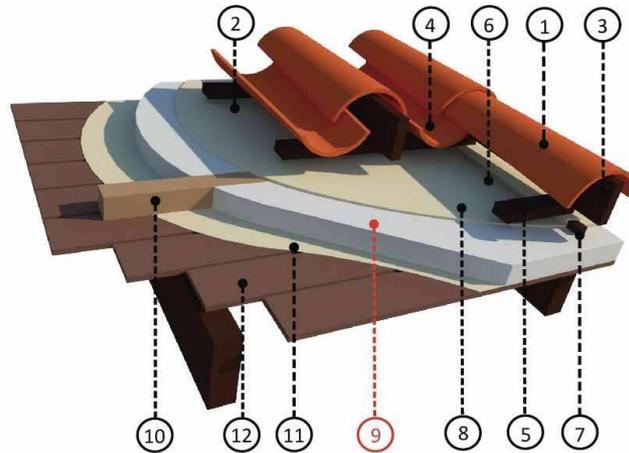


Figura 10: Perspectiva de detalle tecnológico de propuesta tipológica para cerramiento horizontal.

La Propuesta de diseño fue evaluada en relación a la transmitancia térmica entre la cara interna y externa del componente, tanto para las secciones opacas como para los puentes térmicos (es decir, los puntos del componente de cerramiento en que el aislante térmico es interrumpido y sustituido por algún otro material). Los valores obtenidos fueron luego cotejados con los niveles admisibles establecidos por la Norma IRAM 11605, considerando en este caso la ubicación de las construcciones en la subzona bioambiental "Ib", en la que se encuentran las ciudades de Corrientes y Resistencia (ámbito específico de desarrollo del trabajo de investigación).

### Resultados de Cálculos de Transmitancia Térmica según IRAM 11601

Coeficiente de Conductividad Térmica Teórico		Coeficiente de Conductividad Térmica Real	
Transmitancia Térmica Sección Opaca	Transmitancia Térmica Puente Térmico	Transmitancia Térmica Sección Opaca	Transmitancia Térmica Puente Térmico
<b>0,44 W/m<sup>2</sup>K</b>	<b>0,87 W/m<sup>2</sup>K</b>	<b>1,06 W/m<sup>2</sup>K</b>	<b>0,87 W/m<sup>2</sup>K</b>
Nivel según IRAM 11605		Nivel según IRAM 11605	
Verano	<b>B (medio)</b>	Verano	<b>excede Nivel C</b>
Invierno	<b>B (medio)</b>	Invierno	<b>excede Nivel C</b>
<b>NO APTO</b>		<b>APTO</b>	

Tabla 1: Valores comparativos de transmitancia térmica de propuesta tipológica para cerramiento horizontal.

Se exponen en la Tabla 1, por un lado, los valores obtenidos a partir del cálculo con el valor de conductividad térmica teórico y por otro, con el valor real obtenido a partir del ensayo. Asimismo se desarrolló la verificación de la aptitud de las propuestas respecto a lo que establece la Norma IRAM 11605 en relación a la relación de transmitancia térmica entre la sección opaca y el puente térmico (específicamente, que la transmitancia térmica correspondiente a un puente térmico no debe ser mayor

que el 50% del valor de la transmitancia térmica de la sección opaca. Si los puentes térmicos lineales se encuentran a una distancia entre sí menor o igual que 1,7m., este porcentaje debe reducirse al 35%).

Debido al hecho de que el único material que entre una y otra verificación varía es el aislante térmico de celulosa utilizado, en este caso, el valor de transmitancia del puente térmico no registra variaciones. Por otra parte, puede notarse claramente cómo el valor obtenido con la conductividad experimental, para la sección opaca, no solo implica que la resolución tecnológica propuesta exceda los niveles mínimos recomendados de transmitancia térmica que establece la normativa de habitabilidad vigente, (no encuadrándose así en ninguna categoría, ya que excede los valores fijados para el Nivel C, o “mínimo”), sino que, por otra parte, se invierte la lógica de sección opaca y puente térmico, pues el valor de transmitancia térmica de la primera es mayor que la del segundo, lo cual refuerza la idea de pérdida de calificación del material celulósico como aislante térmico. Por otra parte, esto tiene, como correlato, el efecto “positivo” referido a que la diferencia de transmitancia térmica entre sección opaca y puente térmico, en este caso, sí califica como “apta” según la relación entre sección del puente térmico y sección del muro opaco.

Para el diseño de una **Propuesta tipológica de cerramiento vertical** (Figura 11) se propuso trabajar con una mampostería de ladrillos comunes que funcione como muro portante. La terminación exterior se planteó con un revoque completo a la cal, y la interior, con medio tabique de placas de roca de yeso, montado sobre listones de madera de pino de 1” x 2”. En el intersticio de estas dos capas se propuso trabajar con el aislante celulósico, en un espesor de 5 cm., completando con una barrera de vapor de film de polietileno colocada entre el aislante y revestimiento interior.

