



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstruccion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile  
Chile

MUÑOZ, C.; BOBADILLA, A.

Simulación y evaluación de puentes térmicos Soluciones constructivas típicas aprobadas por la Norma  
Térmica para elementos verticales en estructura de madera y metálicos en la Zona 4 Simulaciones  
con Therm y Usai y evaluación con Método de Cámara Térmica

Revista de la Construcción, vol. 11, núm. 2, agosto, 2012, pp. 92-111

Pontificia Universidad Católica de Chile

Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127625512003>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

*Simulation And Evaluation  
Of Thermal Bridges*

*Typical constructive solutions  
approved by the Thermal Norm for  
vertical elements in structure of  
wood and metalists in Zone 4.  
Simulations with Therm and Usai  
and evaluation with Method of  
Thermal Camera*

# **Simulación y evaluación de puentes térmicos Soluciones constructivas típicas aprobadas por la Norma Térmica para elementos verticales en estructura de madera y metálicos en la Zona 4 Simulaciones con Therm y Usai y evaluación con Método de Cámara Térmica**



## **Autores**

MUÑOZ, C. Universidad del Bío-Bío,  
cmunoz@ubiobio.cl  
Concepción, Chile

BOBADILLA, A. Universidad del Bío-Bío,  
abobadil@uc.cl  
Concepción, Chile

**Fecha de recepción** 17/04/2011

**Fecha de aceptación** 19/07/2012

## Resumen

Los puentes térmicos generan una serie de patologías dentro de la construcción que son difícilmente reparables una vez ejecutadas. Los problemas derivados por las pérdidas de calor; condensaciones superficiales; aparición de moho y deterioro de las estructuras son los efectos más comunes de verificar en terreno, sin embargo los indirectos tienen que ver con problemas de salud de los usuarios y los costos derivados de la mantención y de pérdida de energía. El puente térmico es un problema

de diseño que se agrava en el proceso constructivo, por ello, analizar su comportamiento en la etapa de desarrollo asegura una mejor prestación de la envolvente. La normativa chilena es débil en su precisión respecto a la manera de abordarlos. Este trabajo pretende definir una metodología de análisis de las soluciones constructivas utilizando para ello métodos teóricos (simulaciones) y métodos experimentales (cámara térmica) para evaluar la pertinencia del uso de un factor como referente de diseño.

**Palabras clave:** Puentes Térmicos; Valor U; Simulación Térmica; Therm; Usai; Zona 4 - Chile

## Abstract

*The thermal bridges generate a series of pathologies within the construction that hardly repairable are once executed. The problems derived by the losses of heat; superficial condensations; appearance of mould and deterioration of the structures is the effects most common to verify in land, nevertheless the indirect ones have to do with problems of health of the users and the costs derived from the maintenance and of energy loss. The thermal bridge is a design problem that worsens in the*

*constructive process, for this reason, to analyze its behavior in the development stage assures one better benefit the surrounding one. The Chilean norm is weak in its precision with respect to the way to approach them. This Thesis tries to define a methodology of analysis of the constructive solutions using for it theoretical methods (simulations) and experimental methods (thermal camera) to evaluate the relevance of the use of a referring factor.*

**Keywords:** Thermal Bridge; U Coefficient; Thermal Simulation; Therm; Usai; Zone 4 - Chile.

## 1. Introducción:

Nuestro país ha generado propuestas que apuntan al mejoramiento en el uso de la energía como política para asegurar el crecimiento económico y social por tres líneas estratégicas principales: el incremento en el volumen de la producción de energía; la ampliación de la matriz energética con nuevas fuentes (entre las que se incluyen las renovables) y mejorar la eficiencia y el ahorro en el uso de la energía.

En las edificaciones, uno de los problemas comunes y evitables son los puentes térmicos que afectan su eficiencia térmica, pero también son un agente potencial de patologías que deterioran la calidad de vida de las personas. Evitarlos pasa por su análisis desde la etapa de diseño hasta la supervisión de su correcta ejecución.

La Normativa actual en Chile; los Programas de Cálculo de simulación de transmitancia térmica y los fabricantes de materiales de construcción tienden a despreciarlos, dejándolos como dato por defecto (un valor o factor) lo cual evita su análisis como detalle constructivo, no existiendo un control entre el valor U de la solución y el valor U de la zona más débil o puente térmico llevando a ejecutarlas como soluciones que traen consigo pérdidas de energía, peligro de condensaciones y aparición de moho afectando con ello la mantención de la edificación, la salud y el confort de los ocupantes. El principal problema es que, una vez construida la envolvente, estos difícilmente pueden ser corregidos y por ello, intervenir el puente térmico en su etapa de diseño permite generar su ruptura o minimizar sus efectos, asegurando así una edificación saludable que aporta, además, a los propósitos de la sociedad chilena al mejorar la eficiencia energética de sus edificios.

### 1.1. Objetivos de la Investigación

#### 1.1.1. Objetivo General

Comparar soluciones constructivas de elementos verticales en estructura soportante de madera y metálica aprobadas por la Norma Térmica y graficadas a través del Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, para evaluarlas teórica (simulación con software Therm y Usai) y experimentalmente (probetas en cámara térmica) y a partir de ello, proponer optimizaciones (rotura de puente térmico) definiendo una relación (proporción) entre el U de mayor valor y el U de menor valor de la solución constructiva y/o entre las temperaturas superficiales registradas, buscando la menor diferencia al utilizar los mismos elementos o

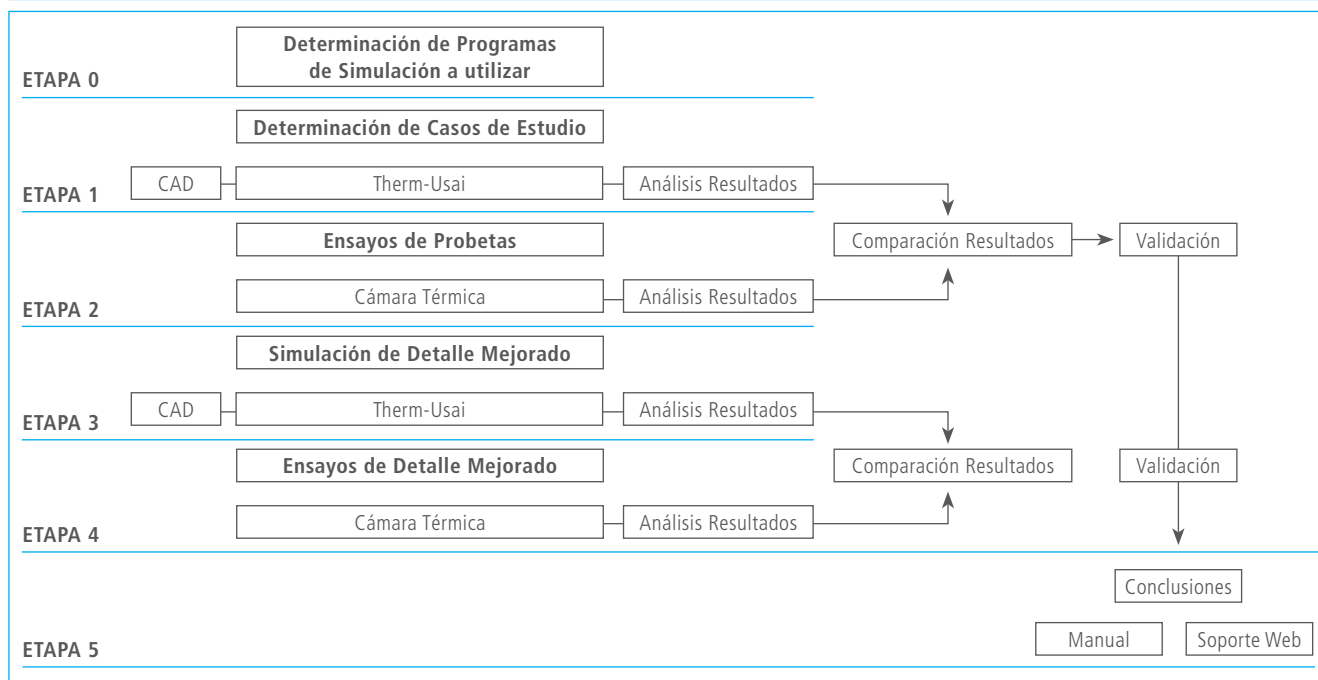
con la menor cantidad de elementos nuevos (solución por diseño).

