

ESTUDIO Y GUÍA DE RECOMENDACIONES
**PARA LA HERMETICIDAD
AL PASO DEL AIRE**
EN VIVIENDAS DE ENTRAMADO DE MADERA

ESTUDIO Y GUÍA DE RECOMENDACIONES PARA LA HERMETICIDAD AL PASO DEL AIRE EN VIVIENDAS DE ENTRAMADO DE MADERA

Primera versión web: octubre 2023

Esta edición ha sido creada por el equipo del Centro UC de innovación en Madera. Todos los derechos reservados. Esta publicación o cualquier parte de la misma no debe ser reproducida en ninguna forma sin el permiso escrito del Centro UC de innovación en Madera.

Autoría

Daniela Méndez
Felipe Victorero

Colaboradores:

SERVIU Los Lagos - Jose Mercado
SERVIU Los Lagos - Tania García
SERVIU Los Lagos - Macarena Valenzuela
SERVIU Los Ríos - Soledad Reyes
SERVIU La Araucanía - Kristel Jaramillo
SERVIU La Araucanía - Jorge Baraona
SERVIU La Araucanía - Alex Matamala
SERVIU La Araucanía - Fernando Paredes

Contraparte Técnica

DITEC MINVU - Susana Jara
DITEC MINVU - Camilo Lanata
DITEC MINVU - Rodrigo Retamal

Edición

Daniela Méndez

Diagramación

Vanessa Naranjo

Ilustración

Daniela Méndez
Javier Haberland
Amani Albouni
Ignacio Ebensperger

Los autores, colaboradores y editores no asumen ninguna responsabilidad por cualquier daño directo o indirecto, lesión, perjuicio o pérdida que pueda producirse o sufrirse como resultado del uso, la confianza, la aplicación y/o la referencia a la información incluida en esta publicación. Consulte a su jurisdicción local o a un profesional del diseño para asegurarse de que se cumplen las disposiciones legales y ordenanzas locales de construcción.

Información de contacto:

Centro UC de Innovación en Madera

Edificio Centro de Innovación Anacleto Angelini, piso 7 Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile Teléfono: +56 2 2354 5549
contactocim@uc.cl
<https://madera.uc.cl>

AGRADECIMIENTOS



Centro UC
de Innovación
en Madera



DECON UC



ESTUDIO Y GUÍA DE RECOMENDACIONES PARA LA HERMETICIDAD AL PASO DEL AIRE EN VIVIENDAS DE ENTRAMADO DE MADERA

Noviembre 2022

Informe elaborado por: Daniela Méndez López

ÍNDICE

Introducción	8
Objetivo general del estudio	8
Objetivos específicos	8
Alcances	9
Estado del arte y contexto normativo	10
Terminología	10
Contexto normativo	10
Nacional	10
Internacional	15
Levantamiento en terreno de la condición de hermeticidad de las viviendas de entramado de madera	18
Antecedentes de los proyectos	18
Metodología de estudio realizado en conjuntos de vivienda	28
Obtención de la muestra	28
Metodología del ensayo	28
Casos de estudio	33
Región de Los Lagos	33
Osorno	33
Puerto Octay	43
Región de Los Ríos	47
Valdivia	47
Los Lagos	50
Región de la Araucanía	54
Temuco	54
Pillanlelbún	60

Observaciones generales de la construcción y especificaciones técnicas	64
Costos asociados a los sellos y elementos para la hermeticidad de las viviendas	70
Resultados	74
Resumen de resultados de ensayos de hermeticidad según proyecto	74
Resultados individualizados	78
Comuna de Osorno	82
Comuna de Puerto Octay	84
Comuna de Valdivia	85
Comuna de Los Lagos	86
Comuna de Temuco	86
Comuna de Lautaro	87
Evaluación experimental de hermeticidad de soluciones constructivas	88
Metodología de ensayo	88
Módulo de ensayo	88
Obtención de la línea base	90
Ensayos realizados por tipo de solución constructiva	90
Soluciones de unión de ventana	91
Soluciones de muro	93
Unión de soleras	95
Unión de instalaciones eléctricas	96
Recomendaciones para lograr un buen desempeño en la hermeticidad de las viviendas	98
La regla del lápiz	98
De los materiales	98
Especificaciones técnicas	100



Capacitación	100
Considerar la vivienda como un todo	101
Características de diseño de la vivienda	101
Bibliografía	102
Listado de figuras	103
Listado de tablas	108
Anexos	109
Datos para ingreso de información al programa de cálculo fantestic®	109
Normativa de cálculo.	115



INTRODUCCIÓN

En el marco del convenio de colaboración y transferencia del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) y el Centro UC de Innovación en Madera (CIM UC) del año 2019, se plantea como uno de sus objetivos el realizar un levantamiento de la realidad de la hermeticidad de las viviendas con estructura de entramado de madera. De igual forma, se busca que este trabajo analice el desempeño de soluciones constructivas que ayuden a obtener una mejora en la hermeticidad al paso del aire, de madera de adecuar especificaciones técnicas para estándares de las nuevas viviendas construidas en esta materialidad.

El presente documento, se compone de tres partes: (i) estado del arte y contexto normativo, a través de levantamiento bibliográfico; (ii) ensayos de hermeticidad al paso del aire de viviendas de entramado de madera, a través de trabajo en terreno y (iii) análisis de soluciones constructivas bajo diferentes estándares, a través de ensayos experimentales en laboratorio.

OBJETIVO GENERAL DEL ESTUDIO

Evaluar en terreno la hermeticidad de las viviendas sociales de materialidad predominante entramado de madera, para identificar las principales falencias, y así diseñar soluciones constructivas que permitan cumplir con los estándares mínimos requeridos por los Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Realizar estado del arte y contexto normativo de la hermeticidad en Chile
- b) Realizar un análisis del impacto de las normativas
- c) Analizar el desempeño de hermeticidad de las viviendas mediante el método de presurización por medio de ventilador
- d) Evaluar la calidad con la que se ejecutan los sistemas constructivos en su etapa de construcción
- e) Análisis del desempeño de hermeticidad de viviendas de entramado de madera según regulación normativa de la comuna (afecta o no afecta a PDA)
- f) Evaluar de forma experimental los sellos y soluciones especificadas para tres casos: (i) sin regulación PDA, (ii) con regulación PDA, (iii) buenas prácticas.



ALCANCES

El presente documento considera una asesoría técnica en temas de permeabilidad del aire en las viviendas asociadas al proyecto de este convenio, los casos de estudio se ubican en las regiones de: (i) Los Lagos, (ii) Los Ríos y (iii) Araucanía; y las comunas de: (i) Osorno, (ii) Puerto Octay, (iii) Valdivia, (iv) Los Lagos, (v) Temuco y (vi) Lautaro. Las regiones y comunas en las cuales se analizaron proyectos se indican en la Figura 1. A la izquierda de cada ramal, las comunas afectas a la regulación de Plan de Descontaminación Atmosférica (PDA) y a la derecha las comunas no afectas.



Figura 1: Distribución de zonas donde se realizaron ensayos Blower Door

Esta asesoría se encuentra basada en antecedentes entregados por los SERVIU regionales, y considera la elaboración de ensayos tipo *blower door* ejecutados en terreno por profesionales de Centro UC de Innovación en Madera (CIM UC), más el registro visual de la ejecución de viviendas.

Es importante destacar que la ejecución de las recomendaciones de mejora señaladas por el estudio, son responsabilidad de quienes las llevan a cabo en terreno. Además, las mejoras de desempeño según estrategia, estudiada por el consultor, son netamente de carácter referenciales y no pueden ser garantizados sus impactos en el proyecto final.

ESTADO DEL ARTE Y CONTEXTO NORMATIVO

Las infiltraciones de aire son el flujo involuntario de aire a través de la envolvente de la vivienda. Según el manual de hermeticidad al aire de edificaciones, corresponde al “paso de aire sin control a través de grietas ocultas y aberturas no previstas en la envolvente”¹. Es así como la hermeticidad es la capacidad de la edificación para oponerse a las infiltraciones. Esta propiedad se mide en renovaciones de aire por hora. Y se obtiene a través de un ensayo in situ, que requiere de un diferencial de presión de 50Pa, a esto se le llama la clase de infiltración de aire, que es la expresión que se utiliza para la reglamentación de hermeticidad e infiltraciones en las viviendas².

TERMINOLOGÍA

Área efectiva de filtración: la suma de aberturas involuntarias en la estructura con una diferencia de presión de 4Pa.

Envolvente térmica: elementos que conforman el perímetro de la edificación separando el ambiente interior del exterior.

Infiltraciones de aire: el paso de aire sin control a través de grietas ocultas y aberturas no previstas en la envolvente³.

Indicador n50 tasa de renovaciones de aire (1/h; ach): para una diferencia de presión constante de 50Pa, se indica la cantidad de veces que se renueva el volumen de aire contenido al interior de la edificación.

Plan de Descontaminación Atmosférica: son instrumentos de gestión ambiental, que, a través de la definición e implementación de medidas y acciones específicas, tienen por finalidad reducir los niveles de contaminación del aire, con el objeto de resguardar la salud de la población⁴.

CONTEXTO NORMATIVO

NACIONAL

En el contexto actual de emergencia climática, han surgido diferentes iniciativas que buscan reducir las emisiones de gases efecto invernadero (GEI). Entre ellas, se intenta disminuir las emisiones generadas por la calefacción, para lo cual se requiere aumentar los estándares de eficiencia energética de las viviendas. En este sentido, la normativa chilena ha realizado regulaciones que apuntan a reducir las pérdidas de calor por transmisión, lo que se traduce en la transmitancia térmica de los elementos de la envolvente, pero se ha dejado de lado la regulación y control de las pérdidas

1 Citec UBB y DECON UC, «Manual de Hermeticidad al aire de Edificaciones», 2014.

2 Ministerio de Vivienda y Urbanismo, «Planes de Descontaminación Atmosférica», accedido 25 de agosto de 2022, <https://www.minvu.gob.cl/planes-de-descontaminacion-atmosferica/>.