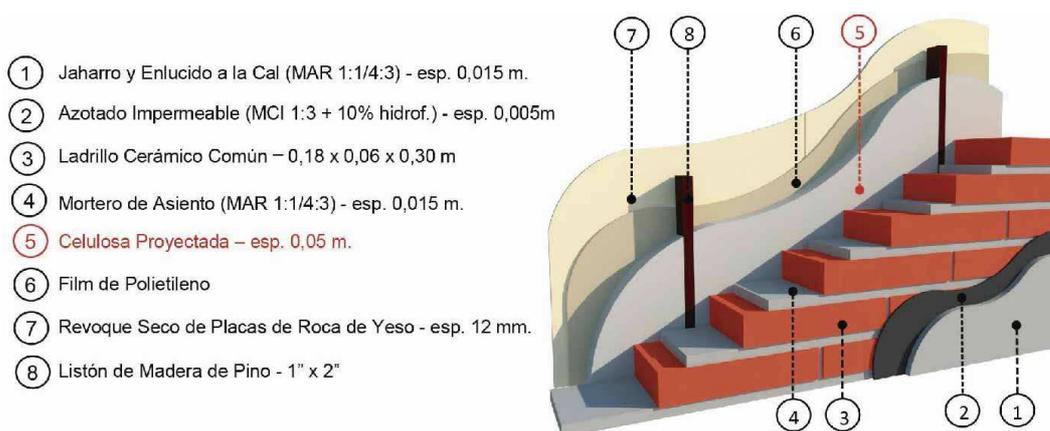


Figura 11: Perspectiva de detalle tecnológico de propuesta tipológica para cerramiento vertical.

Dada la naturaleza de la aplicación “proyectada” del material ofrecido comercialmente, que adquiere cohesión al momento de ser eyectado y humedecido por la lanza de proyección, el material podría aplicarse previo a la colocación de las placas de roca de yeso. No obstante, dichas condiciones de cohesión no podrían lograrse con el material producido artesanalmente en las condiciones expuestas, y por lo tanto debería volcarse en forma manual dentro de la cámara de aire una vez que la terminación interior del medio tabique ya haya sido ejecutada (pudiendo utilizarse para ello sopletes especiales y empleando una operativa similar al “insuflado”, técnica de aplicación del aislante celulósico no empleada en Argentina). Tanto la técnica como la propuesta tipológica se volverían así muy viables de aplicarse en la rehabilitación de construcciones existentes.

Al igual que en la propuesta de diseño antes estudiada, la presente fue evaluada en relación a la transmitancia térmica y prestando asimismo atención a la relación entre transmitancia térmica de sección opaca y la de puente térmico. Se muestran en la Tabla 2 los valores obtenidos a partir del cálculo con el valor de conductividad térmica teórico y real, a izquierda y derecha de la tabla respectivamente.

## Resultados de Cálculos de Transmitancia Térmica según IRAM 11601

Coeficiente de Conductividad Térmica Teórico		Coeficiente de Conductividad Térmica Real	
Transmitancia Térmica Sección Opaca	Transmitancia Térmica Puente Térmico	Transmitancia Térmica Sección Opaca	Transmitancia Térmica Puente Térmico
<b>0,53 W/m<sup>2</sup>K</b>	<b>1,56 W/m<sup>2</sup>K</b>	<b>1,77 W/m<sup>2</sup>K</b>	<b>1,56 W/m<sup>2</sup>K</b>
Nivel según IRAM 11605		Nivel según IRAM 11605	
Verano	<b>A (óptimo)</b>	Verano	<b>C (mínimo)</b>
Invierno	<b>B (medio)</b>	Invierno	<b>C (mínimo)</b>
<b>NO APTO</b>		<b>APTO</b>	

Tabla 2: Valores comparativos de transmitancia térmica de propuesta tipológica para cerramiento vertical.

De manera análoga a lo observado en el primer caso, la variación que sufre la transmitancia térmica de la sección opaca debido al remplazo del valor de conductividad teórica por el de conductividad real, no es registrada por el puente térmico, debido a que las capas homogéneas de su composición no sufren modificaciones. Puede reconocerse en este caso también la reducción de categoría que sufre la sección opaca, de niveles “A” (óptimos o recomendados) en verano y “B” (medios) en invierno, a niveles “C” (mínimos) para ambas estaciones, si bien en este caso la resolución tecnológica aún se encuadra en los niveles mínimos establecidos por la Norma IRAM 11605, no excediéndolos, como en la propuesta evaluada anteriormente. El fenómeno de inversión de sección opaca y puente térmico también puede reconocerse en la evaluación de este caso. Por otro lado, por cuestiones lógicas, la diferencia de transmitancia térmica entre sección opaca y puente térmico no puede exceder el 35% a favor del último para ajustarse a la normativa del IRAM, ya que la primera registra mayores valores de transmitancia térmica que el puente térmico mismo. Sin embargo, si de acuerdo a los valores obtenidos, la función de puente térmico y sección opaca se invirtieran, la tipología de cerramiento no resultaría apta y faltaría a los principios de la aislación térmica, pues el material de mayor desarrollo en el cerramiento sería también el de mayor coeficiente de transmitancia térmica.