#### 1.1.2. Objetivos Específicos

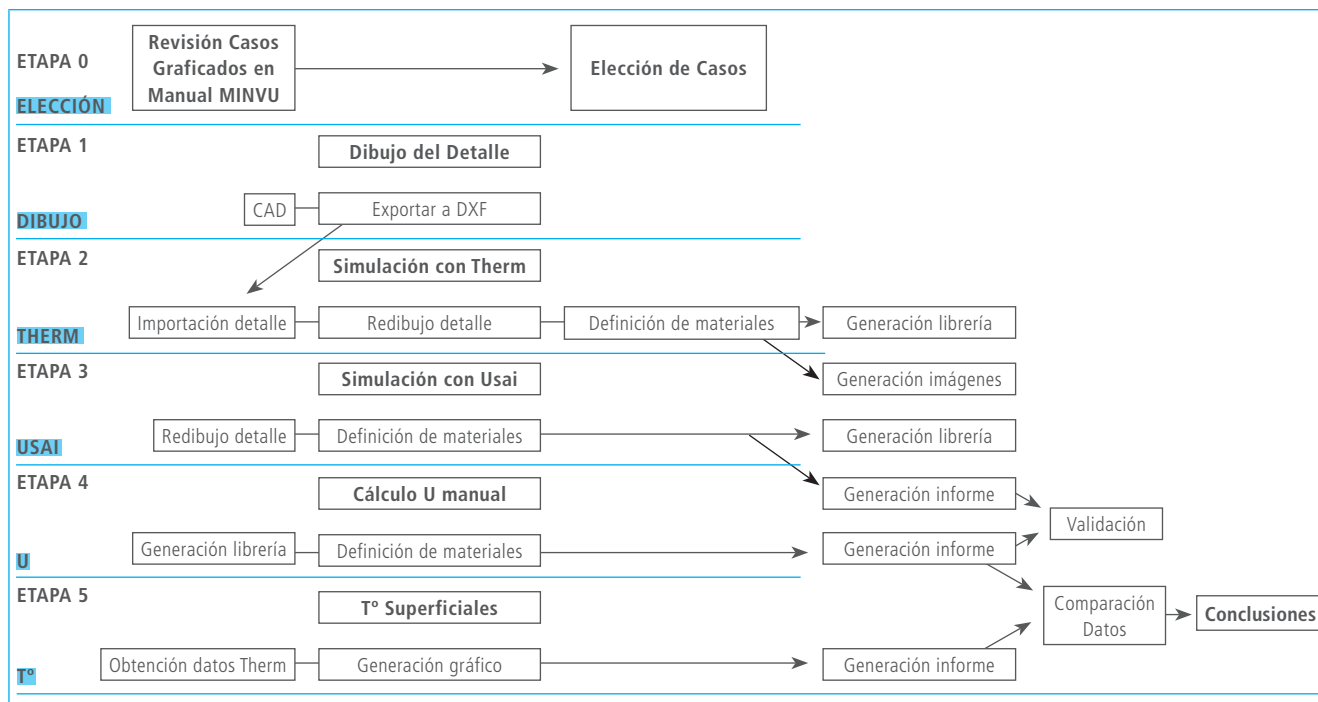
- 1.1.2.1. Comparar valores U y Temperaturas superficiales registradas de las soluciones iniciales y mejoradas para obtener una relación entre las zonas de mayor y menor transmitancia térmica.
- 1.1.2.2. Definir una pauta de evaluación de una solución constructiva que considere el análisis del detalle constructivo para generar la rotura de puente térmico usando un método teórico (Therm y Usai) y un método experimental (probeta) validando así la simulación.
- 1.1.2.3. Generar una librería base de materiales locales para ser utilizada con los programas de simulación Therm y Usai, facilitando su utilización en medios académicos y profesionales locales.
- 1.1.2.4. Utilizar simulaciones que permitan visualizar el comportamiento térmico e higrotérmico de una solución constructiva para tomar conciencia de la aparición de puentes térmicos, fomentando la prevención o atenuación de ellos en la etapa de diseño.

## 1.2. Visión Global de la Metodología utilizada:

**Fig. 001 - Cuadro Resumen Metodología General**



**Fig. 002 - Cuadro Resumen Metodología Estudio de Casos**



## 2. Desarrollo

### 2.1. Marco Teórico:

En el contexto nacional, El Ministerio de Vivienda y Urbanismo implementó para cumplir con la Reglamentación Térmica de Viviendas la utilización de un método de simulación basado en la Herramienta de Certificación del Comportamiento Térmico de los Edificios, la CCTE\_CL ([http://www.minvu.cl/opensite\\_20071214162133.aspx](http://www.minvu.cl/opensite_20071214162133.aspx)).

Esta, asigna valores por defecto a partir del tipo de puente térmico y de la información de los cerramientos a los que se adosa según la NCh 853. El cálculo se hace en base al cálculo de Transmitancia Térmica Lineal. Se asume así que el valor se pondera según los valores arrojados por los diferentes tipo de puente térmico presentes (1).

Este criterio planteado desprecia los puentes térmicos puntuales y valoriza los lineales dado que son los más perjudiciales tanto en lo económico como en salud y confort.

El Manual de Aplicación de la Reglamentación Térmica (2) propone visualmente una serie de soluciones constructivas, pero vuelve a plantear los puentes térmicos sobre la base de un criterio. Son los fabricantes quienes presentan en sus documentos técnicos una serie de soluciones basadas en estos criterios pero demostradas todas ellas para el paquete constructivo, despreciando el problema del puente térmico. De esta manera, la responsabilidad queda en el diseñador o ejecutor de la obra.

En el contexto internacional, una serie de investigaciones, normativas y propuestas tratan de avanzar y demostrar los cuidados que se deben tener en el proceso de diseño para evitar las negativas consecuencias, tanto puntuales como lineales.

En el caso español, la herramienta LIDER CTE (<http://www.codigotecnico.org/index.php?id=33>) mantiene un criterio y valores por defecto para los puentes térmicos basado en una serie de detalles constructivos tipo que arrojan valores específicos para cada uno de los presentes en la obra a evaluar. Si los valores que se entregan no son los que se conocen para el detalle analizado, estos deben ser demostrados por otro método (simulación o ensayo) y se permite validar un valor U nuevo (Manual Líder, pág. 170). En este caso, el programa es más flexible porque no solo da valores asociados a detalles constructivos, sino que además fomenta la búsqueda de otras soluciones validadas por otros métodos.

En Dinamarca se ha implementado un cálculo basado en los mismos criterios que asume CCTE\_CL donde los puentes térmicos son definidos por sus pérdidas lineales o puntuales y que su método de cálculo es bidimensional o tridimensional (ISO 14683). Basados en el estándar de las ISO 10211-1 y 10211-2, se profundiza en los modelos de cálculo, sin embargo ellos han aprendido a adaptarlas a sus necesidades locales. El estudio concluye que al incorporar cálculos más exactos en la evaluación de los puentes térmicos, se ha logrado ajustar los criterios de diseño y con ello se ha reducido la pérdida de calor entre 10% a 50%, especialmente en muros y alrededor de puertas y ventanas. Definen que la base está en el detalle constructivo y en la adecuada aislación de la obra. Basado en 3 tipologías de puentes térmicos: Valor bajo (vivienda pasiva); Valor medio (diseño típico) y Valor alto (Estructura con muchos puentes térmicos) y definen 3 niveles de U: Valor bajo (pasivo); Valor medio (la normativa) y Valor alto (asociado a edificios locales de los 70). Esto permite generar un análisis y porcentajes asociados a las mayores zonas de pérdida de energía (ventanas) basados en la realidad local, comparando lo existente, la normativa y lo más eficiente realizado localmente. El estudio trae una mirada más realista a las posibilidades tecnológicas locales. Se realiza basado en las ISO y apoyado en simulaciones, las que se hacen con métodos bidimensionales considerando que el análisis tridimensional no es necesario para el caso de los puentes térmicos (3).

En un estudio realizado en Grecia, cimentado en las construcciones de doble muro de ladrillo, arrojaron resultados esperados, donde los puentes térmicos eran los principales responsables de las pérdidas de calor. Concluyen que la normativa es deficiente en estos temas y que la falta de reglamentación afecta fuertemente al medio ambiente, dadas las demandas de enfriamiento y calentamiento que sufren en ese país. Para demostrar y apoyar sus datos, realizan simulaciones con TRSYS, programa de análisis bidimensional, y se incorpora HVAC para sumar los aportes de los sistemas de acondicionamiento. Este análisis los llevó a ver la enorme discrepancia que hay entre los resultados basados en los métodos tradicionales que tienden a la estandarización *versus* el cálculo detallado que aporta un análisis 3D donde además se evalúa el comportamiento de los flujos de calor (4).

Un estudio realizado en Francia planteó la necesidad de evaluar los cálculos numéricos *versus* las simulaciones 2D de puentes térmicos utilizando el programa BISCO. Se concluyó que las diferencias estaban en el orden de un 5%. De esta manera valida el uso de los programas 2D para cálculo de puentes térmicos, considerándolo una herramienta útil y de rápida verificación en el proceso de diseño (5).

En Argentina se realizó un estudio que analizó a través de simulaciones con un programa 2D, edificios existentes en los cuales se sabía que existían puentes térmicos. Se demostró la situación anómala, pero también se realizó una propuesta de mejora donde no solo se planteó un detalle constructivo, sino que se propuso una ecuación matemática para determinar si se resolvía el problema por espesor o por conductividad térmica. Así, el dato que se consideraba como constante determinaba la estrategia a utilizar (6).

El estudio de Regodón y Tenorio Ríos, del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, analiza los puentes térmicos por varios métodos numéricos y modelos bidimensionales digitales, considerando los demás inexactos o de interminables mediciones. Se centran en la problemática de la pérdida de calor, pero también en los problemas de humedad. Por ello establecen dos criterios para abordar los detalles que contienen puentes térmicos:

1. "Que el impacto de energía sea bajo, es decir, que el valor global de U del elemento constructivo (incluido el efecto del puente térmico) sea menor que un cierto valor máximo (exigido por ejemplo por la normativa nacional) y/o que el efecto del puente térmico no suponga más de un porcentaje dado del total de la pérdida de calor a través del elemento constructivo".
2. "Que el riesgo de condensaciones sea mínimo, es decir, que el factor de temperatura sea superior al valor crítico (este valor debería determinarse a nivel nacional)".

Finalmente, plantean el concepto de *robust detail* definido por la normativa inglesa.

El Detalle Robusto es "aquella solución habitual, realizada con materiales y productos comunes y duraderos, basada en las técnicas y práctica industrial existente, concebida de tal forma que minimiza el riesgo de condensaciones, el riesgo de penetración al agua, las pérdidas extra de calor, exceso de infiltraciones, etc. Por tanto una solución constructiva es "robusta" cuando incorpora otros requisitos adecuados a la habitabilidad de los edificios y no solo atiende a aspectos higrorémicos" (7).

