



**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**  
**FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO**

**Evaluación de riesgos de condensación superficial e intersticial en  
muros exteriores de viviendas sociales con estándar definido en el  
Plan de Descontaminación Atmosférica en la comuna de Valdivia, Chile.**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN HÁBITAT SUSTENTABLE Y  
EFICIENCIA ENERGÉTICA**

**AUTOR: José Miguel Mercado Yáñez**  
Arquitecto

**PROFESOR GUÍA: Sr. Ariel Bobadilla Moreno**  
Ingeniero Civil Mecánico  
Doctor en Ciencias Aplicadas de la Ingeniería  
Universidad Católica de Lovaina, Bélgica

**CONCEPCION, 23 de julio de 2018**

## Resumen

La contaminación atmosférica, en ciudades del centro - sur de Chile, ha obligado al Estado a implementar estándares más exigentes de eficiencia energética, a través de los Planes de Descontaminación Atmosférica, en consecuencia, las soluciones constructivas de la envolvente de las viviendas deberán modificarse para dar cumplimiento a este nuevo estándar.

Este estudio se enfoca en la evaluación de condensación superficial e intersticial de tres soluciones constructivas de muros exteriores típicos de viviendas sociales de Valdivia, Chile. Esta se realiza con métodos de evaluación unidimensionales y los resultados se analizan comparativamente con soluciones propuestas.

En los resultados obtenidos, se observa que la implementación del estándar PDA permite disminuir notablemente los riesgos de condensación en las soluciones constructivas.

Las estrategias que permiten mejorar el comportamiento higrotérmico de las soluciones constructivas, son la incorporación de cámaras de aire ventiladas y no ventiladas, mayor espesor de aislación y barreras de vapor, ordenando las capas, de acuerdo a sus propiedades físicas.

Se realiza análisis de sensibilidad del yeso cartón, modificando las propiedades del material, en el cual, al aumentar la porosidad en 12%, disminuye el contenido de humedad en el material entre un 40% a 55% en soluciones base y entre un 15% a 33% en soluciones propuestas.

**Palabras claves:** Condensación superficial e intersticial, Simulación Numérica, Muros exteriores, Vivienda social, Plan de descontaminación atmosférica.

## Abstract

Atmospheric pollution, in cities of southern Chile, has become a more demanding requirement of energy efficiency, through the Atmospheric Decontamination Plans, therefore, the constructive solutions of the envelope of the houses give fulfillment to this new standard.

This study focuses on the superficial and interstitial condensation evaluation, considering three constructive solutions of the exterior walls typical of social housing in Valdivia, Chile. This is done with one-dimensional evaluation methods and the results are analyzed comparatively with proposed solutions.

In the results obtained, it is observed that the implementation of the ADP standard allows to reduce significantly the condensation risks in the constructive solutions.

The strategies that allow to improve the hygrothermal behavior of the constructive solutions, are the incorporation of ventilated and non-ventilated air gap, greater thickness of insulation and vapor barriers, ordering the layers, according to their physical properties.

Sensitivity analysis of gypsum plaster is carried out, modifying the properties of the material, in which, it increases the porosity by 12%, decreases the moisture content in the material between 40% and 55% in base solutions and between 15% and 33% in proposed solutions.

**Keywords:** Superficial and interstitial condensation, Numerical simulation, Exterior wall, Social housing, Atmospheric Decontamination Plan.

## Índice

<b>Capítulo 1. Antecedentes .....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción.....	1
1.2 Hipótesis .....	5
1.3 Objetivo general.....	5
1.3.1 Preguntas de investigación.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos .....	6
1.4 Metodología.....	7
<b>Capítulo 2. Marco Teórico .....</b>	<b>9</b>
2.1 Condiciones ambientales locales .....	9
2.2 Humedad en viviendas sociales de Valdivia.....	11
2.3 Propiedades higrotérmicas de los materiales de construcción .....	12
2.4 Normativas aplicables a vivienda sociales .....	18
2.5 Condensación Superficial.....	21
2.6 Condensación Intersticial.....	23
2.7 Métodos de evaluación del comportamiento higrotérmico .....	24
2.7.1 Evaluación: Método Glaser (NCh1973:2014) .....	27
2.7.2 Evaluación: Método de Simulación Numérica .....	30
<b>Capítulo 3. Evaluación de riesgos de condensación superficial e intersticial .....</b>	<b>36</b>
3.1 Condiciones climáticas – Humedad de base climática .....	36
3.2 Fuentes de humedad en viviendas – Humedad de ocupación .....	37
3.3 Condiciones de borde para cálculos de riesgos de condensación.....	40
<b>Capítulo 4. Soluciones Constructivas Base (SCB).....</b>	<b>41</b>
4.1 Definición de las soluciones constructivas base de muros exteriores.....	41
4.2 Consideraciones de evaluación de riesgos de condensación superficial.....	43
4.3 Consideraciones de evaluación de riesgos de condensación intersticial .....	47
4.4 Evaluación de condensación superficial de soluciones constructivas base.....	48
4.4.1 Solución constructiva Base 1 .....	48
4.4.2 Solución constructiva Base 2 .....	49
4.4.3 Solución constructiva Base 3 .....	50

4.5	Evaluación de condensación intersticial de soluciones constructivas base .....	50
4.5.1	Solución constructiva Base 1 .....	51
4.5.2	Solución constructiva Base 2 .....	54
4.5.3	Solución constructiva Base 3 .....	57
<b>Capítulo 5.</b>	<b>Soluciones Constructivas Propuestas (SCP) .....</b>	<b>60</b>
5.1	Evaluación de condensación superficial de soluciones constructivas propuestas .....	60
5.1.1	Solución constructiva Propuesta 1 .....	60
5.1.2	Solución constructiva Propuesta 2 .....	61
5.1.3	Solución constructiva Propuesta 3 .....	62
5.2	Evaluación de condensación intersticial de soluciones constructivas propuestas.....	63
5.2.1	Solución constructiva Propuesta 1 .....	63
5.2.2	Solución constructiva Propuesta 2 .....	67
5.2.3	Solución constructiva Propuesta 3 .....	70
<b>Capítulo 6.</b>	<b>Comparación de resultados de las soluciones constructivas .....</b>	<b>73</b>
6.1	Comparación de condensación superficial .....	73
6.1.1	SCB – 1 vs SCP – 1 .....	73
6.1.2	SCB – 2 vs SCP – 2 .....	74
6.1.3	SCB – 3 vs SCP – 3 .....	75
6.2	Comparación de condensación intersticial.....	76
6.2.1	Método Glaser .....	76
6.2.2	Método de Simulación Numérica.....	79
6.2.3	Análisis de Sensibilidad.....	83
<b>Capítulo 7.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>88</b>
7.1	Propuestas de trabajos futuros.....	90
<b>Capítulo 8.</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>92</b>
<b>Anexo A</b>	<b>.....</b>	<b>94</b>

## Índice de figuras

Figura 1.1:	Termografía de vivienda social con alta presencia de puentes térmicos. (Fuente: Informe Análisis Termográfico e Higrotérmico, CIVA - UACH, 2012) .....	1
Figura 1.2:	Vivienda social en proceso de construcción afectado por humedad producto de la lluvia. (Fuente: SERVIU Los Ríos, 2013).....	2
Figura 1.3:	Vivienda social afectada por humedad por ocupación. (Fuente: SERVIU Los Ríos, 2010) .....	2
Figura 2.1:	Ilustraciones de la estructura de poro de un material: la ilustración derecha es una amplificación de la izquierda, que muestra un poro grande con poros capilares conectados. .	14
Figura 2.2:	Los tres mecanismos diferentes de transporte de agua son posibles en un material higroscópico poroso: difusión de vapor, difusión superficial (de agua líquida) y acción capilar (también de agua líquida). (Fuente: Fraunhofer IBP / Imagen Fraunhofer-Gesellschaft) .....	17
Figura 2.3:	Perfil de presiones, muro con riesgo de condensación intersticial (izquierda) y Perfil de presiones, muro sin riesgo de condensación intersticial (derecha).....	23
Figura 2.4:	Perfiles de temperatura de estado estable para un muro sólido aislada internamente, con aislación por el interior del muro mostrado como capa amarilla. ....	26
Figura 2.5:	Diagrama que muestra el perfil de presión de vapor (verde) y el perfil de contenido de agua (azul) a través de un muro. ....	27
Figura 2.6:	Captura de pantalla de WUFI Pro 6.2: el software utiliza elementos de cuadrícula de tamaño variable para evaluar la sección transversal de una construcción.....	33
Figura 2.7:	Diagrama de flujo que muestra el proceso iterativo en el que se basa el método de simulación numérica. ....	34
Figura 3.1:	Carta psicrométrica que permite visualizar la carga de humedad de base climática para la ciudad de Valdivia en el mes de julio. (Fuente: Elaboración propia) .....	37
Figura 3.2:	Carta psicrométrica que permite visualizar la carga de humedad de base climática y la humedad por ocupación para la ciudad de Valdivia en el mes de julio. (Fuente: Elaboración propia).....	40
Figura 4.1:	Flujo térmico y cálculo de resistencia térmica de la SCB – 1. ....	48
Figura 4.2:	Flujo térmico y cálculo de resistencia térmica de la SCB – 2. ....	49
Figura 4.3:	Flujo térmico y cálculo de resistencia térmica de la SCB – 3. ....	50
Figura 5.1:	Flujo térmico y cálculo de resistencia térmica de la SCB – 1. ....	61
Figura 5.2:	Flujo térmico y cálculo de resistencia térmica de la SCP – 2. ....	62
Figura 5.3:	Flujo térmico y cálculo de resistencia térmica de la SCP – 3. ....	63
Figura 6.1:	Captura de pantalla de WUFI Pro 6.2: propiedades del material yeso cartón. ....	84
Figura 6.2:	Captura de pantalla de WUFI Pro 6.2: propiedades del material yeso cartón para evaluación de sensibilidad. (Fuente: Software WUFI Pro 6.2) .....	84

## Índice de gráficos

Gráfico 2.1: Cuadro psicrométrico que muestra la derivación de humedad relativa de la temperatura y la presión de vapor. (Fuente: BS 5250:2011).....	22
Gráfico 3.1: Variación de clase de humedad interior 5 con temperatura exterior de 3,5° C en Valdivia. (Fuente: NCh1973:2014) .....	39
Gráfico 4.1: Porcentaje de predios habitacionales por materialidad predominante en estructura vertical de la construcción por Región al primer semestre 2018. (Fuente: SII) .....	41
Gráfico 4.2: Cálculo de condensación intersticial de la SCB – 1 realizado con herramienta Excel® DITEC – MINVU.....	51
Gráfico 4.3: Resumen de evaluación del contenido de humedad total de agua (kg/m <sup>2</sup> ) por día para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCB – 1.....	52
Gráfico 4.4: Contenido de agua promedio por fecha para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCB – 1. ....	52
Gráfico 4.5: Contenido total de agua en SCB – 1 y en cada material no laminar de la envolvente. ....	53
Gráfico 4.6: Cálculo de condensación intersticial de la SCB – 2 realizado con herramienta Excel® DITEC – MINVU.....	54
Gráfico 4.7: Resumen de evaluación del contenido de humedad total de agua (kg/m <sup>2</sup> ) por día para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCB – 2.....	55
Gráfico 4.8: Contenido de agua promedio por fecha para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCB – 2. ....	55
Gráfico 4.9: Contenido total de agua en SCB – 2 y en cada material no laminar de la envolvente. ....	56
Gráfico 4.10: Cálculo de condensación intersticial de la SCB – 3 realizado con herramienta Excel® DITEC – MINVU.....	57
Gráfico 4.11: Resumen de evaluación del contenido de humedad total de agua (kg/m <sup>2</sup> ) por día para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCB – 3.....	58
Gráfico 4.12: Contenido de agua promedio por fecha para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCB – 3. ....	58
Gráfico 4.13: Contenido total de agua en SCB – 3 y en cada material no laminar de la envolvente. ....	59
Gráfico 5.1: Cálculo de condensación intersticial de la SCP – 1 realizado con herramienta Excel® DITEC – MINVU.....	64
Gráfico 5.2: Resumen de evaluación del contenido de humedad total de agua (kg/m <sup>2</sup> ) por día para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCP – 1.....	65
Gráfico 5.3: Contenido de agua promedio por fecha para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCP – 1. ....	65

Gráfico 5.4:	Contenido total de agua en SCP – 1 y en cada material no laminar de la envolvente.....	66
Gráfico 5.5:	Cálculo de condensación intersticial de la SCP – 2 realizado con herramienta Excel® DITEC – MINVU.....	67
Gráfico 5.6:	Resumen de evaluación del contenido de humedad total de agua (kg/m <sup>2</sup> ) por día para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCP – 2.....	68
Gráfico 5.7:	Contenido de agua promedio por fecha para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCP – 2. ....	68
Gráfico 5.8:	Contenido total de agua en SCP – 2 y en cada material no laminar de la envolvente.....	69
Gráfico 5.9:	Cálculo de condensación intersticial de la SCP – 3 realizado con herramienta Excel® DITEC – MINVU.....	70
Gráfico 5.10:	Resumen de evaluación del contenido de humedad total de agua (kg/m <sup>2</sup> ) por día para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCP – 3.....	71
Gráfico 5.11:	Contenido de agua promedio por fecha para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCP – 3. ....	71
Gráfico 5.12:	Contenido total de agua en SCP – 3 y en cada material no laminar de la envolvente.....	72
Gráfico 6.1:	Perfil de presiones, SCB – 1 (izquierda) y Perfil de presiones, SCP – 1 (derecha). ....	76
Gráfico 6.2:	Perfil de presiones, SCB – 2 (izquierda) y Perfil de presiones, SCP – 2 (derecha). ....	77
Gráfico 6.3:	Perfil de presiones, SCB – 3 (izquierda) y Perfil de presiones, SCP – 3 (derecha). ....	78
Gráfico 6.4:	Contenido máximo de agua por material de SCB – 1 y SCP – 1. ....	80
Gráfico 6.5:	Contenido máximo de agua por material de SCB – 2 y SCP – 2. ....	81
Gráfico 6.6:	Contenido máximo de agua por material de SCB – 3 y SCP – 3. ....	82
Gráfico 6.7:	Contenido máximo de agua en SCB – 1 con distintas propiedades higrotérmicas de yeso cartón.....	84
Gráfico 6.8:	Contenido máximo de agua en SCB – 3 con distintas propiedades higrotérmicas de yeso cartón.....	85
Gráfico 6.9:	Contenido máximo de agua en SCP – 1 con distintas propiedades higrotérmicas de yeso cartón.....	86
Gráfico 6.10:	Contenido máximo de agua en SCP – 3 con distintas propiedades higrotérmicas de yeso cartón.....	87



## Índice de tablas

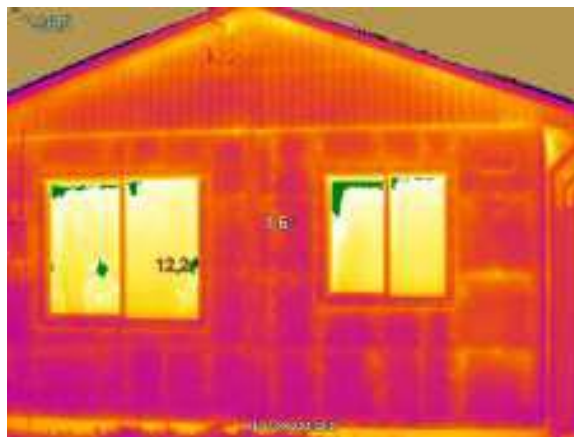
Tabla 2.1:	Comportamiento al paso del vapor de materiales nacionales y extranjeros reconocidos. ....	13
Tabla 2.2:	Efecto del condensado en superficies impermeables. ( <i>Fuente: BS5250:2011</i> ) .....	21
Tabla 2.3:	Diferencias entre metodologías de evaluaciones higrotérmicas, basados en sistemas de estado estacionario y transitorio. ....	25
Tabla 3.1:	Vapor de agua generada por actividad y por personas. ....	38
Tabla 3.2:	Condiciones ambientales para cálculo de riesgo de condensación para la ciudad de Valdivia. ( <i>Fuente: DITEC MINVU / CITEC UBB – Licitación ID 587-78-LE13</i> ) .....	38
Tabla 3.3:	Clases de humedad interior. ( <i>Fuente: NCh1973:2014</i> ) .....	39
Tabla 4.1:	Soluciones constructivas base de viviendas sociales construidas en Valdivia. ....	42
Tabla 4.2:	Propiedades físicas de los materiales de construcción. ....	43
Tabla 4.3:	Transmitancias y Resistencias térmicas contenida en el artículo 4.1.10 de la O.G.U.C. ....	46
Tabla 4.4:	Resistencia térmica por unidad de superficie de cámaras de aire no ventiladas – Cámaras de aire verticales, flujo térmico horizontal. ....	47
Tabla 4.5:	Temperatura superficial mínima y Resistencia térmica total mínima para condiciones de borde establecidas en el punto 3.3. de este documento. ....	47
Tabla 4.6:	Resumen de evaluación de acumulación de condensación con WUFI Pro de la SCB – 1. ....	51
Tabla 4.7:	Resumen de evaluación de acumulación de condensación con WUFI Pro de la SCB – 2. ....	54
Tabla 4.8:	Resumen de evaluación de acumulación de condensación con WUFI Pro de la SCB – 3. ....	57
Tabla 5.1:	Resumen de evaluación de acumulación de condensación con WUFI Pro de la SCP – 1. ....	64
Tabla 5.2:	Resumen de evaluación de acumulación de condensación con WUFI Pro de la SCP – 2. ....	67
Tabla 5.3:	Resumen de evaluación de acumulación de condensación con WUFI Pro de la SCP – 3. ....	70
Tabla 6.1:	Contenido de agua de SCB – 1 y SCP – 1. ....	79
Tabla 6.2:	Contenido de agua de SCB – 2 y SCP – 2. ....	80
Tabla 6.3:	Contenido de agua de SCB – 3 y SCP – 3. ....	82

## Capítulo 1. Antecedentes

### 1.1 Introducción

La contaminación por calefacción de viviendas, en las ciudades del centro - sur de Chile, ha obligado al Estado a implementar estándares más exigentes de eficiencia energética, mediante los Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA), por lo tanto, las soluciones constructivas de la envolvente de las viviendas deberán modificarse para dar cumplimiento a este nuevo estándar.

La reglamentación térmica establecida en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, antes de la implementación de los PDA, presenta bajas exigencias de transmitancias térmicas a la envolvente; está es una de las razones por la que las viviendas presentan problemas de condensación en su interior, condición que se ve agravada por la alta producción de humedad interior y el clima local que, en el caso de la ciudad de Valdivia, en invierno, es frío con alta humedad. El 98% de las viviendas en Chile (CDT, 2010), construidas antes de la entrada en vigencia de la reglamentación térmica (año 2007), están débilmente aisladas o sin aislación, con una alta presencia de puentes térmicos, como se aprecia en la Figura 1.1, que constituyen la primera área colonizada por moho. Por su configuración y la condición de vulnerabilidad socioeconómica de sus ocupantes, las viviendas sociales presentan condiciones que potencian los riesgos de condensación y la aparición de moho. Esta situación se acentúa por la elevada producción de humedad en estas viviendas, por ocupación; considerando un volumen reducido de 100 m<sup>3</sup> aprox. con una alta ocupación con actividades que influyen considerablemente en la producción de humedad interior.



**Figura 1.1: Termografía de vivienda social con alta presencia de puentes térmicos.**

*(Fuente: Informe Análisis Termográfico e Higrotérmico, CIVA - UACH, 2012)*

En Valdivia, las viviendas sociales han presentado problemas de condensación y aparición de moho, asociados principalmente a humedad absorbida en el proceso de construcción (por lluvia) como se aprecia en la Figura 1.2, y humedad por uso y ocupación de los habitantes, como muestra la Figura 1.3. Por lo tanto, es importante tratar este aspecto en el diseño de viviendas, pues se sabe que ambientes con proliferación de moho en las superficies presentan un efecto negativo en la salud de las personas, principalmente en niños, adultos mayores y personas inmunosuprimidas, asociados a enfermedades respiratorias (Sedlbauer, K., 2001).



**Figura 1.2: Vivienda social en proceso de construcción afectado por humedad producto de la lluvia.** (Fuente: SERVIU Los Ríos, 2013)



**Figura 1.3: Vivienda social afectada por humedad por ocupación.** (Fuente: SERVIU Los Ríos, 2010)

El Plan de Descontaminación Atmosférica de Valdivia (PDAV), establece además de mayores exigencias de transmitancias térmicas a la envolvente, la disminución del riesgo de condensación superficial e intersticial, verificado mediante la NCh1973:2014 y considerando los criterios de cálculo definidos por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), ver punto 2.4 Normativas aplicables a viviendas sociales. Esta norma contiene un método para diseñar la envolvente de la edificación para prevenir los efectos adversos de la condensación, asociado a la difusión de vapor de agua a través de los elementos constructivos.

El objetivo de la implementación de este nuevo estándar es disminuir las emisiones de material particulado por combustión de leña para calefacción residencial. Sin embargo, es importante tener presente que el requisito de un uso más eficiente de la energía en la operación y el uso de las edificaciones, ha llevado a un aumento en los niveles de aislación térmica y hermeticidad; esto ha provocado un mayor riesgo de daños por condensación (BS5250:2011); por lo que se prevé que esta situación pueda ocurrir en las comunas en que se implementan nuevos y más exigentes condiciones de construcción.

En Valdivia, 95% de las viviendas sociales utiliza como sistema constructivo, tabiquería liviana de madera confeccionadas con piezas de madera de 2" x 3", espacios rellenos con material aislante (40 a 50 mm de espesor), en algunos casos barrera de vapor y de humedad, y revestimiento interior y exterior (SERVIU Los Ríos, 2018). Con la nueva exigencia de transmitancias térmicas, esta configuración deberá modificarse agregando nuevas capas de materiales; es en este punto donde se hace relevante esta investigación, pues para decidir los materiales de construcción que conformarán el sistema constructivo, es necesario conocer sus propiedades físicas, y las variables climáticas que afectan el comportamiento higrotérmico.

La importancia de considerar el ordenamiento de las capas de materiales conociendo el comportamiento higrotérmico de estos en una etapa temprana en los proyectos, es que estos están directamente relacionados a pérdidas de energía, riesgos de condensación superficial e intersticial, y aparición y proliferación de moho; afectando con ello la salud, el confort de las personas y el deterioro de las construcciones. Estos factores se hacen aún más críticos en las viviendas sociales, las cuales se diseñan y construyen con las exigencias normativas mínimas establecidas.

Si bien, el orden de las capas de materiales no altera el comportamiento térmico, en cuanto a la transmitancia térmica del elemento constructivo; si afecta el comportamiento, donde al condensar, es posible que disminuya su resistencia térmica, pues la humedad presente en los materiales tiende a aumentar su conductividad térmica.

Para llevar a cabo esta investigación, se utilizarán dos métodos de evaluación de los riesgos de condensación superficial e intersticial en muros exteriores, ambos unidimensionales. El más conocido y establecido por el PDAV, método Glaser de difusión al paso del vapor de agua, que utiliza cálculos mensuales para un período de evaluación de un año – estado estacionario; y el segundo, método de Simulación Numérica, que considera el clima local (precipitaciones y radiación solar), este realiza cálculos por hora para un período de evaluación de varios años – estado transitorio (Little, J. et al, 2015).

Estos métodos de evaluación de condensación exigen tener información de las propiedades higrotérmicas de los materiales de construcción nacional, como son: la permeabilidad al paso del vapor, higroscopicidad, absorptividad, reflectividad, conductividad térmica, calor específico, entre otros. Estos datos están disponibles de manera muy somera y en una reducida cantidad de materiales en Chile. Por lo tanto, para este estudio se considerarán los datos nacionales disponibles y se cruza con información de materiales extranjeros que presenten datos nacionales conocidos similares.

En el presente estudio se establecen casos de estudio, que corresponden a tres soluciones constructivas de muros exteriores, el criterio de selección responde a los materiales y configuración más utilizados en la construcción de viviendas de Valdivia de acuerdo a información obtenida del Servicio de Impuestos Internos (SII) para la estructura predominante, y del Servicio de Vivienda y Urbanización de Los Ríos (SERVIU Los Ríos) para materiales de construcción (revestimientos exteriores e interiores y materiales aislantes). Se analiza el desempeño higrotérmico de estas tres soluciones constructivas base, y de acuerdo a los resultados, se propone mejoras de bajo costo económico, obteniendo tres soluciones constructivas propuestas, que nuevamente se analizan y comparan los resultados. Por último, se realiza análisis de sensibilidad de un material según sus propiedades físicas para comprobar su comportamiento higrotérmico.

## 1.2 Hipótesis

La implementación de los estándares del Plan de Descontaminación Atmosférica de Valdivia en muros exteriores de viviendas sociales, permitirá reducir el riesgo de condensación superficial e intersticial; condicionado al correcto ordenamiento de capas de materiales, según sus propiedades físicas.

## 1.3 Objetivo General

Analizar el desempeño higrotérmico de diferentes tipos de soluciones constructivas de muros en tabiquerías de madera utilizadas en viviendas sociales de Valdivia, para evaluar los efectos de las propiedades físicas y el ordenamiento de las capas de materiales en la formación de condensación superficial e intersticial, con estándar definido en el Plan de Descontaminación Atmosférica.

### 1.3.1 Preguntas de investigación

- *¿Cómo se define el fenómeno de la condensación? ¿Cuáles son las variables que determinan el comportamiento higrotérmico de una solución constructiva?*
- *¿Cuál es la clase de higrometría o exceso de humedad apropiada para la localidad de Valdivia, considerando la base climática y la generación de humedad por ocupación (uso) para viviendas sociales?*
- *¿Qué sistemas constructivos y materiales de muros exteriores predominan en la construcción de viviendas sociales de Valdivia y cuáles son los riesgos de condensación que presentan?*
- *¿Cuál es la influencia que presenta el ordenamiento de las capas de materiales de muros exteriores en el riesgo de condensación, considerando las propiedades físicas de los materiales, aplicando los estándares establecidos en el PDAV?*

### 1.3.2 Objetivos Específicos

**Objetivo específico 1:** Comprender el fenómeno de la condensación y su influencia en el desempeño higrotérmico de las soluciones constructivas, mediante la revisión del estado del arte para definir las variables ambientales a considerar.

**Objetivo específico 2:** Definir la humedad de base climática y de ocupación de las viviendas sociales para determinar la clase de higrometría (exceso de humedad) apropiada para la ciudad de Valdivia, para la evaluación de riesgos de condensación.

**Objetivo específico 3:** Identificar las soluciones constructivas predominantes de muros exteriores en viviendas sociales construidas en Valdivia según materialidad para definir los casos de estudio y evaluar su comportamiento higrotérmico.

**Objetivo específico 4:** Comparar soluciones constructivas mejoradas con la finalidad de establecer la influencia de las propiedades físicas y ordenamiento de capas de materiales en los sistemas constructivos para verificar la mejora del desempeño higrotérmico implementando las exigencias del PDAV, y junto con ello determinar la efectividad de las soluciones.

## **1.4 Metodología**

### Etapa 1: Establecer el marco teórico y el contexto

- Revisar bibliografía general referente a la condensación, su relación con el clima y con materiales de construcción, y el impacto de la condensación sobre la salud de las personas y sobre las edificaciones.
- Consultar normativa y estándares nacionales e internacionales que condicionan y limitan los riesgos de condensación en viviendas.
- Recopilar datos climáticos (temperatura y humedad) de Valdivia e información referente a la cultura ocupacional enfocada a la generación de humedad interior que permita definir el exceso de humedad base climática y la clase de higrometría en las viviendas sociales.

### Etapa 2: Identificar soluciones constructivas y las propiedades físicas de los materiales

- Recopilar información planimétrica (soluciones constructivas – muros exteriores) y especificaciones técnicas según materialidad de viviendas sociales en el SERVIU de Los Ríos, obteniendo la muestra de análisis de casos de estudio.
- Recopilar información de las propiedades higrotérmicas de los materiales identificados en las soluciones constructivas de casos de estudio.

### Etapa 3: Evaluación y análisis del desempeño higrotérmico

- Identificar y definir métodos de evaluación de riesgos de condensación superficial e intersticial para evaluar los casos de estudio.
- Evaluar el comportamiento higrotérmico de las soluciones constructivas base de muros exteriores, mediante la aplicación de métodos de evaluación de riesgos de condensación precedentemente definidos.



- Plantear mejoras a las soluciones constructivas de muro a partir de los análisis previos aplicando el estándar PDAV, considerando las propiedades físicas y el ordenamiento de capas, y reevaluar el desempeño higrotérmico.
- Realizar análisis de sensibilidad de las propiedades física de los materiales en las soluciones constructivas para determinar la influencia que presenta en el desempeño higrotérmico.
- Analizar, comparar y concluir a partir de las estrategias con mejores resultados obtenidos.

## Capítulo 2. Marco Teórico

En este capítulo se aborda las condiciones climáticas y la humedad interior generada por ocupación y uso de las viviendas sociales en Valdivia, determinando con ello, la humedad de base climática y la clase de higrometría apropiada a este contexto. Del mismo modo, se trata las propiedades físicas de los materiales de construcción y su relación con el calor y la humedad. Se explica la normativa nacional que aplica a las viviendas sociales en Chile, se definen los conceptos de condensación superficial e intersticial y se determinan los métodos de evaluación y criterios que definen el comportamiento higrotérmico de las soluciones constructivas que serán utilizados en esta investigación.

### 2.1 Condiciones ambientales locales

El uso eficiente de la energía es un tema fundamental en el desarrollo del país. El 26,9% del consumo final de energía en Chile corresponde al sector comercial, público y residencial; y de este, el 69,8% corresponde solo al sector residencial (Balance Nacional de Energía – Ministerio de Energía, 2015). Estas cifras permiten fundamentar la inversión de políticas públicas orientadas a la eficiencia energética de viviendas, con la finalidad de reducir el consumo de energía en el país. Al respecto el Informe sobre Desarrollo Humano 2016 del PNUD señala: *“...es importante centrarse en el nexo entre la pobreza y el medio ambiente, que es complejo, pero crucial para los marginados. Las personas pobres soportan la mayor carga del daño ambiental, aunque apenas contribuyen a su creación...”*.

El porcentaje del parque de viviendas construidas en el país que fueron construidas sin Reglamentación Térmica obligatoria, representa el 86% (Estudio de usos finales de oferta de conservación de la energía en el sector Residencial de Chile, CDT 2010); importante potencial de ahorro de consumo de energía que ha sido reconocida por el Estado, por lo que desde el año 2009 ha impulsado el Programa de Reacondicionamiento Térmico (MINVU, 2009) para viviendas existentes aplicadas a este segmento, de acuerdo a la Evaluación Independiente del Programa de Reacondicionamiento Térmico – Informe Final (Fissore & Colonelli, 2013) para viviendas entre las regiones del Maule y Aysén entre los años 2009 al 2011, se logró una disminución del consumo de energía de 28% promedio ponderado, aumentando en 1º C la temperatura interior. Sin embargo, a

pesar de los esfuerzos, se puede constatar que la temperatura del aire al interior de las viviendas está lejos del rango de confort con una variación de temperatura durante el día de 13º C a 22º C; para dar respuesta a esta condición de las viviendas es que se aumenta el consumo de energéticos que en la zona centro – sur del país es principalmente la quema de leña, en el caso específico de la comuna de Valdivia, según datos obtenido del Estudio Inventario de Emisiones Atmosféricas y Modelación de Contaminantes, año base 2013, el 92% de las viviendas usa leña como combustible para calefaccionar y/o cocinar, lo que se traduce en un consumo promedio de leña estimado por vivienda dentro del radio urbano de 10,1 m<sup>3</sup> estéreo/año. Este escenario hace imperioso aumentar la calidad de construcción de las viviendas para incrementar el rendimiento de la energía, y a su vez, el confort ambiental interior.

La temperatura interior del aire es una de las variables del confort ambiental; y en general, las medidas y políticas públicas van orientadas a aumentar esta temperatura y a reducir el consumo de energía de las viviendas. El confort higrotérmico está relacionado con una serie de variables ambientales con las que el cuerpo humano interactúa, las más importantes son la temperatura del aire del recinto, temperatura superficial interior de la envolvente, humedad relativa del aire y velocidad del aire (Bustamante, 2009). Entonces, el confort higrotérmico se debe entender como la interrelación entre las variables antes mencionadas y la relación de estas con el clima local. En Chile, se pueden reconocer fácilmente las diferencias climáticas al desplazarse por distintas latitudes, a su vez el clima está determinado por la altitud y la cercanía al mar; estas diferencias climáticas deben ser consideradas al diseñar y construir una vivienda.

El riesgo de condensación al interior de las viviendas depende de tres factores interrelacionados; las condiciones climáticas locales, fuentes y aportes de humedad en las viviendas derivadas de la actividad metabólica de las personas y la generada en forma de vapor acuoso en las diversas áreas y actividades, y las propiedades higrotérmicas de los materiales (CITECUBB, 2017).

Los factores climáticos que afectan en el fenómeno de la condensación interior son la temperatura, humedad relativa y humedad absoluta. Estos factores hacen necesario un estudio detallado debido a la diversidad climática que existe en el país (DITEC – MINVU & CITECUBB, 2014).