### CONCLUSIONES

A partir de los resultados registrados, puede inferirse que los procesos de transformación y tratamiento de la materia prima para la producción del material aislante derivado de la celulosa serían mucho más complejos respecto a lo que describe la bibliografía a la que se tuvo acceso, demandando otras transformaciones físico – químicas que le otorguen mayor cohesión. Asimismo puede deducirse que, a pesar de la abundancia de la materia prima en el medio, un material celulósico que resulte apto para su uso como aislante térmico –en el sentido de lograr valores de conductividad que lo ubiquen en el rango de los aislantes térmicos- en la construcción de edificios, tal intervención físico-química, que implicaría muy posiblemente un cierto grado de industrialización, demandaría por ello una producción en instalaciones especiales de mayor complejidad.

Se reconoce, por otro lado, la importancia que representaría contar con una muestra del material que es ofrecido comercialmente en el contexto nacional para futuros ensayos, de manera de poder validar los estudios teóricos y las propuestas de aplicación de la tecnología en la construcción de la región NEA, ya que, lógicamente, las variaciones de los valores tomados como referencia para los diferentes estudios implican grandes modificaciones en los comportamientos de las diversas soluciones tecnológicas.

También se considera que la verdadera oportunidad de generalizar el empleo del material celulósico como aislante en la construcción regional se generaría con la instalación de industrias a nivel local y/o regional, que no solo aprovechen la materia prima producida en la región, sino que reduzcan las desventajas ambientales que significa el transporte de larga distancia del material, potenciando aún más su promoción como “ecológico” y “sustentable”.

## REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Aislantes Celulósicos S.A. (2014). Especificaciones Técnicas del Material ACP. Buenos Aires, Argentina.
- Alías, H. M. y Pilar, C. (2013). Uso Racional de la Energía URE y Análisis de Ciclo de Vida. Material Didáctico para la Cátedra Construcciones II. ITDAHU, FAU, UNNE. Resistencia, Chaco, Argentina.
- Arena, A. P. (2012). El Análisis de Ciclo de Vida. Una Metodología de evaluación de las consecuencias ambientales de la actividad humana. Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Mendoza
- American Society for Testing Materials (1993). **Norma Astm C177-85**. Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot Plate Apparatus.
- Cellulose Insulation Manufacturers Association (2014). *CIMA web site*. Disponible en <http://www.cellulose.org/index.php>
- Guidi, G. (1986). Transición del Calor, 2ª edición. Editorial Nueva Librería, Buenos Aires, Argentina.
- Hermida Rodríguez, Manuel (2013). La Fibra de Celulosa como Aislante en la Construcción. (Master en Rehabilitación Arquitectónica). Nuevos Materiales y Sistemas, Universidad de la Coruña. La Coruña, España.
- InnoDämm (2014). Zellulose Einblasdämmstoff. Prosepecto Comercial. *InnoDämm web site*. Disponible en <http://www.innodaemm.de/daemmstoffe/zellulose.html>
- Instituto Argentino de Normalización (1971). **Norma IRAM 11559**. Acondicionamiento térmico. Determinación de la resistencia térmica y propiedades conexas en régimen estacionario. Método de la placa caliente con guarda. Buenos Aires, Argentina.
- Instituto Argentino de Normalización (IRAM). Normas Técnicas Nacionales vigentes de Habitabilidad Higrotérmica (**Normas IRAM 11601 – 11603 – 11605 – 11625 – 11630**). Buenos Aires, Argentina.
- Isachenko, V. P. (1973). Transmisión del Calor. Editorial Marcombo, Barcelona.
- Manrique Valadez, J. A. (2002). Transferencia del Calor, 2ª edición. Editorial Alfaomega, Distrito Federal, México.
- Meil, J. y Salazar, J. (2009). Prospects for carbon-neutral housing: the influence of greater wood use on the carbon footprint of a single-family residence. *Journal of Cleaner Production*, 17, 1573-1571.
- Organización Internacional de Normalización (ISO) (1997): **Norma N° 14040**. Gestión Ambiental. Análisis de Ciclo de Vida. Principios y Estructura.
- Zabalsa Bribián, I. (2010). Adaptación de la metodología del análisis de ciclo de vida para la evaluación y la mejora del impacto energético y ambiental de la edificación en España. (Tesis de Doctorado). Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza, España.

**ABSTRACT:** The results of the testing of the actual thermal conductivity of a test specimen of projected cellulose by the method of "hot plate apparatus" are disclosed, including the experimental production of the test material. In order to validate the theoretical studies and verifications that were made on the use of building materials derived from cellulose as insulation, pursuing his widespread application in the regional constructions of the Northeast Argentina. The results of the assay, very different compared to the theoretical tabulated values, were applied to hygrothermal checks of the different construction technologies that were analyzed, evaluating their performance and recording significant changes in their thermal performance. The study shows that artisanal production of such material is not technically possible. Specific samples of the materials commercially offered, which, besides, are not manufactured domestically, would be necessary to analyze the true feasibility of its application.

**Keywords:** sustainability, newsprint, heat resistance, experimental production and testing.