El estudio del Belgian Building Research Institute (BBRI), Bélgica, realiza un exhaustivo análisis de los principales programas de evaluación de puentes térmicos 2D y 3D. Esta revisión permite tener una visión comparativa de las capacidades y prestaciones de

cada uno, además del alcance de sus resultados. Se plantea aquí que durante las últimas 2 décadas se ha avanzado en esta área, haciéndolos más precisos y de interfase más amigable. Sin embargo, muchos de ellos presentan errores al intentar transformarlos en herramientas válidas. Ello porque la evaluación experimental se considera la forma más adecuada de certificación. Por ello, los resultados de estos procesos de simulación son sometidos a ajuste de modo de hacerlos válidos, lo que no ha evitado que sean considerados como buenas alternativas de análisis y verificación previa, por su capacidad y flexibilidad de incorporar materialidades y condiciones ambientales internas y externas sumado a los esfuerzos por validar sus resultados con las Normativas Vigentes, principalmente la ISO 10211:2007 que es específica de los Puentes Térmicos, y las ISO 6946, EN 673, EN ISO 10077-2 de capas de aire y cavidades, e ISO 10456 de Conductividad Térmica (8).

De ello, ambas herramientas elegidas para este trabajo, son parte del listado de los productos gratuitos los que, obviamente, son limitados en comparación con los comerciales. Por ello es pertinente incorporar otros métodos complementarios que ayuden a alcanzar los objetivo planteados.

## 2.2. Metodología:

### ETAPA 0

#### 2.2.1. Determinación de el o los programas de simulación a utilizar

La elección se hizo en base a sus posibilidades de utilización de costos asociados; curva de aprendizaje; flexibilidad de incorporar nueva información (información local de materiales) y el tipo de resultados obtenidos.

Bajo esos criterios se decidió utilizar el programa **Therm** <http://windows.lbl.gov/software/therm/therm.html> y el programa **Usai** [http://www.usaisoftware.com/en/index\\_en.html](http://www.usaisoftware.com/en/index_en.html) dado que ambos permiten ampliar sus librerías, pudiendo incorporar materiales locales y, en el caso de Usai, simular el elemento constructivo utilizando los datos del clima local dado que se vincula a la librería de **Meteonorm** <http://www.meteonorm.com/pages/en/meteonorm.php>.

Otro aspecto valioso en ambos es su disponibilidad de descarga gratuita desde la red lo que permitiría mayores posibilidades de masificarlos como herramientas válidas para simular soluciones constructivas locales.


## ETAPA 1

### 1. Determinación de los casos de estudio

De la revisión del Manual de Aplicación de la Norma Térmica (9) se generó una selección de los casos a simu-

lar considerando aquellos aplicables a la zona 4 y que poseyeran estructura heterogénea (Fig. 003) ya sea en base a una estructura de madera o una metálica y considerando que esta es parte de una solución ya masificada (solución típica) y su factibilidad de realizar una probeta de ella para someterla al ensayo en la cámara térmica.

**Fig. 003 - Ejemplo caso elegido**



MINVU - DITEC  
LISTADO OFICIAL DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS PARA ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO

EDICIÓN 006

FECHA: AGOSTO, 2009

**E6**

<b>Código</b> <b>1.2.M.C15</b>	Muro Tabique perimetral estructura metálica con aislación térmica de lana mineral y revestida con placa Permanit de espesor 15 mm
-----------------------------------	---

A. Único valor de Resistencia (Rt) y Transmitancia (U) Térmica para la solución constructiva

RESISTENCIA TÉRMICA (Rt):	<b>1.43</b> (m <sup>2</sup> *K/ W)	TRANSMITANCIA TÉRMICA (U)	<b>0.70</b> (W/m <sup>2</sup> *K)
---------------------------	------------------------------------	---------------------------	-----------------------------------

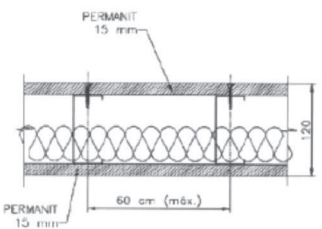
B. En caso que se modifique el espesor del material aislante manteniendo el resto de la configuración constructiva:

	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7
Rt (m <sup>2</sup> *K/ W)	----	----	----	----	----	----	----
U (W/m <sup>2</sup> *K)	----	----	----	----	----	----	----
Espesor Aislante (mm)	----	----	----	----	----	----	----

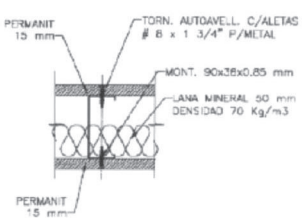
Descripción de la Solución Constructiva	Genérico	----	Marca Comercial	<b>X</b>
<p>Elemento constructivo conformado por montantes de acero galvanizado de 90 x 38 x 0,85 mm, distanciados entre ejes cada 60 cm y dos soleras de 92 x 30 x 0,85 mm. Esta configuración está revestida por ambos lados con una placa "Permanit" de espesor 15 mm. Las fijaciones de las placas a la estructura se han colocado a un distanciamiento de 30 cm entre sí. En el interior de esta estructura quedan espacios libres, los cuales se han rellenado con una colchoneta de Lana Mineral de 50 mm de espesor y densidad 70 kg/ m3.</p> <p>Los valores de U y RT consideran los puentes térmicos.</p>				

Forma de cumplir con las exigencias				Densidad material aislante	Institución	Vigencia
Certificado de ensaye	----	Cálculo (NCh 853)	<b>X</b>	70 kg/m3.	Sociedad Industrial Pizarreño	Diciembre de 2011

**Corte:**



**Detalle (opcional)**





## 2. Dibujo en CAD del detalle constructivo

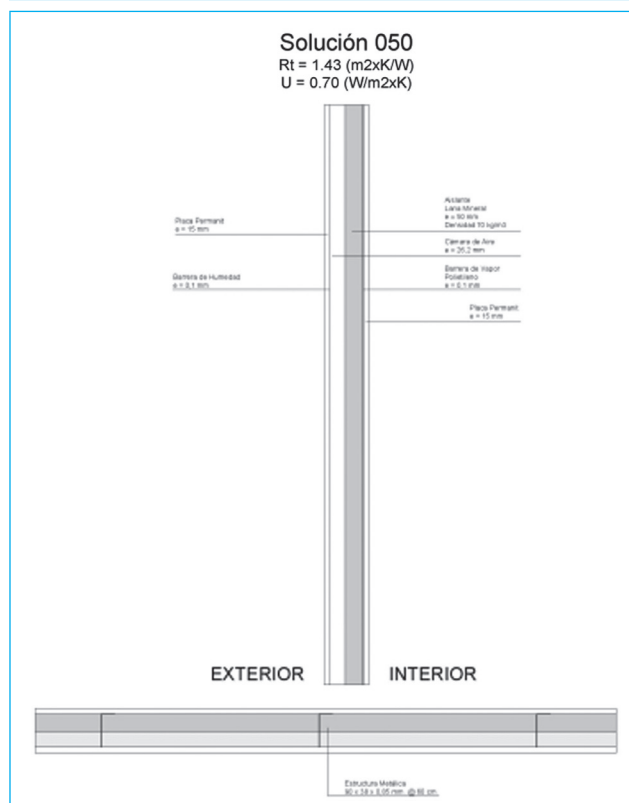
Dado que Therm (10) reconoce los archivos dxf como base para su dibujo, este debe cumplir dos condiciones:

1. Estar separado en capas por material de modo que pueda considerar aristas independientes cuando dos materiales son tangentes.
2. Ir solo en líneas o polígonos, sin textos ni cotas.

Por ello, se generaron 3 archivos:

1. Cad completo con cotas y textos explicativos (Fig. 004).
2. Imagen del dibujo completo en formato jpg.
3. Cad en formato dxf separando cada material por capa y eliminando textos y cotas.

Fig. 004 - Ejemplo CAD

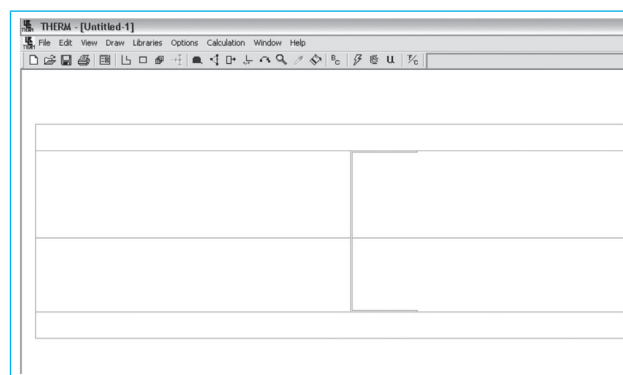


## 3. Exportación a simulador Therm

Los archivos en formato dxf se pueden “calcar” usando el documento base como referencia (Fig. 005).

Una vez redibujado se determina el sentido en el que se encuentra (planta o corte) y las condiciones de borde, de manera de definir el sentido del flujo térmico.

Fig. 005 - Redibujo en Therm

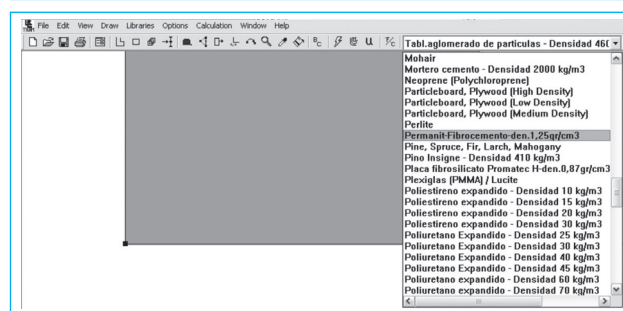


## 4. Incorporación de datos de materiales a librería base

Therm permite ampliar la librería de materiales y para ello se utilizó la base de materiales del programa de Certificación CCTE.