3 Citec UBB y DECON UC, «Manual de Hermeticidad al aire de Edificaciones».

4 Ministerio de Vivienda y Urbanismo, «Planes de Descontaminación Atmosférica».

térmicas derivadas de las infiltraciones de aire, las cuales pueden influir entre un 24% y un 73% en la demanda de energía de calefacción de la vivienda⁵.

En Chile, se ha implementado una exigencia normativa de carácter comunal para las zonas saturadas por material particulado respirable (MP10) y material particulado fino respirable (MP2,5); las cuales se denominan Planes de Descontaminación Atmosférica. Entre sus exigencias regulatorias, para algunas comunas se determina un valor máximo de infiltraciones de aire a 50Pa (ach), cuyos valores se presentan en la Tabla 1 y Tabla 2 específicamente en las comunas estudiadas. Se observa que existen ocho regiones con regulación, cuyas exigencias van desde los 4 ach a los 8 ach, además la Región Metropolitana contiene dentro de su PDA recomendaciones de diseño que se deben seguir para obtener un buen desempeño de hermeticidad, pero no se limita a una clase de infiltraciones en particular.

Según el proyecto de norma NTM 011/3, 2014⁶, se define la clase de infiltración de aire máxima permitida para la envolvente térmica de las edificaciones de uso residencial, educación y salud, excluyendo los complejos de puerta y ventana. Según la zonificación térmica de la norma NCh 1079/2008, como se muestra en la Tabla 3. Al comparar estos criterios propuestos con los requerimientos normativos de los PDA se tiene que estos últimos son menos exigentes en las comunas de Osorno y Valdivia.

La Figura 2, muestra la correspondencia entre la reglamentación de hermeticidad propuesta por un anteproyecto de norma y la existente en las zonas estudiadas, dada por los PDA.

Tabla 1: regulación de infiltraciones de aire a nivel nacional según PDA vigente

Región	Comuna	Clase de infiltración de aire (50 Pa; ach)
Región Metropolitana De Santiago	Región Metropolitana	Solo recomendaciones
Región De Aysén Del General Carlos Ibáñez Del Campo	Coyhaique y su zona circundante	4,00
Región De Los Lagos	Osorno	5,00
Región De Los Ríos	Valdivia	5,00
Región De La Araucanía	Temuco y Padre las Casas	7,00
Región Del Biobío	Concepción Metropolitano	8,00
Región De Ñuble	Chillán y Chillán Viejo	8,00
Región Del Maule	Talca y Maule	5,00
Región Del Libertador General Bernardo O'Higgins	Valle Central de la Región de O'Higgins	5,00

5 Waldo Bustamante et al., «Eficiencia energética en vivienda social: un desafío posible.» (Camino al Bicentenario. Propuestas para Chile, Concurso Políticas Públicas, 2009), 253-82, <https://politicaspUBLICAS.uc.cl/wp-content/uploads/2015/02/eficiencia-energetica-en-vivienda-social-un-desafio-posible.pdf>; F. Ossio, A. De Herde, y L. Veas, «Exigencias europeas para infiltraciones de aire: Lecciones para Chile», *Revista de la construcción* 11, n.o 1 (abril de 2012): 54-63, <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2012000100006>.

6 «NTM 011/3 2014 Requisitos y mecanismos de acreditación para acondicionamiento ambiental de las edificaciones. Parte 3: Calidad del aire interior.» (2014).plainCitation: «NTM 011/3 2014 Requisitos y mecanismos de acreditación para acondicionamiento ambiental de las edificaciones. Parte 3: Calidad del aire interior.» (2014).

Tabla 2: estándar de infiltraciones de aire en comunas en las cuales se realizó el levantamiento

Región	Comuna	Estándar; infiltración de aire a 50Pa (ach)
Los Lagos	Osorno	5,00
	Puerto Octay	Sin regulación
Los Ríos	Valdivia	5,00
	Los Lagos	Sin regulación
Araucanía	Temuco	7,00
	Pillanlelbún	Sin regulación

Tabla 3: clase de infiltración de aire máxima permitida para la envolvente térmica. Fuente: NTM 011/2014

Zona Térmica	Clase de Infiltración de aire	
	50Pa	
	Ach	
A	---	
B	6.00	
C	9.00	
D	8.00	
E	8.00	
F	7.00	
G	4.00	
H	6.00	
I	4.00	

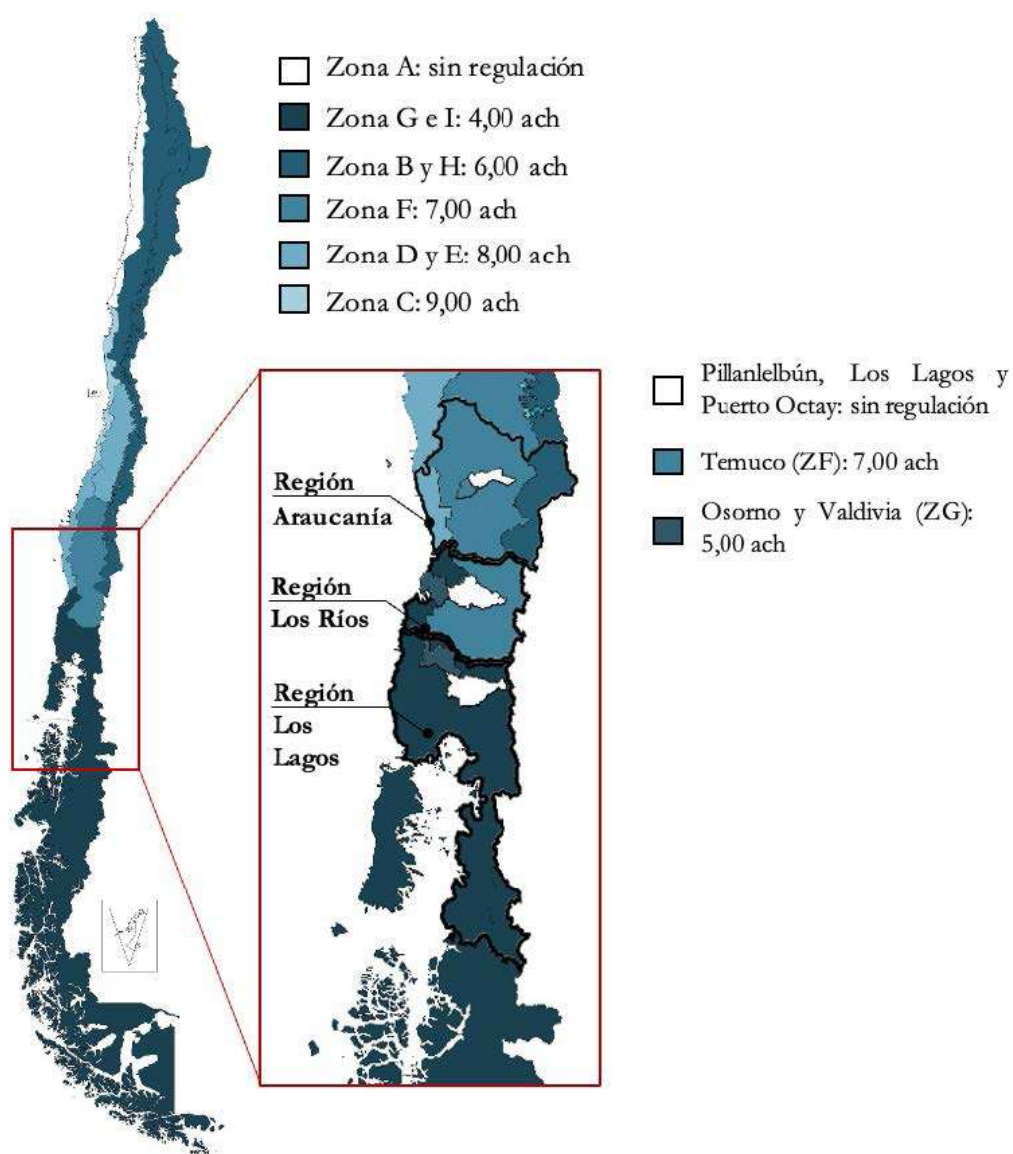


Figura 2: mapa ilustrativo de regulación de hermeticidad según zonas térmicas (basado en NTM 011/3-2014). Detalle de las regiones y comunas estudiadas donde se observa que las comunas de Osorno y Valdivia las cuales están afectas a PDA este es menos restrictivo que la propuesta de norma.

La construcción a nivel nacional tiene un gran impacto, corresponde aproximadamente al 7,8% del PIB nacional, el 8,46% de la generación de empleos, el 26% del uso de energía y materiales, el 6% del uso del agua, el 33% de los gases efecto invernadero y el 34% de los residuos sólidos⁷.

En este sentido y en línea con las metas de descarbonización 2050, ante la emergencia climática mundial los compromisos adquiridos por Chile, y la intención de mejorar el estándar de calidad de las viviendas y con ello brindar un mayor confort interior, lo que impacta directamente en el usuario final. Es que diferentes políticas públicas tales como la reglamentación térmica en su primera y segunda etapa han apuntado a mejorar la envolvente de las viviendas, pero solo han regulado las pérdidas por transmisión, dejando fuera la evaluación de demanda y consumo energético, sin considerar la hermeticidad de las viviendas. Estas regulaciones han permitido reducir los consumos de energía en las viviendas de 500 [KWh/m²] a 200 [KWh/m²]⁸; pero podría ser aún más eficiente la medida si se incorporaran los criterios de hermeticidad.

Dada la alta contaminación atmosférica de algunas regiones y sobre todo regiones de clima frío, como se habla en el apartado anterior se han generado los planes de descontaminación atmosférica los cuales “son instrumentos de gestión ambiental, que, a través de la definición e implementación de medidas y acciones específicas, tienen por finalidad reducir los niveles de contaminación del aire, con el objeto de resguardar la salud de la población”⁹. Estos planes permitirían reducir el consumo energético de las viviendas a 100 KWh/m².