## 2.2 Humedad en viviendas sociales de Valdivia

El exceso de humedad en un edificio puede provocar la condensación y el crecimiento de moho, que representan riesgos para la integridad estructural del edificio y la salud de sus ocupantes. Para gestionar esos riesgos, se debe reconocer primero la relación entre el calor, el aire y la humedad, considerar posibles fuentes de humedad y la generación de vapor de agua, su transporte y deposición. Es esencial que el atrapamiento de humedad durante la construcción y la generación de vapor de agua durante la ocupación se minimicen, y que el exceso de humedad se elimine lo más cerca posible de la fuente (BS5250:2011).

Una vez establecida la carga climática de humedad, se debe definir la carga de humedad por cultura ocupacional, es decir, una vez que el edificio está ocupado y en uso, las actividades dentro del edificio, en diferentes momentos, generan cantidades variables de vapor de agua. La cantidad de vapor de agua está determinada por el número de ocupantes y las actividades que realizan. El vapor de agua que se genera (por ejemplo, al respirar, lavar, secar la ropa, cocinar) produce un aumento en la presión de vapor interior.

Las condiciones de las viviendas sociales propician la aparición de condensación y crecimiento de moho en zona climáticas con alta humedad, esto responde en gran medida por las reducidas dimensiones de estas, con superficies mínimas de 42 m<sup>2</sup> (volumen de 96,6 m<sup>3</sup>), una alta ocupación y al uso, asociado a la calefacción “húmeda” (GLP o parafina), al secado de ropa al interior, y la baja ventilación de los espacios.

En mediciones realizadas a viviendas sociales construidas el año 2011, en la ciudad de Valdivia, con problemas de condensación y crecimiento de moho en muros, se registraron mediciones de humedad relativa interior entre 41% y 83% y temperaturas interiores entre 5,5º C y 29º C, recogida de información en el mes de julio (Informe análisis termográfico e higrotérmico – Viviendas Sociales Brisas de Guacamayo, CIVA 2012).

Por lo tanto, es necesario para realizar un análisis de riesgo de condensación, establecer adecuadamente la clase de higrometría o exceso de humedad considerando las condiciones específicas para cada localidad y las condiciones de ocupación y uso de las viviendas.

### 2.3 Propiedades higrotérmicas de los materiales de construcción

Los materiales utilizados en función de sus propiedades físicas establecen de manera importante el desempeño energético ambiental de los edificios, algunas de éstas son: conductividad térmica, calor específico, permeabilidad al vapor, difusividad térmica, emisividad, entre otros; que determinan el comportamiento higrotérmico de la envolvente. El vapor de agua se difunde a través de la mayoría de los materiales de construcción, la velocidad de difusión depende de la diferencia en la presión de vapor entre el interior y el exterior, y de la resistencia al paso de vapor de agua de cada capa de material.

La mayoría de los materiales son higroscópicos (capaces de absorber y desorber el vapor de agua). Esto puede tener un efecto amortiguador beneficioso, reduciendo el riesgo de condensación superficial e intersticial durante fluctuaciones rápidas de temperatura y presión de vapor. Sin embargo, los materiales higroscópicos expuestos a altos niveles de humedad pueden, con el tiempo, absorber suficiente humedad para dañar los elementos de la estructura, las terminaciones, los muebles y el mobiliario (BS5250:2011).

Un estudio experimental reporta que los materiales de construcción secos (50% HR) pueden ser muy resistentes al crecimiento de moho si están expuestos a humedad relativa alta (90% HR) solo por un período limitado, mientras que los materiales de construcción orgánicos son muy vulnerables cuando están expuestos al agua. Estas conclusiones respaldan bien las pautas existentes sobre cómo evitar la humedad elevada o cualquier daño causado por el agua durante el período de construcción, así como que los edificios deben diseñarse de manera que la humedad relativa en las superficies interiores nunca exceda el 75% de humedad relativa (Moller, E. et al, 2017).

La mayoría de las soluciones para envolvente no logran relacionar correctamente las propiedades físicas de los materiales con el diseño, y este con los distintos climas del territorio. Existe ausencia y desconocimiento de las propiedades higrotérmica de los materiales, como la resistencia a la difusión de vapor, que no son exigidas, por lo tanto no son informadas por los proveedores de materiales (MINVU, CITECUBB, 2014).

Por lo tanto, es fundamental conocer las propiedades higrotérmicas de los materiales para determinar la correcta posición de estos en una solución multicapa.

De los insumos entregados por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (DITEC) para la verificación de condensación del estándar PDAV, están las planillas de cálculo de condensación superficial e intersticial, en la que se adjunta Tabla 2.1 que muestra valores de Resistencia a la difusión de vapor y Permeabilidad al vapor de materiales de construcción nacionales y materiales extranjeros reconocidos.

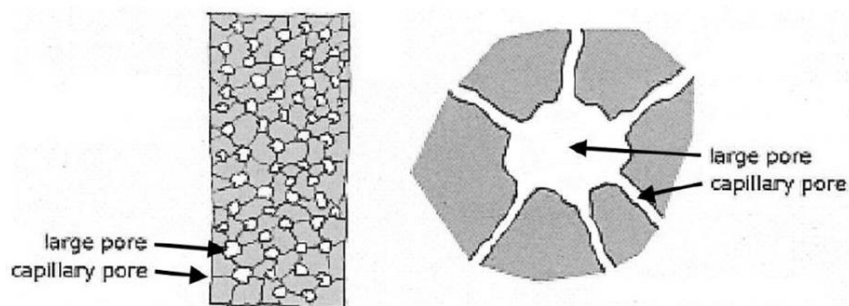
**Tabla 2.1: Comportamiento al paso del vapor de materiales nacionales y extranjeros reconocidos.**  
(Fuente: DITEC – MINVU, 2017)

COMPORTAMIENTO AL PASO DE VAPOR				
Materiales - Ensayados				
MATERIAL	Espesor [m]	Resistencia a la difusión de vapor [MNs/g]	Permeabilidad al vapor	
			$\delta p$ [gm/MNs]	$\delta p$ [Kg/msPa]
SmartPanel	0,0111	15,92	0,000697236	6,97236E-13
PaintPanel	0,0095	12,37	0,000767987	7,67987E-13
Clover	0,000175	0,44	0,000400494	4,00494E-13
Typar	0,000175	1,34	0,000130161	1,30161E-13
Papel Kraft CMPC 126-20-126	0,00035	36,61	9,56023E-06	9,56023E-15
Papel laminado - Volcan	0,00035	48,33	7,24188E-06	7,24188E-15
Fibrocemento 1250 kg/m <sup>3</sup>	0,006	5,30	0,001132075	1,13208E-12
Yeso Cartón 750 kg/m <sup>3</sup>	0,01	0,89	0,011223345	1,12233E-11
Lana de vidrio 11 kg/m <sup>3</sup>	0,05	1,11	0,045045045	4,5045E-11
EPS 10 kg/m <sup>3</sup>	0,05	7,35	0,006802721	6,80272E-12
Esmalte al agua (10 micras)	0,00001	5,78	1,7301E-06	1,7301E-15
Látex acrílico (10 micras)	0,00001	1,52	6,57895E-06	6,57895E-15
Pino insigne 410 kg/m <sup>3</sup>	0,02	5,84	0,003424658	3,42466E-12
OSB 648 kg/m <sup>3</sup>	0,0111	18,70	0,000593583	5,93583E-13
Terciado ranurado 570 kg/m <sup>3</sup>	0,009	12,00	0,00075	7,5E-13
Poliétileno	0,0002	138,00	1,44928E-06	1,44928E-15
Filtro M-1: 10-40	0,00027	0,66	0,000410618	4,10618E-13
Filtro M-2: 15-40 (N°15)	0,00033	0,55	0,00060312	6,0312E-13
Filtro M-3: 15 Libras	0,00037	0,49	0,000748443	7,48443E-13
EPS 10 kg/m <sup>3</sup> - archipex	0,05	6,94	0,0072	7,2E-12
EPS 15 kg/m <sup>3</sup> - archipex	0,05	8,06	0,0062	6,2E-12
EPS 20 kg/m <sup>3</sup> - archipex	0,05	8,62	0,0058	5,8E-12
EPS 25 kg/m <sup>3</sup> - archipex	0,05	10,42	0,0048	4,8E-12
EPS 30 kg/m <sup>3</sup> - archipex	0,05	12,50	0,004	4E-12
H.A. - NCh1980	0,12	3,60	0,033333333	3,33333E-11
H.A. - NCh1980	0,12	12,00	0,01	1E-11
Volcapol 20mm	0,02	17,80	0,001123596	1,1236E-12
Volcapol 30mm	0,03	26,68	0,001124438	1,12444E-12
Aire en movimiento (cámara ventilada)	-	0,00	0	0
Aire en reposo (cámara no ventilada)	0,02	5,50	0,003636364	3,63636E-12
MATERIALES - NORMA ARGENTINA IRAM 11601				
Tabla A.6 - Permeabilidades al vapor de agua y permeancias al vapor de agua				
MATERIAL	Espesor [m]	Resistencia a la difusión de vapor [MNs/g]	Permeabilidad al vapor	
			$\delta p$ [gm/MNs]	$\delta p$ [Kg/msPa]
H.A. 1800 kg/m <sup>3</sup>	-	-	0,012222222	1,22222E-11
H.A. 2000 kg/m <sup>3</sup>	-	-	0,008333333	8,33333E-12
H.A. 2200 kg/m <sup>3</sup>	-	-	0,006111111	6,11111E-12
H.A. 2400 kg/m <sup>3</sup>	-	-	0,005555556	5,55556E-12
Mortero cemento 2000 kg/m <sup>3</sup>	-	-	0,006111111	6,11111E-12
Ladrillo macizo	-	-	0,022222222	2,22222E-11

El aire, incluido el vapor de agua que contiene naturalmente, no solo existe en los espacios de las edificaciones que nos rodean, también está presente en la mayoría de los materiales de construcción, pues la mayoría de ellos es de naturaleza porosa. Esto significa que no solo están constituidos por masa, sino que también contienen una estructura de poros microscópicamente pequeños. Dependiendo del material, esta estructura de poros puede variar significativamente y afectará la cantidad y la facilidad con que el aire y la humedad pueden entrar, salir y atravesar. Por lo tanto, es importante comprender la relación de masa / poros y la naturaleza de la estructura de poro de un material para evaluar su comportamiento higrotérmico. La estructura de poro de un material consiste en huecos o intersticios de diferentes formas y tamaños. Estos vacíos a menudo están interconectados formando una o más redes, a estas redes se les llama estructura de poros (Little, J. et al, 2015).

Determinar el comportamiento de una estructura de poros en relación al almacenamiento y transporte de humedad es extremadamente complejo. Sin embargo, se ha determinado un comportamiento promedio de las estructuras de poros, en el que los parámetros más importantes son la porosidad, la permeabilidad y el área de superficie específica (área superficial intersticial de los poros, por unidad de masa o volumen, que es la medida de la capacidad de absorción). (Dullien, 1992).

Por lo tanto, incluso materiales porosos y permeables que muestran una gran complejidad y aparente heterogeneidad a escala microscópica actúan de hecho de una manera uniforme y medible a escala macroscópica, que es la escala de interés para las evaluaciones higrotérmicas. La Figura 2.1 muestra una estructura general de poro y la conexión de poros capilares.



**Figura 2.1: Ilustraciones de la estructura de poro de un material: la ilustración derecha es una amplificación de la izquierda, que muestra un poro grande con poros capilares conectados.**  
(Fuente: *Assessing risk in insulation retrofits using hygrothermal software tools*, 2015, p.26)

Para describir la relación de masa / poro de un material y la naturaleza de esta estructura de poro, generalmente se usan tres propiedades físicas: densidad, porosidad y permeabilidad (Little, J. et al, 2015).

#### (a) Densidad

La masa de un material a menudo se discute utilizando la densidad aparente ( $\rho$ ), una propiedad del material que describe la masa de un material por unidad de volumen. La densidad se da normalmente en unidades de gramos por centímetro cúbico [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ] o kilogramos por metro cúbico [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ], donde  $1 \text{ g}/\text{cm}^3 = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ .

Esta propiedad permite convertir el calor específico en masa al calor específico por volumen.

La densidad aparente  $\rho_{\text{bruta}}$  es la relación entre la masa  $m$  del material el volumen total  $V_{\text{tot}}$  del material:

$$\rho_{\text{bruta}} = m/V_{\text{tot}}$$

La densidad real  $\rho_{\text{real}}$ , por el contrario, es la relación de la masa  $m$  del material y volumen tomado solo por la matriz del material.

$$\rho_{\text{real}} = m/(V_{\text{tot}} - V_{\text{poros}}) = m/V_{\text{real}}$$

La densidad aparente debería estar disponible para prácticamente todos los materiales de construcción. Debido a que afecta principalmente el valor del calor específico y la conductividad térmica dependiente de la humedad que entra en el cálculo, y las simulaciones higrotérmicas generalmente no dependen muy sensiblemente de estos valores, no es necesario conocer este valor con gran precisión.

#### (b) Porosidad

Mientras que la densidad describe la masa de un material, la porosidad se refiere a los poros dentro de un material (en relación con su masa). La porosidad ( $f$ ) es el porcentaje del volumen total del material que en realidad es poros. La porosidad se describe como un valor sin unidad entre 0 y 1 o como un porcentaje [%]. Los valores de 0 y 1 (o 0% y 100%) son, por supuesto, hipotéticos:  $f = 0$  describe un material con absolutamente ningún poro, mientras que  $f = 1$  significa que solo habría poros y, por lo tanto, no hay material.

Los materiales con una cantidad relativamente grande de poros se llaman porosos; aquellos con una pequeña cantidad o ninguno se llaman no porosos. La mayoría de los



materiales de construcción son, de hecho, porosos, pero solo unos pocos tienen una porosidad tan baja que se los llama no porosos. Estos últimos incluyen, por ejemplo, vidrio, metales y algunos plásticos. Los materiales orgánicos son casi siempre porosos, por ejemplo, madera o paja, pero la mayoría de los materiales de construcción inorgánicos son también porosos, por ejemplo, cal, piedra u hormigón. Sin embargo, el grado en que los materiales son porosos puede variar.

La densidad aparente y la porosidad están obviamente relacionadas entre sí: un material con una gran porosidad, como la lana mineral, es probable que no sea denso, o de peso ligero, mientras que un material pesado, p. plomo, es denso y no muy poroso.

La porosidad se puede estimar a partir de la densidad real  $\rho_{real}$  y la densidad aparente  $\rho_{bruta}$ :

$$\begin{aligned}\rho_{bruta} &= m/V_{tot} = m/(V_{real} + V_{poros}) = \rho_{real}/(1 + V_{poros}/V_{real}) = \\ &= \rho_{real} * V_{real}/V_{tot} = \rho_{real} * (1 - V_{poros}/V_{tot}) = \rho_{real} * (1 - \text{porosidad}),\end{aligned}$$

Por lo tanto,

$$\text{Porosidad} = 1 - \rho_{bruta}/\rho_{real}$$

$\rho_{real}$  puede, a su vez, estimarse a partir de otros materiales que tienen la misma composición, pero diferente densidad aparente, si se conoce su densidad aparente y su porosidad.

Ejemplo: un ladrillo de hormigón celular con  $\rho_{bruta} = 600 \text{ kg/m}^3$  y porosidad = 0,72 tiene  $\rho_{real} = 600/(1-0,72) \text{ kg/m}^3 = 2140 \text{ kg/m}^3$ . La porosidad de un ladrillo de hormigón celular con  $\rho_{bruta} = 400 \text{ kg/m}^3$  puede estimarse como:

$$\text{Porosidad} = 1 - 400/2140 = 0,81 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

### (c) Permeabilidad

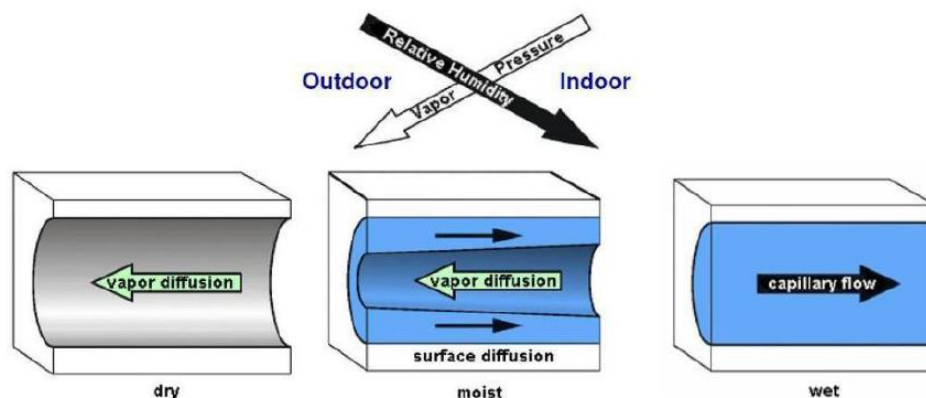
Mientras que la porosidad se refiere a la cantidad de poros en un material, la permeabilidad describe la conectividad de los poros entre sí y con el entorno que rodea al material. Las partes de una estructura de poro están abiertas a la superficie o límite de un material, que conecta la estructura de poro a un material adyacente o al entorno más grande. De este modo, el aire y la humedad del medio ambiente pueden entrar y salir de un material a través de la estructura de poro.

Sin embargo, no siempre todos los poros de un material están conectados entre sí. De hecho, algunas conexiones de poros pueden ser callejones sin salida; otros pueden ser estructuras de poro pequeño aisladas del resto, es decir, poros "ciegos". Algunas estructuras de poros se conectarán a las superficies de los materiales y se unirán en una trayectoria continua.

Las estructuras de poro con una gran proporción de redes interconectadas se llaman estructuras de poro abierto; mientras que las estructuras de poro con poros principalmente aislados se denominan estructuras de poro cerrado.

Se debe considerar el hecho que, a muy altos contenidos de humedad, incluso los capilares más grandes se obstruyen con agua y ya no pueden contribuir al transporte de vapor.

La Figura 2.2 ilustra la relación de concurrencia en la que el transporte capilar y la difusión de la superficie y del vapor pueden tener lugar en una estructura de poros. Las direcciones de transporte que se muestran en la figura son dominantes durante el invierno en paredes de mampostería de una sola hoja en el norte de Europa. Debido a que el aire frío del exterior tiene menos capacidad para retener la humedad, la presión de vapor tiende a ser más alta en interiores que en el exterior, lo que hace que la difusión del vapor se extienda hacia afuera. Sin embargo, al mismo tiempo, la difusión de la superficie tiende a transportar el agua hacia el interior, ya que los regímenes de calefacción del espacio dan como resultado una menor humedad relativa en el interior. Si los capilares grandes se llenan con agua de lluvia, también absorberán el líquido en el interior, para su redistribución por capilares más pequeños. (Little, J. et al, 2015).



**Figura 2.2:** Los tres mecanismos diferentes de transporte de agua son posibles en un material higroscópico poroso: difusión de vapor, difusión superficial (de agua líquida) y acción capilar (también de agua líquida).  
(Fuente: Fraunhofer IBP / Imagen Fraunhofer-Gesellschaft)

## **2.4 Normativas aplicables a vivienda sociales**

En Chile, la reglamentación térmica para viviendas está contenida en el artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, reglamento de la Ley General de Urbanismo y Construcciones, esta reglamentación establece valores de transmitancias térmicas máximas para complejos de techumbres, muros y pisos ventilados, y porcentajes máximos de superficies vidriadas según transmitancias térmicas, diferenciadas para 7 zonas térmicas del país (MINVU, 2018). Este instrumento regulatorio no establece restricciones para la condensación superficial e intersticial.

El año 2013, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, en conjunto con una mesa técnica, elabora una propuesta de actualización de la reglamentación térmica, denominada Norma Técnica – NTM11, la cual está compuesta por tres partes: Acondicionamiento Acústico, Comportamiento Higrotérmico y Calidad del Aire Interior; y por primera vez se establecía requerimientos de desempeño asociados a la condensación superficial e intersticial, a través de la NCh1973.

Dada la elevada y creciente contaminación atmosférica del aire, el año 2014, la comuna de Valdivia se declara zona saturada por material particulado respirable MP10 y MP2,5. Esta declaración permite al Estado de Chile desarrollar e implementar un instrumento de gestión ambiental que tiene por finalidad recuperar los niveles señalados en las normas de calidad de aire ambiental de una zona saturada; a partir de esta declaración, se dicta el Plan de Descontaminación Atmosférica de Valdivia (PDAV) el año 2017; dentro de las líneas de acción del plan se encuentra la regulación referida al mejoramiento de la eficiencia térmica de la vivienda, la cual establece un nuevo estándar que modifica la actual reglamentación térmica (O.G.U.C.). Esta modificación se basa principalmente en la propuesta de la NTM11 en el apartado de Comportamiento Higrotérmico, estableciendo nuevos requisitos de transmitancia térmicas para la envolvente, evaluación de riesgos de condensación, restricciones a infiltraciones de aire y ventilación (D.S. Nº 25, Ministerio de Medio Ambiente, 2017).

A continuación, se detalla el Artículo 27 de Plan de Descontaminación Atmosférica de Valdivia para vivienda nueva, a partir del 23.06.2018, extraído del Decreto Supremo Nº 25 del Ministerio de Medio Ambiente del año 2017.

**Estándar PDAV (Artículo 27. A 12 meses de la entrada en vigencia del plan)**

**1. Transmitancia térmica de la envolvente**

*Transmitancia térmica máxima de la envolvente térmica, valores de U.*

Elemento	Estándar	Valdivia
Techo	Valor U [W/(m²K)]	0,28
Muro		0,40
Piso Ventilado		0,50

*Valor R100 para elemento de techo, muro y piso ventilado.*

Elemento	Estándar	Valdivia
Techo	Valor R100 [(m²K)/W] x 100	357
Muro		250
Piso Ventilado		183

**2. Riesgo de condensación**

*Las soluciones constructivas que se adopten deberán disminuir el riesgo de condensación superficial e intersticial. Lo anterior deberá ser acreditado por el profesional competente para la obtención del permiso de edificación, mediante la norma de cálculo NCh1973:2014, considerando los criterios de cálculo que el Ministerio de Vivienda y Urbanismo defina para ello.*

Criterios y condiciones para el análisis del riesgo de condensación - MINVU	
Norma	NCh1973/2014
Tipo de análisis	Condensación superficial e intersticial
Período de análisis	Mes de julio
Condiciones ambiente exterior	T= 3,5°C y HR= 98%
Condiciones ambiente interior	T= 19°C y HR= 65%, 75% y 80%
Punto de análisis en el sistema constructivo	1. Sección más desfavorable (puente térmico) 2. Sección más favorable (aislación térmica)
El cálculo se realizará al sistema constructivo base (tradicional) y al sistema constructivo mejorado (proyectista), para comparar los resultados obtenidos para ambas soluciones, con 3 HR interiores (65, 75 y 80%).	

### 3. Infiltraciones de aire

#### *Infiltraciones de Aire*

Elemento	Estándar	Valdivia
Vivienda completa	Clase de infiltración de aire a 50Pa (ach)	5

#### *Grado de estanqueidad al viento*

Elemento	Estándar	Valdivia
Puerta y ventana	Grado de estanqueidad al viento 100Pa (m³/h m²)	7

### 4. Ventilación

*Las viviendas deberán contar con un sistema de ventilación que garantice la calidad del aire interior. Lo anterior será acreditado por el proyectista para la obtención del permiso de edificación, según lo establecido en las normas NCh3308 y NCh3309, según corresponda. El sistema de ventilación deberá considerar sistemas mecánicos de salida de aire al exterior, pudiendo ser las entradas de aire natural o mecánicas, con al menos dos puntos de extracción de aire ubicados en baño y cocina con encendido mediante control de higrostató.*

Este nuevo estándar no solo se enfoca en reducir la demanda de energía de las viviendas, disminuyendo considerablemente las transmitancias térmicas de la envolvente, si no que establece también exigencias orientadas al confort higrotérmico. En el caso de la evaluación de disminución del riesgo de condensación superficial e intersticial, aunque dicho acercamiento es muy importante, este parece insuficiente, pues las condiciones de humedad relativa interior no se condicen con la realidad de las viviendas sociales en Valdivia.

En países del Reino Unido, se establece para la evaluación de los riesgos de condensación la utilización de la norma UNE – EN ISO 13788 (NCh1973) basado en cálculos simplificados de transportes de vapor por difusión, no cubriendo otros aspectos de la humedad, por ejemplo, agua de suelo e ingreso de precipitación, como así tampoco considera la transferencia de vapor por movimientos de aire que podrían ser mayores que la de la difusión (BS5250:2011).

La norma chilena NCh1973:2014 establece una metodología para el cálculo de condensación superficial e intersticial; y como ya se comentó anteriormente, se debe establecer la clase de higrometría consecuente con el clima local y con la generación de humedad por uso y ocupación de la vivienda.

## 2.5 Condensación Superficial

En la estación invernal de lugares con climas fríos, como es el caso de las ciudades del centro - sur de Chile, se produce una diferencia considerable entre la temperatura y presión de vapor de agua, interior – exterior. Mientras mayor sea esta diferencia, mayor es el riesgo de ocurrencia de condensación, considerando que la temperatura del ambiente interior al ser mayor puede contener más agua en forma de vapor, por lo que los elementos constructivos al exterior presentan mayor probabilidad que la humedad del ambiente condense sobre ellos. Si el vapor de agua presente en el ambiente encuentra superficies con una temperatura menor a la temperatura de rocío, condensará superficialmente sobre ellas.

En la definición que se plantea en la BS5250:2011 señala, que el aire caliente y húmedo dentro de las edificaciones se enfría a su punto de rocío por contacto con superficies frías y no absorbentes, como vidrios de ventanas, tuberías no aisladas y cisternas, depositará el exceso de humedad en esas superficies como condensado. Si bien es posible que ese condensado no dañe el material sobre el que se produce, si se acumula lo suficiente, correrá o goteará sobre otros materiales donde podría causar daños. Ver Tabla 2.2 de efectos del condensado en superficies impermeables.

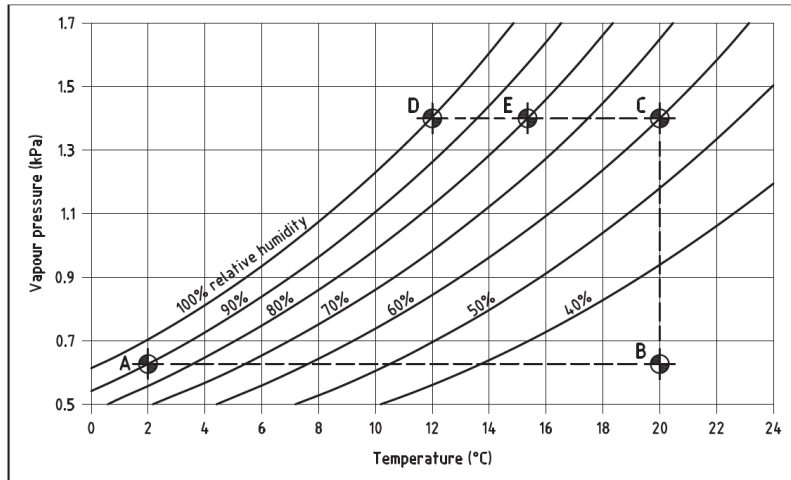
**Tabla 2.2: Efecto del condensado en superficies impermeables.** (Fuente: BS5250:2011)

<b>Cantidad de condensado</b> <b>g/m<sup>2</sup></b>	<b>Efecto</b>
< 30	Una niebla fina que no corre o gotea
30 - 50	Las gotas se forman y comienzan a correr por las superficies
51 - 250	Las gotas grandes se forman y comienzan a correr por superficies inclinadas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 70 g/m<sup>2</sup> correrán por una pendiente de 45º</li> <li>• 150 g/m<sup>2</sup> correrán por una pendiente de 23º</li> </ul>
> 250	Las gotas se forman y goten desde superficies horizontales

La humedad relativa y el punto de rocío son los dos parámetros más importantes que determinan si se produce condensación. Si bien el punto de rocío se expresa como temperatura, depende de la cantidad de humedad presente en el aire.

La humedad relativa del aire ambiente determina cuánta humedad será absorbida por los materiales higroscópicos; esto a su vez determina el riesgo de crecimiento de moho en las superficies y la descomposición de los materiales. El cuadro psicrométrico del Gráfico 2.1

demuestra la relación entre la humedad relativa y el punto de rocío. Las líneas curvas muestran las humedades relativas, la línea del 100% es la saturación (punto de rocío).



**Gráfico 2.1:** Cuadro psicrométrico que muestra la derivación de humedad relativa de la temperatura y la presión de vapor. (Fuente: BS 5250:2011)

*El punto A representa un volumen dado de aire a una temperatura de 2º C con una presión de vapor 0,60 kPa: su humedad relativa es, por lo tanto, del 90%.*

*El punto B representa el mismo volumen de aire, con el mismo contenido de humedad (y, por lo tanto, la misma presión de vapor) pero calentado a 20º C; su humedad relativa ahora será de aproximadamente 24%. Esto ilustra lo que ocurre cuando el aire exterior ingresa a un edificio y se calienta.*

*El punto C indica el mismo volumen de aire a 20º C, al que se ha agregado humedad para llevar su presión de vapor a aproximadamente 1,4 kPa. Ese aumento en la humedad sin cambios en la temperatura significa que la humedad relativa del aire ha aumentado a aproximadamente 60%. Esto ilustra lo que sucede cuando ese aire entrante caliente absorbe la humedad de las actividades dentro de un edificio, pero no se calienta.*

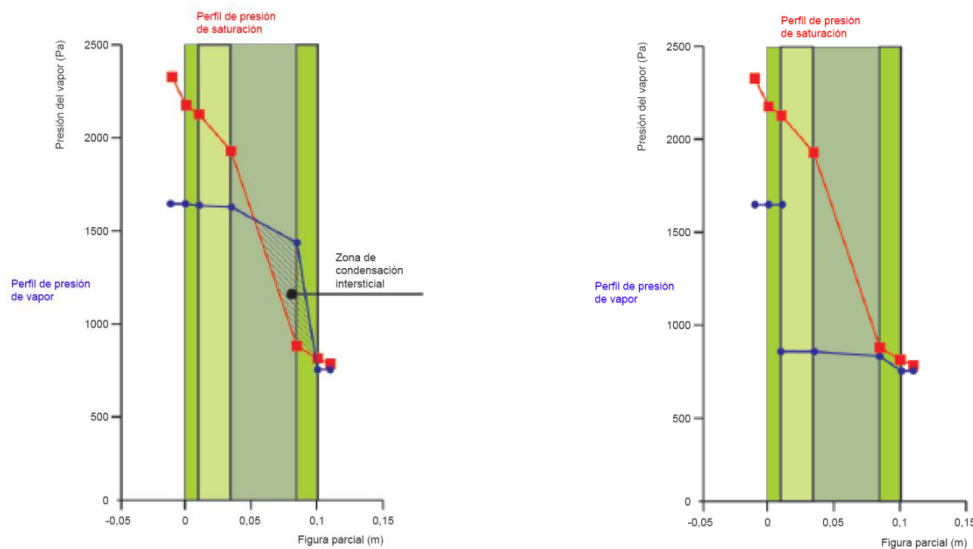
*El punto D ilustra que la saturación de ese aire ocurrirá si se enfría a su temperatura de punto de rocío de aproximadamente 11,9º C; cualquier reducción adicional de temperatura dará como resultado la condensación.*

El punto E en la tabla indica que se producirá 80% de humedad relativa si la temperatura del volumen de aire dado cae a aproximadamente 15º C. El riesgo de crecimiento de moho se produce cuando la humedad relativa en una superficie el 80%.

(BS 5250:2011)

## 2.6 Condensación Intersticial

La condensación intersticial ocurre dentro de un sistema constructivo, cuando el vapor de agua que se desplaza a través de ese sistema entra en contacto con un material que está en o debajo del punto de rocío del vapor. Esta condensación es probable que ocurra en la superficie de los materiales, pero puede ocurrir dentro del cuerpo de un material si es allí donde se produce el punto de rocío. En un sistema constructivo multicapa, también es posible que el condensado se deposite en más de un plano a medida que la humedad se evapora de una superficie y se condensa nuevamente en una más fría. En los esquemas de la Figura 2.3 se puede visualizar una solución constructiva en la que existe riesgo de condensación intersticial (izquierda), y el mismo sistema constructivo en el que no presenta riesgo de condensación intersticial (derecha).



**Figura 2.3: Perfil de presiones, muro con riesgo de condensación intersticial (izquierda) y Perfil de presiones, muro sin riesgo de condensación intersticial (derecha).**

(Fuente: *Humedad por condensación en viviendas: Prevención y soluciones. N°33, CDT*)



Debido a la diferencia de presión de vapor entre el interior y el exterior, el vapor de agua tratará de salir por la envolvente al exterior. Si los materiales que constituyen el sistema constructivo son permeables al vapor, este puede penetrarlos condensando en el interior. La condensación intersticial puede causar el deterioro de la estructura de la edificación, a través de la corrosión, la podredumbre y la descomposición, dependiendo de la naturaleza y características de los materiales. También puede reducir la resistencia térmica de los materiales, lo que afecta negativamente a la eficiencia energética, sobre todo si esta condensación se aloja en el material aislante.

La humedad provoca, como ya se ha mencionado, variados efectos en los materiales de construcción, como el aumento de la conductividad térmica, disminuyendo con ello la resistencia térmica, esta situación es aún más crítica en materiales porosos. Los poros que se encuentran en estos materiales están llenos de aire, con una conductividad térmica  $\lambda_{\text{aire quieto}} = 0,026 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , al entrar en contacto con el vapor de agua, estos poros comienzan a llenarse de agua, la cual posee una conductividad térmica 22,3 veces mayor que la del aire  $\lambda_{\text{agua}} = 0,58 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ . Como consecuencia de esto, el material se hace más conductor del calor. Provocando pérdidas o ganancias de calor indeseables cuando estos materiales forman parte de la envolvente (Humedad por condensación en viviendas, CDT, 2012).