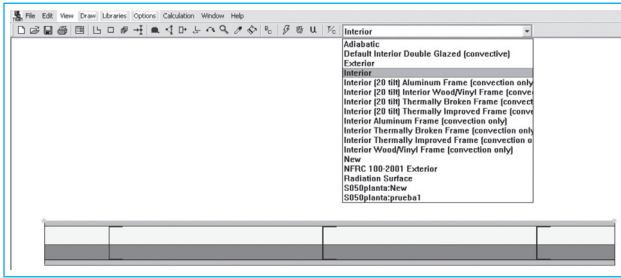
Con la librería actualizada, se procedió a incorporar a cada elemento constructivo su material especificado. (Fig. 006).

Fig. 006 - Asignación de material local



Para las condiciones de borde, se utilizó el método simplificado sugerido por el programa utilizándose 20 °C para el interior y 0 °C para el exterior. Para el coeficiente de film, se considera el inverso a la resistencia superficial (Rse y Rsi).

**Fig. 007 - Asignación de Condiciones de Borde**

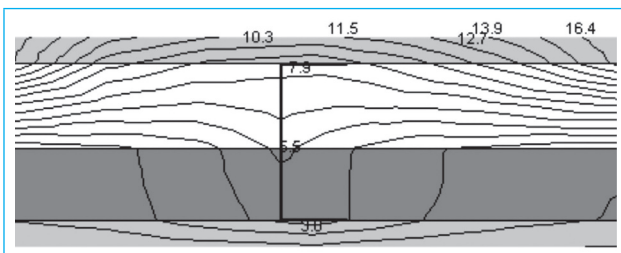


## 5. Simulación

La simulación arroja como resultado imágenes y datos de diferente tipo:

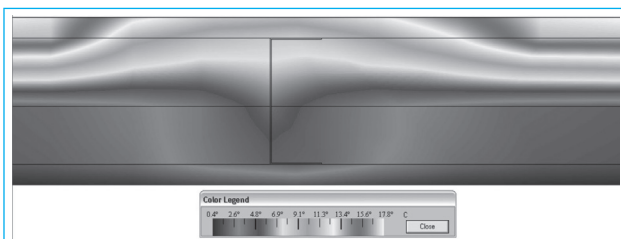
1. *Isotermas*: muestra las líneas de igual temperatura a lo largo del detalle. Estas se deformarán más si existen mayores discontinuidades en los materiales tanto por forma como por conductividad.

**Fig. 008 - Isotermas**



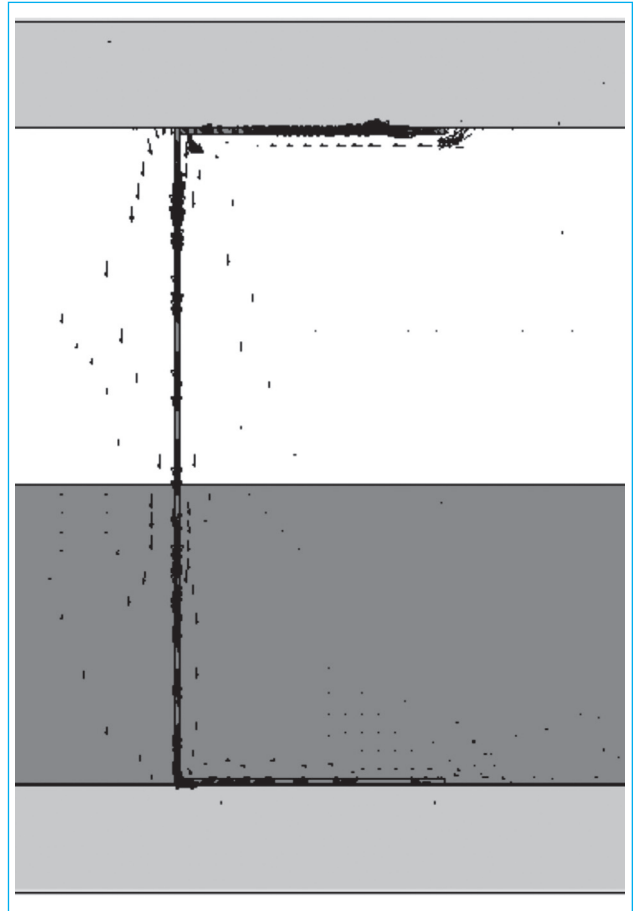
2. *Flujo de calor en infrarrojo*: Muestra en colores un espectro de temperaturas en relación a una escala visual la cual se despliega al generarse esta gráfica. Los colores más cálidos (rojos, anaranjados y amarillos) mostrarán las zonas calientes y los fríos (azules y violetas), las zonas frías.

**Fig. 009 - Infrarrojo**



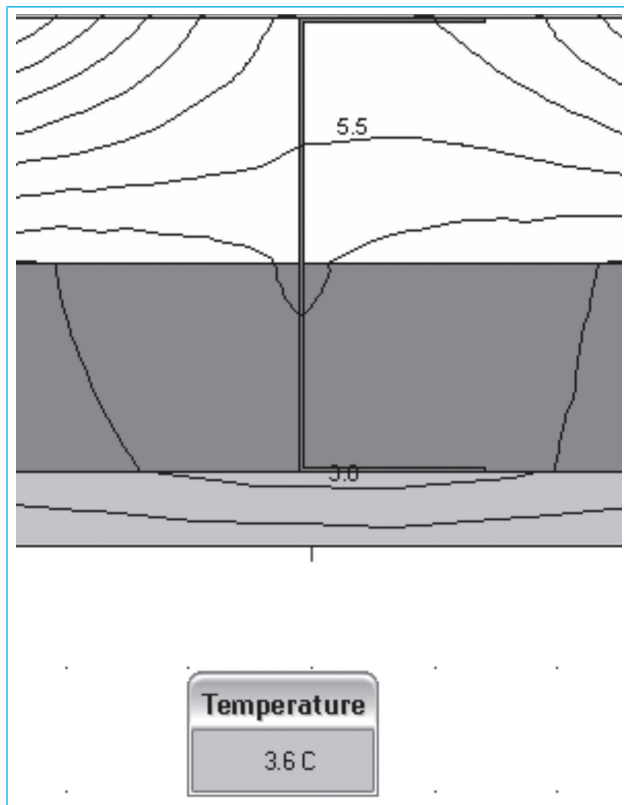
3. *Flujo de vectores*: muestra con vectores, el flujo de calor.

**Fig. 010 - Vectores**



4. **Temperaturas:** al setear el cursor, al colocarse sobre alguna parte del dibujo arroja la temperatura en ese punto. Con este procedimiento se obtuvo las temperaturas superficiales.

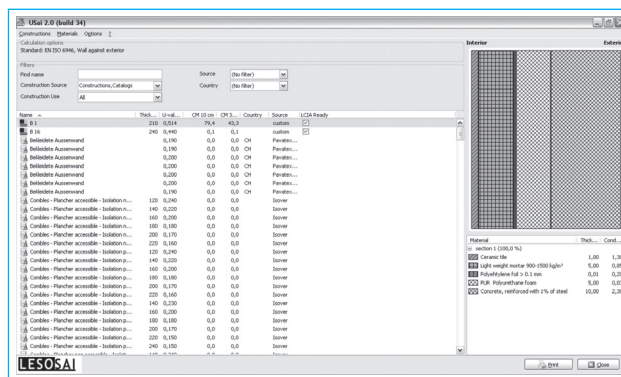
Fig. 011 - Temperaturas en cursor



## 6. Desarrollo de detalles con Usai

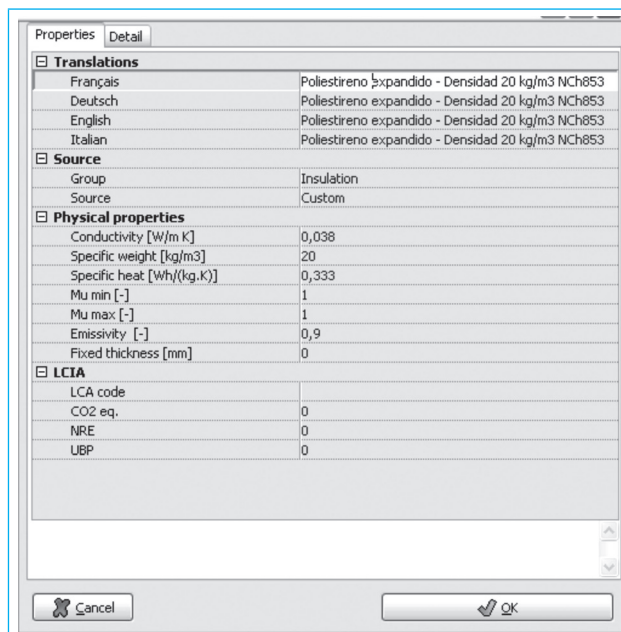
Usai no requiere del dibujo cad base, pero sí la disposición y especificación de los materiales de cada elemento. La definición de las condiciones locales se hace utilizando la base climática de Meteonorm. Una vez vinculados esos datos, los detalles son analizados según variantes locales anuales considerando sus temperaturas y humedad relativa.

Fig. 012 - Ventana Usai



Para los materiales locales, estos se incorporaron uno a uno, utilizando la base del programa de certificación CTE para obtener los valores de conductividad térmica y calor específico de cada material. Para el valor del calor específico, este debió ser convertido a la unidad del programa ya que utilizaba una diferente a la chilena.