Específicamente para la hermeticidad de las viviendas, la Universidad del Biobío junto a DECON UC han realizado un levantamiento del parque construido el cual se detalla en el manual de hermeticidad al aire de edificaciones, y muestra que las viviendas construidas con entramado de madera son las que tienen un mayor nivel de infiltraciones llegando a 24,6 ach en promedio versus 9 ach que son las renovaciones de volumen de aire por hora de la materialidad hormigón. De todas formas, la regulación que incorporan los PDA que van desde las 5 ach a las 8 ach no se cumpliría inicialmente en la línea base de ninguna materialidad, esto supone que la implementación de los PDA requiere de esfuerzos desde la capacitación, mejora en las especificaciones técnicas, mayor presupuesto, mayor inspección en terreno y entre otras.

Como la madera es la materialidad con peor desempeño hermético según el estudio de la UBB y DECON UC, urge realizar un levantamiento de la situación actual sobre todo en viviendas sociales de 1 a 2 pisos de las regiones de La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos, ya que esta materialidad representa un 90% del parque con permiso de edificación entre el 2002 y el 2019.

7 Ministerio de Vivienda y Urbanismo, *Estándares de construcción sustentable para viviendas de Chile*, vol. IV: Materiales y Residuos, 2018.

8 INFOR, «El Dilema de la Leña. ¿Cómo reducir la contaminación del aire sin incrementar el costo en calefacción?» (Boletín BES, Bosques - Energía - Sociedad: Observatorio de los Combustibles Derivados de la Madera OCDM, octubre de 2015), <https://bibliotecadigital.infor.cl/bitstream/handle/20.500.12220/20966/31499.pdf;jsessionid=09D806E38A211B8757F3A59E074D75D6?sequence=1>.

9 Ministerio de Vivienda y Urbanismo, «Planes de Descontaminación Atmosférica».

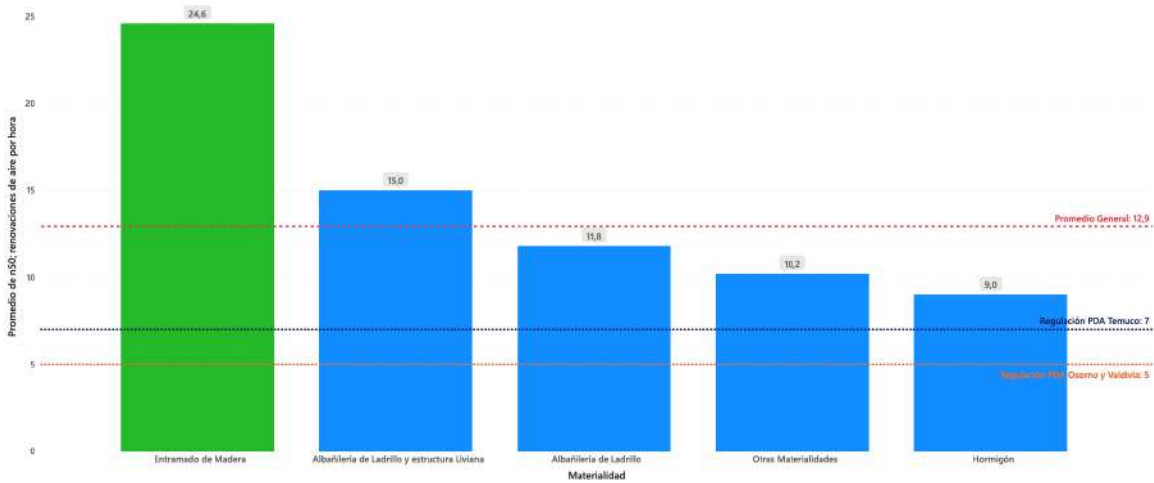


Figura 3: Línea base de clase de infiltraciones de aire para diferentes materialidades. Fuente: modificado desde CitecUBB, 201410.

INTERNACIONAL

La regulación de infiltraciones de aire en el contexto internacional según los datos obtenidos por un levantamiento realizado en 2012, muestra que el estándar normalizado a 50 Pa (Vol/h) en la mayoría de los países estudiados, es diferente para ciertas clasificaciones de vivienda, estas se catalogan por: (i) tipo de ventilación, (ii) clase de estanqueidad, (iii) tipo de vivienda y (iv) tamaño. La regulación en su mayoría es más exigente que en Chile, y además cuenta con clasificaciones que pueden facilitar el cumplimiento de la normativa adaptándose de mejor forma a la tipología que se regula.

Tabla 4: estándares de hermeticidad para envolventes de viviendas normalizados a 50Pa.¹¹

País	Clasificación	Estándar normalizado a 50 Pa (Vol/h)
Alemania	Viviendas con Ventilación Natural	3
	Viviendas con Ventilación Mecánica	1,5
Austria	Viviendas con Ventilación Natural	3
	Viviendas con Ventilación Mecánica	1,5
Bélgica	Valor por defecto para el cálculo de demanda	10
Bulgaria	Viviendas Unifamiliares de Alta Estanqueidad	2
	Viviendas Unifamiliares de Media Estanqueidad	Entre 2 y 5
	Viviendas Unifamiliares de Baja Estanqueidad	Mayor a 5
	Edificios de Alta Estanqueidad	4
	Edificios de Media Estanqueidad	Entre 4 y 10
	Edificios de Baja Estanqueidad	Mayor a 10
Eslovenia	Viviendas con Ventilación Natural	3
	Viviendas con Ventilación Mecánica	2
Estonia	Viviendas Pequeñas	5
	Viviendas de Gran Tamaño	2,5
Francia	Viviendas Unifamiliares	2,5
	Otros tipos de Viviendas	5,3
Letonia	Viviendas en General	2,5
Lituania	Viviendas con Ventilación Natural	3
	Viviendas con Ventilación Mecánica	1,5
Noruega	Viviendas en General	3
Portugal	Viviendas en General	0,6
Reino Unido	Viviendas en General	10

En la regulación chilena dada por los PDA, no se observa un criterio claro para obtener la cantidad de renovaciones de aire por hora, no se establece si se requiere el desempeño en uso de las viviendas o el de la envolvente (sistema constructivo); tampoco se define si se debe diferenciar por ventilación mecánica o natural, o si existen clasificaciones de viviendas por tamaño o desempeño hermético.

¹¹ Ossio, De Herde, y Veas, «Exigencias europeas para infiltraciones de aire».

Existe un problema en la elaboración y seguimiento de especificaciones técnicas. Algunas no tienen la información y detalle suficiente para dar cumplimiento a los requerimientos de hermeticidad; y las que si se encuentran completas pueden generar expectativas erróneas en los constructores, dado que en temas de hermeticidad es muy relevante la ejecución de la solución en obra, por lo tanto, no basta con una correcta especificación técnica para asegurar el resultado de hermeticidad al paso del aire. Por esto se deduce que si bien las especificaciones técnicas tienen un rol fundamental, no aseguran el cumplimiento de las políticas públicas y reglamentaciones.

A nivel internacional el uso obligatorio de ensayo de puerta sopladora no es generalizado, si bien la gran mayoría de los países se enfoca en la eficiencia energética de la envolvente a través del aislamiento térmico, la hermeticidad de la envolvente es muchas veces relegada a certificaciones voluntarias, tales como LEED o *PassiveHaus* entre muchas otras. Por otra parte, las normativas internacionales que sí hacen referencia a hermeticidad son: de forma obligatoria en todo el país en: Francia, Irlanda, Mónaco, Reino Unido; en algunos estados del país como: Canadá y Estados Unidos; u obligatorias según condiciones específicas, Bélgica¹², Estonia y Finlandia tienen el requerimiento obligatorio de la realización de ensayos para validar el desempeño de la hermeticidad¹³.

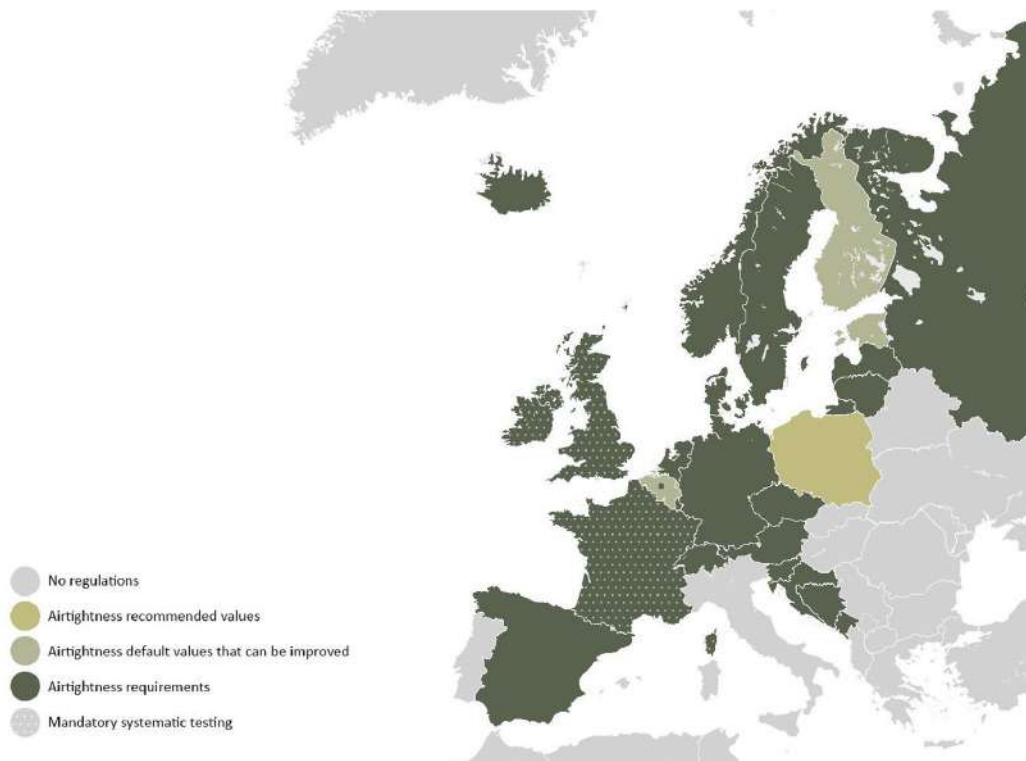


Figura 4: contexto normativo de hermeticidad en Europa¹⁴

¹² Por ejemplo, en Bélgica, para reducir la base teórica de infiltraciones para cálculos de consumo energético es requerido un ensayo que acredite una mayor hermeticidad.