## 2.7 Métodos de evaluación del comportamiento higrotérmico

El transporte de calor y humedad son fenómenos físicos intrínsecamente relacionados, este acoplamiento hace que su evaluación sea compleja, y que su evaluación por separado no sería adecuada.

Metodológicamente, existen esencialmente dos enfoques para tratar la complejidad en las evaluaciones, como se muestra en la Tabla 2.3:

1. Hacer una serie de suposiciones para simplificar y desacoplar las ecuaciones (Método Glaser);
2. Para resolver las ecuaciones numéricamente, usando simulación por computadora (Método de Simulación numérica).

**Tabla 2.3: Diferencias entre metodologías de evaluaciones higrotérmicas, basados en sistemas de estado estacionario y transitorio.**

(Fuente: *Assessing risk in insulation retrofits using hygrothermal software tools, 2015, p.108*)

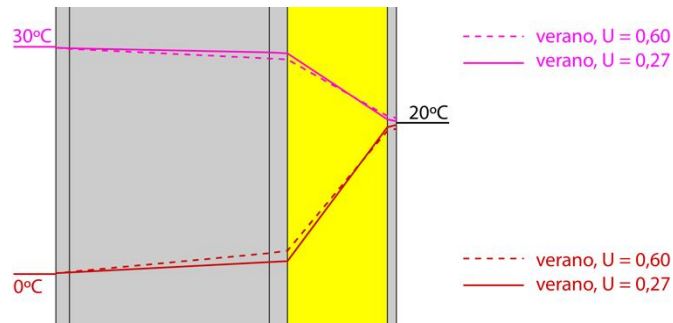
Enfoque metodológico	Sistema de estado - estable	Sistema de estado - transitorio
Método de diseño	Resuelve ecuaciones simplificadas y desacopladas	Resuelve ecuaciones complejas numéricamente
Tipo de evaluación	Método Glaser	Simulación numérica
Estándar asociado	BS EN ISO 13788 (NCh 1973)	BS EN 15026
Base de evaluación	Doce cálculos mensuales para un período de evaluación de un año	Conjunto de cálculos por hora para un período de evaluación de varios años

#### **Diferencia entre los sistemas de estado estacionario y transitorio.**

Realizar una evaluación higrotérmica con un conjunto de datos enormemente reducido, es decir, doce cálculos para el período de un año, no permite considerar los ciclos diarios en el patrón climático. Los datos meteorológicos utilizados para tales evaluaciones higrotérmicas deberán ser promedios mensuales. Esto significa que se ignoran los ciclos meteorológicos a corto plazo. Dicha evaluación simplificada, como se usa para las evaluaciones del método Glaser, se basa en un sistema de estado estacionario, lo que significa que numerosos parámetros de entrada, como caída de lluvia, presión o flujo de calor, se consideran en la evaluación como inmutables en el tiempo. Obviamente, para dicha evaluación, cada conjunto mensual de datos meteorológicos será único. Sin embargo, esto se considera como estado estacionario, en comparación con las grandes cantidades de datos procesadas en Simulación Numérica. La cantidad sustancial de conjuntos de cálculos realizados en simulaciones numéricas, permite tener en cuenta los ciclos climáticos a corto. Los cálculos tienen en cuenta los cambios en el sistema a lo largo del tiempo, como las oscilaciones horarias de temperatura o humedad. Cuando se basa en cálculos por hora, una simulación anual consistiría en 8.760 conjuntos de cálculos. Este enfoque de evaluación, utilizado para las evaluaciones de simulación numérica, permite que los parámetros de entrada cambien con el tiempo y, por lo tanto, se lo denomina sistema de estados transitorios (Little, J. et al, 2015).

La pérdida de calor a través de la envolvente depende de la transmitancia térmica (valor U) del componente, en este caso de los muros, y de la diferencia de temperatura, a través del sistema constructivo. El diferencial de temperatura es la fuerza conductora para el flujo de calor, entonces,

el valor U se puede considerar como regulador que controla la velocidad con que se transfiere el calor. El flujo de calor a través de un sistema constructivo, que puede estar constituido por varias capas de diferentes materiales de construcción, se puede ilustrar con un perfil de temperatura, un gráfico trazado sobre la sección transversal, como se muestra en la Figura 2.4.



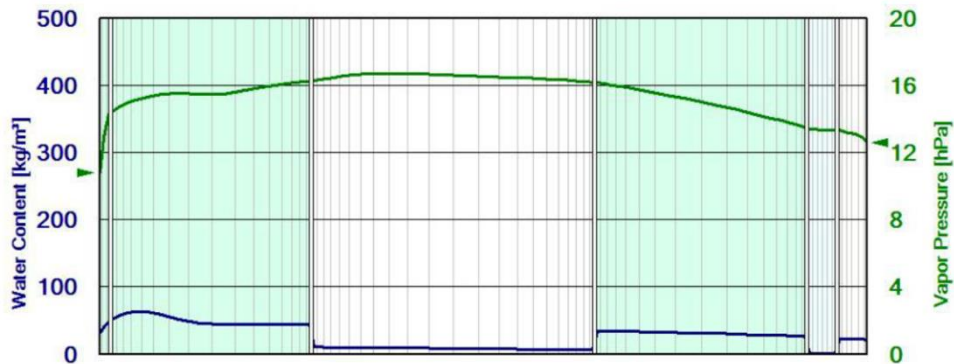
**Figura 2.4: Perfiles de temperatura de estado estable para un muro sólido aislado internamente, con aislación por el interior del muro mostrado como capa amarilla.**

(Fuente: *Assessing risk in insulation retrofits using hygrothermal software tools*, 2015,p.71)

Las diferentes conductividades térmicas ( $\lambda$ ) de cada capa en sistema constructivo da como resultado un cambio desigual de temperaturas a través de las capas. Los materiales aislantes tienen una alta diferencia de temperatura de un lado a otro, mientras que los materiales más conductores poseen un cambio de temperatura mucho menor. El perfil de temperatura de un componente de construcción es importante, pues permite comprender las condiciones higrotérmicas dentro de esas partes que son permeables al aire y a la humedad. Como el movimiento de aire normalmente implica el transporte de humedad, las ubicaciones de baja temperatura tienden a presentar riesgo de condensación, ya sea en la superficie del material o intersticialmente.

Mientras que la diferencia de temperatura es el potencial de conducción para la transferencia de calor, la diferencia de presión de vapor a través del componente de construcción es el potencial de conducción para la transferencia de vapor. La resistencia al vapor ( $S_d$ ) del sistema constructivo y el factor de resistencia a la difusión de vapor (valor  $\mu$ ) de cada una de las capas del componente son los reguladores. Similar a los perfiles de temperatura, es posible generar perfiles de presión de vapor a través de un elemento particular de construcción. El potencial de conducción para el transporte de agua líquida por acción capilar es la diferencia en el contenido de agua en el componente, es decir, el diferencial de agua líquida. La diferencia en la humedad relativa dentro

de los capilares de los materiales del componente es el potencial de conducción para el transporte de agua líquida por difusión superficial. Finalmente, la función de almacenamiento de humedad de un material higroscópico describe (entre otras cosas) la relación entre la humedad relativa y la cantidad de agua líquida que se absorberá en las superficies de los poros y, por lo tanto, está disponible para la difusión superficial. En consecuencia, también es posible trazar un perfil de contenido de agua sobre la sección transversal de un componente de construcción, como se ilustra en la Figura 2.5.



**Figura 2.5:** Diagrama que muestra el perfil de presión de vapor (verde) y el perfil de contenido de agua (azul) a través de un muro.

(Fuente: *Assessing risk in insulation retrofits using hygrothermal software tools*, 2015, p.71)

### 2.7.1 Evaluación: Método Glaser (NCh1973:2014)

El método Glaser es un procedimiento de evaluación de riesgos de condensación en los sistemas constructivos. El procedimiento descrito en la NCh 1973:2014 (BS EN ISO 13788: 2012), consiste en un método de cálculo simplificados, que suponen que el transporte de humedad en o a través del elemento constructivo es solo por difusión de vapor y utiliza datos climáticos mensuales, asumiendo además condiciones unidimensionales, en estado estacionario.

En su introducción, la NCh 1973:2014 describe su alcance e igualmente esboza sus limitaciones:

*La transferencia de vapor es un proceso muy complejo, y el conocimiento de sus mecanismos, las propiedades de los materiales, las condiciones iniciales y las condiciones límite a menudo son limitadas. Por lo tanto, esta norma presenta métodos de cálculo simplificados, que consideran que el transporte de humedad es solamente mediante difusión de vapor y utiliza datos climáticos mensuales. La normalización de estos métodos de cálculo no excluye el uso de métodos más*

*avanzados. Si son despreciables otras fuentes de humedad, tales como la penetración de la lluvia o la convección, los cálculos normalmente llevarán a diseños seguros y si una edificación no cumple un criterio de diseño especificado según este procedimiento, se puede utilizar métodos más exactos para demostrar que el diseño cumplirá. (NCh 1973:2014, p.1)*

Esta norma proporciona esencialmente tres métodos de cálculo:

- a) La temperatura superficial interior de un componente o elemento de construcción bajo la cual es probable la formación de moho, dada la temperatura y humedad relativa interior.*
- b) La evaluación del riesgo de condensación intersticial debida a la difusión de vapor de agua.*
- c) El tiempo necesario para que el agua, desde cualquier fuente, en una capa entre dos capas altamente resistentes al vapor se seque, y el riesgo de condensación intersticial se presente en otra parte del componente durante el proceso de secado.*

*(NCh 1973:2014, p.2)*

Los primeros dos de estos métodos son de particular interés en el contexto de esta tesis.

De las limitaciones, esta norma señala lo siguiente:

*El método utilizado no toma en cuenta un número de importantes fenómenos físicos incluyendo:*

- o La variación de las propiedades del material con contenido de humedad;*
- o La succión capilar y la transferencia de humedad líquida dentro de los materiales;*
- o El movimiento de aire desde el interior de la edificación hacia el componente a través de brechas o dentro de espacios de aire;*
- o La capacidad higroscópica de los materiales.*

*Consecuentemente, el método es aplicable sólo cuando los efectos de estos fenómenos se pueden considerar despreciables.*

*(NCh 1973:2014, p.2)*

El procedimiento de cálculo del método Glaser, se basa en el desacoplamiento de las ecuaciones para el transporte de calor y vapor. Por lo tanto, la transferencia de calor y el transporte de vapor (o más bien sus equivalentes de acuerdo con el método Glaser: presión de vapor de saturación y presión de vapor) se calculan por separado y los resultados de estos cálculos separados se superponen. De acuerdo con la NCh 1973:2014, los cálculos en las interfaces de materiales se llevan a cabo doce veces separadas: una vez por cada mes del año. Se presuponen condiciones unidimensionales de estado estacionario. Para cada mes, se definen las temperaturas interiores y exteriores y las humedades relativas, basadas en promedios mensuales. Esencialmente, la presión de saturación y la presión parcial se calculan y trazan sobre una forma específica de una sección transversal de la construcción, dando como resultado dos perfiles de presión que luego pueden analizarse, como muestra la Figura 2.3.

Para el caso de la evaluación exigida en el PDAV establecida por el MINVU, este cálculo se solicita solo para el mes más desfavorable del año, para Valdivia correspondiente al mes de julio, como se indica en la tabla del punto **2. Riesgo de condensación** del artículo 27 del PDAV de este documento.

Es importante tener presente, que las limitaciones en los procesos físicos cubiertos por esta norma, significa que puede proporcionar un análisis más sólido de algunas estructuras que otras. Los resultados serán más confiables para estructuras livianas y herméticas que no contienen materiales que almacenan grandes cantidades de agua. Son menos confiables para estructuras con gran capacidad térmica y de humedad, y que están sujetas a una fuga de aire significativa. (Little, J. et al, 2015).

Esta norma requiere que los cálculos de condensación intersticial se evalúen y se registren de la siguiente manera:

*Informar los resultados de los cálculos de acuerdo con a), b) o c) según corresponda.*

*a) No se prevé condensación en ninguna interfase en algún mes.*

*En este caso se debe informar que la estructura está libre de condensación intersticial.*

*b) Se produce condensación en una o más interfases durante algunos meses, pero para cada interfase en cuestión, no hay acumulación neta durante el año por cuanto todo el condensado se evapora nuevamente.*

*En este caso se debe informar la cantidad máxima de condensación que se produjo en cada interfase, y el mes en que se produjo el máximo. Además, se debe considerar de acuerdo con los requisitos reglamentarios y otras orientaciones de las normas de productos, el riesgo de escurrimiento de agua o la degradación de los materiales de construcción y el deterioro del desempeño térmico, como consecuencia de la cantidad de humedad máxima acumulada.*

*NOTA Si la acumulación máxima de condensado es mayor a  $200 \text{ g/m}^2$ , el riesgo de escurrimiento de materiales no absorbentes será muy alto.*

*c) Condensación en una o más interfases que no se evapora completamente.*

*En este caso se debe informar que la estructura falla en la evaluación, y establecer la cantidad máxima de humedad que se produce en cada interfase junto con la cantidad de humedad remanente después de 12 meses en cada interfase.*

*(NCh 1973:2014, p.21)*

En general, un componente evaluado con los criterios de esta norma aprueba dicha evaluación si no hay condensación o si la cantidad total de condensado en cada ubicación de evaluación puede evaporarse dentro de un mismo año; de lo contrario, se considera que el componente falla.

Es importante señalar, que estas evaluaciones unidimensionales no pueden explicar las pérdidas de calor elevadas que se producen en las uniones de construcción, que a su vez pueden conducir a temperaturas superficiales más bajas. (Little, J. et al, 2015).

### **2.7.2 Evaluación: Método de Simulación Numérica**

El método de simulación numérica es un procedimiento de evaluación de riesgos de condensación en los sistemas constructivos, que incluye en su evaluación, a diferencia del método Glaser, la precipitación, la higroscopicidad y el transporte de líquidos. La simulación numérica para evaluaciones higrótérmicas se desarrolló en la década de los '90, y su uso más general fue posible gracias al poder de la computación cada vez más disponible. En 2007, se publicó el primer estándar británico sobre simulación numérica para evaluaciones higrótérmicas: BS EN 15026: 2007. (Little, J. et al, 2015). En Chile, esta norma no está disponible en las Normas Chilenas (NCh).

La norma comienza con una descripción de su alcance en comparación con la de BS EN ISO 13788 (NCh 1973:2014):

*Este estándar define la aplicación práctica del software de simulación higrotérmica utilizado para predecir el calor transitorio unidimensional y la transferencia de humedad en componentes de envolvente de edificios multicapa sujetos a condiciones climáticas no estables en ambos lados. En contraste con la evaluación de estado estable de la condensación intersticial por el método Glaser (como se describe en EN ISO 13788), la simulación transitoria higrotérmica proporciona información más detallada y precisa sobre el riesgo de problemas de humedad dentro de los componentes del edificio y sobre el diseño de tratamiento. Mientras que el método Glaser considera solo la conducción en estado estable de la difusión de calor y vapor, los modelos transitorios cubiertos en este estándar tienen en cuenta el almacenamiento de calor y humedad, efectos de calor latente y transporte líquido y convectivo bajo condiciones iniciales y límite realistas. La aplicación de tales modelos se ha utilizado ampliamente en la práctica de la construcción en los últimos años, lo que resulta en una mejora significativa en la precisión y la reproducibilidad de la simulación higrotérmica. (BS EN ISO 15027:2007).*

El objetivo del estándar de simulación numérica es mucho más amplio que el estándar del método Glaser: mientras que el último se ocupa principalmente de la evaluación del riesgo de condensación, el estándar de simulación numérica busca proporcionar un modelo para simular el rendimiento higrotérmico de la envolvente de la construcción a través del tiempo. Sin embargo, una diferencia importante es que el estándar del método Glaser proporciona una guía clara de aprobación / falla específicamente para las evaluaciones de riesgo de condensación, el estándar de simulación numérica no lo hace. Solo establece las ecuaciones que se utilizarán para el modelo de simulación y proporciona alguna guía para la interpretación de los resultados.

La siguiente cita describe con más detalle el alcance y las limitaciones de la norma de simulación numérica, BS EN 15026: 2007:



*Esta norma especifica las ecuaciones que se utilizarán en un método de simulación para calcular la transferencia no constante de calor y humedad a través de las estructuras de construcción...*

*Las ecuaciones en esta norma tienen en cuenta los siguientes fenómenos de almacenamiento y transporte unidimensional:*

- *almacenamiento de calor en materiales de construcción secos y agua absorbida;*
- *transporte de calor por conducción térmica dependiente de la humedad;*
- *transferencia de calor latente por difusión de vapor;*
- *almacenamiento de humedad por absorción de vapor y fuerzas capilares;*
- *transporte de humedad por difusión de vapor;*
- *transporte de humedad por transporte de líquidos (difusión superficial y flujo capilar).*

*Las ecuaciones descritas en este estándar consideran las siguientes variables climáticas:*

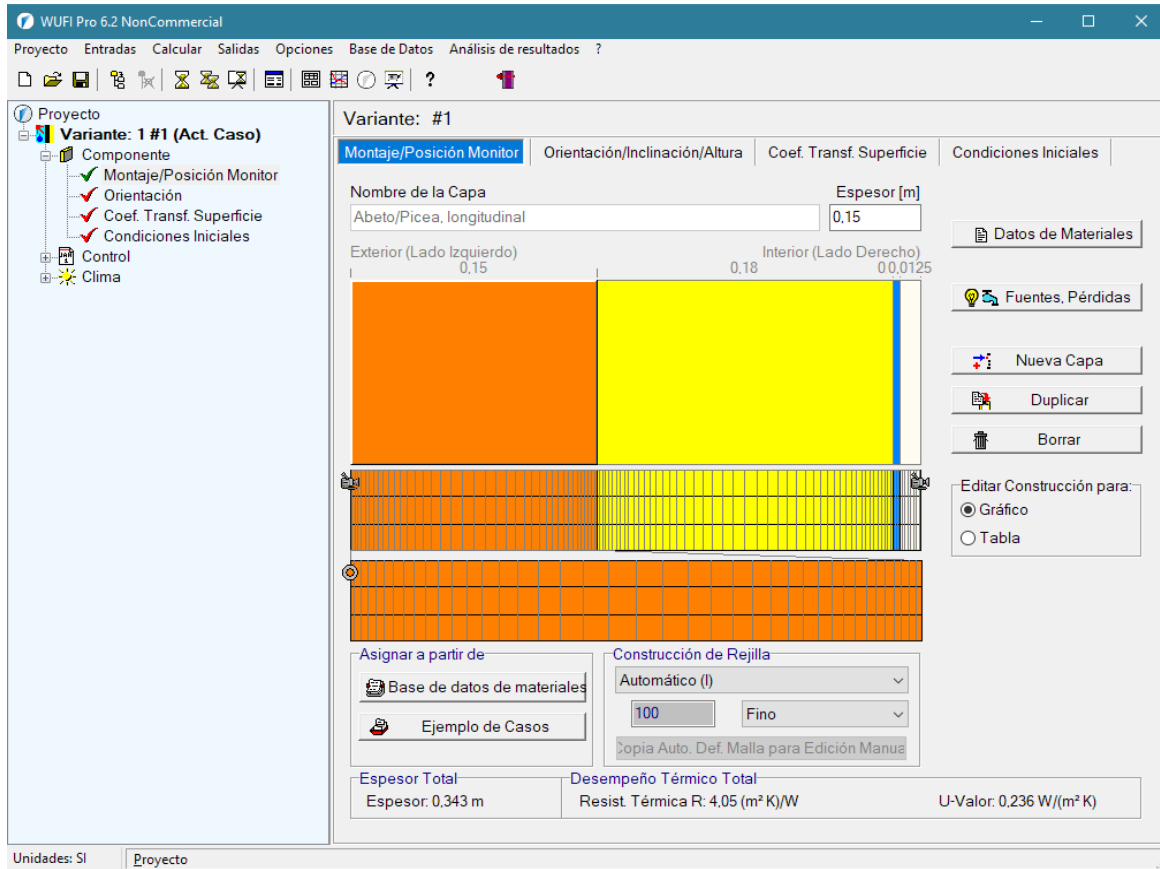
- *temperatura interna y externa;*
- *humedad interna y externa;*
- *radiación solar y de onda larga;*
- *precipitación (lluvia normal y de conducción);*
- *velocidad y dirección del viento.*

*Las ecuaciones higrótérmicas descritas en esta norma no se aplicarán en los casos en que:*

- *La convección tiene lugar a través de agujeros y grietas;*
- *Los efectos bidimensionales desempeñan un papel importante (por ejemplo, el aumento de la humedad, las condiciones alrededor de los puentes térmicos, el efecto de las fuerzas gravitacionales);*
- *Fuerzas hidráulicas, osmóticas, electroforéticas están presentes;*
- *Las temperaturas medias diarias en el componente superan los 50° C.*

*(BS EN ISO 15027:2007)*

Debido a su complejidad, las evaluaciones higrotérmicas mediante simulación numérica son realizadas por software. El software superpone el componente de construcción para ser analizado con una grilla computacional, la cual se puede ver en la Figura 2.6.



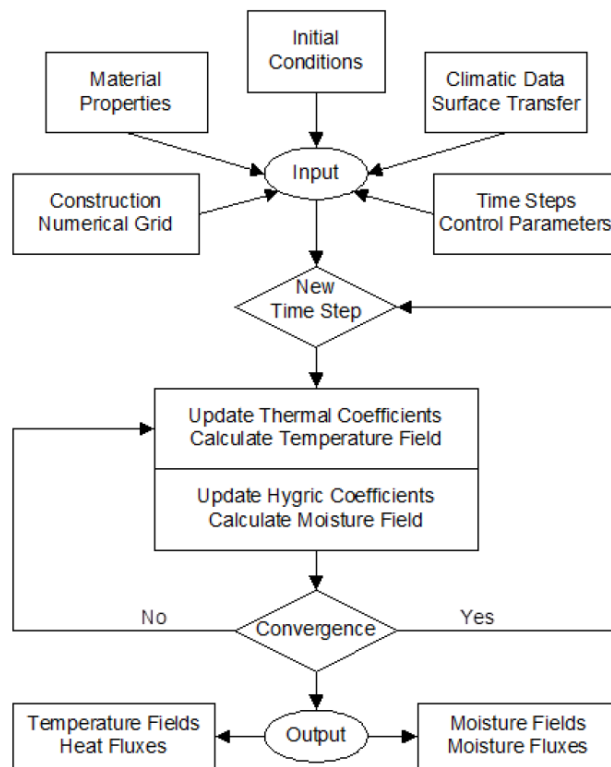
**Figura 2.6: Captura de pantalla de WUFI Pro 6.2: el software utiliza elementos de cuadrícula de tamaño variable para evaluar la sección transversal de una construcción.**

*(Fuente: Elaboración propia con software WUFI Pro 6.2)*

Aunque, en realidad, la humedad y el calor se afectan entre sí de forma continua en todo el ancho de un componente, en la simulación numérica esta relación solo se evalúa en el centro de una celda de cuadrícula o elemento de cuadrícula. La cuadrícula es de tamaño variable, con elementos de cuadrícula estrechamente espaciados en las superficies de los componentes y las interfaces de materiales. Es en estos lugares que ocurren los cambios higrotérmicos más marcados. Dentro de la capa de material de un componente, se utilizan elementos más ampliamente espaciados, lo que minimiza el número de cálculos. Se usa una cuadrícula de tamaño variable para mejorar la eficiencia de la simulación: demasiados elementos de la cuadrícula estrechamente espaciados dan

como resultado un aumento en el tiempo de cálculo, pero si están demasiado espaciados, la precisión se pierde.

En una simulación numérica, acopladas, las ecuaciones diferenciales se resuelven para los procesos de transporte de calor y humedad para cada elemento de rejilla y unidad de tiempo seleccionada (normalmente una hora), utilizando como condiciones de contorno, los datos ambientales interiores, y para exterior, los datos climáticos. Este proceso se repite durante el período de simulación. Para una simulación que utiliza un período de simulación de diez años e intervalos por hora, esto dará como resultado 87.600 conjuntos de cálculos. Este proceso iterativo se ilustra en la Figura 2.7 con un diagrama de flujo.



**Figura 2.7: Diagrama de flujo que muestra el proceso iterativo en el que se basa el método de simulación numérica.**

*(Fuente: Künzle, H., 1995. Simultaneous heat and moisture transport in building components. p.44)*

La simulación durante un período de tiempo seleccionado da como resultado una cantidad importante de datos de salida, registrando los cambios de temperatura, humedad, contenido de agua y presión de vapor. Estos datos se basan en las propiedades de los materiales y las

condiciones de borde. Los tipos de resultados se pueden ver juntos, como una película, o por separado, en forma de gráfico o como una hoja de cálculo.

Como criterio de evaluación, el estándar británico no establece límites específicos en la cantidad de acumulación de humedad. Sin embargo, se plantean criterios generales, estos son:

- *El criterio más importante: la humedad no debe acumularse en el tiempo. La condensación de agua en el componente del edificio debe poder secarse nuevamente. Si el contenido de humedad en el componente sigue aumentando, incluso lentamente, tarde o temprano tendrá problemas.*
- *Los materiales de construcción que entran en contacto con la humedad no deben dañarse (por ejemplo, por corrosión o crecimiento de moho).*
- *Los materiales de construcción minerales, generalmente no están en riesgo, algunos de ellos pueden ser susceptibles al daño por heladas si contienen mucha humedad.*
- *La madera no debe exceder el 20% en masa de humedad durante un periodo prolongado; de lo contrario, puede aparecer crecimiento de moho (posible excepción: aumento de la humedad cuando las temperaturas son bajas).*

*La norma alemana DIN 4108-3 agrega los siguientes criterios:*

- *La cantidad de condensación de humedad en los complejos de techo o muros no debe exceder un total de 1,0 kg/m<sup>2</sup>.*
- *En las interfaces entre materiales que no son activos capilares (por ejemplo, lana mineral), no se permite ningún aumento de humedad superior a 0,5 kg/m<sup>2</sup>. (Esto está destinado a evitar que la humedad corra o gotee, lo que podría acumularse en otros lugares y causar daños).*

*(Fuente: WUFI's Online Help)*

### Capítulo 3. Evaluación de riesgos de condensación superficial e intersticial

Este capítulo aborda la definición de la humedad de base climática para Valdivia y la humedad por ocupación y uso de las viviendas sociales, en que se establece la clase de higrometría apropiada a este contexto, y en base a lo anterior se definen las condiciones de borde para los cálculos de riesgo de condensación que serán utilizadas en este estudio.

#### 3.1 Condiciones climáticas – Humedad de base climática

Para evaluar la condensación superficial e intersticial de un sistema constructivo, los factores climáticos que influyen y que son necesarios conocer, son la carga de lluvia en la superficie, la densidad del flujo de radiación solar de onda corta, la temperatura interior y exterior, la humedad relativa interior y exterior, la presión barométrica media.

El Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2017) ha generado una herramienta de cálculo simplificado (Planilla Excel®) de condensación superficial e intersticial, como método de comprobación de cumplimiento de la disminución de condensaciones para el PDAV, basado en la NCh1973:2014, esta norma señala que a menos que la Autoridad Competente especifique de otra manera, los cálculos se deben hacer con los valores de temperatura media mensual y la humedad relativa asociada a esa temperatura; MINVU ha establecido como condiciones de borde exterior la temperatura media mínima mensual y la humedad relativa exterior asociada a esta temperatura, es decir 3,5° C y 98% de HR (mes de julio).

Bajo esta premisa, es posible establecer una humedad de base climática, determinada por las condiciones del lugar, que constituye la carga base de humedad con la que el aire entra a la vivienda. Entonces, para el período de invierno, aire exterior entrando a temperatura media de las mínimas del mes más frío de la localidad y humedad asociada a esa temperatura en Valdivia, tenemos un valor de 4,8 gramos de vapor / kilogramo de aire seco (gv/kg as) correspondiente a la humedad absoluta exterior; esto se visualiza en la Figura 3.1 que muestra la relación de la temperatura media mínima y su humedad relativa.

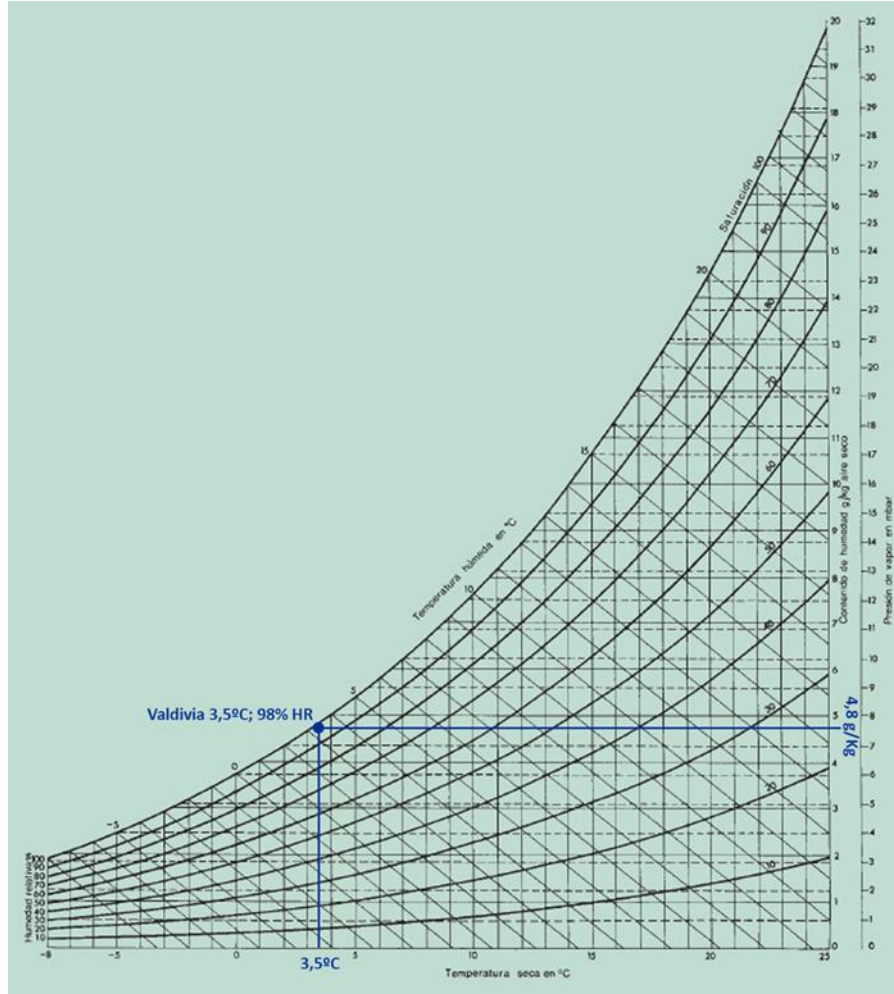


Figura 3.1: Carta psicrométrica que permite visualizar la carga de humedad de base climática para la ciudad de Valdivia en el mes de julio. (Fuente: Elaboración propia)

### 3.2 Fuentes de humedad en viviendas – Humedad de ocupación

El MINVU ha establecido para la verificación del riesgo de condensación una temperatura interior del aire de 19° C y humedad relativa interior de 65%, 75% y 80%; para el cálculo se debe determinar la disminución del riesgo de condensación en al menos una de las humedades relativas.

Como se menciona anteriormente, las viviendas sociales presentan una baja superficie, 42 m<sup>2</sup> aprox. y una alta ocupación; adicional a esto están las actividades cotidianas en una vivienda que generan una alta tasa de vapor de agua como el aseo personal, cocción de alimentos, y en algunos

casos el uso de calefacción en base a hidrocarburos (principalmente parafina o GLP) sin evacuación de gases al exterior, entre otros. Entonces, esta humedad de ocupación es derivada de la actividad metabólica de las personas y de las actividades, como se puede visualizar en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1: Vapor de agua generada por actividad y por personas.**

(Fuente: *Humedad por condensación en viviendas: Prevención y soluciones. N°33, CDT*)

Fuente	Generación de
Secado de ropa	1000 g/día
Cocina	500 g/h
Aseo personal (ducha)	1000 g/h
Calefacción (parafina)	625 g/h
<b>Actividad de personas (a 20° C de temperatura):</b>	
Reposo	45 g/h pers.
Trabajo ligero	110 g/h pers.
Trabajo normal	170 g/h pers.
Trabajo muy pesado	300 g/h pers.

En estudio llevado a cabo por el CIVA – UACH, se realizaron mediciones a viviendas sociales de la ciudad de Valdivia, para determinar las causas de problemas de condensación y proliferación de moho, se registraron mediciones de humedad relativa interior entre 41% y 83% y temperaturas interiores entre 5,5°C y 29°C, recogida de información en el mes de julio (Informe análisis termográfico e higrotérmico – Viviendas Sociales Brisas de Guacamayo, CIVA – UACH, 2012).