Fig. 013 - Asignación de Propiedades de materiales



Al construir el detalle, este va actualizando los datos de su valor U y el valor de la Resistencia Térmica de

la solución de modo que no pasa por un proceso de cálculo separado de la construcción. Al finalizar, el programa puede generar un reporte para el detalle analizado lo que arroja datos de geometría; comportamiento térmico e higrotérmico y un análisis mes a mes del riesgo de condensación.

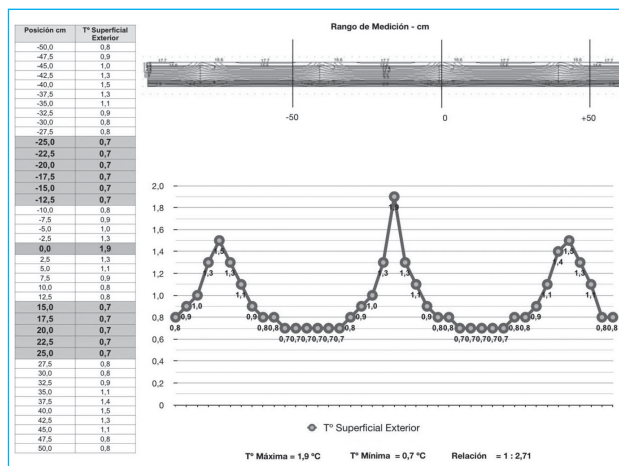
## 7. Análisis de los resultados

Con Usai se obtuvieron los valores U de las partes con y sin puente térmico por separado y para validarlos se comparó con los obtenidos utilizando el método de cálculo manual (planilla de cálculo que incorporó la fórmula que define la NCh853).

Fig. 014 - Planilla de Cálculo

<b>CASO 04</b>	
Cálculo U - Solución 005	
<b>Zona sin puente térmico</b> Muro Hormigón Armado, e = 10 cm, y Aislación de Poliestireno Expandido de e = 20 mm, densidad 10 kg/m <sup>3</sup> . Cámara de aire e = 20 mm, YessoCartón e = 15mm.	
Rmuro =	Rae + $\frac{e1}{\lambda1} + \frac{e2}{\lambda2} + \frac{e3}{\lambda3} + \frac{e4}{\lambda4} + Rai$
Rmuro =	0,12 + $\frac{0,1}{1,63} + \frac{0,020}{0,043} + \frac{0,164}{0,26} + \frac{0,015}{0,05} + 0,05$
Rmuro =	0,12 + 0,0613 + 0,465 + 0,164 + 0,058 + 0,05
Rmuro =	0,92      Exp.Muro = 165
U1 =	$\frac{1}{Rmuro} = \frac{1}{0,92} = 1,09$
<b>Zona con puente térmico</b> Muro Hormigón Armado, e = 10 cm, Listón Madera Pino de e = 50 mm, YessoCartón e = 15mm.	
Rmuro =	Rae + $\frac{e1}{\lambda1} + \frac{e2}{\lambda2} + \frac{e3}{\lambda3} + Rai$
Rmuro =	0,12 + $\frac{0,1}{1,63} + \frac{0,050}{0,104} + \frac{0,015}{0,26} + 0,05$
Rmuro =	0,12 + 0,061 + 0,481 + 0,058 + 0,05
Rmuro =	0,77      Exp.Muro = 165
U2 =	$\frac{1}{Rmuro} = \frac{1}{0,77} = 1,30$
Sup. total =	1,8 x 1,8 = 2,66 m <sup>2</sup>
Sup. U2 =	0,05 x 1,600 = 0,08 m <sup>2</sup>
	0,05 x 0,050 = 0,0025
Sup. U2 =	0,4575 m <sup>2</sup>
Sup. U1 =	2,1025 m <sup>2</sup>
2,66 =	$\frac{2,1025}{x} = x = \frac{210,25}{2,66} = 82,13 \%$
Sup. U1 =	82,13 %
Sup. U2 =	17,87 %
U =	0,894496 + 0,232 = 1,13 ponderado

Fig. 015 - Gráfico de Temperaturas Superficiales



Estos valores aportaron una nueva relación entre el punto de mayor y el de menor pérdida de calor.

## ETAPA 2

### 1. Determinación de 2 (dos) casos de estudio a construir (probetas)

Fueron elegidos considerando relaciones mayores entre los valores U y las temperaturas superficiales y donde uno fuese en base a estructura de madera y el otro de estructura metálica.

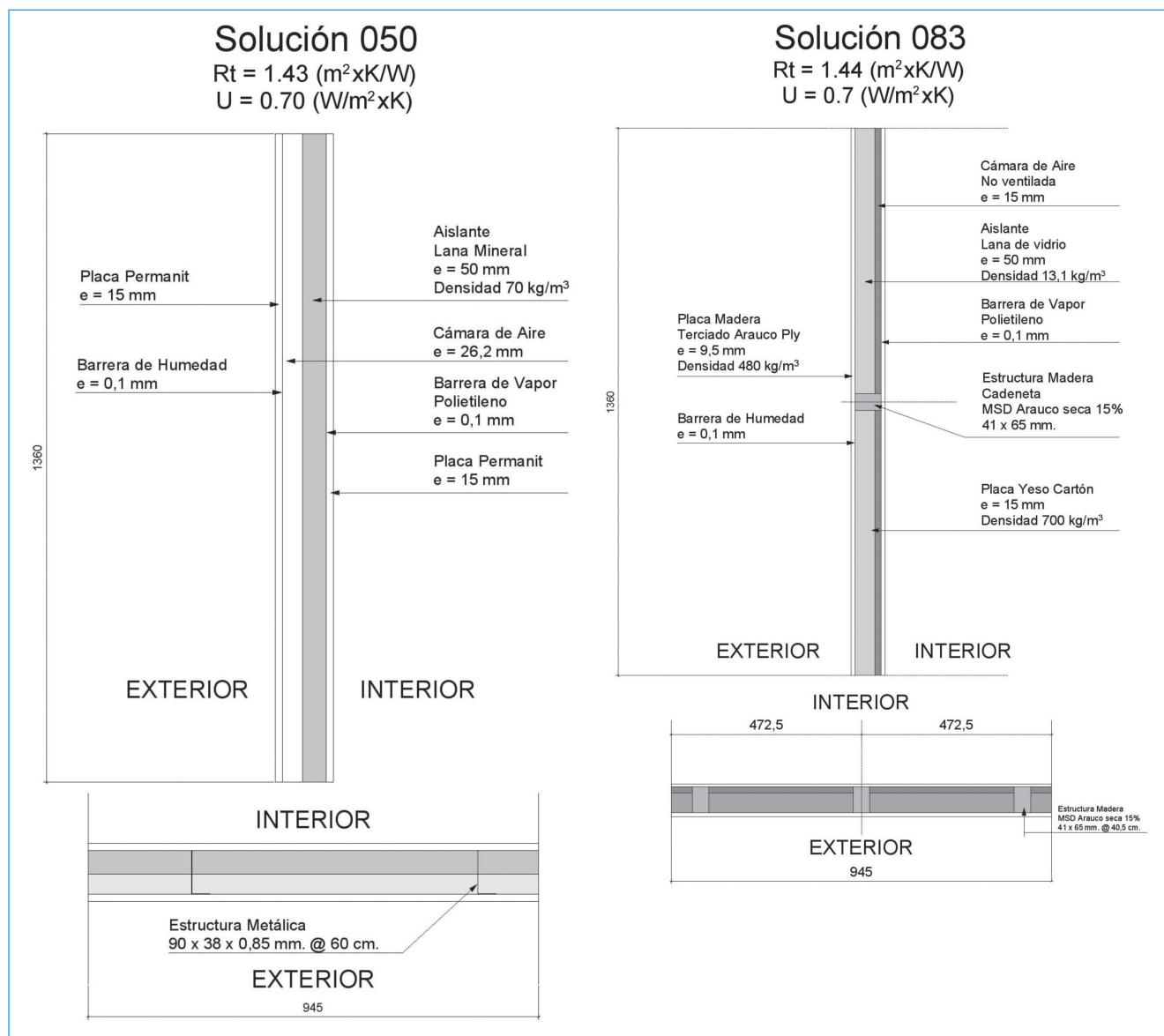
De estas planillas se obtuvieron los valores por separado y los ponderados de cada detalle.

Comparar los valores definió una relación entre la zona de mayor y menor U.

Sin embargo, se debió hacer un nuevo ejercicio de comparación de datos dado que las diferencias entre valores U no arrojaban claridad ante la pérdida de calor que es, en definitiva, el problema del puente térmico.

Para ello se utilizó Therm, construyendo una grilla de 2,5 cm por la superficie exterior del muro definiendo como punto inicial el de mayor pérdida de calor. Se obtuvieron 20 puntos hacia la derecha y 20 hacia la izquierda y sus valores se trasladaron a una planilla de cálculo y transformándolos en un gráfico.