¹³ Irene Poza-Casado et al., «Residential Buildings Airtightness Frameworks: A Review on the Main Databases and Setups in Europe and North America», *Building and Environment* 183 (1 de octubre de 2020): 107221, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107221>.

¹⁴ Poza-Casado et al.

LEVANTAMIENTO EN TERRENO DE LA CONDICIÓN DE HERMETICIDAD DE LAS VIVIENDAS DE ENTRAMADO DE MADERA

ANTECEDENTES DE LOS PROYECTOS

La presentación de antecedentes de los seis proyectos evaluados se compone de una parte de información general y planos de planta y elevación. Luego se presentan las especificaciones técnicas de los puntos críticos, los cuales son abordados en las fichas de soluciones constructivas de acondicionamiento térmico para viviendas, las cuales están disponibles en la página del MINVU¹⁵ y para la materialidad predominante de madera corresponden a: (i) encuentros de solera inferior con sobrecimiento, (ii) solera superior con alero en vivienda de tabiquería de madera, (iii) encuentro entre placas, (iv) encuentro con artefactos eléctricos en muros, (v) encuentro con artefactos eléctricos en cielos, (vi) ductos de ventilación en viviendas de tabiquería de madera, (vii) ventanas en viviendas de madera, (viii) puertas en viviendas de madera y (ix) ductos de estufas a través de techumbre existente.

En las fichas dispuestas por MINVU en general se tiene que la solución para un mejor desempeño de hermeticidad es incorporar sellos de poliuretano monocomponente, un problema de estos sellos es que su vida útil es corta, pierden elasticidad o se resquebrajan, esto puede generar diferencias en el desempeño hermético con el paso del tiempo, las cuales se han identificado en hasta un 30% de menor desempeño, tal como se muestra en el estudio de NHBC Foundation elaborado en el 2011¹⁶.

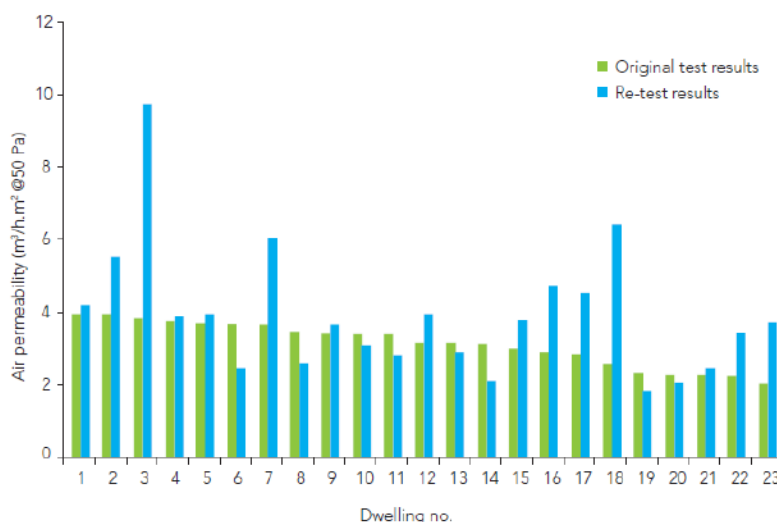


Figura 5: cambios en la hermeticidad de las viviendas con el paso del tiempo.

¹⁵ Ministerio de Vivienda y Urbanismo, «Planes de Descontaminación Atmosférica».

¹⁶ NHBC Foundation, *Ageing and Airtightness: How Dwelling Air Permeability Changes over Time* (NHBC Foundation, 2011), <https://www.nhbcfoundation.org/publication/ageing-and-airtightness/>.

A continuación, se muestran las fichas elaboradas por MINVU que tienen relación con la construcción hermética en viviendas de entramado de madera.

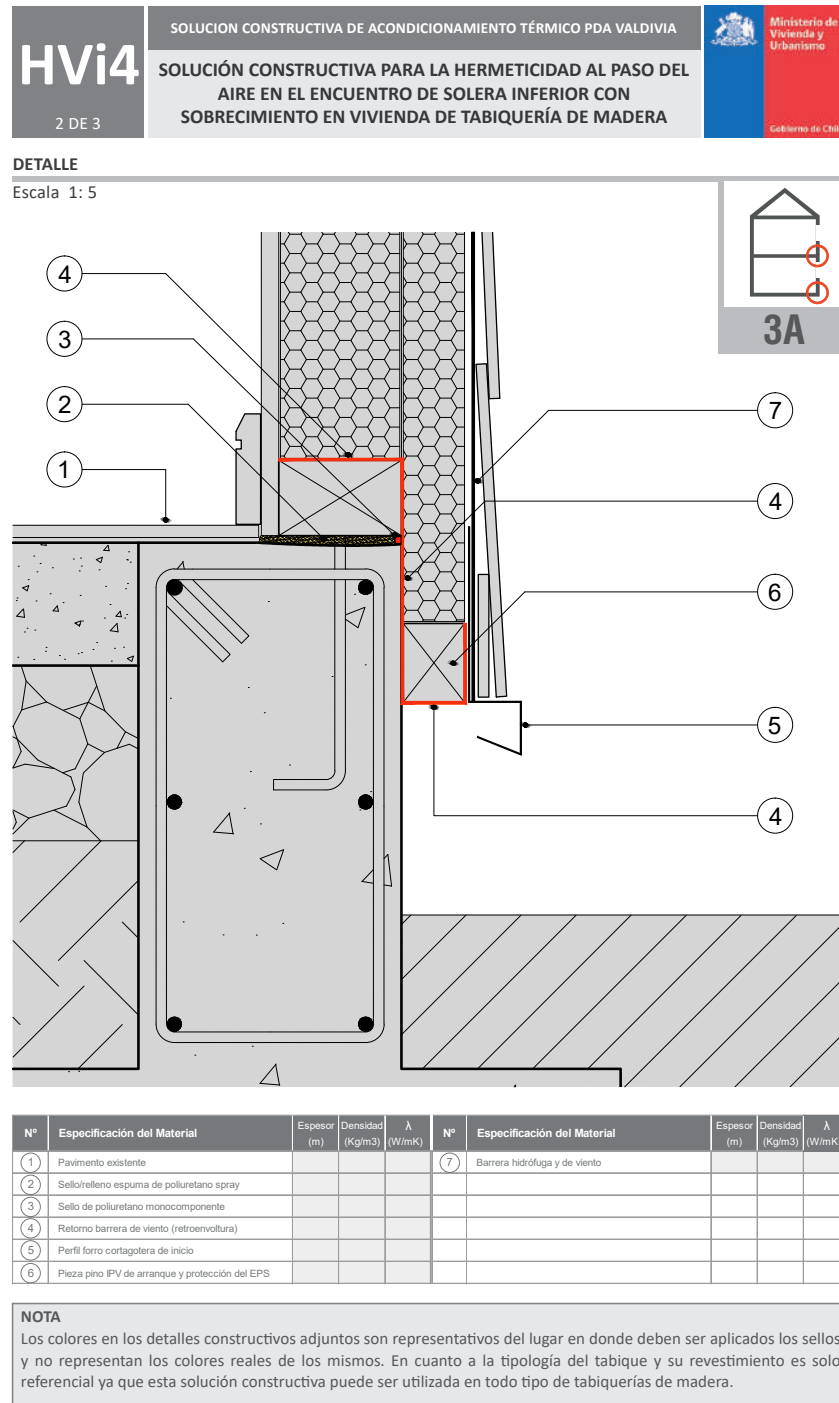


Figura 6: (i) ficha solución constructiva para la hermeticidad al paso del aire en encuentro solera inferior con sobrecimiento en vivienda con estructura de madera, PDA Valdivia.

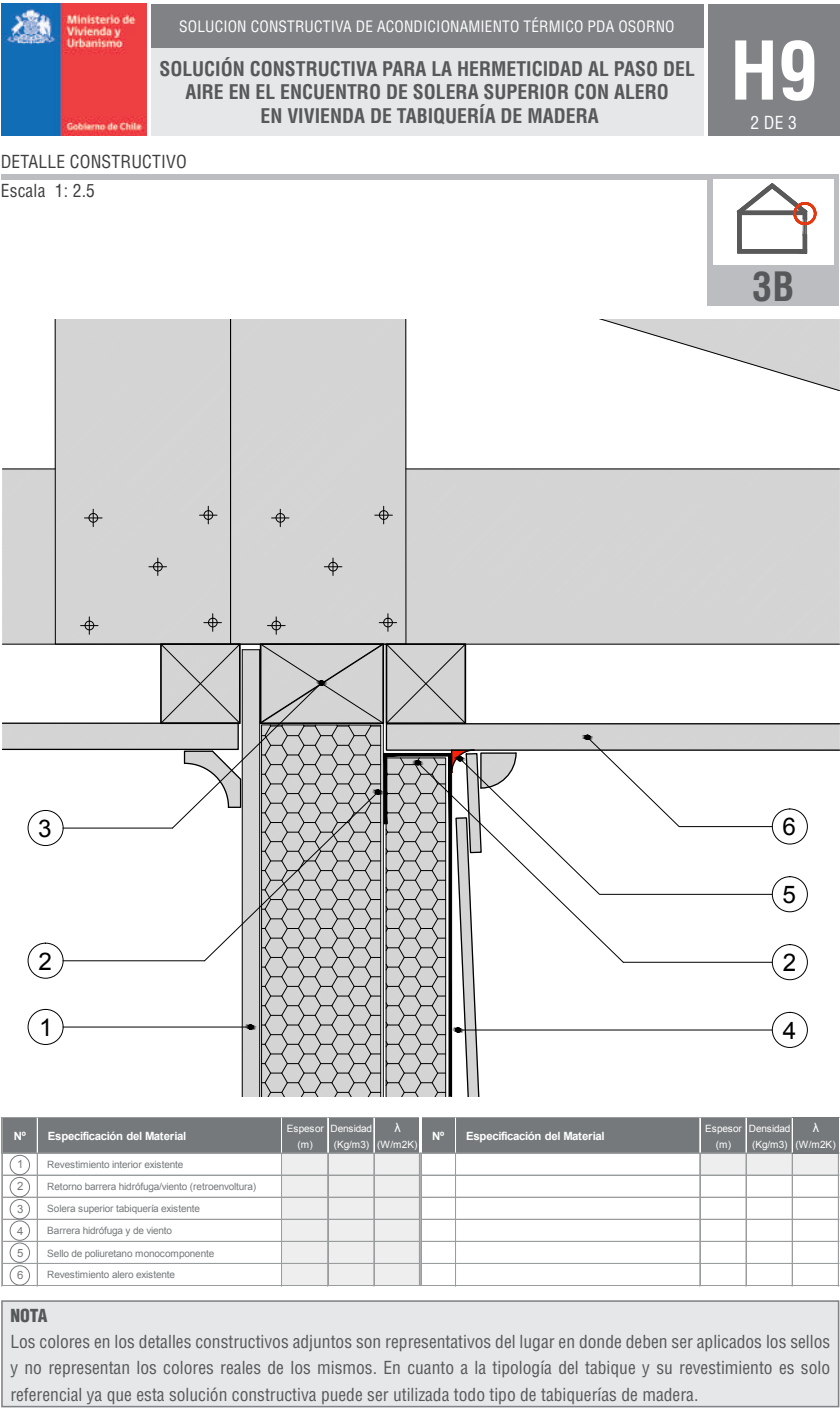



Figura 7: (ii) ficha solución constructiva para la hermeticidad al paso del aire en encuentro solera superior con alero en vivienda con estructura de madera, PDA Osorno.