Así mismo, el estudio realizado por CITECUBB (a través de licitación ID 587-78-LE13), establece solicitudes para cálculo de riesgo de condensación, en el que se determinan condiciones ambientales propuestas de referencia para verificación y análisis de riesgo de ocurrencia de condensaciones por provincia, según NCh1973 con clase de higrometría 5, valores que para la ciudad de Valdivia se detallan en la Tabla 3.2:

**Tabla 3.2: Condiciones ambientales para cálculo de riesgo de condensación para la ciudad de Valdivia.**

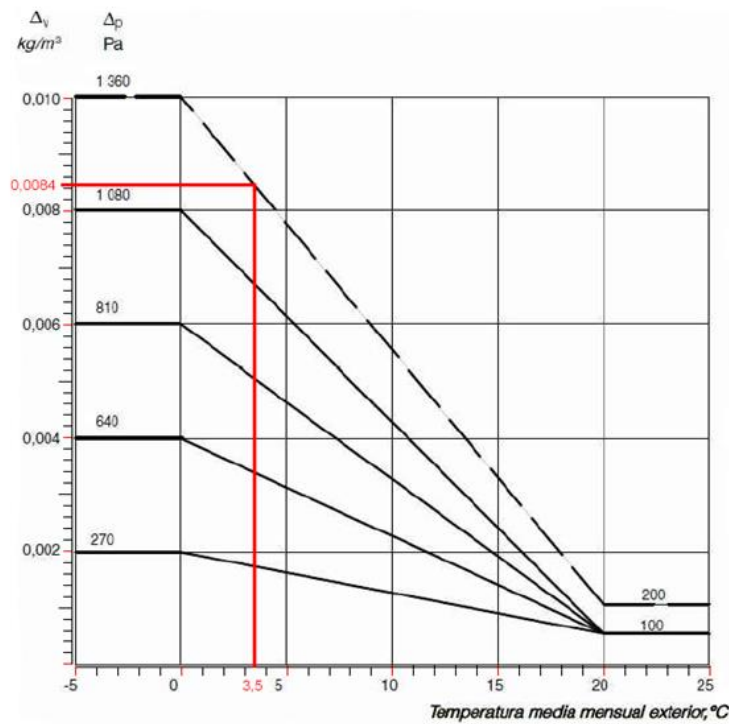
(Fuente: *DITEC MINVU / CITEC UBB – Licitación ID 587-78-LE13*)

Región/Provincia	Capital	Ambiente Exterior				Ambiente Interior				Gradiente	
		t° mínima media	HR	v	Pv	t°	HR	v	Pv	ΔT	Δpv
		°C	%	Kg/m³	Pa	°C	%	Kg/m³	Pa	°C	Pa
Región de Los Ríos											
Provincia de Valdivia	Valdivia	3,5	98	0,0060	769	20	87	0,0151	2103	16,5	1334

Con los antecedentes antes señalados, se determina que la clase de higrometría 5 es la condición apropiada para el cálculo de riesgo de condensación para Valdivia, de acuerdo a lo señalado en la Tabla 3.3 y el Gráfico 3.1 de la NCh1973:2014.

**Tabla 3.3: Clases de humedad interior.** (Fuente: NCh1973:2014)

Clase de humedad	Edificaciones
1	Edificaciones desocupadas, almacenamiento de productos secos.
2	Oficinas, viviendas con ocupación normal y ventilación.
3	Edificaciones con ocupación desconocida.
4	Salas de deportes, cocinas, comedores.
5	Edificaciones especiales, por ejemplo, lavandería, cervecería, piscina.



**Gráfico 3.1: Variación de clase de humedad interior 5 con temperatura exterior de 3,5° C en Valdivia.** (Fuente: NCh1973:2014)

Esto implica una carga de humedad por ocupación con clase de higrometría 5 en el mes de julio, de 0,0084  $\text{kg/m}^3$ , es decir 7 g/kg as (8,4  $\text{g/m}^3$  / 1,2  $\text{kg/m}^3$ ).

En resumen, si se adiciona a la humedad de base climática de 4,8 g/kg as, la humedad por ocupación de 7 g/kg as a una temperatura interior 19° C, se obtiene una humedad relativa interior de 86%, esto se visualiza en la Figura 3.2.



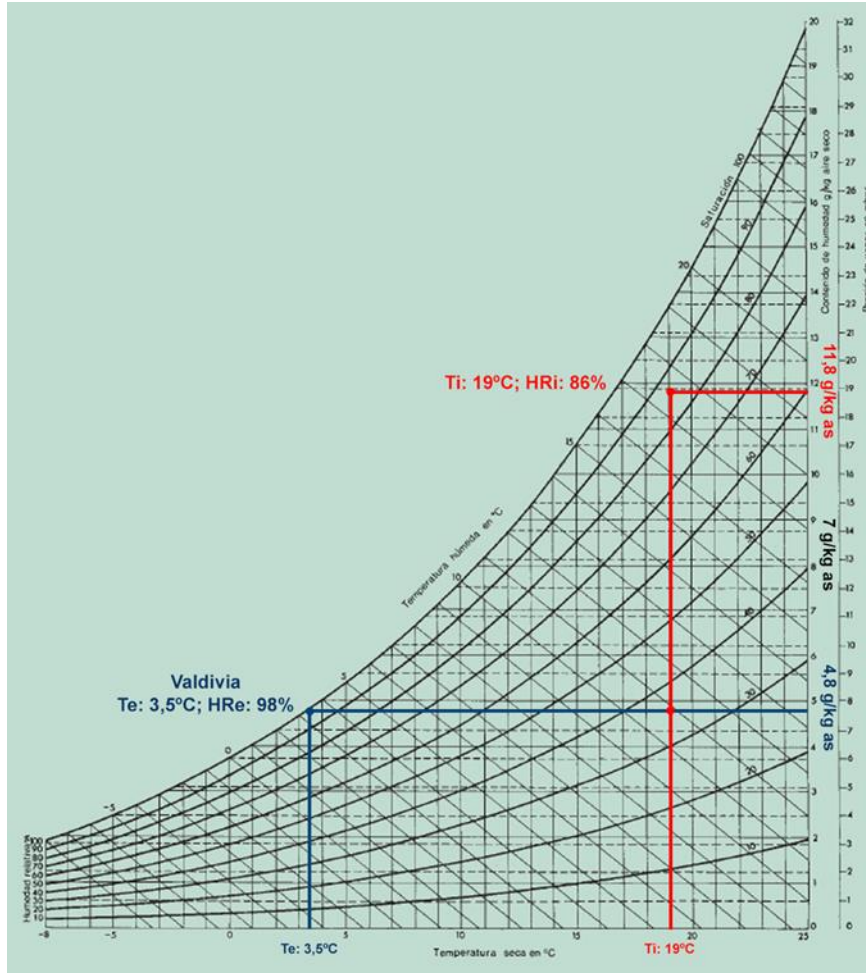


Figura 3.2: Carta psicrométrica que permite visualizar la carga de humedad de base climática y la humedad por ocupación para la ciudad de Valdivia en el mes de julio. (Fuente: Elaboración propia)

### 3.3 Condiciones de borde para cálculos de riesgos de condensación

Para la evaluación de los cálculos de riesgos de condensación de la presente tesis se establece las condiciones de borde, de acuerdo a los puntos antes descritos 3.1 y 3.2:

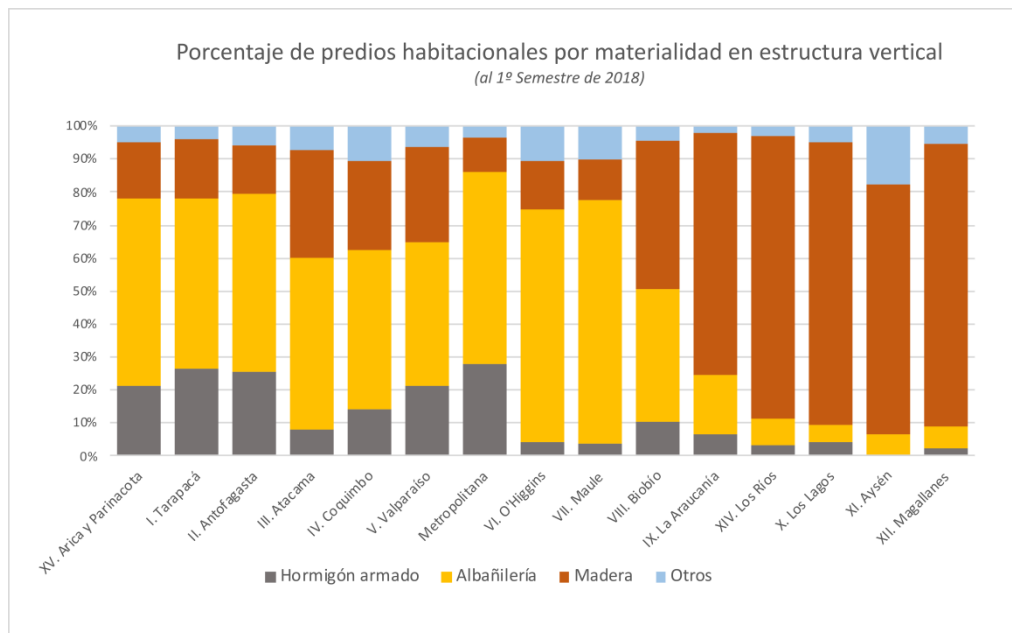
- Condición exterior:
- Temperatura exterior: 3,5° C
  - Humedad Relativa exterior: 98%
- Condición interior:
- Temperatura interior: 19° C
  - Humedad Relativa interior: 86%

## Capítulo 4. Soluciones Constructivas Base (SCB)

En este capítulo se aborda la definición de los casos de estudio, que corresponden a 3 soluciones constructivas de muros exteriores utilizadas en vivienda sociales en Valdivia, basados en el sistema de estructura y los materiales de construcción. Se establecen condiciones de condensación superficial e intersticial y se señalan los métodos de cálculo considerados para cada uno de ellos y finalmente se muestran las evaluaciones de riesgos de condensación para cada uno de los tres tipos de soluciones constructivas base (SCB).

### 4.1 Definición de las soluciones constructivas base de muros exteriores

Para definir las soluciones constructivas base de muros exteriores de viviendas sociales en la ciudad de Valdivia, está se realiza en base a la revisión estadística del tipo de estructura más utilizado en la XIV Región de Los Ríos que alcanza un 85% en tabiquería de madera, como ilustra el Gráfico 4.1.



**Gráfico 4.1: Porcentaje de predios habitacionales por materialidad predominante en estructura vertical de la construcción por Región al primer semestre 2018. (Fuente: SII)**

En el caso específico de las viviendas sociales construidas en la ciudad de Valdivia, estas presentan estructura de tabiquería de madera en más de un 95% en los últimos 10 años.

En cuanto a los materiales de revestimiento interior de muros, en el 90% de los proyectos de viviendas social construidos en Valdivia, consideran placa de yeso cartón ST en zonas secas y en el mismo porcentaje se utiliza placa de fibrocemento en zonas húmedas, el 10% restante se utiliza placa de terciado ranurado y otros. Como revestimientos exteriores de muros, los materiales más utilizados son tableros de fibra de madera con terminación base de pintura en cara expuesta (tipo Smartpanel), fibrocemento (tinglado o placa), tinglado de PVC sobre placa de OSB (tipo Vinyl Siding) y planchas de zincalum acanalado. Respecto a los aislantes térmicos, el más utilizado es la lana de vidrio, luego le sigue la lana mineral y en mucho menor proporción el poliestireno expandido (SERVIU Los Ríos, 2018).

De acuerdo a las materialidades mayoritariamente presentes en las viviendas sociales construidas en Valdivia, se consideran tres soluciones constructivas base (SCB) como se muestra en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1: Soluciones constructivas base de viviendas sociales construidas en Valdivia.**

(Fuente: Elaboración propia)

Soluciones Constructivas Base	Revestimiento Exterior	Barrera de Humedad	Estructura Principal	Aislación Térmica	Barrera de Vapor	Revestimiento Interior
SCB - 1	Fibrocemento e: 6 mm	Fieltro 15 Lbs	Tabiquería madera 2" x 3"	Lana Mineral e: 40 mm - $\rho$ : 40 kg/m <sup>3</sup>	Papel Kraft e: 0,35 mm	Yeso cartón ST e: 10 mm
SCB - 2	Zincalum acanalado e: 0,35 mm	Klover	Tabiquería madera 2" x 3"	Lana de Vidrio e: 50 mm - $\rho$ : 14 kg/m <sup>3</sup>	---	Terciado Ranurado e: 9 mm
SCB - 3	Smartpanel e: 11,1 mm	Fieltro 15 Lbs	Tabiquería madera 2" x 3"	EPS e: 50 mm - $\rho$ : 10 kg/m <sup>3</sup>	Papel Kraft e: 0,35 mm	Yeso cartón ST e:10 mm

Una vez establecidas las soluciones constructivas que se evaluarán, se determinan las propiedades físicas de los materiales. En general, en Chile, existe muy poca información sobre los materiales de construcción, es por ello que se ha recopilado información disponible y sea buscado información de materiales extranjeros similares con esta información disponible; estos datos han sido obtenidos del software WUFI Pro v6.2, la cual se detalla en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2: Propiedades físicas de los materiales de construcción.**

Material	Espesor	Densidad Aparente, ρ	Porosidad	Calor Específico, C <sub>p</sub>	Conductividad Térmica, λ	Resistencia a la Difusión de Vapor	Permeabilidad al Vapor, δ <sub>p</sub>		Factor Resistencia a la Difusión de Vapor, μ	Sd, μ <sup>•e</sup>
	[m]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	[J/kgK]	[W/mK]	[MNs/g]	[gm/MNs]	[Kg/msPa]	[-]	[m]
<b>Revestimiento Exterior</b>										
Fibrocemento	0,006	1250	0,48	840	0,23	5,30	1,13E-03	1,13E-12	194	1,17
Smartpanel	0,0111	655	0,84	1500	0,055	15,92	6,97E-04	6,97E-13	316	3,50
Zinc Acanalado	0,00035	7800	0,001	450	46	---	2,20E-06	2,20E-15	100.000	35
<b>Revestimiento Interior</b>										
Yeso cartón ST	0,01	750	0,65	850	0,26	0,89	1,12E-02	1,12E-11	20	0,20
Terciado Ranurado	0,009	570	0,5	1500	0,102	12,00	7,50E-04	7,5E-13	293	2,64
<b>Aislantes Térmicos</b>										
Lana Mineral	0,04	40	0,95	850	0,0420	---	1,69E-01	1,69E-10	1,3	0,052
Lana de Vidrio	0,05	11	0,99	840	0,0420	1,11	4,50E-02	4,50E-11	4,88	0,24
EPS 10	0,05	10	0,95	1500	0,0430	6,94	7,20E-03	7,2E-12	30,56	1,53
<b>Barreras de Humedad</b>										
Filtro 15 Lbs	0,00037	280	0,001	1500	2,3	0,49	7,48E-04	7,48E-13	294	0,11
Klober	0,000175	130	0,001	2300	2,3	0,44	4,00E-04	4,00E-13	549	0,10
<b>Barrera de Vapor</b>										
Papel Kraft	0,00035	120	0,6	1500	0,42	36,61	9,56E-06	9,56E-15	23012	8,05
<b>Cámara de Aire</b>										
Aire en reposo	0,02	1,3	0,999	1000	0,121	5,50	3,64E-03	3,64E-12	60,50	1,21

Permeabilidad al vapor de agua del aire, δ<sub>o</sub>= 2,20E-10 (Kg/msPa)

## 4.2 Consideraciones de evaluación de riesgos de condensación superficial

Para el cálculo de condensación superficial, la NCh 1973:2014 contiene un método de cálculo para determinar el factor de temperatura en la superficie interior de la envolvente. Esta norma plantea distintos criterios de evaluación de riesgo de condensación superficial, según el objetivo que se establece en el diseño de la solución constructiva:

- Para evitar la formación y crecimiento de moho: HR en la superficie < 0,8 (80%)
- Para evitar la oxidación: HR en las superficies < 0,6 (60%)
- Para evitar la condensación superficial: HR en las superficies < 1,0 (100%)

**Factor de temperatura de la superficie interior:** Cociente entre la diferencia de temperatura superficial interior y la del ambiente exterior y la diferencia de temperaturas del ambiente interior y exterior.

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

**Factor de temperatura de diseño en la superficie interior:** Factor de temperatura mínima aceptable en una superficie interior.

$$f_{R_{si,mín.}} = \frac{\theta_{si,mín.} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

Para un diseño de edificación dado, se puede deducir los valores eficaces de  $f_{R_{si}}$ :

- Para elementos planos, a partir de  $f_{R_{si}} = 1 - R_{si} \times U$ ;
- Cuando ocurren flujos de calor multidimensionales, a partir de un programa de elementos finitos o similar de acuerdo con ISO 10211.

Esta norma (NCh1973:2014) establece para las resistencias superficiales – transferencia de calor:

- Resistencia superficial exterior,  $R_{se}$ : 0,04 m<sup>2</sup>K/W.
- Resistencia superficial interior, señala que, al no existir norma nacional, para la condensación o la formación de moho sobre las superficies opacas, se debe considerar una  $R_{si}$ : 0,25 m<sup>2</sup>K/W para representar el efecto de las esquinas, mobiliario, cortinas o cielos rasos suspendidos.

Entonces, de acuerdo a las condiciones de borde para cálculos de riesgo de condensación descritos en el **punto 3.3**, se obtiene:

- $\theta_e$ : 3,5° C
- $\theta_i$ : 19° C
- HRi: 86%

- (1) Se calcula la humedad de saturación aceptable, para una humedad relativa máxima aceptable en la superficie,  $\varphi = 1$ :

$$p_{sat}(\theta_{si}) = p_i$$

$$p_i = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}} \quad \text{para } \theta \geq 0^\circ\text{C}$$

Se obtiene, para 19° C de temperatura interior un  $P_i = 2196$  Pa, entonces reemplazando;

$$P_{sat}(\theta_{si}) = 2196 \cdot 0,86 / 1 = \mathbf{1888,56 \text{ Pa}}$$

- (2) Se calcula la temperatura superficial mínima aceptable ( $\theta_{si,mín}$ ) de acuerdo a criterio establecido para la presión de saturación (1888,56 Pa):

$$\theta = \frac{237,3 \log_e \left( \frac{P_{sat}}{610,5} \right)}{17,269 - \log_e \left( \frac{P_{sat}}{610,5} \right)} \quad \text{para } p_{sat} \geq 610,5 \text{ Pa}$$

$$\theta_{si, \text{mín}} = \mathbf{16,6^\circ \text{ C}}$$

- (3) Con la temperatura superficial mínima aceptable ( $\theta_{si,mín}$ ) se calcula el Factor de temperatura de diseño en la superficie interior,  $f_{Rsi}$ :

$$f_{Rsi,mín.} = \frac{\theta_{si,mín.} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

$$f_{Rsi,mín.} = 16,6 - 3,5 / 19 - 3,5$$

$$f_{Rsi,mín.} = \mathbf{0,845}$$

- (4) Para determinar la transmitancia térmica máxima (valor U) se utiliza la ecuación, considerando una resistencia superficial interior  $R_{si} = 0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$ :

$$f_{Rsi} = 1 - R_{si} \times U$$

Reemplazando, se obtiene:

$$0,845 = 1 - 0,25 \times U$$

$$\mathbf{U = 0,62 \text{ W/m}^2\text{K}; \text{ o } R_t = 1,61 \text{ m}^2\text{K/W}}$$

Si se compara este valor con lo exigido en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (O.G.U.C.) para la zona térmica 5 (Valdivia), según Tabla 4.3 de valor U por zonas térmicas, este valor de  $0,62 \text{ W/m}^2\text{K}$  es más exigente que la normativa térmica ( $1,60 \text{ W/m}^2\text{K}$ ); a su vez, si se compara con el nuevo estándar definido en el PDAV, que establece un valor U para muros de  $0,40 \text{ W/m}^2\text{K}$ , el valor U de  $0,62 \text{ W/m}^2\text{K}$  no cumple con la exigencia. Por lo que se puede inferir, que cumplir con el estándar PDAV permite obtener una temperatura superficial mínima aceptable de  $10,45^\circ \text{ C}$ ., disminuyendo el riesgo de ocurrencia de condensación superficial.

**Tabla 4.3: Transmitancias y Resistencias térmicas contenida en el artículo 4.1.10 de la O.G.U.C.**

ZONA	Techumbre		Muros		Pisos Ventilados	
	U	Rt	U	Rt	U	Rt
	W/m <sup>2</sup> K	m <sup>2</sup> K/W	W/m <sup>2</sup> K	m <sup>2</sup> K/W	W/m <sup>2</sup> K	m <sup>2</sup> K/W
1	0,84	1,19	4,00	0,25	3,60	0,28
2	0,60	1,67	3,00	0,33	0,87	1,15
3	0,47	2,13	1,90	0,53	0,70	1,43
4	0,38	2,63	1,70	0,59	0,60	1,67
5	0,33	3,03	<b>1,60</b>	<b>0,63</b>	0,50	2,00
6	0,28	3,57	1,10	0,91	0,39	2,56
7	0,25	4,00	0,60	1,67	0,32	3,13

Para verificar el cumplimiento de la resistencia térmica total mínima para que no se produzca condensación superficial de 1,618 m<sup>2</sup>K/W, que se muestra en la Tabla 4.5, señaladas en el punto **3.3 Condiciones de borde para cálculos de riesgos de condensación**, se obtendrá el  $R_{T,min}$ , de forma manual incorporando los datos de los materiales mencionados para cada solución constructiva en una planilla Excel<sup>®</sup> que utiliza la siguiente formula extraída de la NCh853:2007:

$$R_T = \frac{1}{U} = R_{si} + R_i + R_g + R_e + R_{se} \qquad R = \frac{e}{\lambda}$$

Donde,

$R_T$ : Resistencia térmica (m<sup>2</sup>K/W)

$U$ : Transmitancia térmica (W/m<sup>2</sup>K)

$R_{si}$ : Resistencia superficial interior (m<sup>2</sup>K/W)

$R_{se}$ : Resistencia superficial exterior (m<sup>2</sup>K/W)

$e$ : Espesor del material (m)

$\lambda$ : Conductividad térmica del material (W/mK)

$R_g$ : Resistencia térmica de una cámara de aire (m<sup>2</sup>K/W)

Para determinar la resistencia térmica de las cámaras de aire no ventiladas ( $R_g$ ), se utiliza la Tabla 4.4 contenida en la NCh 853:2007, en la cual por las características de los materiales que componen las cámaras de aire de las soluciones analizadas se consideran con una Emisividad total,  $E = 0,82$ .

**Tabla 4.4: Resistencia térmica por unidad de superficie de cámaras de aire no ventiladas – Cámaras de aire verticales, flujo térmico horizontal.**

Espesor de la cámara, mm	Emisividad total, E			
	0,82	0,20	0,11	0,05
	Resistencia térmica, $R_g$ , m <sup>2</sup> x K/W			
5	0,105	0,17	0,20	0,20
10	0,140	0,28	0,32	0,38
15	0,155	0,35	0,43	0,51
20	0,165	0,37	0,46	0,55
25	0,165	0,37	0,46	0,55
30	0,165	0,37	0,46	0,55
35	0,165	0,37	0,46	0,55
e ≥ 40	0,165	0,37	0,46	0,55

Se utiliza el software Therm v7.6 de análisis bidimensional de transferencia de calor por conducción, para determinar las temperaturas superficiales interiores de las soluciones constructivas, para realizar una comparación con la temperatura mínima aceptable de la superficie interior indicada en la Tabla 4.5 de 16,6° C.

**Tabla 4.5: Temperatura superficial mínima y Resistencia térmica total mínima para condiciones de borde establecidas en el punto 3.3. de este documento.**

Mes	T° aire ext.	HR ext.	T° aire int.	HR int.	Presión de saturación vapor de agua del aire interior	Presión de vapor interior	HR max. aceptable en superficie	Min. Presión de saturación vapor aceptable	T° min. aceptable de la superficie interior	Factor de T° de diseño en la superficie interior	Resistencia térmica de superficie interior	Resistencia térmica total mínima	Transmitancia térmica total máxima
	$\theta_e$ [°C]	$\phi_e$	$\theta_i$ [°C]	$\phi_i$	$p_{sat,i}$ [Pa]	$p_i$ [Pa]	$\phi_{acr}$	$p_{sat}(\theta_{si})$ [Pa]	$\theta_{si,min}$ [°C]	$f_{Rsi,min}$	$R_{si}$ [m <sup>2</sup> K/W]	$R_{T,min}$ [m <sup>2</sup> K/W]	$U_{min}$ [W/m <sup>2</sup> K]
Julio	3,5	0,98	19	0,86	2196	1889	1	1889	16,6	0,845	0,25	1,618	0,618

### 4.3 Consideraciones de evaluación de riesgos de condensación intersticial

Para verificar el riesgo de condensación intersticial y la acumulación de condensación en interior de las soluciones constructivas se utilizarán dos métodos de evaluación: la primera corresponde a la metodología establecida por DITEC - MINVU a través de la herramienta Excel© “Cálculo Condensaciones\_DITEC\_v2.17” basada en la NCh 1973:2014 - método Glaser; evaluación realizada para el mes más desfavorable (julio), de acuerdo a las condiciones de borde indicadas en el **punto 3.3 Condiciones de borde para cálculos de riesgos de condensación**. Los datos de permeabilidad al paso de vapor de agua de los materiales se obtienen de la Tabla 2.1, que se encuentra en la misma herramienta antes mencionada.



Para el segundo, se utiliza el método de Simulación Numérica a través del software WUFI® Pro v6.2, que como ya se ha mencionado anteriormente, permite realizar cálculos higrotérmicos unidimensionales en las envolventes en secciones transversales, considerando la humedad, precipitaciones, radiación solar, radiación de onda larga, transporte capilar y condensación de verano, basado en la norma BS EN ISO 15027:2007.

#### 4.4 Evaluación de condensación superficial de soluciones constructivas base

##### 4.4.1 Solución constructiva Base 1

La primera solución constructiva base 1 (SCB - 1), consiste en una tabiquería de madera de 2" x 3" con pies de derechos y cadenetras de la misma escuadría, en su interior se incorpora aislación de lana mineral de 40 mm de espesor y de 40 kg/m<sup>3</sup> de densidad aparente, dejando una cámara de aire no ventilada (CANV) de 30 mm de espesor, como barrera de humedad se contempla papel fieltro de 15 lb y como barrera de vapor considera papel kraft 0,35 mm de espesor, el revestimiento exterior corresponde una placa de fibrocemento de 6 mm de espesor y de revestimiento interior una plancha de yeso cartón de 10 mm de espesor.

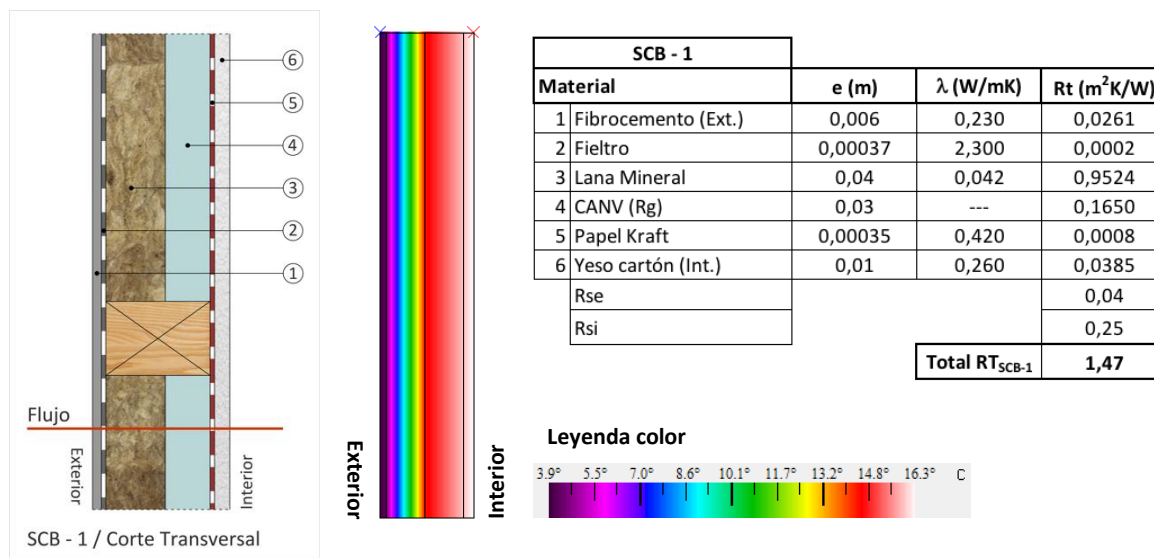


Figura 4.1: Flujo térmico y cálculo de resistencia térmica de la SCB – 1.

Esta solución arroja un valor de resistencia térmica de 1,47 m<sup>2</sup>K/W, y una temperatura superficial interior de 16,34° C; esto se puede visualizar en el esquema de flujo térmico realizado con Therm

en la Figura 4.1. Por consiguiente, esta solución constructiva presenta riesgo de condensación superficial según la Tabla 4.5 presentada anteriormente.

#### 4.4.2 Solución constructiva Base 2

La segunda solución constructiva base 2 (SCB - 2) analizada, consiste en una tabiquería de madera de 2" x 3" con pies de derechos y cadenetitas de la misma escuadría, en su interior se incorpora aislación de lana de vidrio de 50 mm de espesor y de 11 kg/m<sup>3</sup> de densidad aparente, dejando una cámara de aire no ventilada (CANV) de 20 mm de espesor, como barrera de humedad se contempla membrana Klover y sin barrera de vapor, el revestimiento exterior corresponde una plancha de zincalum acanalado vertical de 0,35 mm de espesor y de revestimiento interior una placa de terciado ranurado de 9 mm de espesor.

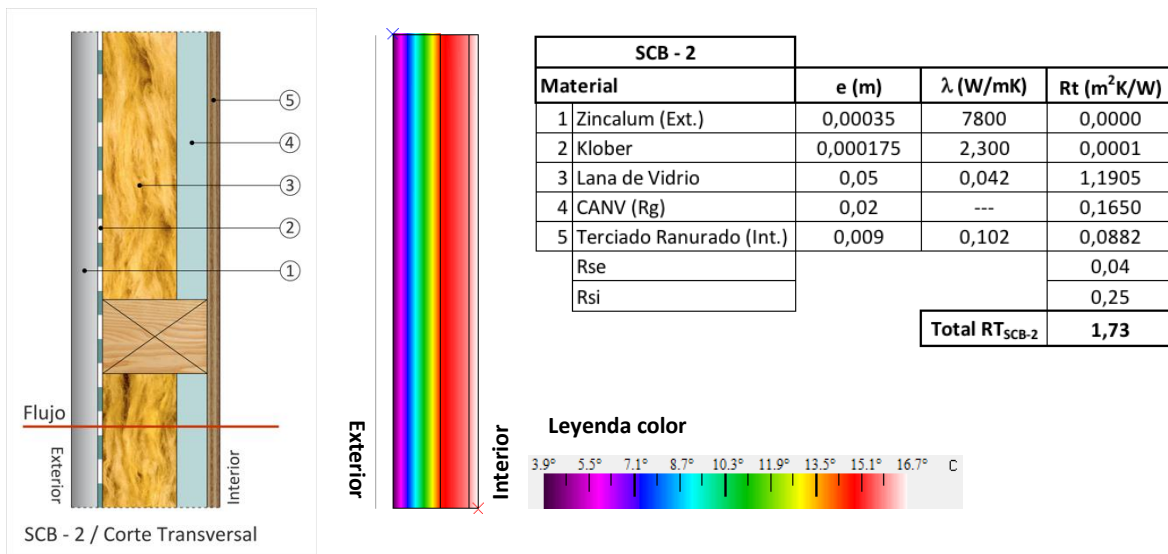


Figura 4.2: Flujo térmico y cálculo de resistencia térmica de la SCB – 2.

Esta solución entrega un valor de resistencia térmica de 1,73 m<sup>2</sup>K/W, y una temperatura superficial interior de 16,74° C; esto se puede visualizar en el esquema de flujo térmico realizado con Therm en la Figura 4.2. Por lo tanto, esta solución constructiva no presenta riesgo de condensación superficial, pues posee una resistencia térmica superior a la R<sub>T,min</sub>, según la Tabla 4.5.

### 4.4.3 Solución constructiva Base 3

La tercera solución constructiva base 3 (SCB - 3) estudiada, consiste en una tabiquería de madera de 2" x 3" con pies de derechos y cadenetras de la misma escuadría, en su interior se incorpora aislación de poliestireno expandido (EPS) de 50 mm de espesor y de 10 kg/m<sup>3</sup> de densidad aparente, dejando una cámara de aire no ventilada (CANV) de 20 mm de espesor, como barrera de humedad se contempla papel fieltro de 15 lb y como barrera de vapor considera papel kraft 0,35 mm de espesor, el revestimiento exterior corresponde un tablero de fibra de madera con terminación base de pintura en cara expuesta de 11,1 mm de espesor y de revestimiento interior una plancha de yeso cartón de 10 mm de espesor.