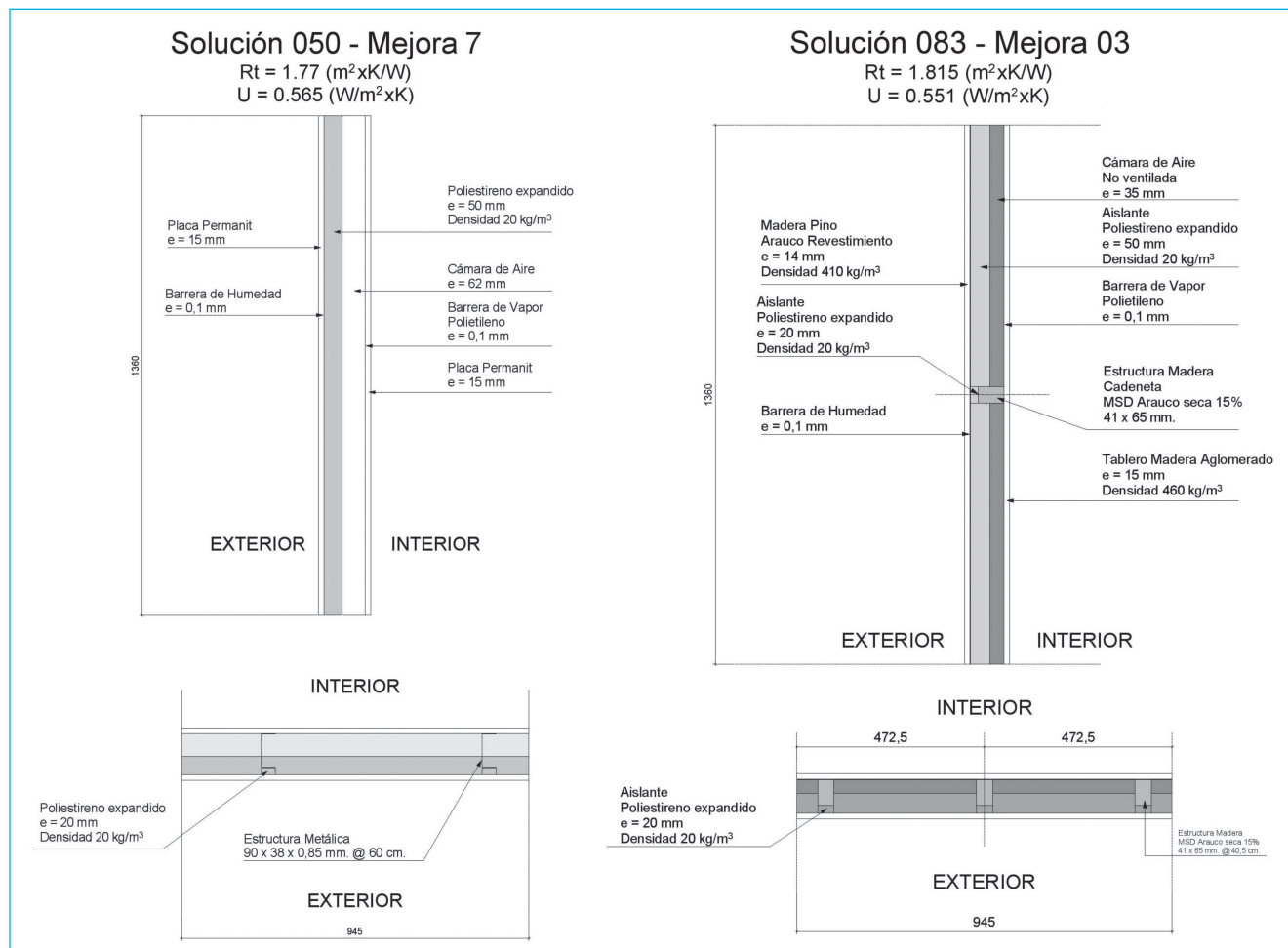
Fig. 016a - 016b - Casos elegidos



## 2. Desarrollo de detalle con Usai

### 3. Dibujo en CAD del detalle constructivo mejorado

Fig. 017a - 017b - Casos mejorados



### 4. Exportación a simulador Therm

### 5. Simulación

Se obtuvieron las imágenes de isoterma, flujo de calor y flujo de vectores.

### 6. Cálculo Manual

Se realizó, a modo de verificación.

### 7. Cubicación

Se cubió la solución para construir las probetas a ensayar en la cámara térmica.

### ETAPA 3

#### 1. Construcción de probetas originales

Adaptado el detalle a las medidas del anillo de guarda de la cámara térmica, en la probeta se dispusieron las termocupas de la manera estándar, es decir, dispo-

niéndolas para obtener las temperaturas superficiales y de aire y a ellas se sumaron una serie de termocuplas al interior de los tabiques para medir las temperaturas que permitan graficar su comportamiento, similar a lo que se obtuvo de manera automática con Usai.

## 2. Análisis en cámara térmica

El proceso de evaluación en la cámara se realizó según lo descrito en el procedimiento de la NCh 851 Of.83. En el caso de estas probetas, el período de estabilización se produjo entre 2 a 3 días y las mediciones se realizaron cada dos horas en períodos desde las 8 de la mañana hasta las 20 horas.

Estos registros se traspasaron a una planilla que contiene los valores asociados a cada termocupla para los días y horas que dura el proceso de estabilización, obteniéndose los siguientes datos:

1. Valor U.

2. Temperaturas superficiales lado frío y lado caliente.
3. Temperatura de aire lado frío y lado caliente.
4. Temperaturas Interiores.

## 3. Comparación de los resultados con los de la simulación

Originalmente se consideraron condiciones de borde supuestas de temperaturas (0 °C exterior y 20 °C interior) las cuales difieren de las registradas en la cámara térmica lo que distorsionaba los valores mínimos y máximos tanto superficiales como interiores. Por ello, se actualizaron las simulaciones (Therm y Usai) utilizando las obtenidas experimentalmente para que se pudiera comparar los resultados con parámetros iguales.

Con los datos, se generó una matriz (Fig. 018) que contiene los valores iniciales (de las soluciones MINVU); los cálculos manuales; las simulaciones y los resultados de las probetas.

Fig. 018 - Matriz de Comparación

VALOR U PONDERADO	Valor U Solución MINVU	Valor U Cálculo Manual	Valor U Simulación Usai	Valor U Cámara Térmica
S050 original	0,7	0,65	0,70	0,72
S050 mejora		0,59	0,62	0,74
S083 original	0,7	0,66	0,65	0,74
S083 mejora		0,539	0,57	0,6

VALOR U MAYOR - MENOR	Valor U mayor Cálculo Manual	Valor U menor Cálculo Manual	Relación	Valor U mayor Usai	Valor U menor Usai	Relación	Valor U mayor Cámara Térmica	Valor U menor Cámara Térmica	Relación
S050 original	1,87	0,56	3,34	1,842	0,554	3,32	0,73	0,7	1,04
S050 mejora	0,95	0,57	1,67	0,94	0,56	1,68	0,8	0,69	1,16
S083 original	1,1	0,59	1,86	1,103	0,59	1,87	0,78	0,68	1,15
S083 mejora	0,64	0,525	1,22	0,663	0,543	1,22	0,61	0,57	1,07

TEMPERATURAS SUPERFICIALES	T° Superficial Exterior Mayor Therm	T° Superficial Exterior Menor Therm	Relación	Diferencia de T°	T° Superficial Exterior Mayor Cámara Térmica	T° Superficial Exterior Menor Cámara Térmica	Relación	Diferencia de T°
S050 original	9	6	1,50	3	9,93	8,58	1,16	1,35
S050 mejora	5,6	4,9	1,14	0,70	7,39	6,84	1,08	0,55
S083 original	5,5	3,9	1,41	1,6	7,52	6,76	1,11	0,76
S083 mejora	5	4,8	1,04	0,2	6,61	6,08	1,09	0,53



#### 4. Validación (o no) de simulación

Con la matriz se visualizaron los datos obtenidos por los diferentes métodos de manera de aproximar a una validación o pertinencia para utilizar Therm y Usai como simuladores, considerando que se mantuvieron condiciones similares de borde y de datos asociados a los materiales en ambos procedimientos (Simulaciones y Cámara Térmica).

#### ETAPA 4

Procedimiento es idéntico al de la Etapa 3 pero para las probetas mejoradas, punto 1,2,3, y 4.

#### ETAPA 5

##### 1. Conclusiones

##### 2. Manual paso a paso y soporte web

Se eligió uno de los casos mejorados y se estructuró un documento paso a paso para la utilización de Therm y Usai. Este trasladará a soporte web, anexando todo el material necesario para repetir el procedimiento.

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1. Resultados Obtenidos

La elección de las soluciones constructivas a evaluar se basó en la idea de conseguir variaciones de temperaturas y resistencias térmicas notorias dada la evidente presencia de puentes térmicos por discontinuidad de materiales.

#### 3.1.1. De las Simulaciones

Se ejecutaron por tres métodos: Planilla de Cálculo; Therm y Usai.

Todas ellas toman como referencia el dato de la solución aprobada por el MINVU (caso base) la cual daba como parámetro el valor U de la solución constructiva.

*Planilla de Cálculo:*

La primera evaluación fue realizar los cálculos por separado de los valores U de las zonas sin y con puente térmico. Luego se hizo un cálculo ponderado, presentándose pequeñas diferencias con el valor definido en la solución MINVU.

**Fig. 019 - Comparación valores U ponderado MINVU / Planilla de Cálculo**

VALOR U PONDERADO	Valor U Solución MINVU	Valor U Cálculo Manual	Valor U Simulación Usai	Valor U Cámara Térmica
S050 original	0,7	0,65	0,70	0,72
S050 mejora		0,59	0,62	0,74
S083 original	0,7	0,66	0,65	0,74
S083 mejora		0,539	0,57	0,6

Diferencias que en el caso de la solución S053 con estructura en base a perfiles metálicos varió de U original = 0,7 a un valor U calculado = 0,65 y en el caso de la solución S083 en base a estructura de madera, de U original = 0,7 a un valor U calculado = 0,66. Aproximando los valores a un decimal, los valores serían iguales (Fig. 019).

Los valores U separados de utilizaron para definir si se cumplía la relación 1:2 máxima para evitar las patologías de los puentes térmicos y comparar los valores entre simulaciones y los obtenidos en la cámara térmica. (Fig. 020).