Ministerio de
Vivienda y
Urbanismo

Gobierno de Chile

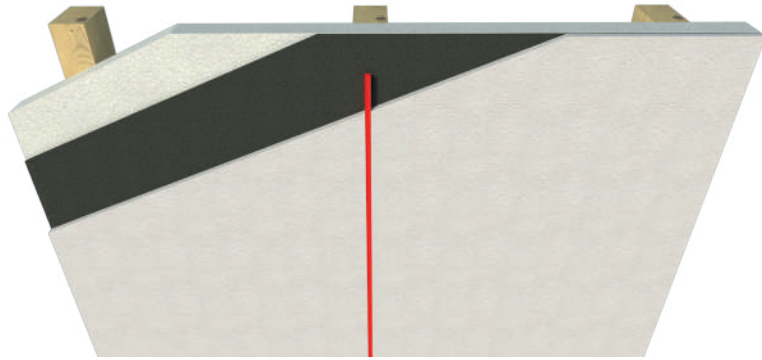
SOLUCION CONSTRUCTIVA DE ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO PDA OSORNO

**SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA PARA LA HERMETICIDAD AL PASO DEL
AIRE EN EL ENCUENTRO DE PLACAS DE REVESTIMIENTO
DE LA MISMA MATERIALIDAD**

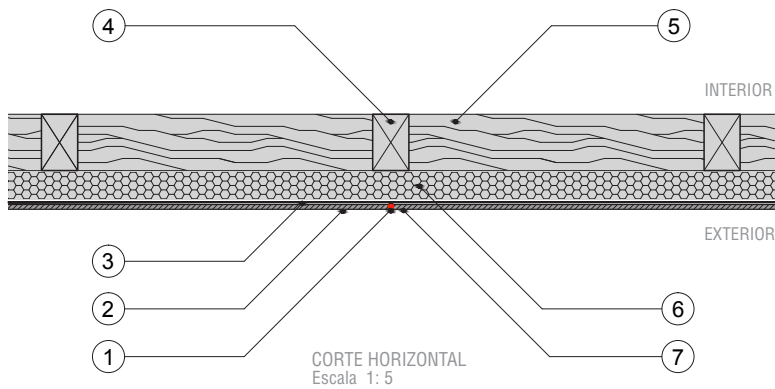
H10

2 DE 3

DETALLES CONSTRUCTIVOS



DETALLE 1



Nº	Especificación del Material	Espesor (m)	Densidad (Kg/m3)	λ (W/m2K)	Nº	Especificación del Material	Espesor (m)	Densidad (Kg/m3)	λ (W/m2K)
1	Sello de poliuretano monocomponente				7	Cartería dilatación revestimiento timpano			
2	Placa de revestimiento Fibrocemento e=6mm								
3	Barrera hidrófuga y de viento								
4	Pie derecho tabiquería timpano								
5	Cadeneta tabiquería timpano								
6	Solución aislación térmica para aplomar el timpano								

NOTA

Los colores en los detalles constructivos adjuntos son representativos del lugar en donde deben ser aplicados los sellos y no representan los colores reales de los mismos. En cuanto a la tipología del tabique y su revestimiento es solo referencial ya que esta solución constructiva puede ser utilizada todo tipo de tabiquerías de madera o metálicas.

Figura 8: (iii) ficha solución constructiva para la hermeticidad al paso del aire en encuentro de placas de revestimiento de la misma materialidad, PDA Osorno.

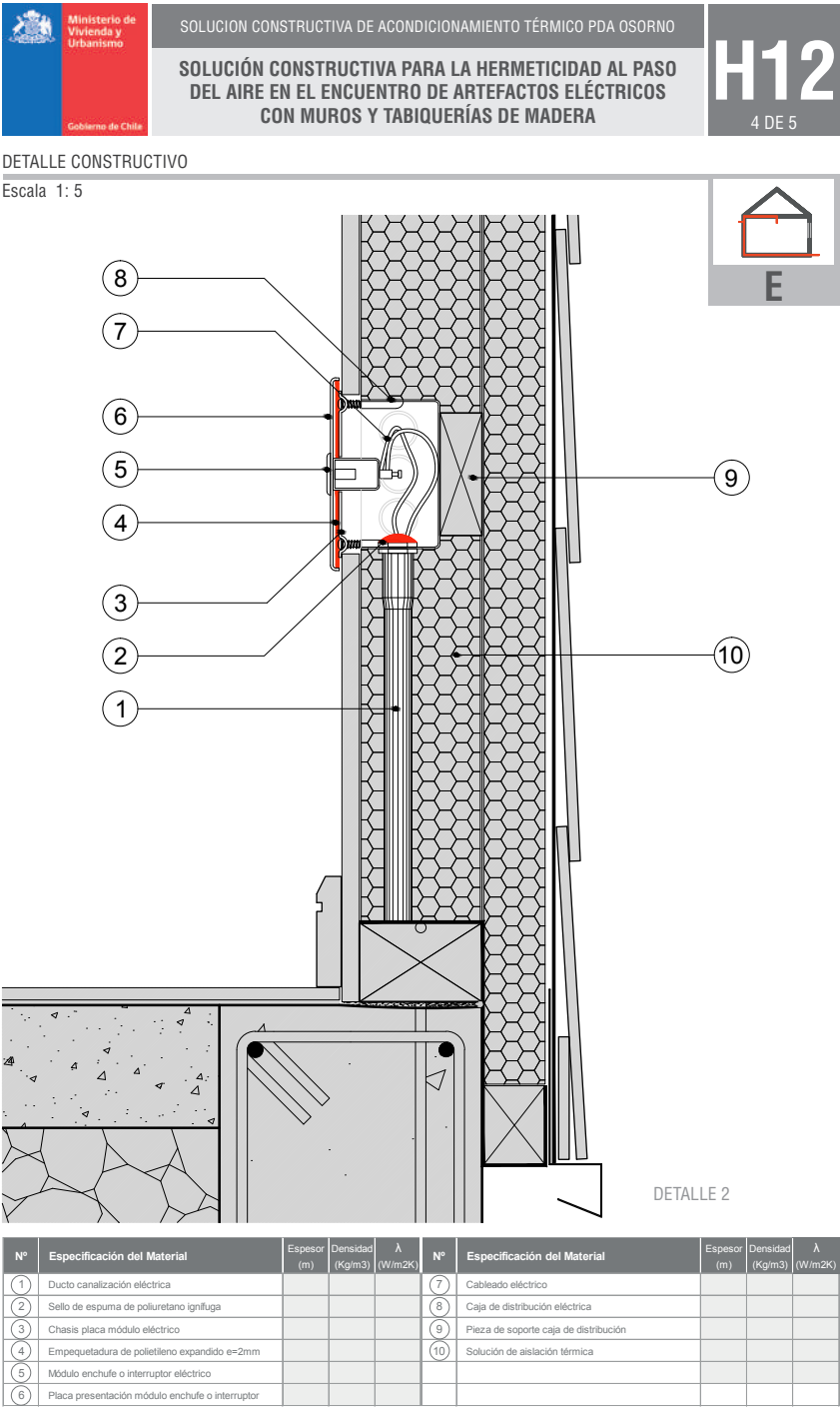


Figura 9: (iv) ficha solución constructiva para la hermeticidad al paso del aire en encuentro de artefactos eléctricos con muros, PDA Osorno.