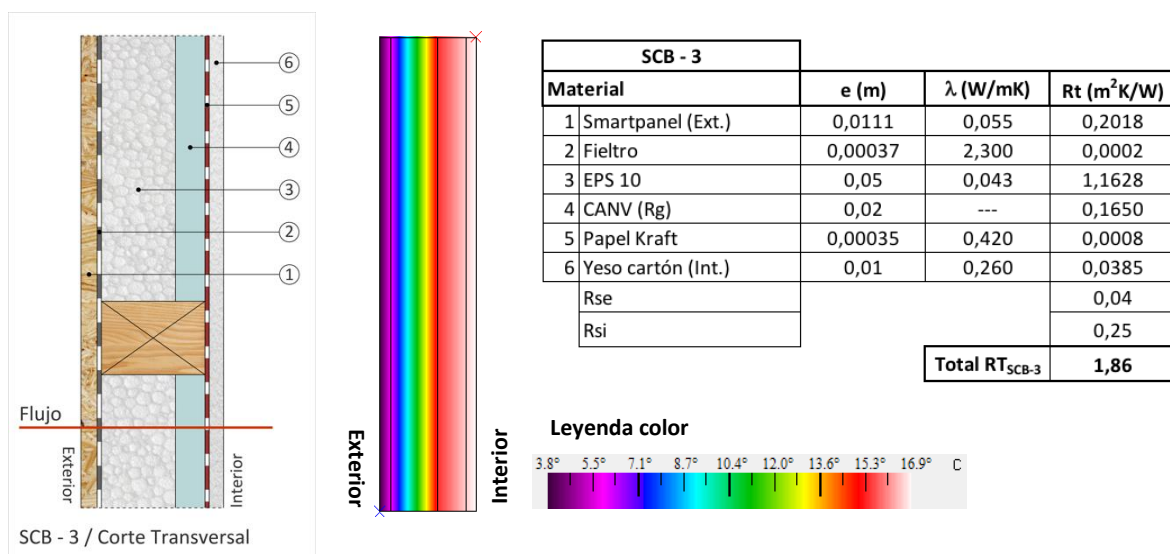


Figura 4.3: Flujo térmico y cálculo de resistencia térmica de la SCB – 3.

Esta tercera solución base arroja un valor de resistencia térmica de 1,86 m<sup>2</sup>K/W, y una temperatura superficial interior de 16,89° C; esto se puede visualizar en el esquema de flujo térmico realizado con Therm en la Figura 4.3. En consecuencia, esta solución constructiva no presenta riesgo de condensación superficial, pues posee una resistencia térmica superior a la R<sub>T,min</sub>, según la Tabla 4.5.

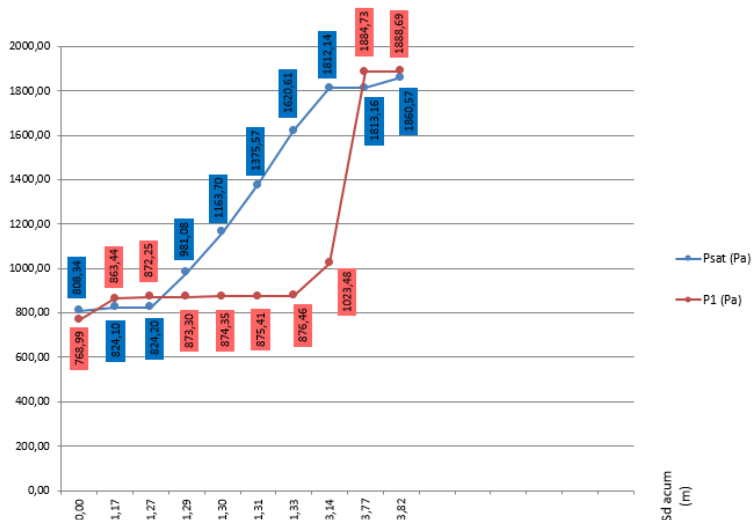
### 4.5 Evaluación de condensación intersticial de soluciones constructivas base

Los valores de permeabilidad al paso del vapor de los materiales utilizadas para las evaluaciones con el método Glaser fueron extraídas de la Tabla 2.1. Los valores de las propiedades físicas de los

materiales para el método de Simulación Numérica se obtienen de la Tabla 4.2 y las condiciones de borde utilizadas en software WUFI Pro se muestran en el **Anexo A**.

#### 4.5.1 Solución constructiva Base 1

Con la evaluación del método Glaser, esta solución constructiva presenta riesgo de condensación en los intersticios de los revestimientos interiores y exteriores. En el cual el perfil de presión parcial de vapor supera al perfil de presión de saturación, como muestra el Gráfico 4.2.



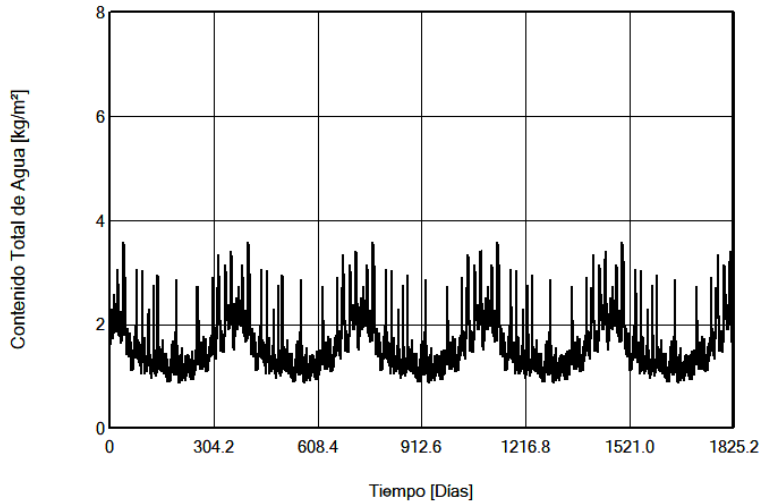
**Gráfico 4.2: Cálculo de condensación intersticial de la SCB – 1 realizado con herramienta Excel<sup>®</sup> DITEC – MINVU.**

Con el método de Simulación Numérica, evaluado para un período de 5 años, se puede apreciar una leve acumulación de condensación en el sistema constructivo de 1,6 kg/m<sup>2</sup> al inicio del periodo de evaluación, llegando a 1,69 kg/m<sup>2</sup> al final del período, como se muestra en la Tabla 4.6.

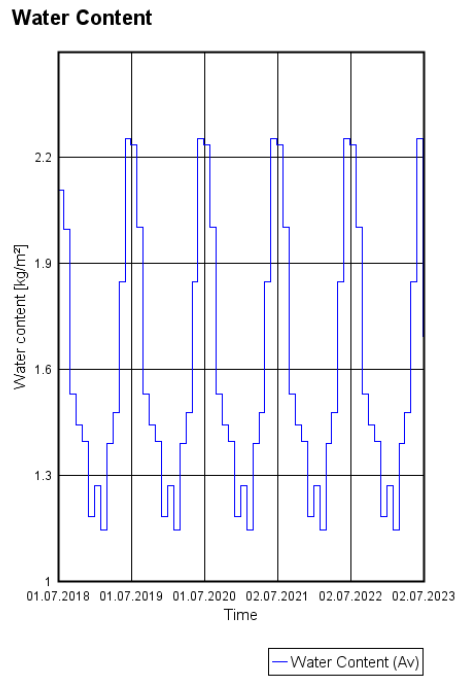
**Tabla 4.6: Resumen de evaluación de acumulación de condensación con WUFI Pro de la SCB – 1.**

Cont. de Agua [kg/m <sup>2</sup> ]				
	Inicio	Fin	Mín.	Máx.
Contenido Total de Agua	1,6	1,69	0,88	3,59
Cont. de Agua [kg/m <sup>3</sup> ]				
Capa/Material	Inicio	Fin	Min.	Máx.
Fibrocemento - Tesis	223,89	194,95	121,24	469,95
Fieltro 15 Lbs - Tesis	0,00	0,00	0,00	0,02
Lana Mineral 40 - Tesis	2,69	1,30	0,94	3,01
Capa de Aire 20 mm - Tesis	2,83	0,64	0,29	2,83
Kraft Papel - Tesis	2,28	1,86	1,51	2,31
Yeso cartón - Tesis	9,12	45,72	6,16	89,15

El Gráfico 4.3 permite visualizar la distribución del contenido total de humedad ( $\text{kg/m}^2$ ) de la solución constructiva en el período evaluado por día, el Gráfico 4.4 muestra el contenido de agua promedio en que se observa que los períodos críticos en cada año se producen en los meses de junio y julio.



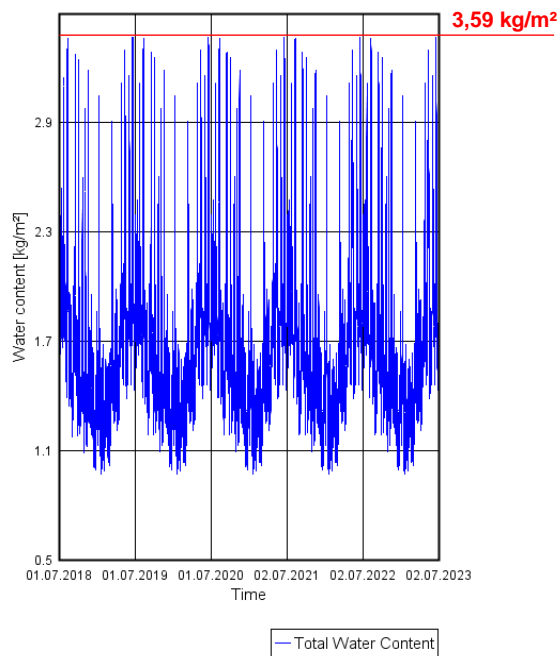
**Gráfico 4.3: Resumen de evaluación del contenido de humedad total de agua ( $\text{kg/m}^2$ ) por día para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCB – 1.**



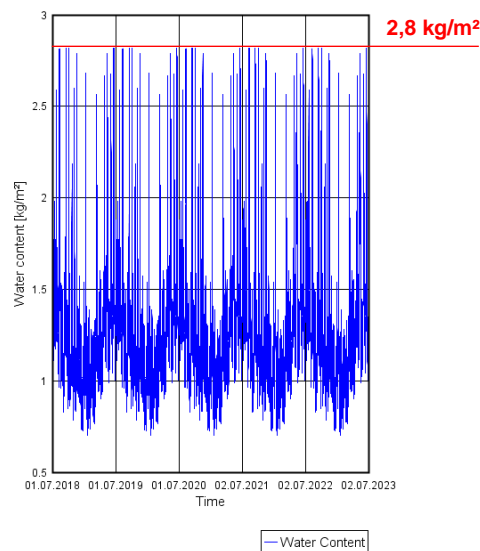
**Gráfico 4.4: Contenido de agua promedio por fecha para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCB – 1.**

Los Gráficos 4.5 muestran el contenido total de agua que alcanza un máximo de  $3,59 \text{ kg/m}^2$  en la solución constructiva y los gráficos de contenido de agua por material ilustran que el revestimiento exterior de fibrocemento es el material con mayor contenido de humedad en el período evaluado con  $2,8 \text{ kg/m}^2$ , también permite visualizar que el material aislante de lana mineral presenta una reducida cantidad de humedad que alcanza el máximo de  $90 \text{ g/m}^2$ .

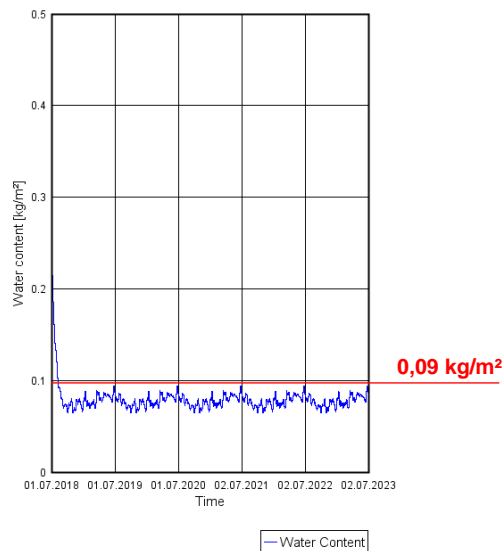
**Total Water Content**



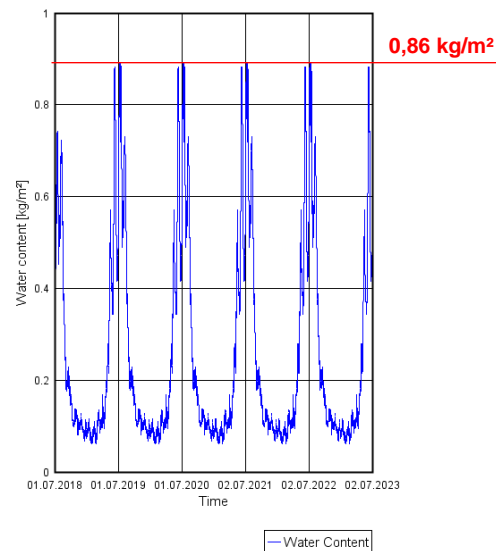
**Water Content Fibrocemento**



**Water Content Lana Mineral**



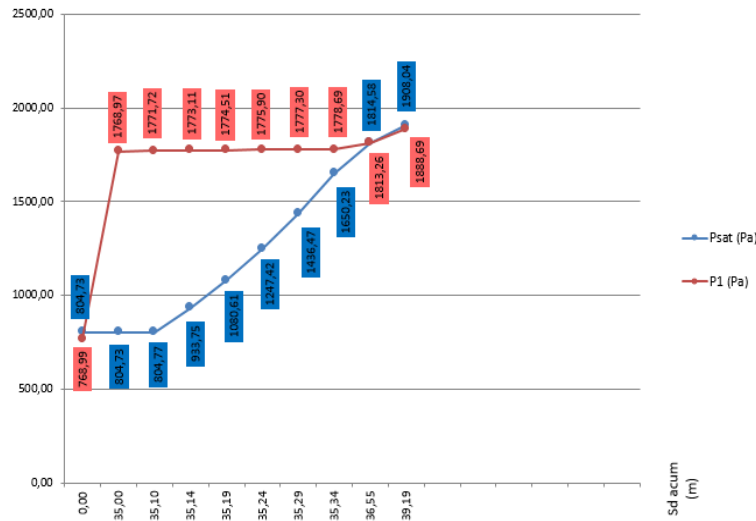
**Water Content Yeso Cartón**



**Gráfico 4.5: Contenido total de agua en SCB – 1 y en cada material no laminar de la envolvente.**

### 4.5.2 Solución constructiva Base 2

Con la evaluación del método Glaser, esta solución constructiva presenta riesgo de condensación en los intersticios de los revestimientos interiores y exteriores. En el cual el perfil de presión parcial de vapor supera al perfil de presión de saturación, como muestra el Gráfico 4.6.



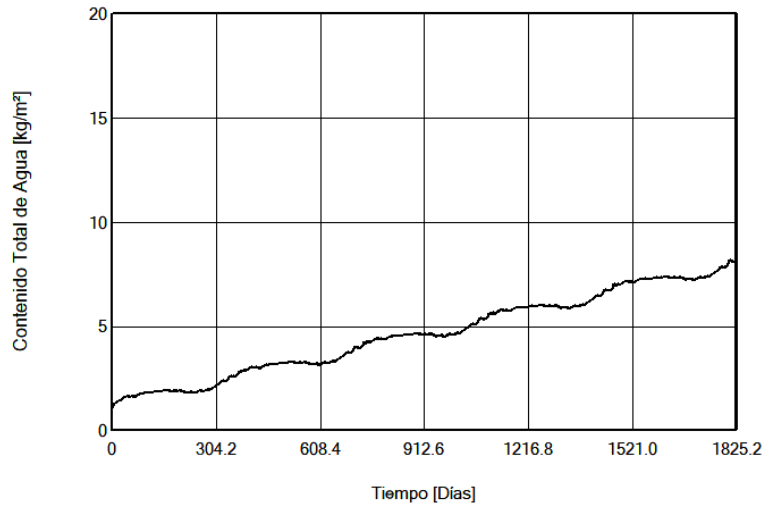
**Gráfico 4.6: Cálculo de condensación intersticial de la SCB – 2 realizado con herramienta Excel® DITEC – MINVU.**

Con el método de Simulación Numérica, evaluado para un período de 5 años, se puede apreciar una importante acumulación de condensación en el sistema constructivo de 1,06 kg/m<sup>2</sup> al inicio del periodo de evaluación, llegando a 8,15 kg/m<sup>2</sup> al final del período, como se muestra en la Tabla 4.7.

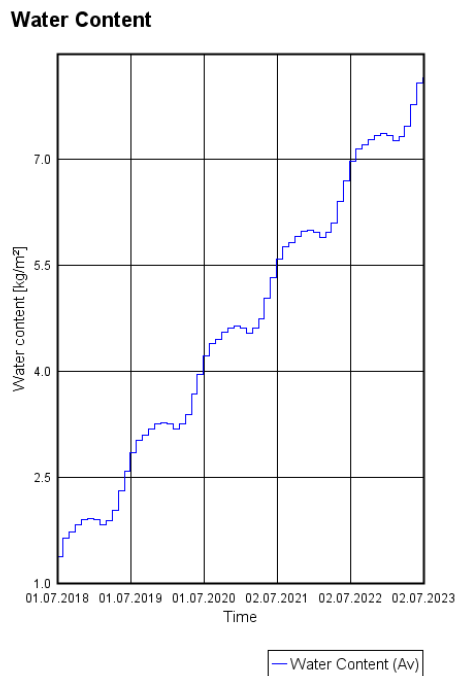
**Tabla 4.7: Resumen de evaluación de acumulación de condensación con WUFI Pro de la SCB – 2.**

Cont. de Agua [kg/m <sup>2</sup> ]				
	Inicio	Fin	Mín.	Máx.
Contenido Total de Agua	1,06	8,15	1,06	8,19
Cont. de Agua [kg/m <sup>3</sup> ]				
Capa/Material	Inicio	Fin	Mín.	Máx.
Zinc Alum - Tesis	0,00	0,01	0,00	0,06
Klober - Tesis	0,00	0,48	0,00	0,63
Lana de Vidrio - Tesis	2,80	137,99	2,80	137,99
Capa de Aire 20 mm - Tesis	2,83	2,57	1,34	4,56
Terciado Ranurado - Tesis	96,00	133,46	85,48	153,67

El Gráfico 4.7 ilustra la distribución del contenido total de humedad ( $\text{kg/m}^2$ ) de la solución constructiva en el período evaluado por día con una acumulación de humedad año a año, el Gráfico 4.8 muestra el contenido de agua promedio en que se observa una acumulación constante durante todo el período.



**Gráfico 4.7: Resumen de evaluación del contenido de humedad total de agua ( $\text{kg/m}^2$ ) por día para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCB – 2.**



**Gráfico 4.8: Contenido de agua promedio por fecha para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCB – 2.**



Los Gráficos 4.9 muestran el contenido total de agua que alcanza un máximo de  $8,19 \text{ kg/m}^2$  en la solución constructiva al final de los 5 años de evaluación y los gráficos de contenido de agua por material ilustran una importante acumulación de humedad que el revestimiento interior de terciado ranurado alcanza a  $1,38 \text{ kg/m}^2$ , también se puede apreciar que el material más crítico es por su condición de material aislante la lana de vidrio pues presenta una acumulación permanente y pronunciada que alcanza los  $6,8 \text{ kg/m}^2$ .

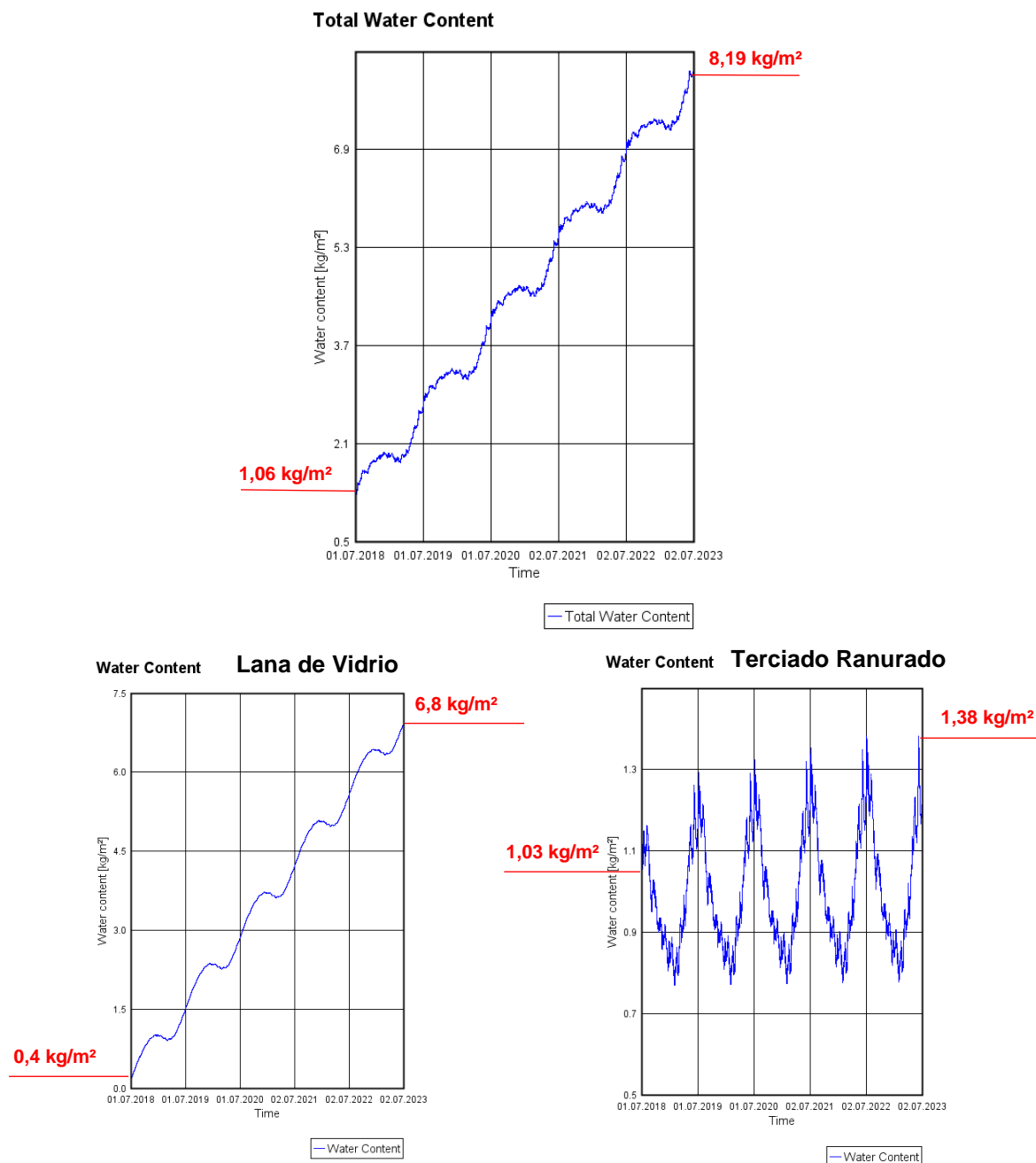
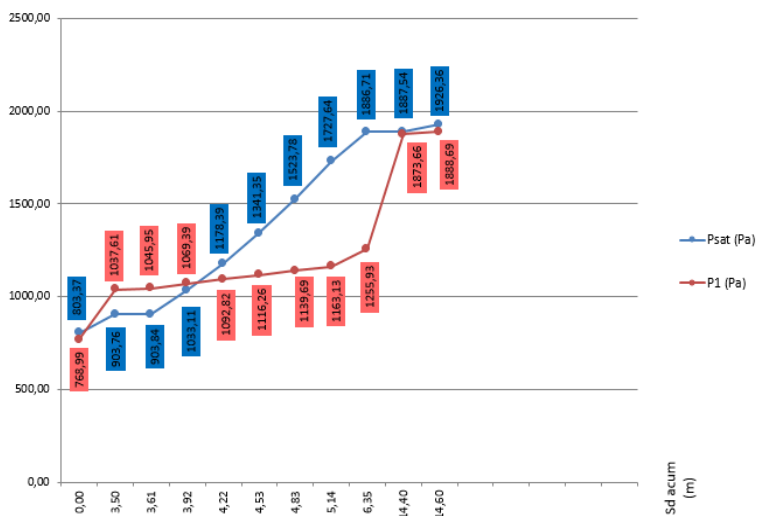


Gráfico 4.9: Contenido total de agua en SCB – 2 y en cada material no laminar de la envolvente.

### 4.5.3 Solución constructiva Base 3

Con la evaluación del método Glaser, esta solución constructiva presenta el riesgo de condensación más importante en el intersticio entre el revestimiento exterior y el aislante térmico. En el cual el perfil de presión parcial de vapor supera al perfil de presión de saturación, como muestra el Gráfico 4.10.



**Gráfico 4.10: Cálculo de condensación intersticial de la SCB – 3 realizado con herramienta Excel® DITEC – MINVU.**

Con el método de Simulación Numérica, evaluado para un período de 5 años, se puede apreciar que no existe acumulación de humedad en el sistema constructivo que inicia el período de evaluación con 1,34 kg/m<sup>2</sup>, disminuyendo a 1,13 kg/m<sup>2</sup> al final del período, como se muestra en la Tabla 4.8.

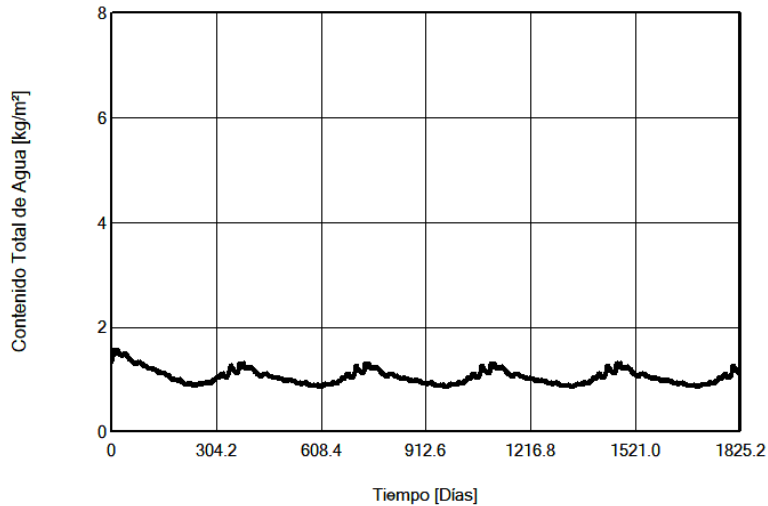
**Tabla 4.8: Resumen de evaluación de acumulación de condensación con WUFI Pro de la SCB – 3.**

Cont. de Agua [kg/m <sup>2</sup> ]				
	Inicio	Fin	Min.	Máx.
Contenido Total de Agua	1,34	1,13	0,86	1,58

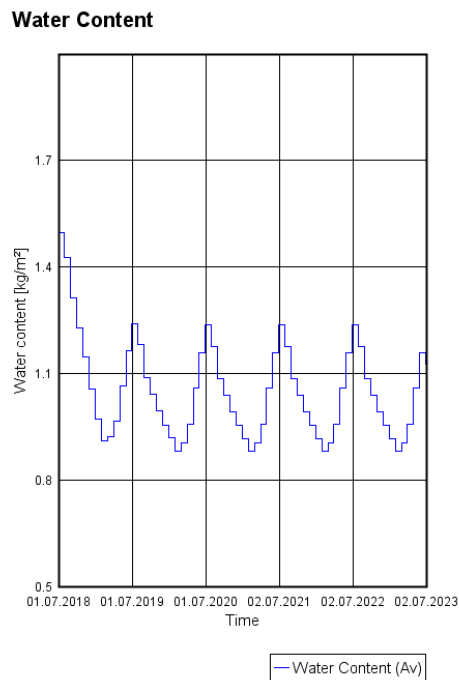
  

Cont. de Agua [kg/m <sup>3</sup> ]				
Capa/Material	Inicio	Fin	Min.	Máx.
Smartpanel - Tesis	95,38	77,88	64,58	104,16
Filtro 15 Lbs - Tesis	0,00	0,00	0,00	0,00
EPS 10 - Tesis	2,69	1,08	0,90	2,88
Capa de Aire 20 mm - Tesis	2,83	0,62	0,44	2,83
KraftPapel - Tesis	2,28	1,80	1,56	2,36
Yeso cartón - Tesis	9,12	19,35	6,19	37,46

El Gráfico 4.11 permite visualizar la distribución del contenido total de humedad ( $\text{kg/m}^2$ ) de la solución constructiva en el período evaluado por día, el Gráfico 4.12 muestra el contenido de agua promedio en que se observa que los períodos críticos en cada año se producen en los meses de junio y julio.



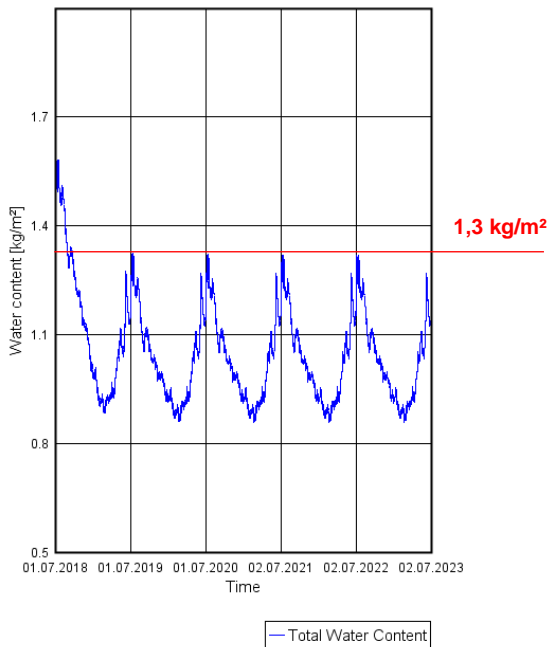
**Gráfico 4.11: Resumen de evaluación del contenido de humedad total de agua ( $\text{kg/m}^2$ ) por día para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCB – 3.**



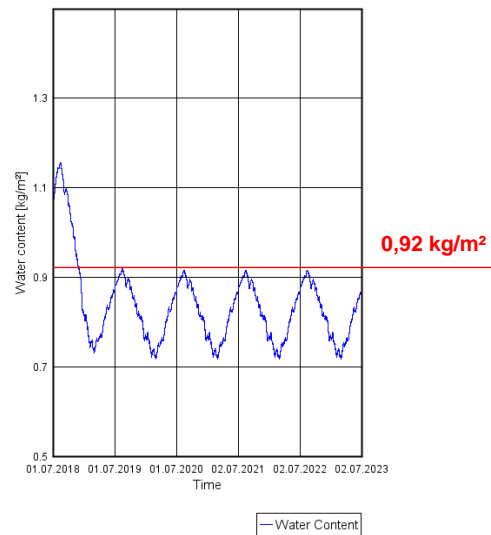
**Gráfico 4.12: Contenido de agua promedio por fecha para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCB – 3.**

Los Gráficos 4.13 muestran el contenido total de agua que alcanza un máximo de  $1,58 \text{ kg/m}^2$  en la solución constructiva al inicio de los 5 años de evaluación, luego desciende en el periodo estival y aumenta en los meses de junio y julio alcanzado  $1,3 \text{ kg/m}^2$ , los gráficos de contenido de agua por material ilustran que no existe acumulación de agua en ningún material, siendo el revestimiento interior de yeso cartón el que presenta las mayores fluctuaciones anuales, sin sobrepasar los  $0,38 \text{ kg/m}^2$  y el revestimiento exterior Smartpanel el que presenta mayor contenido de humedad en julio que llega a  $0,92 \text{ kg/m}^2$ .

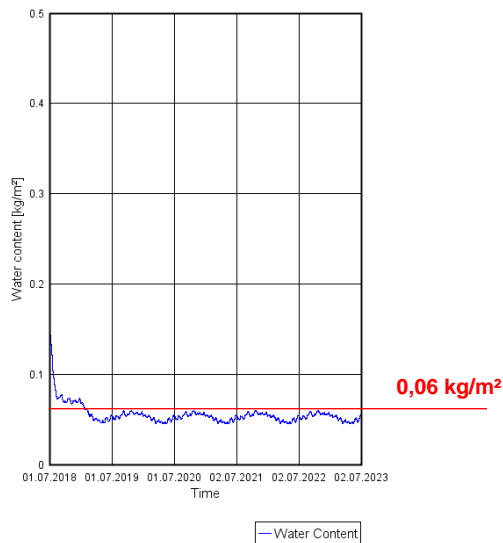
**Total Water Content**



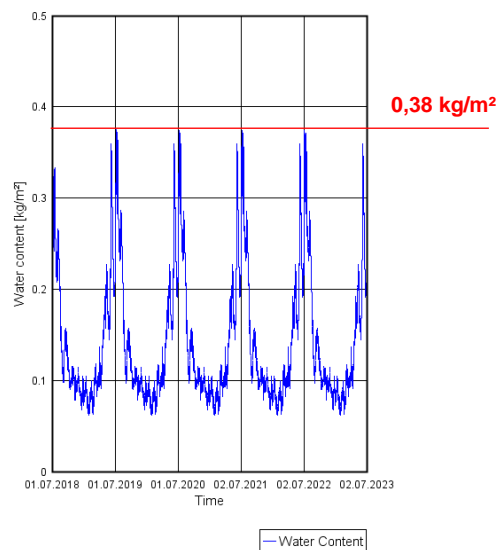
**Water Content Smartpanel**



**Water Content EPS10**



**Water Content Yeso Cartón**



**Gráfico 4.13: Contenido total de agua en SCB – 3 y en cada material no laminar de la envolvente.**

## Capítulo 5. Soluciones Constructivas Propuestas (SCP)

Para las soluciones constructivas propuestas, de acuerdo a los resultados obtenidos en el capítulo anterior, se consideran aplicaciones de mejoras orientadas a cambio de materiales según sus propiedades de físicas, principalmente de las barreras de humedad y de vapor (tipo y posición en la solución), aumento de espesor de aislación térmica y la incorporación de cámaras ventiladas (exterior) y no ventiladas (interior); utilizando los mismos revestimientos interiores y exteriores, aislantes térmicos, y estructura que las soluciones constructivas base tratadas en capítulo anterior.

En este capítulo, la verificación de los riesgos de condensación superficial e intersticial de las soluciones constructivas propuestas se realiza utilizando los mismos métodos y herramientas de cálculo señaladas en los puntos **4.2 Consideraciones de evaluación de riesgos de condensación superficial** y **4.3 Consideraciones de evaluación de riesgos de condensación intersticial** del capítulo anterior.