**Fig. 020 - Comparación valores U mayor y U menor y Relación (1:2)**

VALOR U MAYOR - MENOR	Valor U mayor Cálculo Manual	Valor U menor Cálculo Manual	Relación	Valor U mayor Usai	Valor U menor Usai	Relación	Valor U mayor Cámara Térmica	Valor U menor Cámara Térmica	Relación
S050 original	1,87	0,56	3,34	1,842	0,554	3,32	0,73	0,7	1,04
S050 mejora	0,95	0,57	1,67	0,94	0,56	1,68	0,8	0,69	1,16
S083 original	1,1	0,59	1,86	1,103	0,59	1,87	0,78	0,68	1,15
S083 mejora	0,64	0,525	1,22	0,663	0,543	1,22	0,61	0,57	1,07



Usai:

**Fig. 021 - Comparación valores U ponderado - MINVU / Usai**

VALOR U PONDERADO	Valor U Solución MINVU	Valor U Cálculo Manual	Valor U Simulación Usai	Valor U Cámara Térmica
S050 original	0,7	0,65	0,70	0,72
S050 mejora		0,59	0,62	0,74
S083 original	0,7	0,66	0,65	0,74
S083 mejora		0,539	0,57	0,6

Los valores entregados por el programa Usai para los valores ponderados fueron, para el caso de la solución S050 de  $U=0,7$ , igual a lo definido por el MINVU y de la S083 de  $U=0,65$ , cercano al  $U=0,7$  del caso base. (Fig. 021).

Comparando los valores U ponderados obtenidos por el cálculo manual y los obtenidos con Usai, ambos poseen resultados casi idénticos y en el caso de los valores U parciales sucede algo similar (Fig. 022).

Therm:

De estas simulaciones se obtuvieron imágenes y datos de temperaturas superficiales las cuales se compararon con las obtenidas en la cámara térmica.

Se registraron las temperaturas máximas y mínimas superficiales de ambas soluciones lo que evidenció diferencias mayores que las de los valores U.

La simulación S053 original registró una temperatura máxima de  $9^{\circ}\text{C}$  y mínima de  $6^{\circ}\text{C}$  a diferencia de su probeta que registró una máxima de  $9,93^{\circ}\text{C}$  y una mínima de  $8,58^{\circ}\text{C}$ . Con esos valores el delta de temperatura es  $3^{\circ}\text{C}$  en la simulación y de  $1,35^{\circ}\text{C}$  en la cámara. Más de el doble (Fig. 023).

La simulación S053 mejorada registró una temperatura máxima de  $5,6^{\circ}\text{C}$  y una mínima de  $4,9^{\circ}\text{C}$  y la probeta registró una máxima de  $7,39^{\circ}\text{C}$  y mínima de  $6,84^{\circ}\text{C}$ . En este caso, el delta de la simulación es de  $0,7^{\circ}\text{C}$  y el de la probeta de  $0,55^{\circ}\text{C}$  mucho más cercano.

En el caso de las solución S083 original sucede algo similar al original de la S053 con un delta de  $1,6^{\circ}\text{C}$  versus  $0,6^{\circ}\text{C}$  de la probeta y para la mejora,  $0,2^{\circ}\text{C}$  de la simulación versus  $0,53^{\circ}\text{C}$  de la probeta. Ambas mejoras demuestran un comportamiento más similar al de las probetas que las soluciones originales (Fig. 023).

**Fig. 022 - Comparación valores U Cálculo Manual / Usai**

VALOR U PONDERADO	Valor U Solución MINVU	Valor U Cálculo Manual	Valor U Simulación Usai	Valor U Cámara Térmica
S050 original	0,7	0,65	0,70	0,72
S050 mejora		0,59	0,62	0,74
S083 original	0,7	0,66	0,65	0,74
S083 mejora		0,539	0,57	0,6

VALOR U MAYOR - MENOR	Valor U mayor Cálculo Manual	Valor U menor Cálculo Manual	Relación	Valor U mayor Usai	Valor U menor Usai	Relación	Valor U mayor Cámara Térmica	Valor U menor Cámara Térmica	Relación
S050 original	1,87	0,56	3,34	1,842	0,554	3,32	0,73	0,7	1,04
S050 mejora	0,95	0,57	1,67	0,94	0,56	1,68	0,8	0,69	1,16
S083 original	1,1	0,59	1,86	1,103	0,59	1,87	0,78	0,68	1,15
S083 mejora	0,64	0,525	1,22	0,663	0,543	1,22	0,61	0,57	1,07

**Fig. 023 - Comparación Temperaturas Superficiales Therm / Cámara Térmica**

TEMPERATURAS SUPERFICIALES	T° Superficial Exterior Mayor Therm	T° Superficial Exterior Menor Therm	Relación	Diferencia de T°	T° Superficial Exterior Mayor Cámara Térmica	T° Superficial Exterior Menor Cámara Térmica	Relación	Diferencia de T°
S050 original	9	6	1,50	3	9,93	8,58	1,16	1,35
S050 mejora	5,6	4,9	1,14	0,70	7,39	6,84	1,08	0,55
S083 original	5,5	3,9	1,41	1,6	7,52	6,76	1,11	0,76
S083 mejora	5	4,8	1,04	0,2	6,61	6,08	1,09	0,53

### 3.1.2.- De las Probetas

**Fig. 024 - Comparación valores U ponderado MINVU / Cámara Térmica**

VALOR U PONDERADO	Valor U Solución MINVU	Valor U Cálculo Manual	Valor U Simulación Usai	Valor U Cámara Térmica
S050 original	0,7	0,65	0,70	0,72
S050 mejora		0,59	0,62	0,74
S083 original	0,7	0,66	0,65	0,74
S083 mejora		0,539	0,57	0,6

Los valores de U obtenidos en las probetas fueron más altos que los definidos para las soluciones MINVU variando de 0,7 a 0,72 para la solución S050 y de 0,7 a 0,74 en la solución S083 (Fig. 024).

Para las probetas correspondientes a las mejoras, para la S050 las variaciones fueron para el cálculo manual de 0,59; para Usai de 0,62 y para la cámara de 0,74.

Para la S083 las variaciones fueron para el cálculo manual de 0,54; para Usai de 0,57 y para la cámara de 0,6 (Fig. 024).

Para las comparaciones de los valores U máximos y U mínimos, los rangos fueron más similares entre los métodos de simulación (manual y Usai) que con los de las probetas.

De igual modo, las diferencias de temperaturas superficiales obtenidas con Therm comparadas con las de las probetas fueron muy diferentes al igual que los deltas de temperaturas para cada caso (Fig. 025).

Para el caso de los gráficos de temperaturas interiores obtenidos con Usai, estos presentan diferencias, pero el comportamiento de las curvas es muy similar a las graficadas a partir de los datos obtenidos en las probetas tanto para las zonas sin como para las con puentes térmicos (Fig. 026).

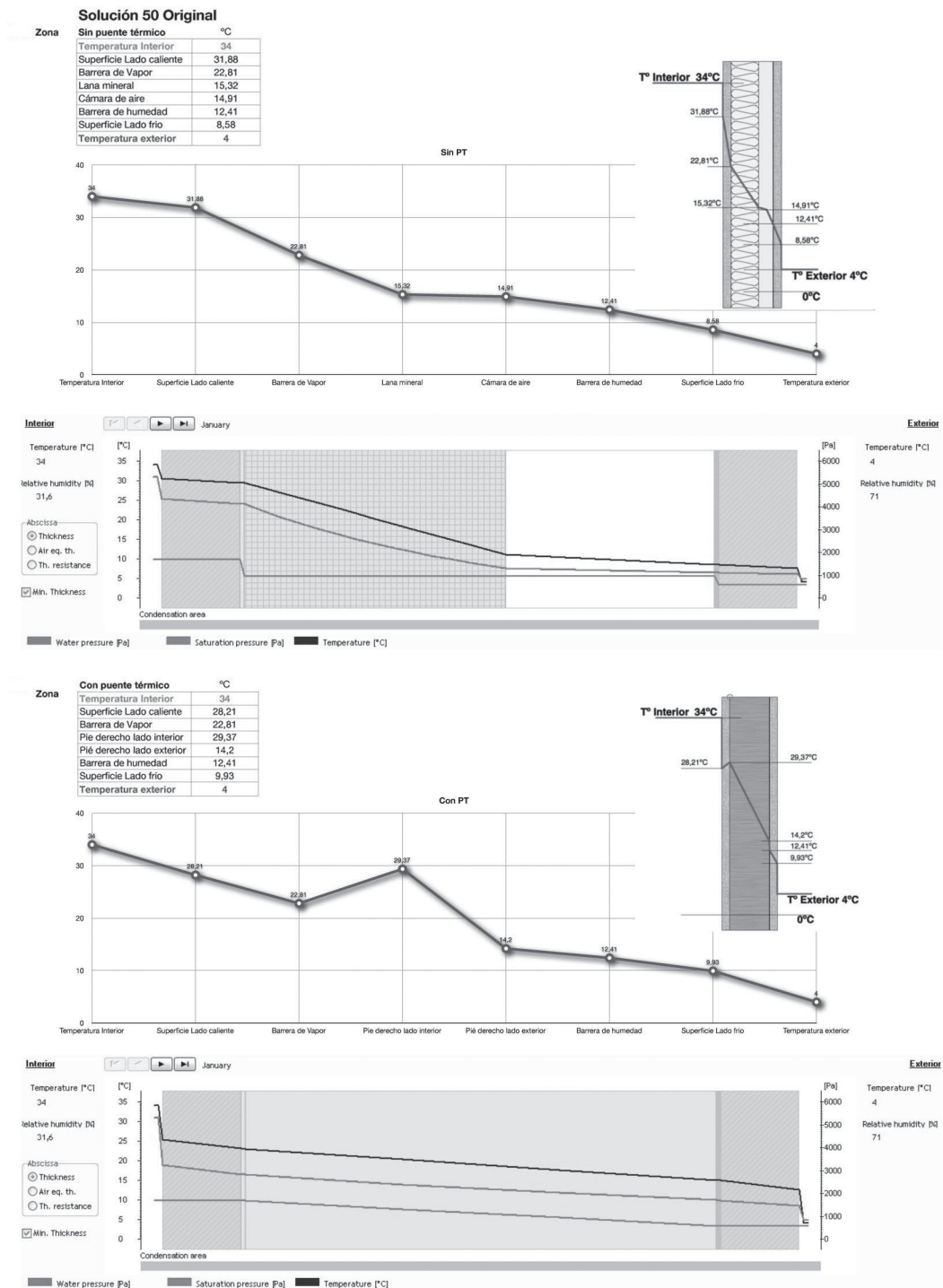
**Fig. 025 - Comparación valores U y Temperaturas Superficiales Simulaciones / Cámara Térmica**