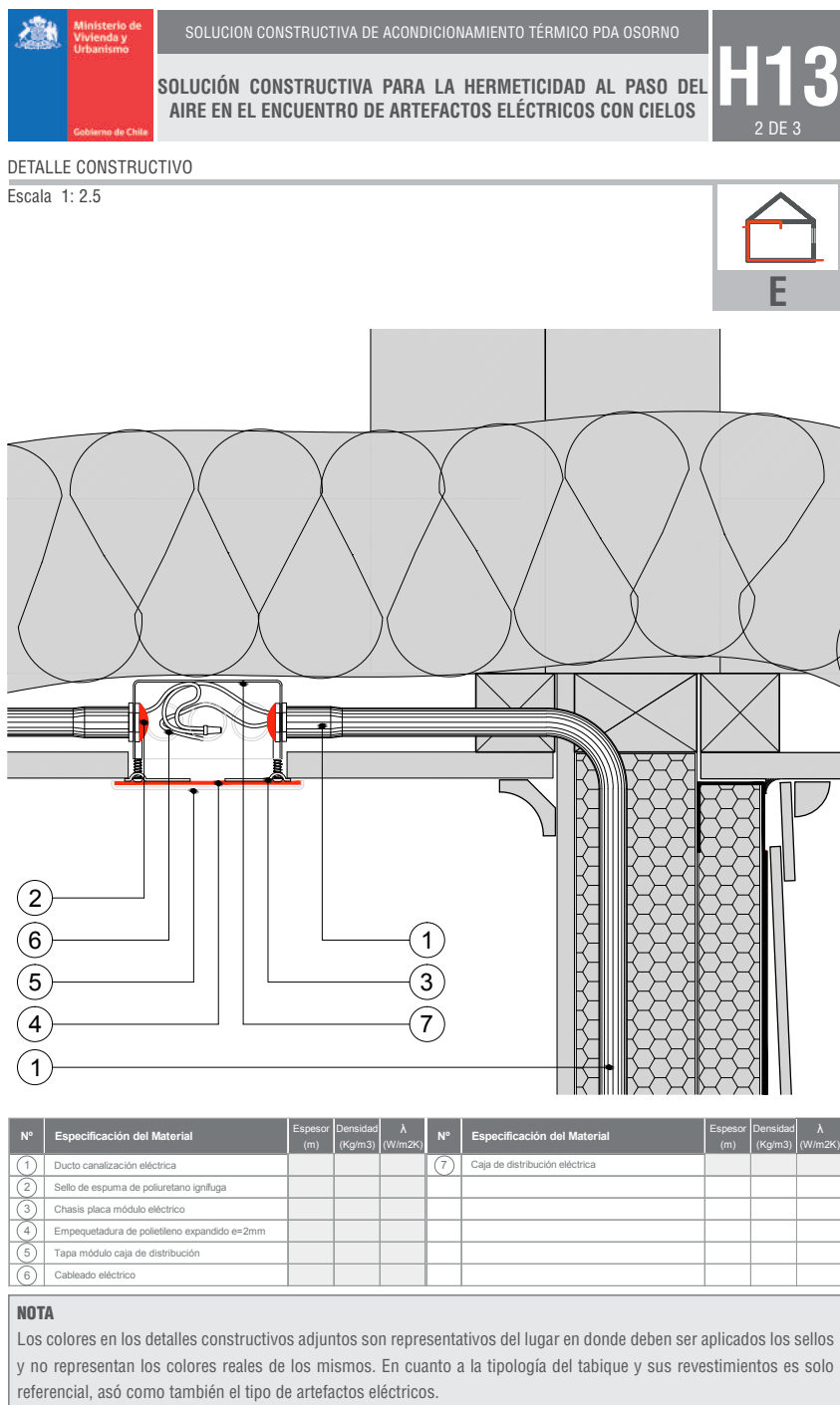
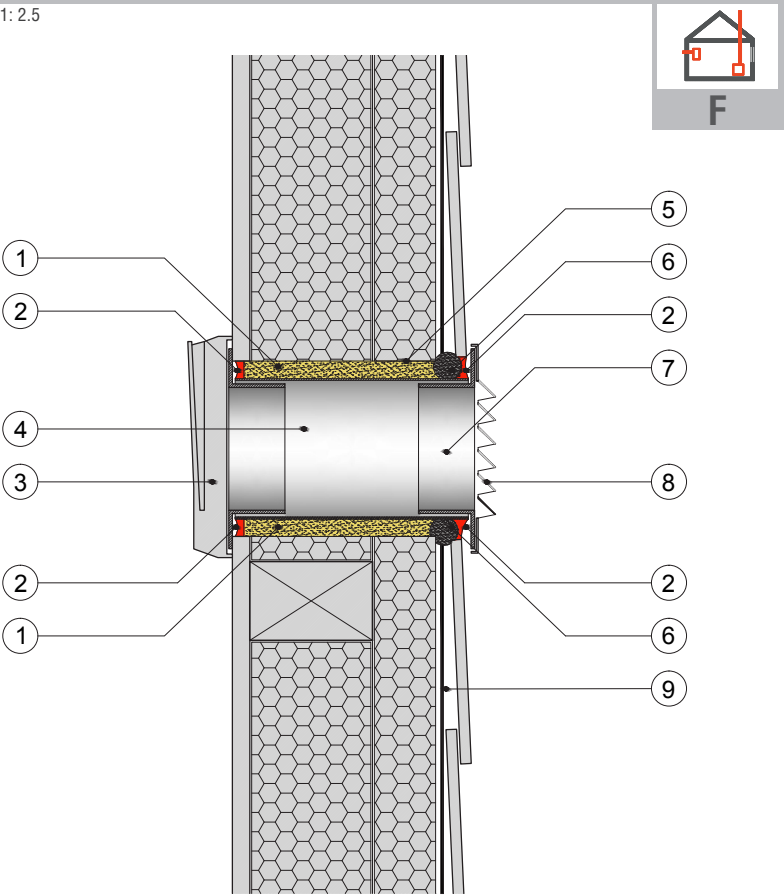


Figura 10: (v) ficha solución constructiva para la hermeticidad al paso del aire en encuentro de artefactos eléctricos con cielos, PDA Osorno.

DETALLE CONSTRUCTIVO

Escala 1: 2.5



Nº	Especificación del Material	Espesor (m)	Densidad (Kg/m3)	λ (W/m2K)	Nº	Especificación del Material	Espesor (m)	Densidad (Kg/m3)	λ (W/m2K)
1	Relleno espuma de poliuretano spray				7	Adaptador rejilla de ventilación			
2	Sello de poliuretano monocomponente				8	Rejilla exterior de ventilación			
3	Dispositivo interior difusor de ventilación				9	Barrera hidrófuga y de viento			
4	Ducto ingreso de aire sistema de ventilación								
5	Perforación practicada en el muro								
6	Cordón de respaldo d=16mm polietileno expandido								

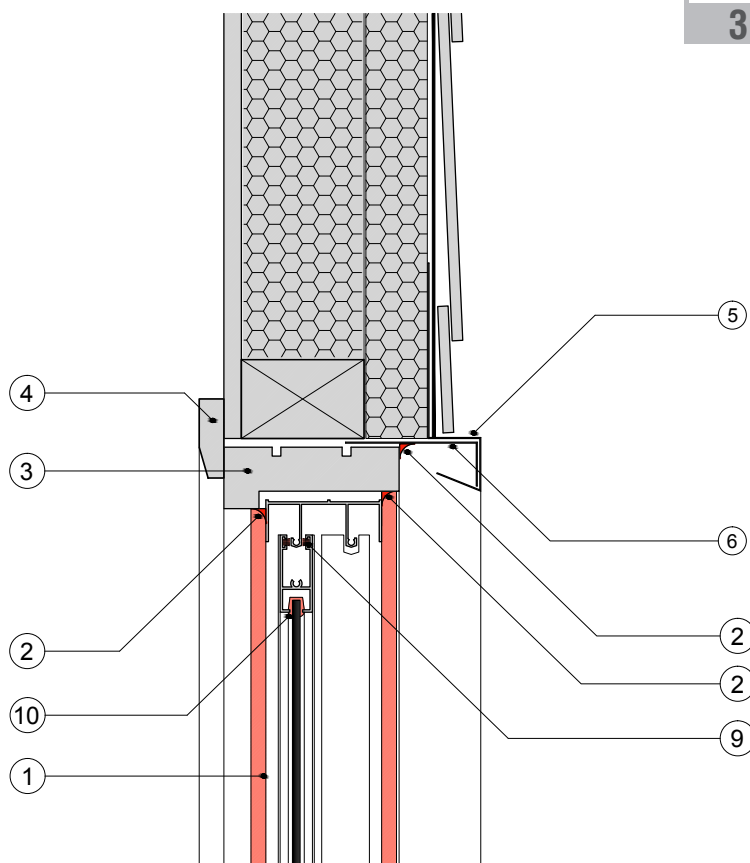
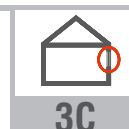
NOTA

En esta partida NO se considera el sistema de ventilación pasiva, solo se consulta la colocación de sellos en los ductos de ventilación. Los colores en los detalles constructivos adjuntos son representativos del lugar en donde deben ser aplicados los sellos y no representan los colores reales de los mismos. En cuanto a la tipología del muro representado es solo referencial ya que esta solución constructiva puede ser utilizada todo tipo de tabiquerías de madera.

Figura 11: (vi) ficha solución constructiva para la hermeticidad al paso del aire en el traspaso de ductos de ventilación en viviendas de tabiquería de madera, PDA Osorno.

DETALLE CONSTRUCTIVO

Escala 1: 2.5

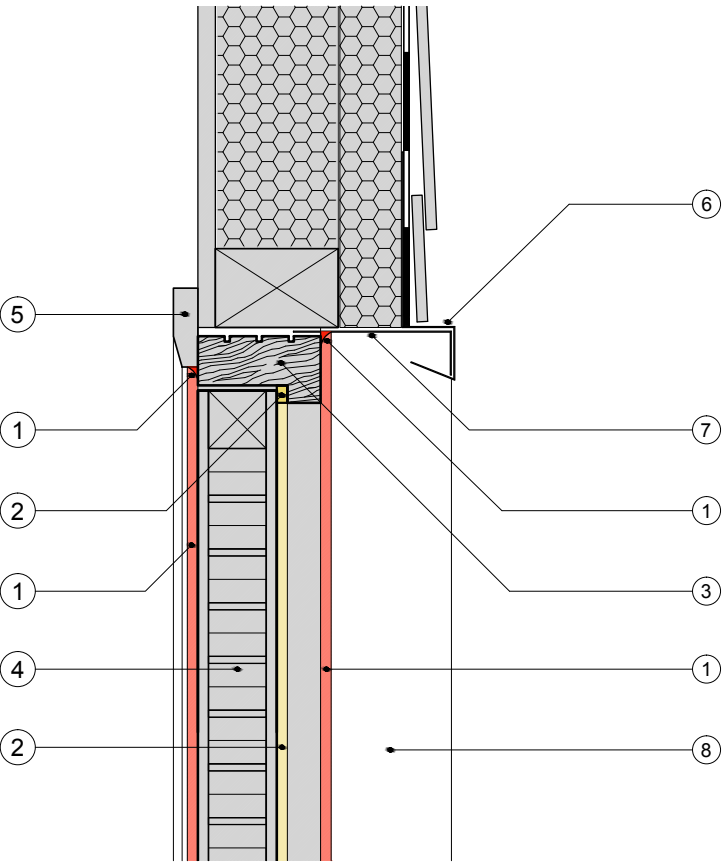
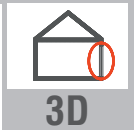