El objetivo de las mejoras en las soluciones constructivas propuestas, además de considerar el desempeño higrotérmico, contempla cumplir con la resistencia térmica establecida en el PDAV que corresponde un  $RT \geq 2,50 \text{ m}^2\text{K/W}$  (valor  $U \leq 0,40 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), como se muestra en la tabla del punto **1. Transmitancia térmica de la envolvente** del artículo 27 del PDAV de este documento, y que las modificaciones sean económicamente viables.

### 5.1 Evaluación de condensación superficial de soluciones constructivas propuestas

#### 5.1.1 Solución constructiva Propuesta 1

La solución constructiva propuesta 1 (SCP - 1), consiste en una tabiquería de madera de 2" x 3" con pies de derechos y cadenetras de la misma escuadría, en su interior se incorpora aislación de lana mineral de 90 mm de espesor (2 capas de 70 y 20 mm) y de  $40 \text{ kg/m}^3$  de densidad aparente, se adiciona una cámara de aire no ventilada (CANV) de 40 mm de espesor por el interior tras el revestimiento interior, como barrera de humedad se contempla papel fieltro de 15 lb y como barrera de vapor considera papel kraft 0,35 mm de espesor, el revestimiento exterior corresponde a una placa de fibrocemento de 6 mm de espesor y se agrega tras este una cámara de aire ventilada de 40 mm, y de revestimiento interior considera una plancha de yeso cartón de 10 mm de espesor.

La solución SCP - 1 arroja un valor de resistencia térmica de 2,64 m<sup>2</sup>K/W, y una temperatura superficial interior de 17,52° C; esto se puede visualizar en el esquema de flujo térmico realizado con Therm en la Figura 5.1. Por lo tanto, esta solución constructiva no presenta riesgo de condensación superficial según la Tabla 4.5 presentada anteriormente.

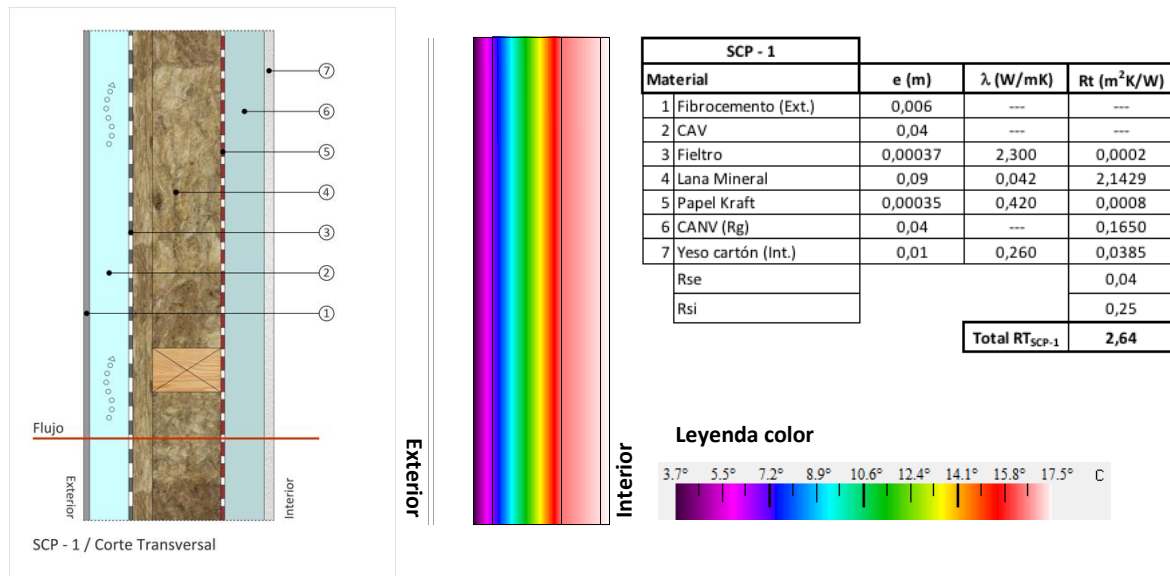


Figura 5.1: Flujo térmico y cálculo de resistencia térmica de la SCB – 1.

### 5.1.2 Solución constructiva Propuesta 2

La solución constructiva propuesta 2 (SCP - 2) analizada, consiste en una tabiquería de madera de 2" x 3" con pies de derechos y cadenetras de la misma escuadría, en su interior se incorpora aislación de lana de vidrio de 90 mm de espesor (2 capas de 70 y 20 mm) y de 11 kg/m<sup>3</sup> de densidad aparente, se adiciona una cámara de aire no ventilada (CANV) de 20 mm de espesor por el interior tras el revestimiento interior, como barrera de humedad se contempla membrana Klobber y como barrera de vapor se incorpora una capa de polietileno de 0,2 mm de espesor, el revestimiento exterior corresponde a una plancha acanalada de zincalum de 0,35 mm de espesor y se agrega tras este una cámara de aire ventilada de 40 mm, y de revestimiento interior considera una placa de terciado ranurado de 9 mm de espesor.

Esta solución entrega un valor de resistencia térmica de 2,69 m<sup>2</sup>K/W, y una temperatura superficial interior de 17,55° C; esto se puede visualizar en el esquema de flujo térmico realizado

con Therm en la Figura 5.2. Por lo tanto, esta solución constructiva no presenta riesgo de condensación superficial, pues posee una resistencia térmica superior a la  $R_{T,min}$ , según la Tabla 4.5.

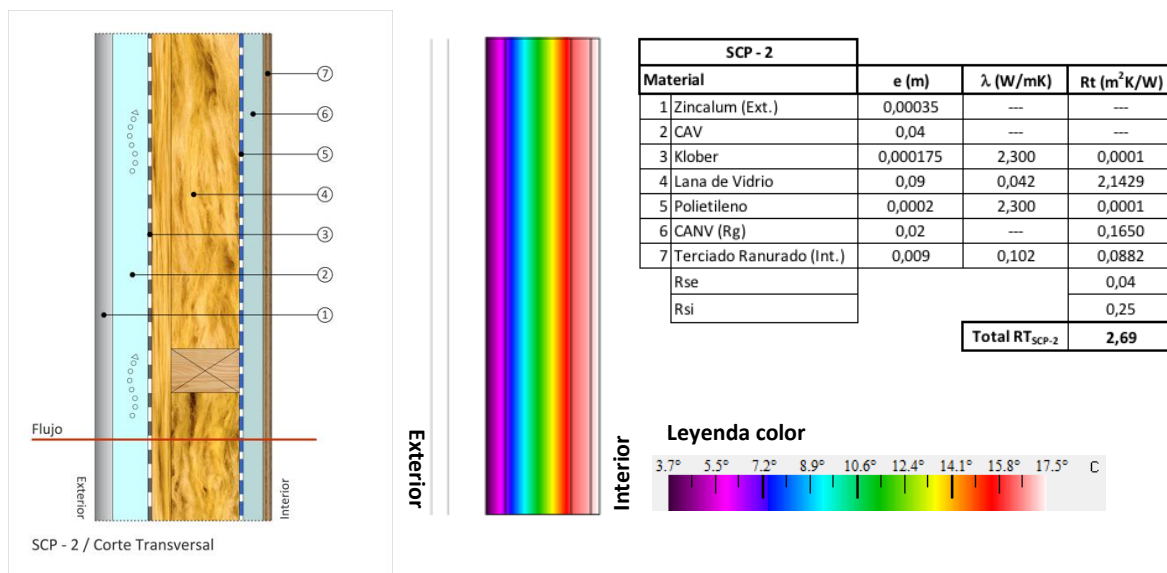


Figura 5.2: Flujo térmico y cálculo de resistencia térmica de la SCP – 2.

### 5.1.3 Solución constructiva Propuesta 3

La tercera solución constructiva propuesta 3 (SCP - 3) estudiada, consiste en una tabiquería de madera de 2" x 3" con pies de derechos y cadenas de la misma escuadría, en su interior se incorpora aislación de poliestireno expandido (EPS) de 100 mm de espesor (2 capas de 70 y 30 mm) y de 10 kg/m<sup>3</sup> de densidad aparente, como barrera de humedad se utiliza papel fieltro de 15 lb y como barrera de vapor se reemplaza el papel kraft por polietileno de 0,2 mm de espesor, el revestimiento exterior es un tablero de fibra de madera con terminación base de pintura en cara expuesta (Smartpanel) de 11,1 mm de espesor, tras este se incluye una cámara de aire ventilada de 20 mm y de revestimiento interior una plancha de yeso cartón de 10 mm de espesor.

Esta solución entrega un valor de resistencia térmica de 2,65 m<sup>2</sup>K/W, y una temperatura superficial interior de 17,54° C; esto se puede visualizar en el esquema de flujo térmico realizado con Therm en la Figura 5.3. Por lo tanto, esta solución constructiva no presenta riesgo de condensación superficial, pues posee una resistencia térmica superior a la  $R_{T,min}$ , según la Tabla 4.5.

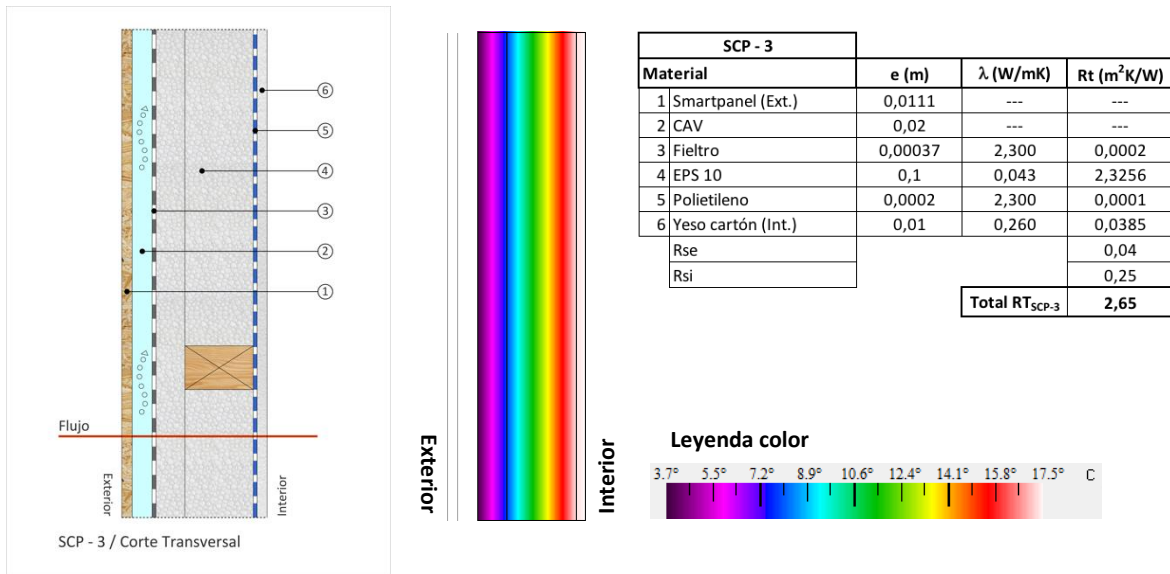


Figura 5.3: Flujo térmico y cálculo de resistencia térmica de la SCP – 3.

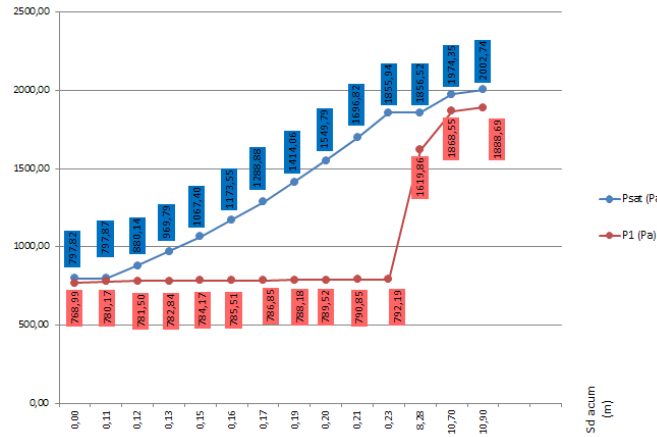
## 5.2 Evaluación de condensación intersticial de soluciones constructivas propuestas

Los valores de permeabilidad al paso del vapor de los materiales utilizadas para las evaluaciones con el método Glaser fueron extraídas de la Tabla 2.1. Los valores de las propiedades físicas de los materiales para el método de Simulación Numérica se obtienen de la Tabla 4.2 y las condiciones de borde utilizadas en software WUFI Pro se muestran en el **Anexo A**.

### 5.2.1 Solución constructiva Propuesta 1

Con la evaluación del método Glaser, esta solución constructiva no presenta riesgo de condensación intersticial. El Gráfico 5.1 permite apreciar que los perfiles de presión parcial de vapor y de presión de saturación se encuentran separados en todo el ancho de la solución.





**Gráfico 5.1: Cálculo de condensación intersticial de la SCP – 1 realizado con herramienta Excel® DITEC – MINVU.**

Con el método de Simulación Numérica, evaluado para un período de 5 años, se puede apreciar que no hay acumulación de humedad en el interior del sistema constructivo que inicio el período de evaluación con 1,9 kg/m<sup>2</sup>, y culmina con 1,72 kg/m<sup>2</sup> al final del período, como se muestra en la Tabla 5.1.

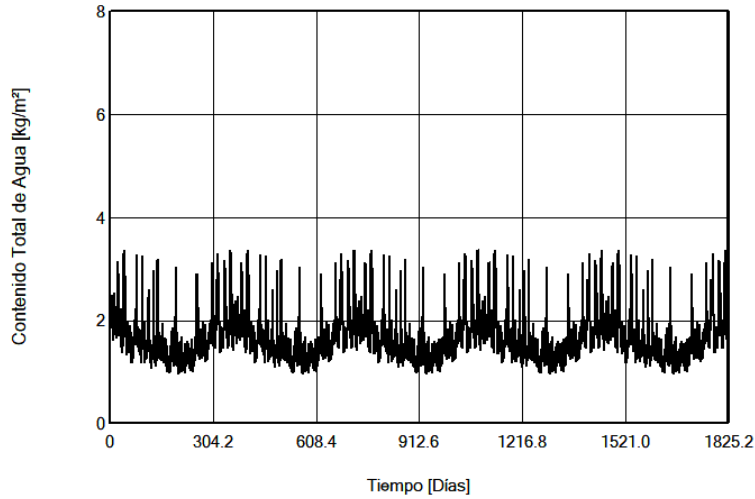
**Tabla 5.1: Resumen de evaluación de acumulación de condensación con WUFI Pro de la SCP – 1.**

Cont. de Agua [kg/m <sup>2</sup> ]				
	Inicio	Fin	Min.	Máx.
Contenido Total de Agua	1,9	1,72	0,94	3,64

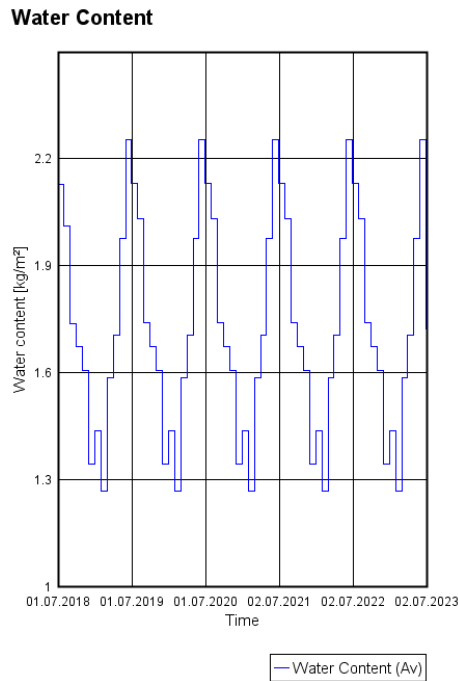
  

Cont. de Agua [kg/m <sup>2</sup> ]				
Capa/Material	Inicio	Fin	Min.	Máx.
Fibrocemento - Tesis	223,89	197,54	106,95	469,51
Capa de Aire 40 mm - Tesis	2,83	2,07	0,74	9,99
Filtro 15 Lbs - Tesis	0,00	0,00	0,00	0,01
Lana Mineral 40 - Tesis	2,69	1,12	0,83	2,69
Kraft Papel - Tesis	2,28	1,67	1,34	2,28
Capa de Aire 40 mm - Tesis	2,83	5,60	1,93	6,50
Yeso cartón - Tesis	9,12	12,52	6,45	14,63

El Gráfico 5.2 permite visualizar la distribución del contenido total de humedad (kg/m<sup>2</sup>) de la solución constructiva en el período evaluado por día, el Gráfico 5.3 muestra el contenido de agua promedio en que se observa que los períodos críticos en cada año se producen en los meses de junio y julio.



**Gráfico 5.2: Resumen de evaluación del contenido de humedad total de agua ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) por día para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCP – 1.**

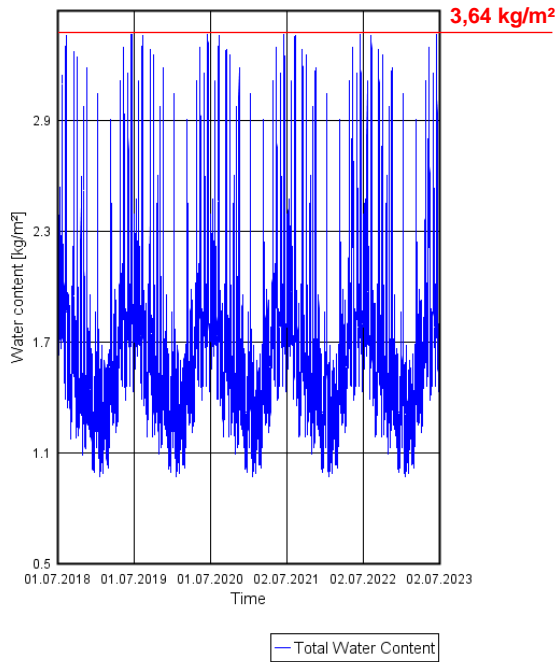


**Gráfico 5.3: Contenido de agua promedio por fecha para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCP – 1.**

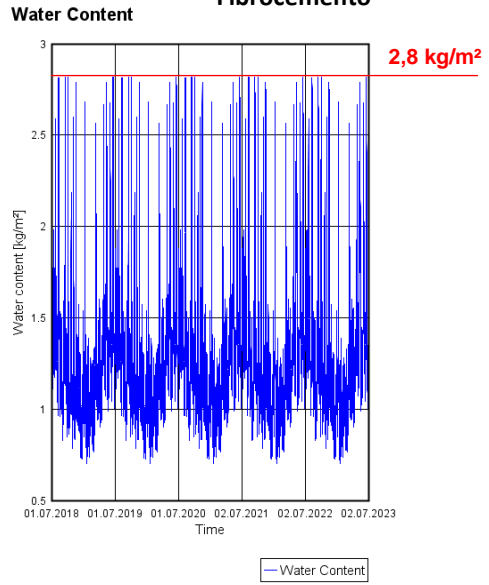
Los Gráficos 5.4 muestran el contenido total de agua que alcanza un máximo de  $3,64 \text{ kg}/\text{m}^2$  en la solución constructiva y los gráficos de contenido de agua por material ilustran que el revestimiento exterior de fibrocemento es el material con mayor contenido de humedad en el

período evaluado con  $2,8 \text{ kg/m}^2$ , también permite visualizar que el material aislante de lana mineral presenta una reducida cantidad de humedad que alcanza el máximo de  $90 \text{ g/m}^2$  y el revestimiento interior de yeso cartón presenta una contenido de agua máximo de  $0,15 \text{ kg/m}^2$ .

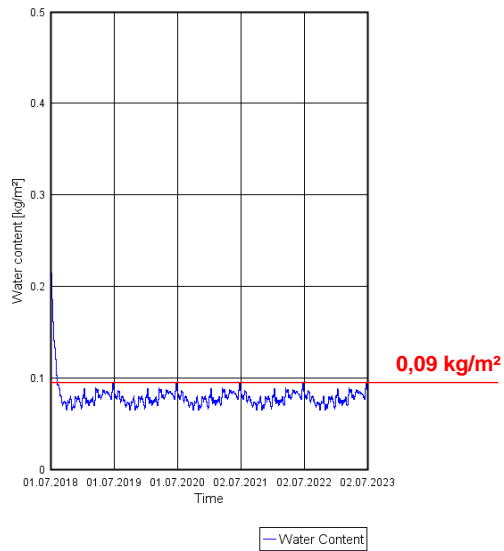
**Total Water Content**



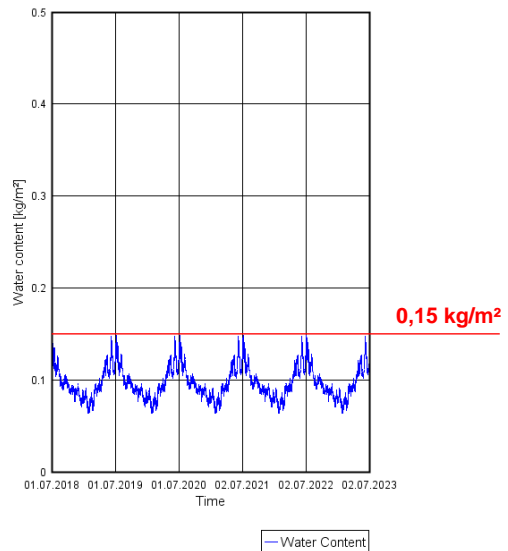
**Fibrocemento**



**Lana Mineral**



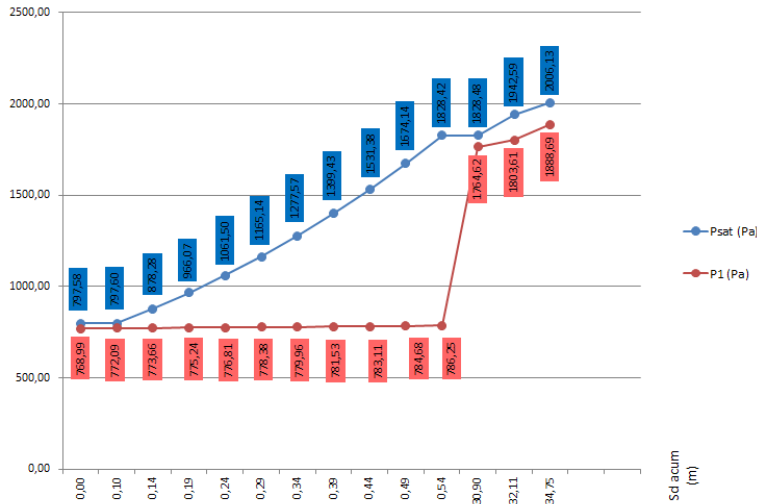
**Yeso Cartón**



**Gráfico 5.4: Contenido total de agua en SCP – 1 y en cada material no laminar de la envolvente.**

### 5.2.2 Solución constructiva Propuesta 2

Con la evaluación del método Glaser, esta solución constructiva no presenta riesgo de condensación intersticial. El Gráfico 5.5 permite apreciar que los perfiles de presión parcial de vapor y de presión de saturación se encuentran separados en todo el ancho de la solución.



**Gráfico 5.5: Cálculo de condensación intersticial de la SCP – 2 realizado con herramienta Excel® DITEC – MINVU.**

Con el método de Simulación Numérica, evaluado para un período de 5 años, se puede visualizar que no hay acumulación de condensación en el sistema constructivo de 1,29 kg/m<sup>2</sup> al inicio del período de evaluación, reduciéndose a 1,22 kg/m<sup>2</sup> al final del período, como se muestra en la Tabla 5.2.

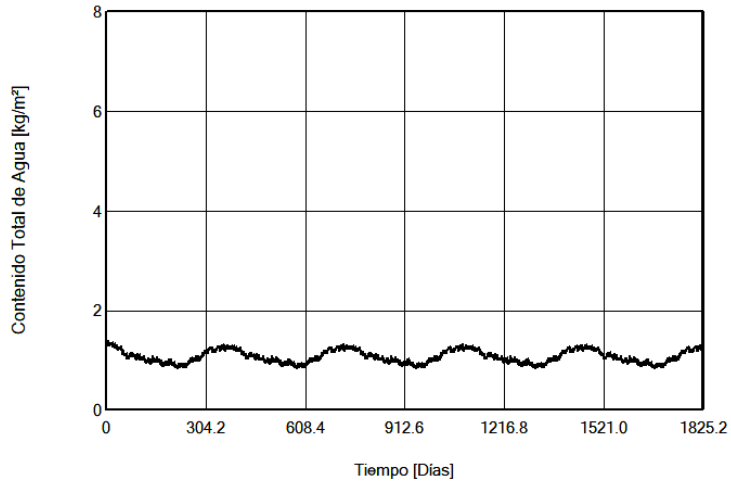
**Tabla 5.2: Resumen de evaluación de acumulación de condensación con WUFI Pro de la SCP – 2.**

Cont. de Agua [kg/m³]				
	Inicio	Fin	Min.	Máx.
Contenido Total de Agua	1,29	1,22	0,84	1,42

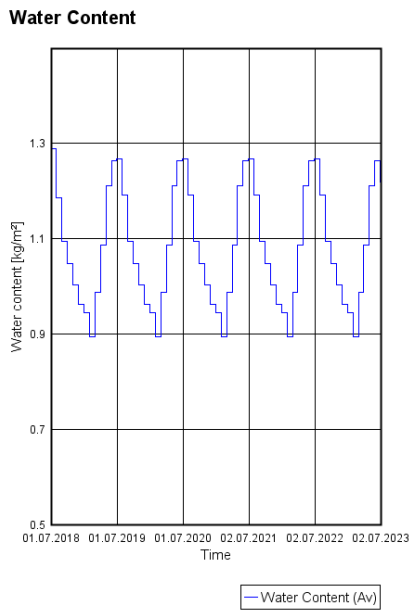
  

Cont. de Agua [kg/m³]				
Capa/Material	Inicio	Fin	Min.	Máx.
Zinc Alum - Tesis	0,00	0,00	0,00	0,01
Capa de Aire 40 mm - Tesis	2,83	1,97	0,27	4,25
Klober - Tesis	0,00	0,00	0,00	0,01
Lana de Vidrio - Tesis	2,80	1,10	0,52	2,80
Polietileno - Tesis	0,00	0,00	0,00	0,00
Capa de Aire 20 mm - Tesis	2,83	2,68	1,75	2,83
Terciado Ranurado - Tesis	96,00	109,82	79,08	116,43

El Gráfico 5.6 ilustra la distribución del contenido total de humedad ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) de la solución constructiva en el período evaluado por día, el Gráfico 5.7 muestra el contenido de agua promedio en que se observa que no existe acumulación en el período evaluado.



**Gráfico 5.6: Resumen de evaluación del contenido de humedad total de agua ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) por día para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCP – 2.**



**Gráfico 5.7: Contenido de agua promedio por fecha para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCP – 2.**

Los Gráficos 5.8 muestran el contenido total de agua que alcanza un máximo de  $1,32 \text{ kg/m}^2$  en la solución constructiva al final de los 5 años de evaluación y los gráficos de contenido de agua por material ilustran que no existe acumulación de humedad, el revestimiento interior de terciado ranurado alcanza a  $1 \text{ kg/m}^2$ , también se puede apreciar que lana de vidrio llega a un máximo de  $0,13 \text{ kg/m}^2$ .

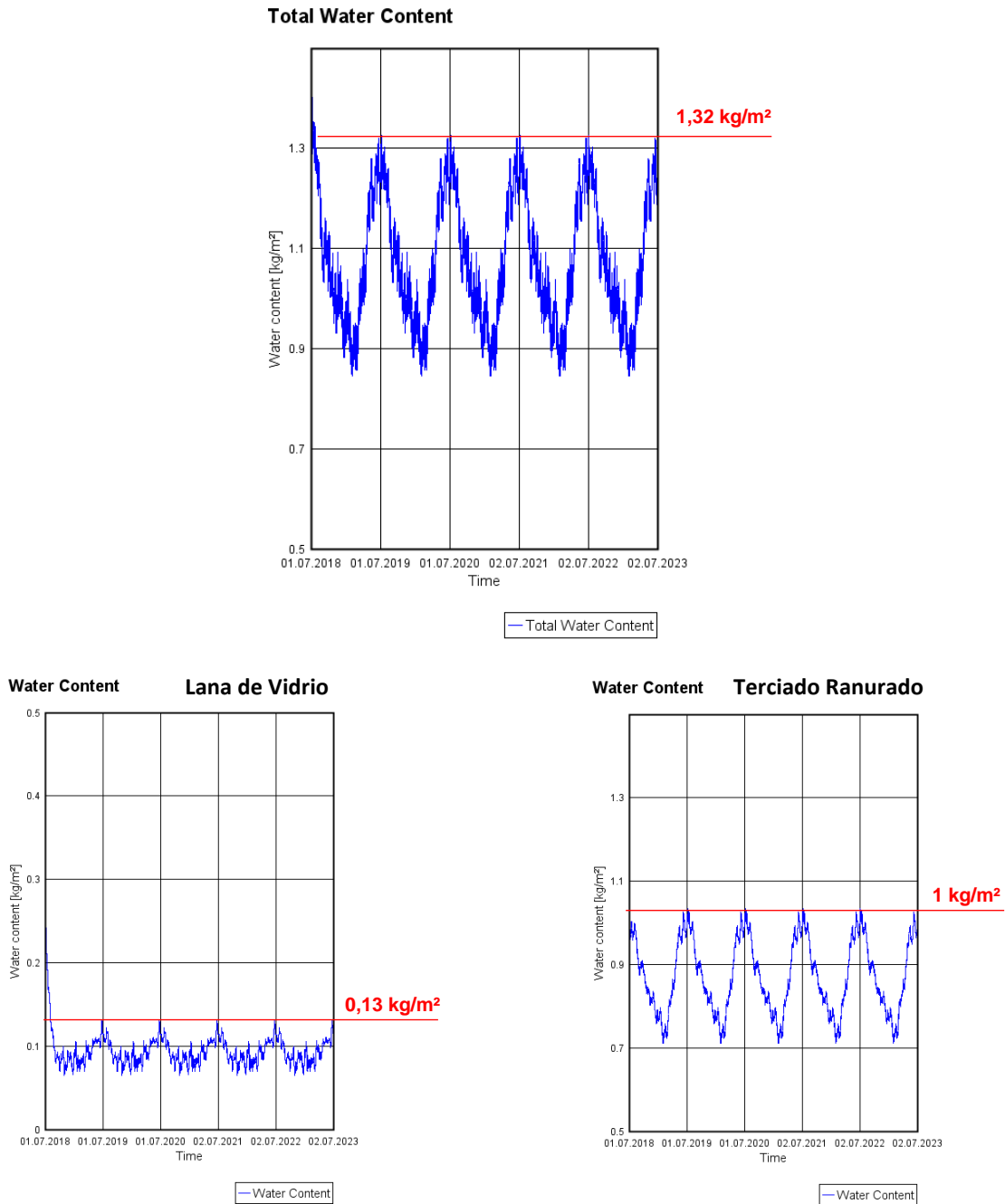
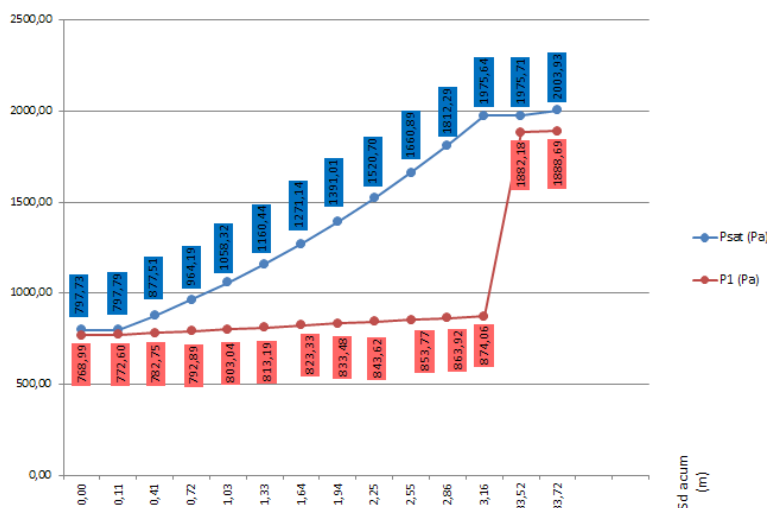


Gráfico 5.8: Contenido total de agua en SCP – 2 y en cada material no laminar de la envolvente.

### 5.2.3 Solución constructiva Propuesta 3

Con la evaluación del método Glaser, esta solución constructiva no presenta el riesgo de condensación. El Gráfico 5.9 permite apreciar que los perfiles de presión parcial de vapor y de presión de saturación se encuentran separados en todo el ancho de la solución.