VALOR U MAYOR - MENOR	Valor U mayor Cálculo Manual	Valor U menor Cálculo Manual	Relación	Valor U mayor Usai	Valor U menor Usai	Relación	Valor U mayor Cámara Térmica	Valor U menor Cámara Térmica	Relación
S050 original	1,87	0,56	3,34	1,842	0,554	3,32	0,73	0,7	1,04
S050 mejora	0,95	0,57	1,67	0,94	0,56	1,68	0,8	0,69	1,16
S083 original	1,1	0,59	1,86	1,103	0,59	1,87	0,78	0,68	1,15
S083 mejora	0,64	0,525	1,22	0,663	0,543	1,22	0,61	0,57	1,07

TEMPERATURAS SUPERFICIALES	T° Superficial Exterior Mayor Therm	T° Superficial Exterior Menor Therm	Relación	Diferencia de T°	T° Superficial Exterior Mayor Cámara Térmica	T° Superficial Exterior Menor Cámara Térmica	Relación	Diferencia de T°
S050 original	9	6	1,50	3	9,93	8,58	1,16	1,35
S050 mejora	5,6	4,9	1,14	0,70	7,39	6,84	1,08	0,55
S083 original	5,5	3,9	1,41	1,6	7,52	6,76	1,11	0,76
S083 mejora	5	4,8	1,04	0,2	6,61	6,08	1,09	0,53

Fig. 026 - Comparación Gráficas de Temperaturas Superficiales Usai / Cámara Térmica



### 3.2. Discusión

De las comparaciones realizadas, el valor U se ve más confiable para la utilización de las simulaciones con Usai y a través una planilla de cálculo. Este procedimiento permitiría rápidos ajustes y comparaciones que son visualizadas con Usai y son verificables aplicando el método de cálculo manual (a través de la planilla de cálculo) especificado en la normativa chilena.

Usai arrojó resultados similares a los de las probetas en las curvas de comportamiento térmico lo que se puede considerar como una visualización válida.

Therm ofrece visualizaciones claras del flujo de calor siendo preciso en graficar los puentes térmicos, pero los datos de temperaturas superficiales no ofrecen seguridad de ser un dato confiable. A pesar de ello, aporta nociones de puntos y zonas críticas de pérdidas de temperatura siendo muy flexible y de rápida incorporación al proceso de diseño para el análisis de una solución constructiva

Las probetas aportaron gran cantidad de datos cuantificables que, además de validar los valores de las soluciones MINVU, obligaron a ajustar los datos de las simulaciones. Este ajuste fue necesario ya que las condiciones de borde originales no correspondían a las aportadas por el método experimental (las temperaturas interior y exterior) las que variaron entre probetas.

Finalmente, las simulaciones aportaron nuevos datos para analizar una solución constructiva permitiendo entender de mejor manera el comportamiento de los casos de estudio, aumentando los criterios de análisis.

Su utilización permite un acercamiento y reflexión mayor ante el problema de los puentes térmicos durante el proceso de diseño siendo ello su mayor potencial. La precisión de los datos no necesariamente serán los esperados, pero se entiende que la simulación entregará datos suficientes para tomar decisiones al menos de manera más consciente e informada.

## 4. Conclusiones

4.1. El análisis de los detalles constructivos requieren de un estudio más profundo, abarcando comparaciones de sus prestaciones **no solo evaluando el valor U, que normalmente lo conocemos como ponderado, sino también evaluando las zonas de pérdidas de calor (puente térmico).**

Utilizar la relación de 1:2 entre estas zonas como límite para el valor U, tal vez sea un adecuado parámetro si se evalúa junto a las temperaturas superficiales (las pérdidas), dado que mientras mayor sea la diferencia, mayor peligro existe de aparición de patologías constructivas.

La evaluación higroscópica no arrojó resultados de posibles condensaciones en los detalles analizados, al considerar el valor de la resistencia a la difusión del vapor de agua ( $\mu$ ) en muchos casos como adimensional (valor =1), lo cual puede llevar a errores cuando se analiza el detalle dejando este parámetro fuera.

Una exploración futura podría centrarse en la definición de este valor para los materiales comunes usados en la zona 4.

4.2. El desarrollo de detalles y su simulación con Therm y Usai permite complementar la información disponible reglamentaria, aportando nuevos datos medibles y verificables que ayudan a decidir y evaluar la solución constructiva a utilizar.

Esta aproximación arroja resultados tanto en la visualización del comportamiento térmico de una solución constructiva como en la obtención de datos numéricos posibles de ser comparados con un "caso base" (lo reglamentario).

Por ello, la visualización apunta a una comparación prestacional pero también de diseño (geometría) y materialidad.

4.3. Desarrollar una base de datos de materiales para Therm y Usai permite, a partir de un mínimo reglamentario, **proponer mejoras a los detalles normalizados utilizando alternativas reales, disponibles y validadas.**

Esto facilita la exploración de mejoras prestacionales variando materiales; su posición dentro del muro; densidades o espesores.

La base de datos de Therm es flexible lo que permite actualizarla y expandirla según los requerimientos del usuario tanto en materiales como en Condiciones de Borde evaluando una misma solución con variables externas diferentes.

La base de datos de materiales de Therm y Usai permitiría una evaluación de costos al incorporar a cada uno

un valor, agregando a la elección criterios económicos, además de diseño y prestacionales.

**4.4. Utilizar Therm y Usai como simuladores e incorporar un análisis en base a Planillas de Cálculo permite desarrollar una sistematización en la evaluación** de soluciones técnicas al cruzar datos aportados por estos diferentes medios que entregan variables complementarias al valor U. Así, los detalles son analizados bajo parámetros que permi-

ten diferentes comparaciones y relaciones (U; RT; T°; Comportamiento higratérmico; Materiales utilizados; Espesores finales; Densidades). Este paso ayuda a prever resultados que podría arrojar la Cámara Térmica. En ese sentido, el prever no apunta a reemplazar este proceso experimental, sino a complementarlo al obtener una mirada sobre un posible comportamiento que nos acerca a lo real. La Cámara Térmica sigue siendo la mirada a la realidad física de la solución constructiva y por ello, el método experimental es irremplazable.

## 5. Referencias

1. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. CCTE: Manuales de Referencias Técnicas: Fundamentos Técnicos. Fundamentos Técnicos CCTE\_CL v2, pág. 7-12.
2. Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, Artículo 4.1.10  
[http://www.minvu.cl/opensite\\_20070314093355.aspx](http://www.minvu.cl/opensite_20070314093355.aspx)
2. Ministerio de Vivienda y Urbanismo (31 de agosto de 2009). Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo Texto aprobado por resolución exenta N° 6227 (V. y U.).
3. Organization for the Promotion of Energy Technologies. Thermal Bridges in residential buildings in Denmark.
4. Theodosiou T.G., Papadopoulos A.M.(2008). The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions.
5. Ben Larbi A.(2004). Statistical modelling of heat transfer for thermal bridges of buildings.
6. Jacobo, G. J (2007). Reducción del consumo energético de edificios en Torre mediante atenuaciones de puentes térmicos en su envolvente, simulaciones con "QUICK II", Alías, H. M.
7. María Inés Regodón y José Antonio Tenorio Ríos, del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Pérdidas de calor y formación de condensaciones en los puentes térmicos de los edificios.
8. Tilmans A. y Van Orshoven D. Belgian Building Research Institute (BBRI), Bélgica. Software and Atlases for evaluating thermal bridges.
9. Ministerio de Vivienda y Urbanismo (31 de agosto de 2009). Listado Oficial de Soluciones Constructivas para

Acondicionamiento Térmico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo Texto aprobado por resolución exenta N° 6227 (V. y U.).

10. Lawrence Berkeley National Laboratory (July 2006). Manual Therm.

### Otros:

11. Citterio M. y Cocco M.. Italian National Agency for New Technologies, Energy and Environment ENEA Italy. Heike Erhorn-Kluttig, Fraunhofer Institute of Building Physics - Germany. Thermal Bridge in the EBP context: overview on MS approaches in regulations.
12. Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, Artículo 4.1.10. Manual de Aplicación de la Reglamentación Térmica.
13. Heike Erhorn-Kluttig y Hans Erhorn, Fraunhofer Institute for Building Physics, Germany. Impact of the Thermal Bridges on the energy performance of buildings.
14. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. CCTE: Manuales de Referencias Técnicas: Fundamentos Técnicos. Anexo A 2.2 Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico en Muros MINVU.
15. Argentina. Ing. Msc Gallipoliti, Virginia A./Arq. M.Sc Jacobo, Guillermo J./Arq. Msc Alias, Herminia (2006). Evaluación del comportamiento térmico de componentes constructivos de los edificios en los puntos de encuentro Estructura-Envolvente con programas computacionales.
16. Building System Simulation, Essam Omar Assem Arab Fund for Economic and Social Development, Arab Organizations Headquarters Building, Shuwaikh, Kuwait