Nº	Especificación del Material	Espesor (m)	Densidad (Kg/m3)	λ (W/m2K)	Nº	Especificación del Material	Espesor (m)	Densidad (Kg/m3)	λ (W/m2K)
1	Ventana existente				7	Cordón de respaldo d=10mm polietileno expandido			
2	Sello de silicona neutra				8	Perfil forro cortagolera alfeizar			
3	Perfil centro marco de ventana				9	Recambio de felpas en correderas y traslazo			
4	Moldura pilastra interior				10	Recambio de burletes de los vidrios			
5	Perfil contra forro cortagolera dintel								
6	Perfil forro cortagolera dintel								

Figura 12: (vii) ficha solución constructiva para la hermeticidad al paso del aire en las ventanas de viviendas de tabiquería de madera, PDA Osorno

DETALLE CONSTRUCTIVO

Escala 1: 2.5



Nº	Especificación del Material	Espesor (m)	Densidad (Kg/m3)	λ (W/m2K)	Nº	Especificación del Material	Espesor (m)	Densidad (Kg/m3)	λ (W/m2K)
1	Sello de silicona neutra				7	Perfil contra forro cortagotera dintel			
2	Burlete autoadhesivo Tessa, 3M o similar				8	Perfil forro lateral puerta			
3	Perfil marco de puerta de madera				9	Burlete mecánico sobrepuesto G-U o similar			
4	Hoja de puerta existente				10	Perfil botaguas de madera			
5	Moldura pilastra interior				11	Grada revestida			
6	Perfil forro cortagotera dintel								

Figura 13: (viii) ficha solución constructiva para la hermeticidad al paso del aire en las puertas de viviendas de tabiquería de madera, PDA Osorno

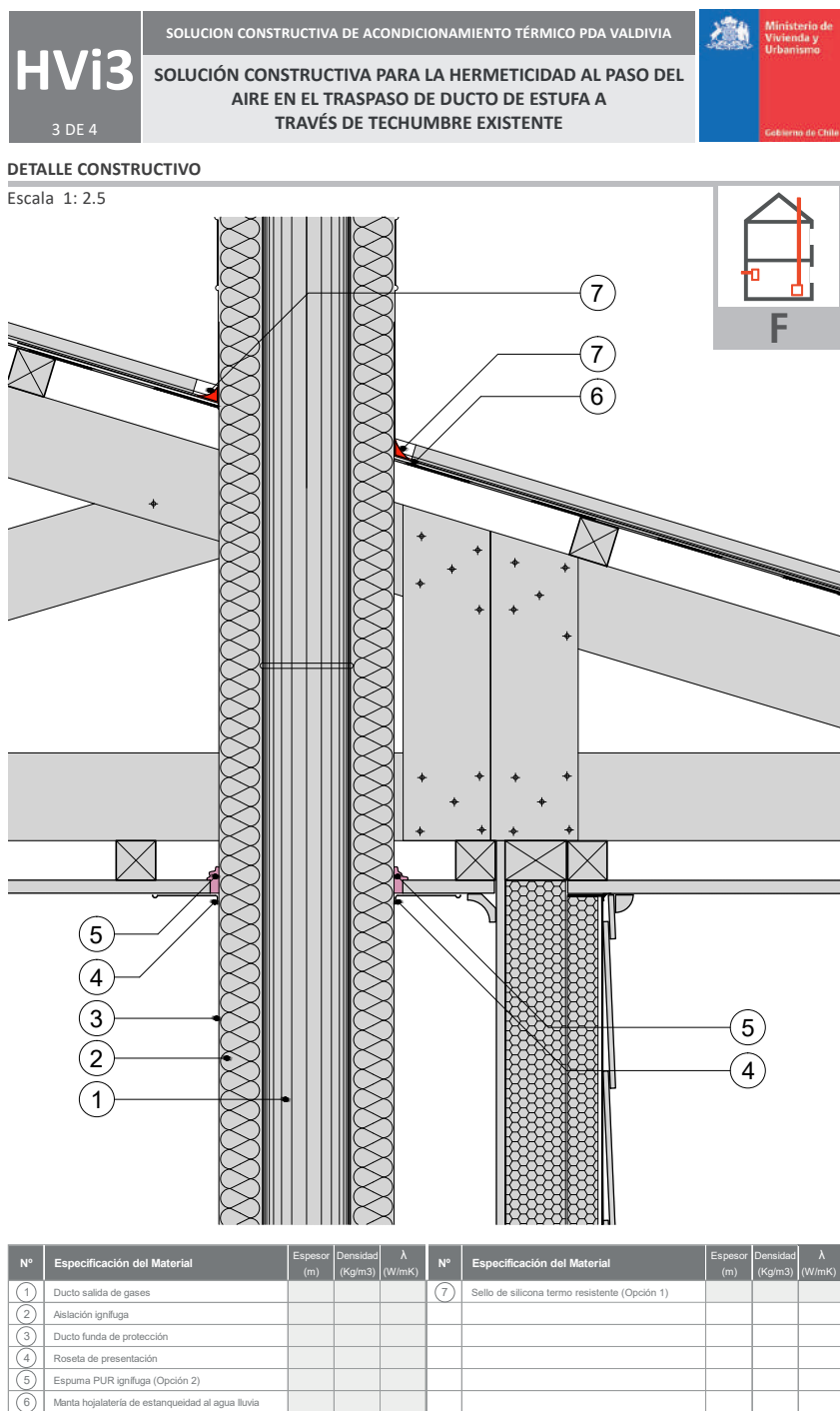


Figura 14: (ix) ficha solución constructiva para la hermeticidad al paso del traspaso de ducto de estufa a través de techumbre, PDA Valdivia.

METODOLOGÍA DE ESTUDIO REALIZADO EN CONJUNTOS DE VIVIENDA

El presente estudio, considera dos etapas la primera corresponde al estudio en viviendas y la segunda al estudio de soluciones constructivas aisladas. El estudio en viviendas se compone de lo siguiente: (i) la realización de pruebas de hermeticidad realizadas en base a lo indicado en la norma chilena NCh 3295 of. 2013 – *Aislación térmica – Determinación de la permeabilidad del aire en edificios – Método de presurización por medio del ventilador*¹⁷, norma idéntica a ASTM E779, realizadas con el software FanTestic ©; (ii) una revisión a las especificaciones técnicas de la vivienda; (iii) una revisión en terreno de la ejecución de las soluciones constructivas, y (iv) el análisis de los ensayos.

OBTENCIÓN DE LA MUESTRA

Con base en la norma chilena NCh 44 – Procedimientos de muestreo para inspección por atributos – Planes de muestreo indexados por nivel de calidad aceptable (AQL) para la inspección lote por lote¹⁸. Se considera un nivel general de inspección II. Este criterio es más exigente que el requerido por la propuesta de norma de hermeticidad NTM 11/3 2014. Con esto se obtiene el siguiente número de muestras según proyecto:

Tabla 5: número de viviendas por proyecto

Región	Comuna	Proyecto	Cantidad de viviendas	Número de muestras
Los Lagos	Osorno	Porvenir II	110	20
	Puerto Octay	Sin casa rural	40	8
Los Ríos	Valdivia	Guacamayo II	149	2019
	Los Lagos	Villa Los Ríos - Folilco	57	8
Araucanía	Temuco	Megaproyecto Labranza	139	20
	Pillanlelbún	El renacer de Pillanlelbún	159	20

METODOLOGÍA DEL ENSAYO

Instalación del equipo

En este capítulo se definen las partes del equipo y luego se explica brevemente su instalación en terreno. En este caso se describe el procedimiento para el equipo Blower Door Retrotec, modelo 5000.

17 INN, «NCh 3295 - Aislación térmica – Determinación de la permeabilidad del aire en edificios – Método de presurización por medio del ventilador» (2013).

18 INN, «NCh 44 – Procedimientos de muestreo para inspección por atributos – Planes de muestreo indexados por nivel de calidad aceptable (AQL) para la inspección lote por lote» (2007), 44.

19 En la región de Los Ríos los proyectos de vivienda visitados no se encontraban con el nivel de terminación necesario para realizar las pruebas de hermeticidad, por lo tanto, el ensayo se realizó a 6 viviendas en la comuna de Los Lagos, y en 3 viviendas en la comuna de Valdivia. Los resultados no tuvieron una desviación estándar mayor por lo que las muestras se consideran representativas de la totalidad del proyecto.

Primero se deberá instalar el bastidor metálico ajustable (*cloth door panels*) en una puerta abierta, en todos los casos estudiados se utilizó la puerta principal, este sirve de estructura para la disposición de la tela impermeable que lo cubre. En la parte inferior de la tela, se encuentra un orificio en el cual será ubicado el ventilador.

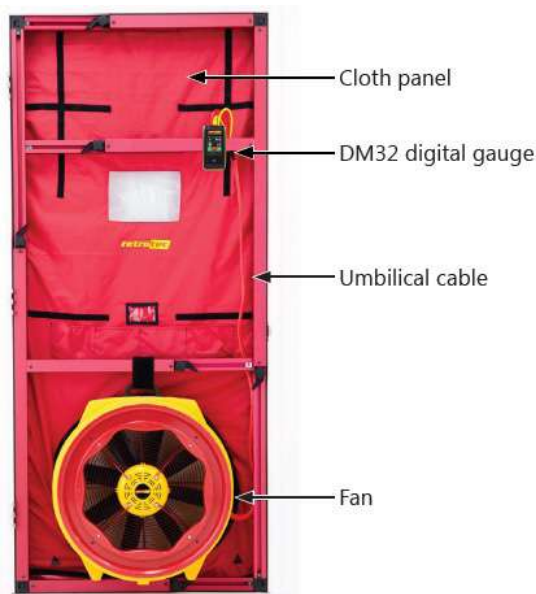


Figura 15: partes del blower door 5000 retrotec. Fuente: Retrotec

Instalación de Retrotec 5000 Blower Door



Armado de la puerta

Montaje de la puerta

Medición de línea base

Realización del ensayo

Figura 16: Instalación de Blower Door Retrotec 5000

El ventilador es capaz de presurizar y despresurizar la edificación (vivienda) sometida a ensayo por medio de la inyección o extracción de un flujo de aire respectivamente. Para conseguirlo, debido a la variedad de dimensiones volumétricas que pueden presentar las condiciones de ensayo, el ventilador está provisto de piezas desmontables denominadas *range*, las cuales posibilitan la menor o mayor abertura del ventilador y así, el ingreso de más o menos flujo de aire.