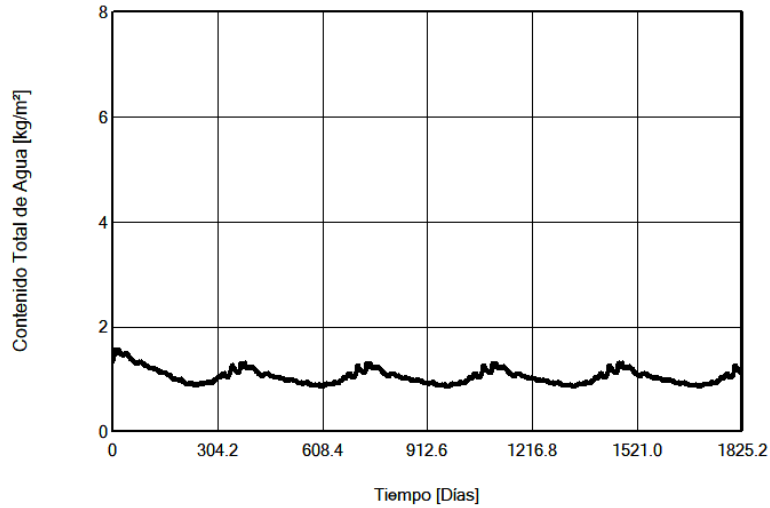
**Gráfico 5.9: Cálculo de condensación intersticial de la SCP – 3 realizado con herramienta Excel® DITEC – MINVU.**

Con el método de Simulación Numérica, evaluado para un período de 5 años, se puede apreciar que no existe acumulación de humedad en el sistema constructivo que inicia el período de evaluación con un contenido de agua de 1,48 kg/m<sup>2</sup>, disminuyendo a 1,37 kg/m<sup>2</sup> al final del período, como se muestra en la Tabla 5.3.

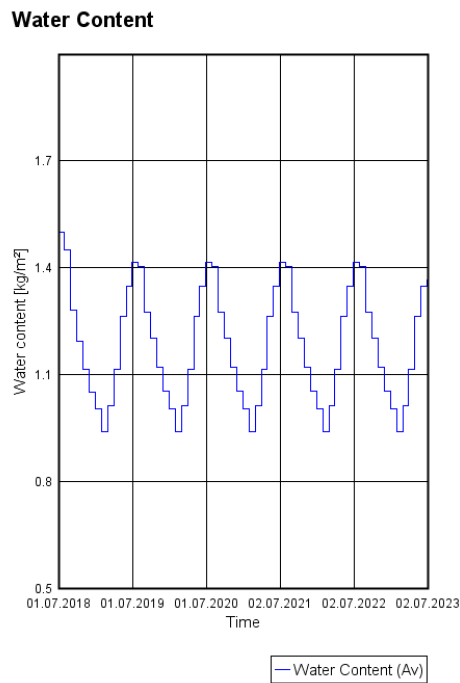
**Tabla 5.3: Resumen de evaluación de acumulación de condensación con WUFI Pro de la SCP – 3.**

Cont. de Agua [kg/m <sup>2</sup> ]				
	Inicio	Fin	Mín.	Máx.
Contenido Total de Agua	1,48	1,37	0,9	1,54
Cont. de Agua [kg/m <sup>3</sup> ]				
Capa/Material	Inicio	Fin	Mín.	Máx.
Smartpanel - Tesis	95,38	79,56	60,33	95,60
Capa de Aire 20 mm - Tesis	2,83	1,83	0,35	3,38
Fieltro 15 Lbs - Tesis	0,00	0,00	0,00	0,00
EPS 10 - Tesis	2,69	3,39	1,45	3,87
Polietileno - Tesis	0,00	0,00	0,00	0,00
Yeso cartón - Tesis	9,12	10,74	6,29	13,51

El Gráfico 5.10 permite visualizar la distribución del contenido total de humedad ( $\text{kg/m}^2$ ) de la solución constructiva en el período evaluado por día, el Gráfico 5.11 muestra el contenido de agua promedio en que se observa que los períodos más altos en cada año se registran en los meses de invierno.



**Gráfico 5.10: Resumen de evaluación del contenido de humedad total de agua ( $\text{kg/m}^2$ ) por día para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCP – 3.**

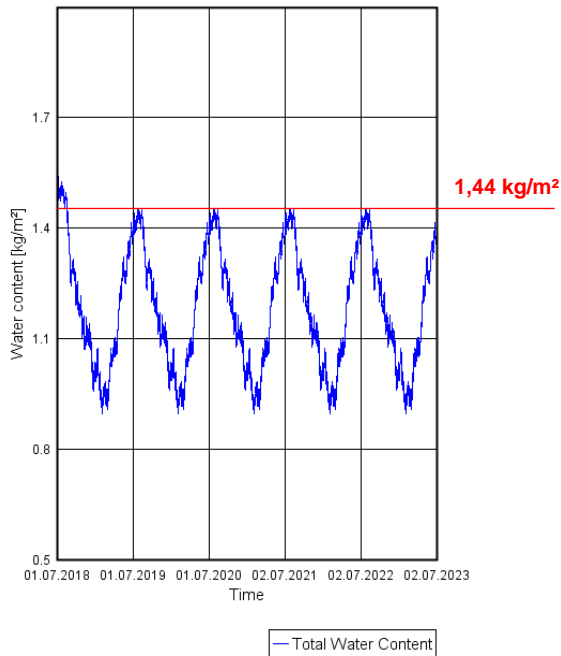


**Gráfico 5.11: Contenido de agua promedio por fecha para 5 años de evaluación con WUFI Pro de la SCP – 3.**

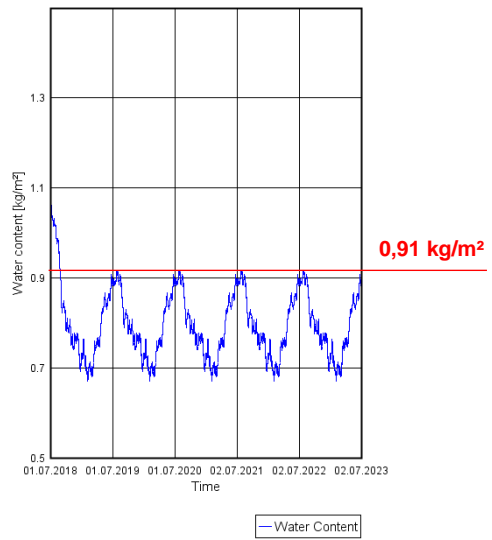


Los Gráficos 5.12 muestran el contenido total de agua que alcanza un máximo de  $1,44 \text{ kg/m}^2$  en la solución constructiva en cada período de invierno, luego desciende en el periodo estival a  $0,92 \text{ kg/m}^2$ . Los gráficos de contenido de agua por material muestran que no existe acumulación de agua en ningún material, siendo el poliestireno expandido el material con mayores fluctuaciones, sin sobrepasar los  $0,38 \text{ kg/m}^2$  y el revestimiento exterior Smartpanel el que presenta mayor contenido de humedad en julio que llega a  $0,91 \text{ kg/m}^2$ .

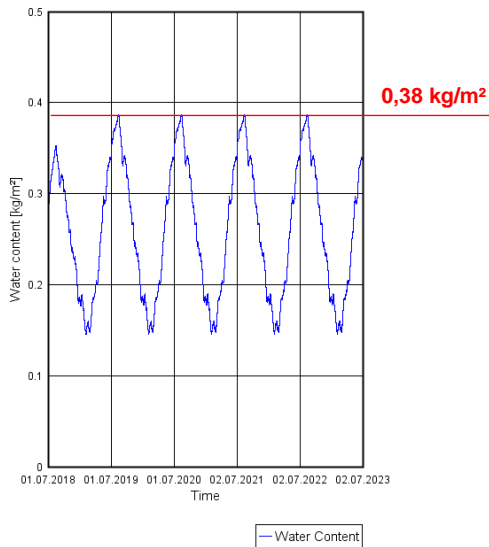
**Total Water Content**



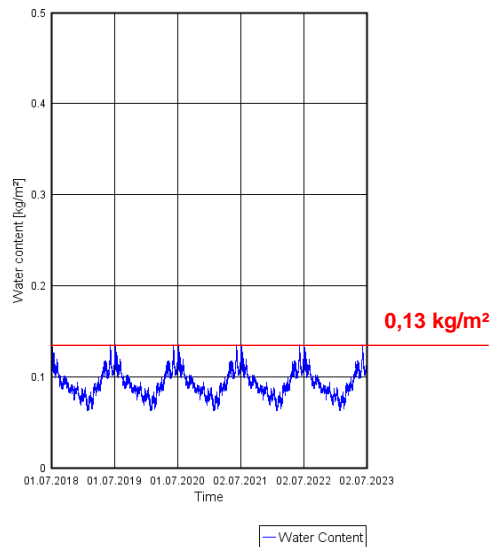
**Water Content Smartpanel**



**Water Content EPS10**



**Water Content Yeso Cartón**



**Gráfico 5.12: Contenido total de agua en SCP – 3 y en cada material no laminar de la envolvente.**

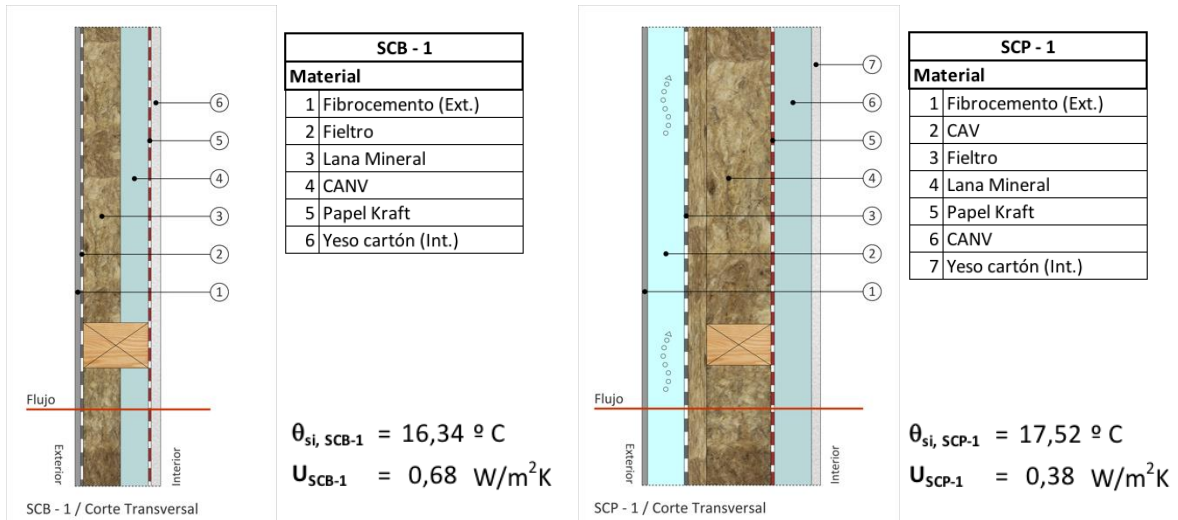
## Capítulo 6. Comparación de resultados de las soluciones constructivas

Valores límites para que no se produzca condensación superficial, según Tabla 4.5 antes presentada:

- $\theta_{si, \min} = 16,6^{\circ} \text{C}$
- $U_{\max} = 0,62 \text{ W/m}^2\text{K}$

### 6.1 Comparación de condensación superficial

#### 6.1.1 SCB – 1 vs SCP – 1

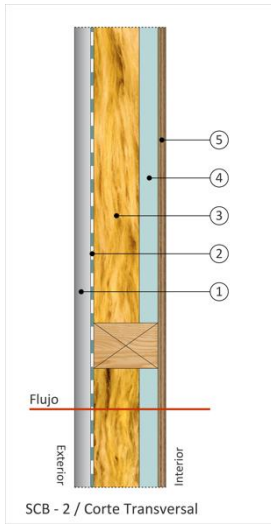


SCB – 1: Presenta condensación superficial

SCP – 1: No presenta condensación superficial

La solución constructiva base 1 (SCB – 1) presenta riesgo de condensación superficial, pues la temperatura superficial interior mínima ( $\theta_{si, \min}$ ) no alcanza los  $16,6^{\circ} \text{C}$ , ya que su transmitancia térmica ( $U$ ) de  $0,68 \text{ W/m}^2\text{K}$  es mayor al máximo calculado para que no ocurra riesgo de condensación; la solución constructiva propuesta 1 (SCP – 1) no presenta riesgo de condensación superficial, pues a esta solución se le ha incorporado 50 mm más de espesor de aislación térmica y una cámara de aire no ventilada (CANV) de 40 mm de espesor por el interior permitiendo reducir la transmitancia térmica en 45% respecto de SCB – 1.

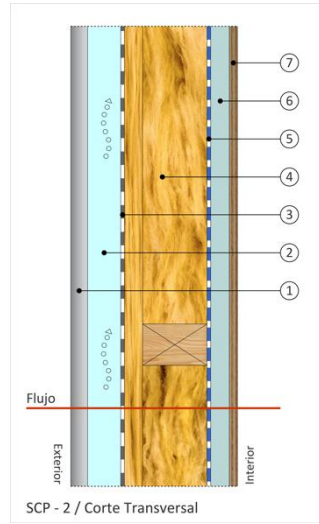
6.1.2 SCB – 2 vs SCP – 2



SCB - 2	
Material	
1	Zincalum (Ext.)
2	Klober
3	Lana de Vidrio
4	CANV
5	Terciado Ranurado (Int.)

$$\theta_{si, SCB-2} = 16,74 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$U_{SCB-2} = 0,58 \text{ W/m}^2\text{K}$$



SCP - 2	
Material	
1	Zincalum (Ext.)
2	CAV
3	Klober
4	Lana de Vidrio
5	Polietileno
6	CANV
7	Terciado Ranurado (Int.)

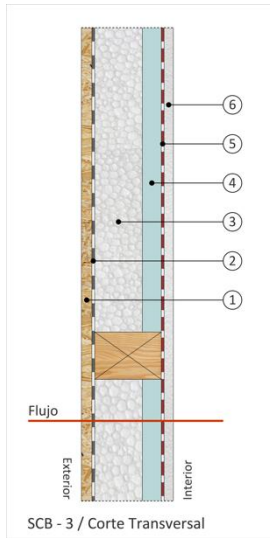
$$\theta_{si, SCP-2} = 17,55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$U_{SCP-2} = 0,37 \text{ W/m}^2\text{K}$$

SCB – 2: No presenta condensación superficial      SCP – 2: No presenta condensación superficial

La solución constructiva base 2 (SCB – 2) no presenta riesgo de condensación superficial, ya que la temperatura superficial interior ( $\theta_{si, SCB-2}$ ) supera los  $16,6^\circ\text{C}$  en  $0,14^\circ\text{C}$ , y su transmitancia térmica ( $U$ ) de  $0,58 \text{ W/m}^2\text{K}$  es menor al máximo calculado para que no ocurra riesgo de condensación en  $0,04 \text{ W/m}^2\text{K}$ , sin embargo, esta solución se encuentra al límite del cumplimiento; la solución constructiva propuesta 2 (SCP – 2) no presenta riesgo de condensación superficial, pues a esta solución se le ha incorporado  $40 \text{ mm}$  más de espesor de aislación térmica y una cámara de aire no ventilada (CANV) de  $20 \text{ mm}$  de espesor por el interior, permitiendo reducir la transmitancia térmica en  $36\%$  respecto de SCB – 2.

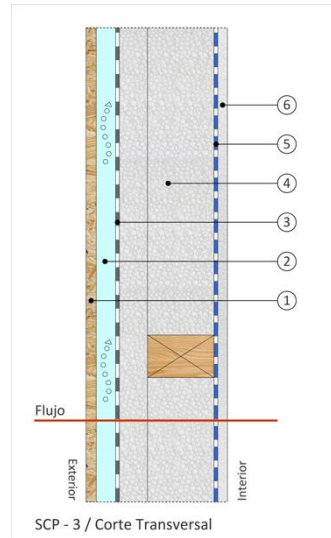
### 6.1.3 SCB – 3 vs SCP – 3



SCB - 3	
Material	
1	Smartpanel (Ext.)
2	Fieltro
3	EPS 10
4	CANV
5	Papel Kraft
6	Yeso cartón (Int.)

$$\theta_{si, SCB-3} = 16,86 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$U_{SCB-3} = 0,54 \text{ W/m}^2\text{K}$$



SCP - 3	
Material	
1	Smartpanel (Ext.)
2	CAV
3	Fieltro
4	EPS 10
5	Polietileno
6	Yeso cartón (Int.)

$$\theta_{si, SCP-3} = 17,54 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$U_{SCP-3} = 0,38 \text{ W/m}^2\text{K}$$

SCB – 3: No presenta condensación superficial      SCP – 3: No presenta condensación superficial

La solución constructiva base 3 (SCB – 3) no presenta riesgo de condensación superficial, ya que la temperatura superficial interior ( $\theta_{si, SCB-3}$ ) supera los  $16,6^\circ\text{C}$  en  $0,26^\circ\text{C}$ , y su transmitancia térmica ( $U$ ) de  $0,54 \text{ W/m}^2\text{K}$  es menor al máximo calculado para que no ocurra riesgo de condensación en  $0,08 \text{ W/m}^2\text{K}$ , sin embargo, esta solución se encuentra al límite del cumplimiento; la solución constructiva propuesta 3 (SCP – 3) no presenta riesgo de condensación superficial, pues a esta solución se le ha incorporado 50 mm más de espesor de aislación térmica, permitiendo reducir la transmitancia térmica en 30% respecto de SCB – 3.

## 6.2 Comparación de condensación intersticial

### 6.2.1 Método Glaser

- SCB – 1 vs SCP – 1

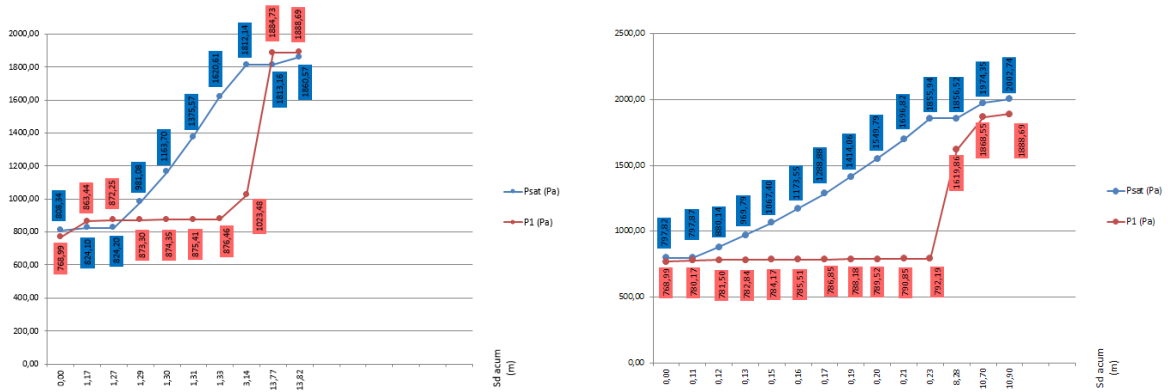


Gráfico 6.1: Perfil de presiones, SCB – 1 (izquierda) y Perfil de presiones, SCP – 1 (derecha).

El Gráfico 6.1 (izquierda) muestra condensación en tres interfaces del componente de la SCB – 1, donde el perfil de presión parcial de vapor supera el perfil de presión de saturación; en el Gráfico 6.1 (derecha), se puede apreciar que al incorporar mayor espesor de material aislante y una cámara de aire no ventilada (CANV) por el interior y manteniendo la misma barrera de vapor – papel kraft – que la solución base, y por el exterior, separar el revestimiento exterior de fibrocemento a través de una cámara de aire ventilada (CAV), permite desacoplar los dos perfiles de presión de vapor en todo el sistema constructivo.

• SCB – 2 vs SCP – 2

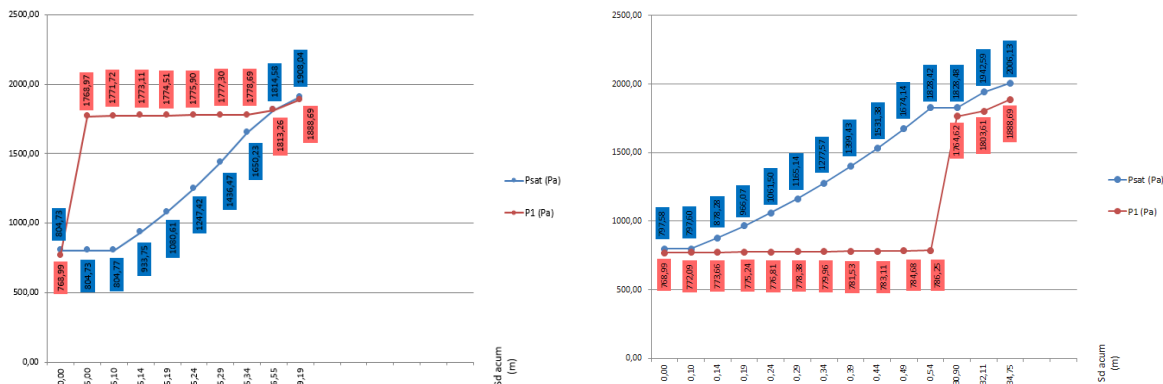


Gráfico 6.2: Perfil de presiones, SCB – 2 (izquierda) y Perfil de presiones, SCP – 2 (derecha).

El Gráfico 6.2 (izquierda) permite apreciar condensación en dos interfaces del componente de la SCB – 2, donde el perfil de presión parcial de vapor supera el perfil de presión de saturación bajo el revestimiento interior de terciado ranurado y tras el revestimiento exterior de zincalum; en el Gráfico 6.2 (derecha) se muestra que al incorporar mayor espesor de material aislante y una cámara de aire no ventilada (CANV) por el interior y una barrera de vapor con una baja permeabilidad al paso del vapor (polietileno) tras el revestimiento interior, y por el exterior, agregar una cámara de aire ventilada (CAV) distanciando el revestimiento exterior de zincalum, material que para los efectos de este cálculo es prácticamente impermeable, permite desacoplar los dos perfiles de presión de vapor en todo el sistema constructivo.

● SCB – 3 vs SCP – 3

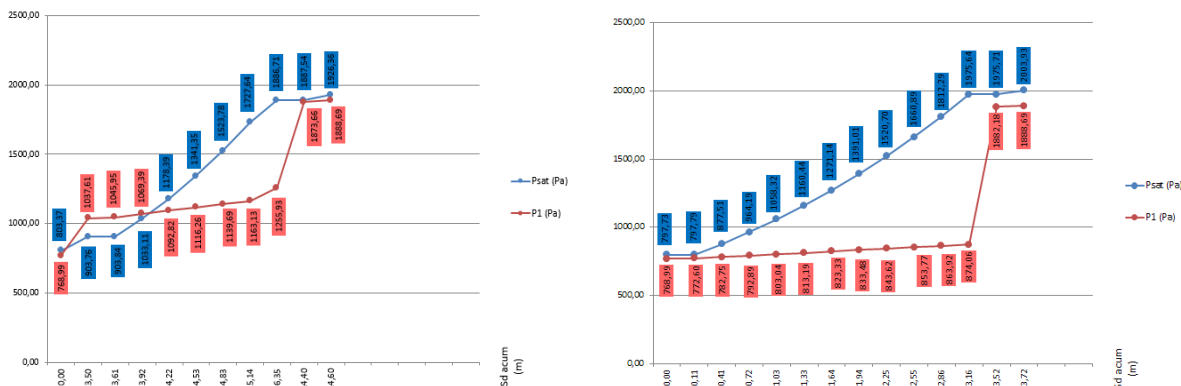


Gráfico 6.3: Perfil de presiones, SCB – 3 (izquierda) y Perfil de presiones, SCP – 3 (derecha).

El Gráfico 6.3 (izquierda) permite apreciar condensación en tres interfaces, las cuales se concentran cercanas al revestimiento exterior del componente de la SCB – 3, donde el perfil de presión parcial de vapor supera el perfil de presión de saturación tras el revestimiento exterior de Smartpanel; en el Gráfico 6.3 (derecha) se visualiza que al incorporar mayor espesor de material aislante y al modificar e incluir una barrera de vapor con una permeabilidad al paso del vapor (polietileno) más baja que el SCB – 3, tras el revestimiento interior, y por el exterior, adicionar una cámara de aire ventilada (CAV) distanciando el revestimiento exterior de Smartpanel, material que se comporta como una barrera de vapor por su alta resistencia al paso del vapor (15,92 MNs/g según Tabla 2.1), permite desacoplar los dos perfiles de presión de vapor en todo el sistema constructivo.

### 6.2.2 Método de Simulación Numérica

La evaluación y comparación de las soluciones constructivas base (SCB) y soluciones constructivas propuestas (SCP) se realiza en base a los criterios señalados por la norma alemana DIN 4108-3 citado al final del **punto 2.7.2** de este documento:

- *La cantidad de condensación de humedad en los complejos de techo o muros no debe exceder un total de 1,0 kg/m<sup>2</sup>.*
- *En las interfaces entre materiales que no son activos capilares (por ejemplo, lana mineral), no se permite ningún aumento de humedad superior a 0,5 kg/m<sup>2</sup>.*

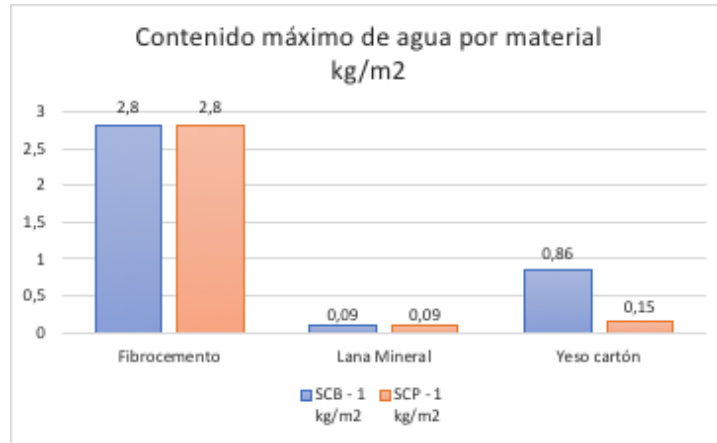
- **SCB – 1 vs SCP – 1**

**Tabla 6.1: Contenido de agua de SCB – 1 y SCP – 1.**

Cont. de Agua [kg/m <sup>2</sup> ]				
Solución Constructiva	Inicio	Fin	Mín.	Máx.
Contenido Total de Agua / SCB - 1	1,6	1,69	0,88	3,59
Contenido Total de Agua / SCP - 1	1,9	1,72	0,94	3,64

La Tabla 6.1 muestra que la SCB – 1 inicia la evaluación con un contenido de agua en 1,6 kg/m<sup>2</sup> y al final del período de evaluación de 5 años el contenido de agua ha aumentado en 0,06 kg/m<sup>2</sup>, evidenciando la acumulación de condensación al interior de la solución. La SCP – 1 inicia con un contenido de agua de 1,9 kg/m<sup>2</sup> y al finalizar los 5 años el contenido de agua ha disminuido a 1,72 kg/m<sup>2</sup>, por lo tanto, no hay acumulación de agua. El material que más aporta al contenido de agua en la solución es el fibrocemento, superando el criterio de la norma DIN 4108-3 de 1 kg/m<sup>2</sup> máximo, es por esta razón que este material se separa de la estructura principal del muro a través de una cámara de aire ventilada.





**Gráfico 6.4: Contenido máximo de agua por material de SCB – 1 y SCP – 1.**

El Gráfico 6.4 muestra en contenido máximo de humedad de cada uno de los materiales no laminares que componen las soluciones constructivas, en el caso del fibrocemento (revestimiento exterior) y la lana mineral (aislante) no presenta variaciones, sin embargo, en el yeso cartón (revestimiento interior) se reduce el contenido de agua en 83% con una diferencia de 0,71 kg/m<sup>2</sup>, esto se puede visualizar en el Gráfico 4.5 (SCB – 1) y el Gráfico 5.4 (SCP – 1). Esta variación responde principalmente al incorporar una cámara de aire no ventilada (CANV) tras el yeso cartón, este espacio de aire es capaz de contener parte del agua que atraviesa el revestimiento exterior, por lo que reduce considerablemente el deterioro prematuro de este material.

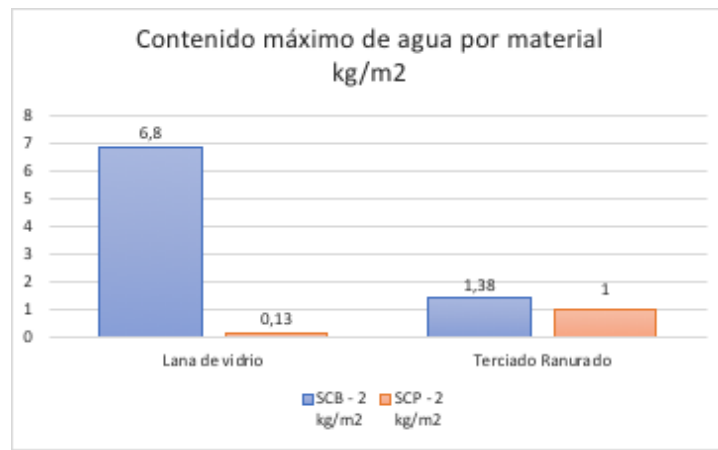
- **SCB – 2 vs SCP – 2**

**Tabla 6.2: Contenido de agua de SCB – 2 y SCP – 2.**

Cont. de Agua [kg/m <sup>2</sup> ]				
Solución Constructiva	Inicio	Fin	Mín.	Máx.
Contenido Total de Agua / SCB - 2	1,06	8,15	1,06	8,19
Contenido Total de Agua / SCP - 2	1,29	1,22	0,84	1,42

En la Tabla 6.2 se aprecia que la SCB – 2 inicia la evaluación con un contenido de agua en 1,06 kg/m<sup>2</sup> y al final del período de evaluación de 5 años el contenido de agua ha aumentado en aproximadamente 8 veces el contenido de agua, evidenciando una excesiva acumulación de

condensación al interior de la solución. La SCP – 2 inicia con un contenido de agua de  $1,29 \text{ kg/m}^2$  y al finalizar los 5 años el contenido de agua ha disminuido a  $1,22 \text{ kg/m}^2$ , por lo tanto, no hay acumulación de agua. El material que más aporta al contenido de agua en la solución es el zincalum (revestimiento exterior) este material se comporta como un cortavapor, el que no permite la difusión de vapor de agua, superando el criterio de la norma DIN 4108-3 de  $1 \text{ kg/m}^2$  máximo, es por esto que se resuelve separar el material con una cámara ventilada tras el zincalum.



**Gráfico 6.5: Contenido máximo de agua por material de SCB – 2 y SCP – 2.**

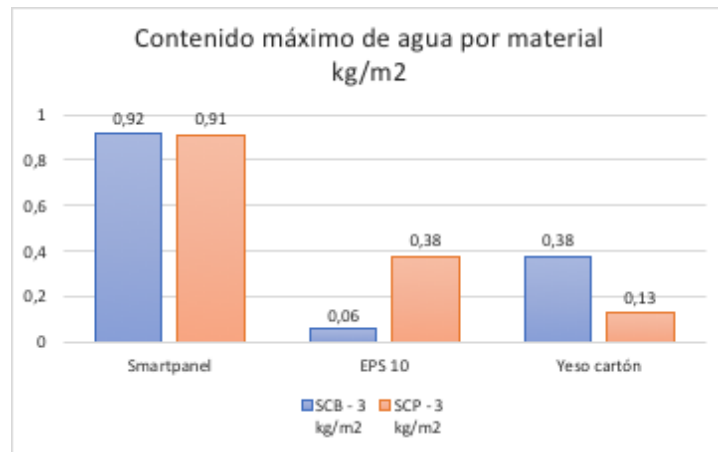
El Gráfico 6.5 muestra el contenido máximo de humedad de cada uno de los materiales no laminares que componen las soluciones constructivas, en el caso de la lana de vidrio (aislante) en la SCB – 2 presenta una gran acumulación de agua llegando a  $6,8 \text{ kg/m}^2$ , en la SCP – 2 este contenido de humedad disminuye en un 98% con  $0,13 \text{ kg/m}^2$ , para este material que no es activo capilar, la norma DIN 4108-3 establece como criterio no superar los  $0,5 \text{ kg/m}^2$  que se cumple en la solución propuesta. Respecto al terciado ranurado se reduce el contenido de humedad con la SCP – 2 llegando a  $1 \text{ kg/m}^2$  quedando en el límite del cumplimiento de acuerdo a lo establecido por norma DIN 4108-3, esto se aprecia en el Gráfico 4.9 (SCB – 2) y el Gráfico 5.8 (SCP – 2). Esta mejora se logra adicionando una cámara de aire no ventilada y una barrera de vapor tras el revestimiento interior y separando el revestimiento exterior de zincalum con una cama de aire ventilada.

- **SCB – 3 vs SCP – 3**

**Tabla 6.3: Contenido de agua de SCB – 3 y SCP – 3.**

Cont. de Agua [kg/m <sup>2</sup> ]				
Solución Constructiva	Inicio	Fin	Mín.	Máx.
Contenido Total de Agua / SCB - 3	1,34	1,13	0,86	1,58
Contenido Total de Agua / SCP - 3	1,48	1,37	0,9	1,54

En la Tabla 6.3 muestra que la SCB – 3 inicia la evaluación con un contenido de agua en 1,34 kg/m<sup>2</sup> y al final del período de evaluación de 5 años el contenido de agua ha disminuido a 1,13 kg/m<sup>2</sup>, evidenciando que no presenta acumulación de condensación y que esta se seca en este período de evaluación. La SCP – 3 se comporta de modo similar, inicia con un contenido de agua de 1,48 kg/m<sup>2</sup> y al finalizar los 5 años el contenido de agua ha disminuido a 1,37 kg/m<sup>2</sup>, por lo tanto, no hay acumulación de agua, en el período evaluado.



**Gráfico 6.6: Contenido máximo de agua por material de SCB – 3 y SCP – 3.**

El Gráfico 6.6 muestra el contenido de agua máximo de los materiales no laminares que componen las soluciones constructivas, en ambos casos el Smartpanel (revestimiento exterior) se comporta prácticamente igual, no así el EPS 10 que en la SCB – 3 posee un contenido de agua de 0,06 kg/m<sup>2</sup> y en la SCP – 3 este aumenta considerablemente a 0,38 kg/m<sup>2</sup>, pudiendo reducir su capacidad aislante al aumentar su conductividad térmica. En el caso del yeso cartón (revestimiento interior) se reduce el contenido de agua en 0,25 kg/m<sup>2</sup>, esto se puede visualizar en el Gráfico 4.13 (SCB – 3) y el Gráfico 5.12 (SCP – 3).

### 6.2.3 Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realiza con el software WUFI Pro v6.2, el objetivo es verificar si al modificar las propiedades físicas de los materiales se puede conseguir mejorar el comportamiento higrotérmico.

Para este análisis se realiza la verificación con un material capilar activo que corresponde al yeso cartón, utilizado como revestimiento interior en las soluciones constructivas base 1 y 3 (SCB – 1 y SCB – 3) y en las soluciones constructivas propuesta 1 y 3 (SCP – 1 y SCP – 3).

Para modificar un material activo capilar es necesario conocer el coeficiente de transporte de líquido. El mecanismo predominante de transporte de humedad en materiales capilares porosos es el transporte líquido capilar. Sin embargo, este coeficiente no es una propiedad pura del material, sino que depende del material y de las condiciones de contorno. Los coeficientes de transporte de líquidos medidos (ensayados) están disponibles solo para un número relativamente pequeño de materiales, WUFI permite estimarlos a partir de datos de materiales estándar ingresando el coeficiente de absorción de agua (WUFI's Online Help).

Para realizar este análisis, se ha considerado seleccionar un yeso cartón del listado del software WUFI Pro, sin modificar sus propiedades físicas ni de transporte de humedad, ya que no es posible solo modificar un valor sin afectar las otras propiedades, por ejemplo, la porosidad está relacionada con la densidad del material y esta con la conductividad térmica.

A continuación, se muestra la Figura 6.1, donde se puede apreciar las propiedades físicas del yeso cartón utilizado en todas las evaluaciones de este estudio, seleccionado en base a las propiedades conocidas de un yeso cartón nacional. Y la Figura 6.2 muestra el material (yeso cartón) seleccionado para realizar el análisis de sensibilidad.

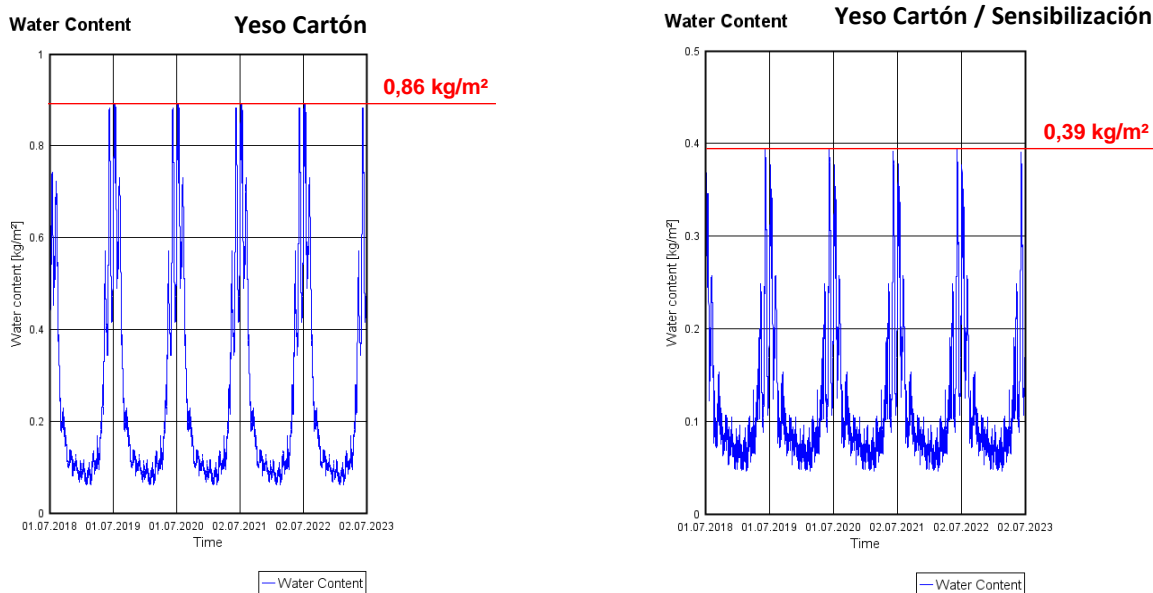
Nombre del Material: <input type="text" value="Yeso cartón - Tesis"/>	
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]: <input type="text" value="750"/>	Humedad Típica en la Construcción [kg/m <sup>3</sup> ]: <input type="text" value="6,3"/>
Porosidad [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]: <input type="text" value="0,65"/>	Valor de diseño de la conductividad térmica [W/mK]: <input type="text"/>
Spec. Calor Específico [J/kgK]: <input type="text" value="850"/>	Color: <input type="text" value=""/>
Conductividad Térmica [W/mK]: <input type="text" value="0,26"/>	
Factor Resist. a Difusión Vapor de Agua [-]: <input type="text" value="20"/>	

**Figura 6.1: Captura de pantalla de WUFI Pro 6.2: propiedades del material yeso cartón.**  
(Fuente: Software WUFI Pro 6.2)

Nombre del Material: <input type="text" value="Tablero de Yeso, interior - Sensibilidad"/>	
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]: <input type="text" value="625"/>	Humedad Típica en la Construcción [kg/m <sup>3</sup> ]: <input type="text" value="20"/>
Porosidad [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]: <input type="text" value="0,73"/>	Valor de diseño de la conductividad térmica [W/mK]: <input type="text"/>
Spec. Calor Específico [J/kgK]: <input type="text" value="850"/>	Color: <input type="text" value=""/>
Conductividad Térmica [W/mK]: <input type="text" value="0,2"/>	
Factor Resist. a Difusión Vapor de Agua [-]: <input type="text" value="8,33"/>	

**Figura 6.2: Captura de pantalla de WUFI Pro 6.2: propiedades del material yeso cartón para evaluación de sensibilidad.** (Fuente: Software WUFI Pro 6.2)

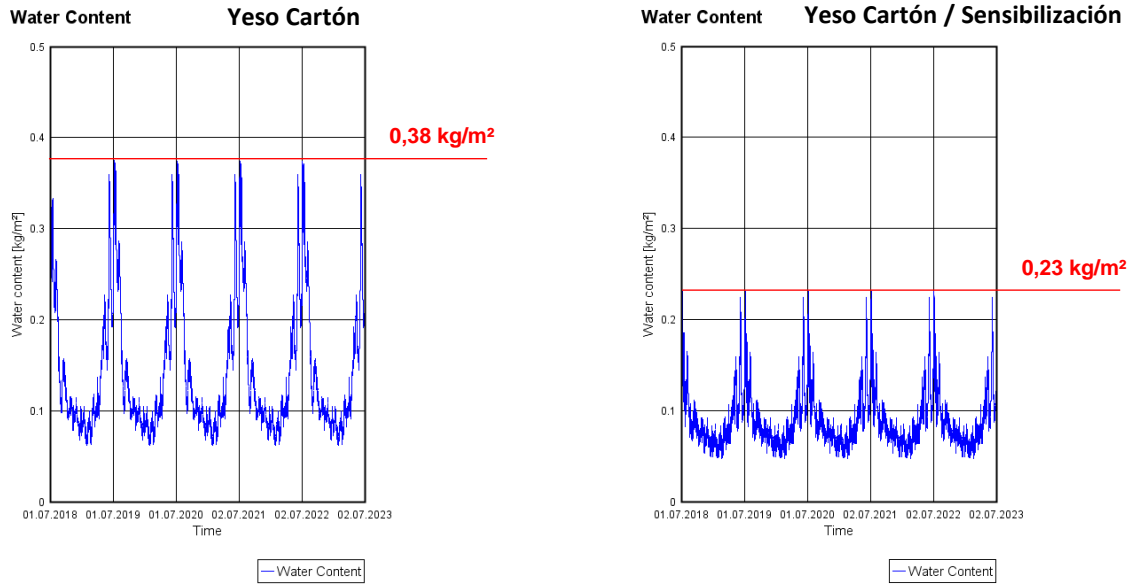
- Solución constructiva Base 1



**Gráfico 6.7: Contenido máximo de agua en SCB – 1 con distintas propiedades higrotérmicas de yeso cartón.**

Para la solución constructiva base 1, con las propiedades del yeso cartón para el análisis de sensibilidad, el Gráfico 6.7 muestra que disminuye el contenido máximo de humedad del material en un 55%, lo que corresponde a una reducción de  $0,47 \text{ kg/m}^2$ .

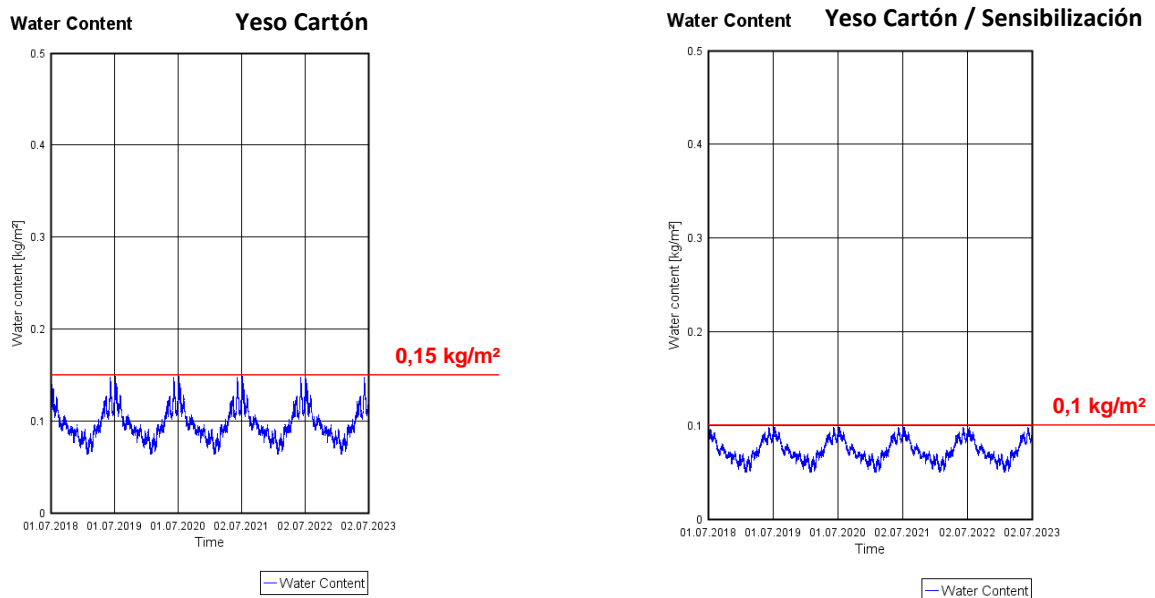
- **Solución constructiva Base 3**



**Gráfico 6.8: Contenido máximo de agua en SCB – 3 con distintas propiedades higrotérmicas de yeso cartón.**

Para la solución constructiva base 3, con las propiedades del yeso cartón para el análisis de sensibilidad, el Gráfico 6.8 muestra que se reduce el contenido máximo de humedad del material en  $0,15 \text{ kg/m}^2$ , es decir en un 40%.

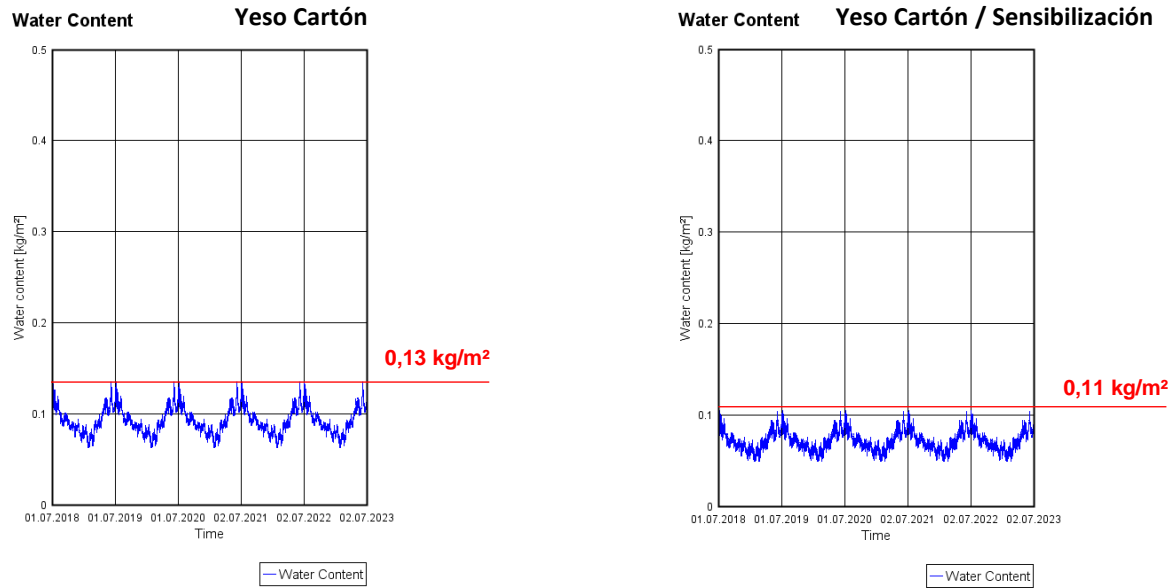
- **Solución constructiva Propuesta 1**



**Gráfico 6.9: Contenido máximo de agua en SCP – 1 con distintas propiedades higrotérmicas de yeso cartón.**

Para la solución constructiva propuesta 1, con las propiedades del yeso cartón para el análisis de sensibilidad, el Gráfico 6.9 muestra que se reduce el contenido máximo de humedad del material en  $0,05 \text{ kg/m}^2$ , es decir en un 33%.

- **Solución constructiva Propuesta 3**



**Gráfico 6.10: Contenido máximo de agua en SCP – 3 con distintas propiedades higrotérmicas de yeso cartón.**

Para la solución constructiva propuesta 3, con las propiedades del yeso cartón para el análisis de sensibilidad, el Gráfico 6.10 muestra que disminuye el contenido máximo de humedad del material en un 15%, lo que corresponde a una reducción de 0,02 kg/m<sup>2</sup>.



## Capítulo 7. Conclusiones

Mediante los resultados obtenidos en el desarrollo de esta tesis se ha conseguido cumplir con el objetivo general y objetivos específicos, dar respuestas a las preguntas de investigación y verificar la hipótesis planteada.

Los resultados basados en las simulaciones permiten validar la hipótesis planteada, pues al aplicar los estándares establecidos en el PDAV, se logra reducir el riesgo de condensación, condicionado al ordenamiento de las capas de materiales, de acuerdo a sus propiedades higrotérmicas, y junto con ello a la incorporación de cámaras de aire ventiladas y no ventiladas tras los revestimientos exteriores e interiores, respectivamente. En las evaluaciones con los métodos Glaser (NCh1973:2014) y de Simulación numérica, el considerar los materiales menos permeables al paso del vapor en el lado caliente (interior) y más permeables hacia el lado frío (exterior), permite desacoplar los perfiles de presión parcial de vapor y de presión de saturación, y se logra reducir el contenido de humedad en los materiales, evitando que se acumulen en el tiempo. Sin embargo, esta configuración presenta una complejidad con los revestimientos exteriores, pues si estos presentan una baja permeabilidad al paso del vapor, como es el caso de la plancha acanalada de zincalum o el tablero de fibra de madera con terminación base de pintura en cara expuesta (Smartpanel), estos no permiten la difusión del vapor a través del sistema constructivo, haciendo que se acumule el condensado en el interior, es por ello que en las soluciones constructivas propuestas en esta investigación se plantea separar estos materiales del sistema constructivo mediante una cámara de aire ventilada que permita difundir la humedad que atraviesa el componente. Del mismo modo, esta investigación permite concluir que la cámara de aire no ventilada tras el revestimiento interior reduce el contenido de humedad de dicho revestimiento, la ventaja de esta cámara es que permite ser utilizada como un espacio (services void) para instalaciones eléctricas, telecomunicaciones y/o sanitarias; sin alterar la continuidad de la barrera de vapor.

El fenómeno de la condensación asociado a los sistemas constructivos, es compleja, pues depende de diferentes condiciones y variables, en ese contexto este estudio permite visualizar a través de los resultados, que los procesos físicos involucrados en la condensación superficial y en la

condensación intersticial son distintos, por lo que una evaluación de riesgo de condensación siempre se debe hacer para las dos condiciones (superficial e intersticial).

Este estudio permite concluir que, para llevar a cabo una evaluación de riesgos de condensación, se debe conocer el contexto local, es decir, las condiciones climáticas del lugar, y la cultura ocupacional y de uso de la edificación; por lo tanto, no es apropiado establecer condiciones de borde para evaluación generalizadas. Para esto es necesario determinar la humedad de base climática, y la humedad por ocupación y uso (clase de higrometría), en este caso de las viviendas. Este ejercicio permite comprender bajo qué condiciones de humedad estará expuesta la solución constructiva en el período de ocupación. Esto toma mayor relevancia cuando los climas presentan gran variación en sus condiciones, de una estación a otra (inverno y verano).

De los métodos de evaluación estudiados y utilizados, se puede concluir que el método Glaser (NCh1973) por su fácil aplicabilidad es el más utilizado, sin embargo, solo considera el transporte de humedad por difusión de vapor a través del componente. El método de Simulación Numérica de una complejidad mayor que el método Glaser, por la gran cantidad de variables que considera en las evaluaciones, permite obtener resultados más precisos, a pesar de ello este trabajo da cuenta que con ambos métodos se llega a conclusiones similar con los resultados obtenidos en cada uno.

En relación a las evaluaciones de condensación superficial, se puede concluir que cada una de las soluciones constructivas base analizadas, presentan distintas resistencias térmicas, y que si bien 2 de las 3 soluciones constructivas (SCB – 2 y SCB – 3) no presentan riesgo de condensación superficial, están al límite de la temperatura superficial mínima. Considerando, además, que el espesor de aislante térmico de 50 mm de espesor, es más de 20 mm aprox. de lo exigido por la reglamentación térmica, es decir si solo se cumple con lo señalado en el artículo 4.1.10 de la O.G.U.C., todas estas soluciones presentarían riesgo de condensación superficial. Esto da cuenta de la baja exigencia de la reglamentación térmica, que no se condice con las condiciones reales de humedad.

De las soluciones constructivas propuestas se concluye, en el contexto de la condensación superficial, que el aumento de los espesores de aislantes permite aumentar la resistencia térmica, y con ello aumentar la temperatura superficial interior mínima para que no se produzca condensación superficial.

Respecto de las evaluaciones de condensación intersticial realizadas mediante el método de simulación numérica, las soluciones propuestas cumplen los criterios planteados por la norma alemana DIN 4108-3 sobre el contenido de humedad en los materiales; sin embargo, esto es una aproximación a los resultados reales, puesto que se han utilizado propiedades higrotérmicas de materiales extranjeros asimilados a materiales nacionales. Para el desarrollo de evaluaciones más precisas, se requiere necesariamente conocer las propiedades físicas de los materiales locales, que actualmente no se encuentran disponibles. Las mejoras planteadas a las soluciones propuestas se basan en la incorporación de mayor espesor de aislante y de cámaras de aire, no obstante, es posible también plantear mejoras modificando las propiedades higrotérmicas de los materiales, como las realizadas en este estudio con el análisis de sensibilidad para el revestimiento interior de yeso cartón, que al aumentar la porosidad en un 12%, baja la densidad, la conductividad térmica y el factor de resistencia de difusión al vapor de agua, esto permite reducir notablemente el contenido de humedad en el material.

Este estudio permite comprender que para implementar un sistema constructivo multicapa, se debe entender el comportamiento higrotérmico de cada capa (material) por separado, para luego comprender el comportamiento del sistema constructivo en su conjunto, pues en el transporte de humedad, a diferencia del transporte de calor, es importante el ordenamiento de las capas en que la permeabilidad de las capas se incremente desde el interior al exterior. El aumento del contenido de humedad en los materiales no solo afecta la durabilidad y estabilidad de estos, sino que también está directamente relacionado con el aumento de la conductividad térmica que aumenta las pérdidas de energía por la envolvente.

### **7.1 Propuestas de trabajos futuros.**

La presente investigación se desarrolla en base al estudio y análisis de soluciones constructivas multicapa de estructura de madera, dado que es el sistema constructivo más utilizado en Valdivia, no obstante, el MINVU plantea que con la implementación del estándar PDAV otras soluciones constructivas en hormigón y albañilería se harán económicamente más competitivas, por lo que es necesario ampliar el campo de estudio a otras soluciones constructivas, por ejemplo, las ya mencionadas.

Respecto a la validación de las evaluaciones de riesgo de condensación intersticial con software de simulación numérica, actualmente no existe en Chile una base de datos robusta de propiedades higrotérmicas de materiales de construcción, que posibilite discriminar la utilización de uno u otro material con base en estas propiedades; es por ello que se hace necesario desarrollar la investigación en esta línea, entregando datos más precisos en las evaluaciones.

Este estudio se basa en la evaluación de condensación de soluciones constructivas a través de métodos unidimensionales, quedando fuera del alcance de esta tesis la evaluación de los puentes térmicos, los que requieren un estudio con método bidimensional y/o tridimensional. Esto permitiría tener una visión más amplia del comportamiento higrotérmico de un sistema constructivo.

En términos generales, la condensación superficial e intersticial provee un ámbito de investigación bastante amplio desde la perspectiva del deterioro de las edificaciones, las pérdidas de energía y la salud de los ocupantes.

## Capítulo 8. Bibliografía

BSI, 2007. *BS EN 15026:2007: Hygrothermal performance of building components and building elements: Assessment of moisture transfer by numerical simulation*. London, UK: BSI.

BSI, 2011. *BS 5250:2011: Code of practice for control of condensation in buildings*. London, UK: BSI.

Bustamante, W., Rozas, Y., Cepeda, R., Encinas, F., & Martínez, P. (2009). *Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social*. (W. Bustamante, DITEC Ministerio de Vivienda y Urbanismo, & Programa País de Eficiencia Energética. Eds.) (p. 38). Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.

CDT. (2010). Informe Final y Resumen Ejecutivo. Estudio de usos finales y curva de oferta de la conservación de la energía en el sector residencial. Santiago, Chile.

CDT. (2012). Humedad por condensación en viviendas. Documento Técnico CDT N°33, 33. Santiago, Chile.

CIVA, UACH. (2012). Informe análisis termográfico e higrotérmico. Viviendas sociales Brisas de Guacamayo. Valdivia. Chile.

Dullien, F. A. L. (1992). *Porous Media Fluid Transport and Pore Structure*. Harcourt Brace Jovanovich (Vol. 39, pp. 5657–5660). Academic Press. Inc.

Fissore, A., Colonelli Pérez-Cotapos, P. (2013). Evaluación Independiente del Programa de Reacondicionamiento Térmico – Informe Final. Santiago, Chile. (pp. 6-7).

Fraunhofer IBP, 2018. WUFI Pro 6.2 Online Help. [Software].

Instituto Nacional de Normalización. Norma chilena NCh 853.Of.2007, Acondicionamiento térmico – Envoltente térmica de edificios – Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas.

Instituto Nacional de Normalización. Norma chilena NCh 1973.Of.2014, Comportamiento higrotérmico de elementos y componentes de construcción – Temperatura superficial interior para evitar la humedad superficial crítica y la condensación intersticial – Método de cálculo.

Künzel Hartwig, M. (1995). *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One and two dimensional calculation using simple parameters.*

Little, J., Ferraro, C., & Aregi, B. (2015). Technical Paper 15: *Assessing risks in insulation retrofits using hygrothermal software tools. Heat and moisture transport in internally insulated stone walls.* Technical Paper 15. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2493.3844>

Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2018). Ordenanza General de Urbanismo y construcción (p.181). Santiago de Chile.

Møller, E. B., Andersen, B., Rode, C., & Peuhkuri, R. (2017). Conditions for mould growth on typical interior surfaces. In *Energy Procedia* (Vol. 132, pp. 171–176). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.680>

Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2016). Informe sobre Desarrollo Humano 2016. Desarrollo humano para todos. [http://hdr.undp.org/sites/default/files/HDR2016\\_SP\\_Overview\\_Web.pdf](http://hdr.undp.org/sites/default/files/HDR2016_SP_Overview_Web.pdf)

Sedlbauer, K. (2001). *Prediction of mould fungus formation on the surface of/and inside building components.* [http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/en/documents/ks\\_dissertation\\_etcm102\\_1-30729.pdf](http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/en/documents/ks_dissertation_etcm102_1-30729.pdf)

## **Anexo A**

Ejemplo de interfaz de software WUFI Pro v6.2 para evaluación de condensación intersticial.

Para este ejemplo se utiliza la Solución Constructiva Base – 1 (SCB - 1).

Proyecto

- Variante: #1 (Act. Caso)
  - Componente
    - Montaje/Posición Monitor
    - Orientación
    - Coef. Transf. Superficie
    - Condiciones Iniciales
  - Control
  - Clima
  - Graf. Rápido

Variante: #1

Montaje/Posición Monitor | Orientación/Inclinación/Altura | Coef. Transf. Superficie | Condiciones Iniciales

Nombre de la Capa: Lana Mineral 40 - Tesis | Espesor [m]: 0.04

Exterior (Lado Izquierdo): 0.000, 0.001 | Interior (Lado Derecho): 0.02, 0.001, 0.01

Datos de Materiales

Fuentes, Pérdidas

Nueva Capa

Duplicar

Borrar

Editar Construcción para:
 

- Gráfico
- Tabla

Asignar a partir de: Base de datos de materiales, Ejemplo de Casos

Construcción de Rejilla: Automático (I), 100, Fino

Espesor Total: 0.078 m | Desempeño Térmico Total: Resist. Térmica R: 1.19 (m² K/W) | U-Valor: 0.675 W/(m² K)

materiales de WUFI

Escanean todos lo materiales | Usuario definido -- SCB - 1

Nombre del Material	Densidad [kg/m³]	Porosidad [m³/m³]	Capacit... [J/kgK]	Cond. Té... [W/mK]	Resist.al ... [-]
Capa de Aire 20 mm - Tesis	1,3	0,999	1000	0,121	60,5
Fibrocemento - Tesis	1250	0,48	840	0,23	194
Fieltro 15 Lbs - Tesis	280	0,001	1500	2,3	110
Kraft Papel - Tesis	120	0,6	1500	0,42	8050
Lana Mineral 40 - Tesis	40	0,95	850	0,042	1,3
Yeso cartón - Tesis	750	0,65	850	0,26	20
Yeso cartón - Tesis Sensibilizacion	750	0,95	850	0,26	20

Información de material | Funciones higrótérmicas

Función Almacenaje de Humedad

No.	H.Rel. [-]	Cont. de A... [kg/m³]
1	0	0
2	0,506	73,14
3	0,705	125,58
4	0,903	251,16
5	0,9993	467,82
6	1	470

Cont. de Agua [kg/m³] vs Humedad Relativa [-]

Importar | Exportar | Espesor [m]: 0,0001524 | Asignar | Cancelar | Ayuda



Proyecto

- Variante: 1 #1 (Act. Caso)
  - Componente
    - Montaje/Posición Monitor
    - Orientación**
    - Coef. Transf. Superficie
    - Condiciones Iniciales
  - Control
  - Clima
  - Graf. Rápido

Variante: #1

Montaje/Posición Monitor
Orientación/Inclinación/Altura
Coef. Transf. Superficie
Condiciones Iniciales

**Orientación**

Norte

**Inclinación**

Inclinación [°]

**Altura Construcción/Coeficiente de Lluvia caída**

Carga de Lluvia calculada según ASHRAE Norma Standard

R1 [-]

R2 [s/m]

Nota:  
Intensidad de Lluvia  
Lluvia\*(R1+R2\*Veloc. Viento)

Edificio Pequeño. Altura hasta 10 m

Proyecto

- Variante: 1 #1 (Act. Caso)
  - Componente
    - Montaje/Posición Monitor
    - Orientación
    - Coef. Transf. Superficie**
    - Condiciones Iniciales
  - Control
  - Clima
  - Graf. Rápido

Variante: #1

Montaje/Posición Monitor
Orientación/Inclinación/Altura
Coef. Transf. Superficie
Condiciones Iniciales

**Superficie Exterior (Lado Izquierdo)**

Resistencia Térmica [(m² K)/W]  Definido por el usuario

Comprende parte de Radiación de Onda-Larga [W/(m² K)]

Dependiente del Viento  ...

---

Sd-Valor [m]  Sin Recubrimiento

Nota: Este ajuste no afecta a la absorción de la lluvia

---

Absorción (Radiación de Onda Corta) [-]  Sin Absorción/Emisión

Emisión (Radiación de Onda Larga) [-]

Balance de Radiación Explícita  Nota: Esta opción toma el enfriamiento radiativo debido a la emisión de onda larga en cuenta. Casos sensibles pueden requerir datos counterradiation suficientemente exactos en el archivo de tiempo.

---

Grado de Refl. Onda-Corta del Suelo [-]  Valor estándar

---

Coef. Penetración del Agua (Lluvia) [-]  Dependiendo de la inclinación del componente

---

**Superficie Interior (Lado Derecho)**

Resistencia Térmica [(m² K)/W]  (Definido por el usuario)

---

Sd-Valor [m]  Sin Recubrimiento

Proyecto

- Variante: 1 #1 (Act. Caso)
  - Componente
    - Montaje/Posición Monitor
    - Orientación
    - Coef. Transf. Superficie
    - Condiciones Iniciales
  - Control
    - Clima
    - Graf. Rápido

Variante: #1

Montaje/Posición Monitor
Orientación/Inclinación/Altura
Coef. Transf. Superficie
Condiciones Iniciales

Humedad inicial en componente

 Constante a través de componentes  
 Definir en cada Capa  
 Leer desde el Archivo

Temp. Inicial en Componente

 Constante a través de componentes  
 Leer desde el Archivo

Humedad relativa inicial [-]

Temp. Inicial en Componente [°C]

Contenido Inicial del Agua en diferentes Capas			
No.	Material Capa	Espesor [m]	Agua Contenido [kg/m³]
1	Fibrocemento - Tesis	0,006	223.89
2	Filtro 15 Lbs - Tesis	0.001	0.0
3	Lana Mineral 40 - Tesis	0.04	2.69
4	Capa de Aire 20 mm - Tesis	0.02	2.83
5	Kraft Papel - Tesis	0.001	2.28
6	Yeso cartón - Tesis	0.01	9.12

Proyecto

- Variante: 1 #1 (Act. Caso)
  - Componente
    - Montaje/Posición Monitor
    - Orientación
    - Coef. Transf. Superficie
    - Condiciones Iniciales
  - Control
    - Periodo de Cálculo/Perfil
    - Numérico
  - Clima
  - Graf. Rápido

Variante: #1

Cálculación Periodo / Perfil
Numérico

Inicio_Fin / Perfil			
Cálculación	Perfiles	Fecha	Hora
Inicio	Perfil 1	01/07/2018	0:00:00
Fin	Perfil 2	01/07/2023	0:00:00
			24/06/2018 0:00:00

Nuevo

Borrar

Copiar

Insertar

Paso del Tiempo [h]

Proyecto

- Variante: 1 #1 (Act. Caso)
    - Componente
      - Montaje/Posición Monitor ✓
      - Orientación ✓
      - Coef. Transf. Superficie ✓
      - Condiciones Iniciales ✓
    - Control
      - Periodo de Cálculo/Perfil ✓
      - Númeroico ✓
    - Clima
      - Graf Rápido

Variante: #1

Calculación Periodo / Perfil Númeroico

Tipo de Cálculo

Cálculo Transporte de Calor

Cálculo Transporte de Humedad

Opciones especiales Higrotérmicas

Sin Conducción de Capilaridad

Sin Calor Latente de Evaporación

Excluyendo la dependencia de la temperatura en el calor latente de evap

Sin Calor Latente de Fusión

Excluir la dependencia de la conductividad térmica de la temperatura y la hu

Parámetros Numéricos

Aumentar Precisión

Mejorar Convergencia

Adaptar Periodo de Tiempo

Autorizar

Geometría

Cartesiano

Simetría Radial

Proyecto

- Variante: 1 #1 (Act. Caso)
    - Componente
      - Montaje/Posición Monitor ✓
      - Orientación ✓
      - Coef. Transf. Superficie ✓
      - Condiciones Iniciales ✓
    - Control
      - Periodo de Cálculo/Perfil ✓
      - Númeroico ✓
    - Clima
      - Exterior (Lado Izquierdo) ✓
      - Interior (Lado Derecho) ✓
      - Graf Rápido

Variante: #1

Clima Exterior (Lado Izquierdo) | Clima Interior (Lado Derecho)

Desde Mapa / Archivo EN 15026 / WTA 6-2 ISO 13788 ASHRAE 160 Curva Seno

BD Usuario: Valdivia\_CI-hour.wac Definir el clima... Detalles...

Temperatura / Humedad Relativa Análisis de Clima

Información de datos

Ubicación: Valdivia CI

Latitud [°]: 39,77 Sur

Longitud [°]: 73,25 Oeste

Altura SNM (m): 114

Zona Horaria: -4,0

Número de líneas de texto: 8760

Descripción: ⓘ

Comentarios: ⓘ

Elementos climáticos

Temperatura: TA

Humedad Relativa: HREL

Radiación de onda corta: ISGH, ISD

Radiación de onda larga: ILAH

Viento: WS, WD

Lluvia: RN

Grado de Nubosidad: CI

Presión del Aire: —