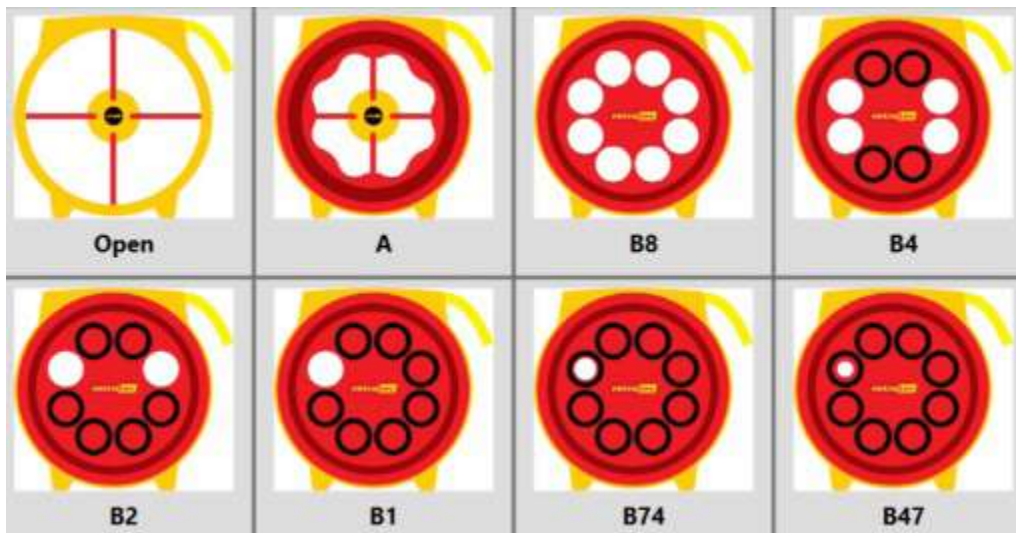


Figura 17: range de ajuste para el ventilador Fuente: FanTestic ©

Una vez instalada la puerta y el ventilador, se deben conectar los cables a la fuente de poder que se encuentra en el ventilador y al manómetro digital *digital pressure gauge*. Una vez instalado esto, se conecta el manómetro al computador y se manejan las presiones de forma automática según los parámetros indicados en el programa FanTestic ©.



Figura 18: a la izquierda fuente de poder, a la derecha manómetro digital. Fuente: Retrotec

Preparación de la envolvente

Para el ensayo en condiciones normales de uso, se determina el desempeño durante las temporadas en que se utilizan sistemas de calefacción o enfriamiento.

Se deberá cumplir con la siguiente lista de chequeo:

Tabla 6: Lista de chequeo previa a la realización del ensayo blower door

Chequeo	Tarea
Preparación de la envolvente	
	Cerrar todas las puertas exteriores
	Cerrar puertas a subterráneo (en caso de existir)
	Cerrar todas las ventanas y claraboyas
	Cerrar todos los accesos al entretecho
	Cerrar todos los tiros de las chimeneas
Preparación interior	
	Despejar la zona del ventilador
	Abrir todas las puertas interiores
	Verificar que no existan llamas o brasas calientes, y cubrir cenizas frías
Aparatos que deben estar apagados	
	Ventiladores de cocina y baño
	Ventilador de la casa
	Secadora de ropa
	Ventilación exterior
	Calefacción central

Por otro lado, para el cálculo del desempeño del sistema constructivo, se deberán cerrar todas las ventilaciones y rendijas. Esto en la práctica se logró con la colocación de cinta de enmascarar y polietileno en todas las rejillas de ventilación.

Se debe medir y registrar la temperatura interior y exterior al inicio y al término del ensayo, si el producto del valor absoluto del promedio de diferencias de temperatura interior y exterior multiplicado por la altura de la edificación da un resultado mayor que 200 m°C, no se debe realizar el ensayo porque la diferencia de presión inducida por el efecto de succión será demasiado grande para permitir una interpretación exacta de los resultados²⁰.

Para lograr una lectura más fluida de este informe la metodología de cálculo, datos de presurización, despresurización y de datos combinados se encuentra en el anexo 1, así en este informe solo se observarán los resultados obtenidos para facilitar el análisis e hilo conductor.

Equipamiento

Ventilador	
Descripción:	Test Fan
Proveedor:	Retrotec
Modelo:	Model 5000
Número de serie:	5FN202436
Certificado de calibración Número:	202005130754-5FN202436

Medidor	
Descripción:	Pressure and Flow Gauge
Proveedor:	Retrotec
Modelo:	DM32 10A
Número de serie:	412244
Certificado de calibración Número:	412244 091825

²⁰ INN, NCh 3295 - Aislación térmica – Determinación de la permeabilidad del aire en edificios – Método de presurización por medio del ventilador.

CASOS DE ESTUDIO

REGIÓN DE LOS LAGOS

OSORNO

Información general y planos

Nombre del Proyecto	: Comité de vivienda Porvenir II
Tipología	: Loteo = 110 viviendas aisladas
Dirección	: Avda. Real sector Rahue Alto
Comuna	: Osorno
Región	: Los Lagos
Código postal	: 5290000
País	: Chile
Constructora	: Peña y Peña Ltda
Fecha de construcción	: noviembre 2019 – febrero 2021
Elevación sobre el nivel del mar	: 36 metros

El proyecto Porvenir II cuenta con tres tipos de vivienda:

Tabla 7: Tipos de vivienda en Porvenir II, Osorno, Los Lagos.

Tipo de Vivienda	Costo total de la Vivienda	Superficie útil	Volumen	Cantidad
Regular PDAO	1219,0 UF	55,94 m ²	137,62 m ³	102
70 UF PDAO	1289,0 UF	55,94 m ²	137,62 m ³	4
80 UF PDAO	1299,0 UF	58,97 m ²	135,63 m ³	4

Ya que el porcentaje mayor de viviendas es de tipo regular, este informe se desarrollará en base a esta tipología. Las viviendas, como se muestra en las imágenes siguientes cuentan con dos plantas, tres dormitorios, un baño y una cocina integrada.



Figura 19: vivienda tipo Porvenir II, Osorno

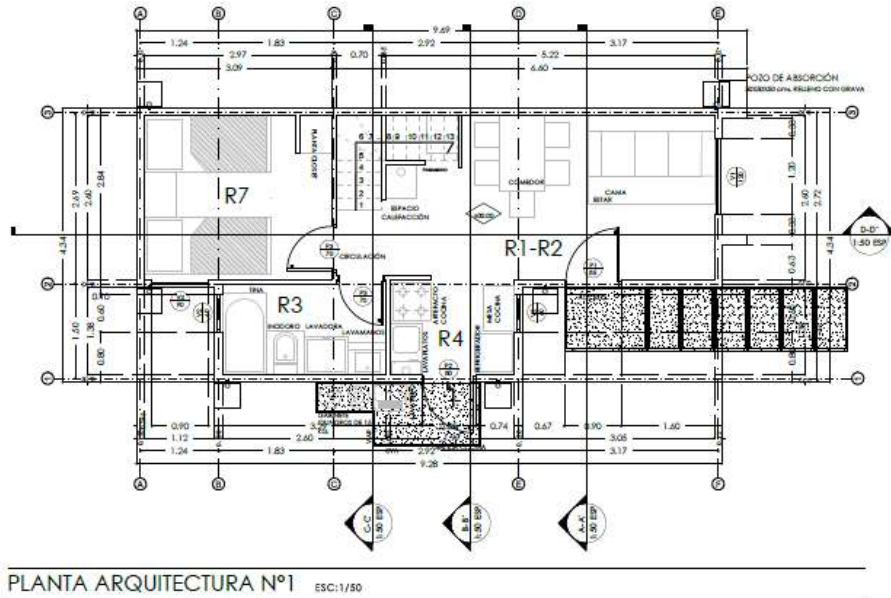


Figura 20: Planta arquitectura 1er piso vivienda tipo: regular. Porvenir II, Osorno.

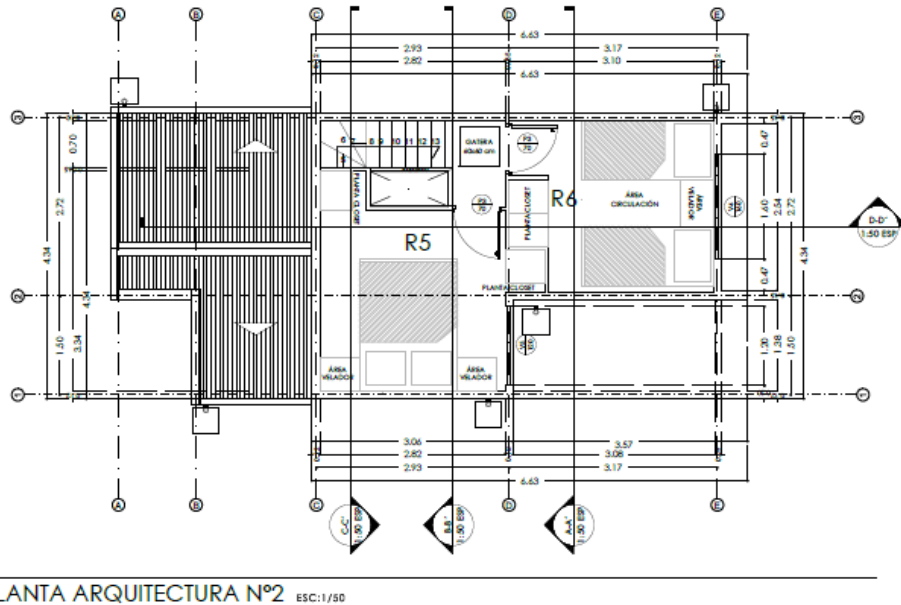


Figura 21: Planta arquitectura 2do piso vivienda tipo: regular. Porvenir II, Osorno.

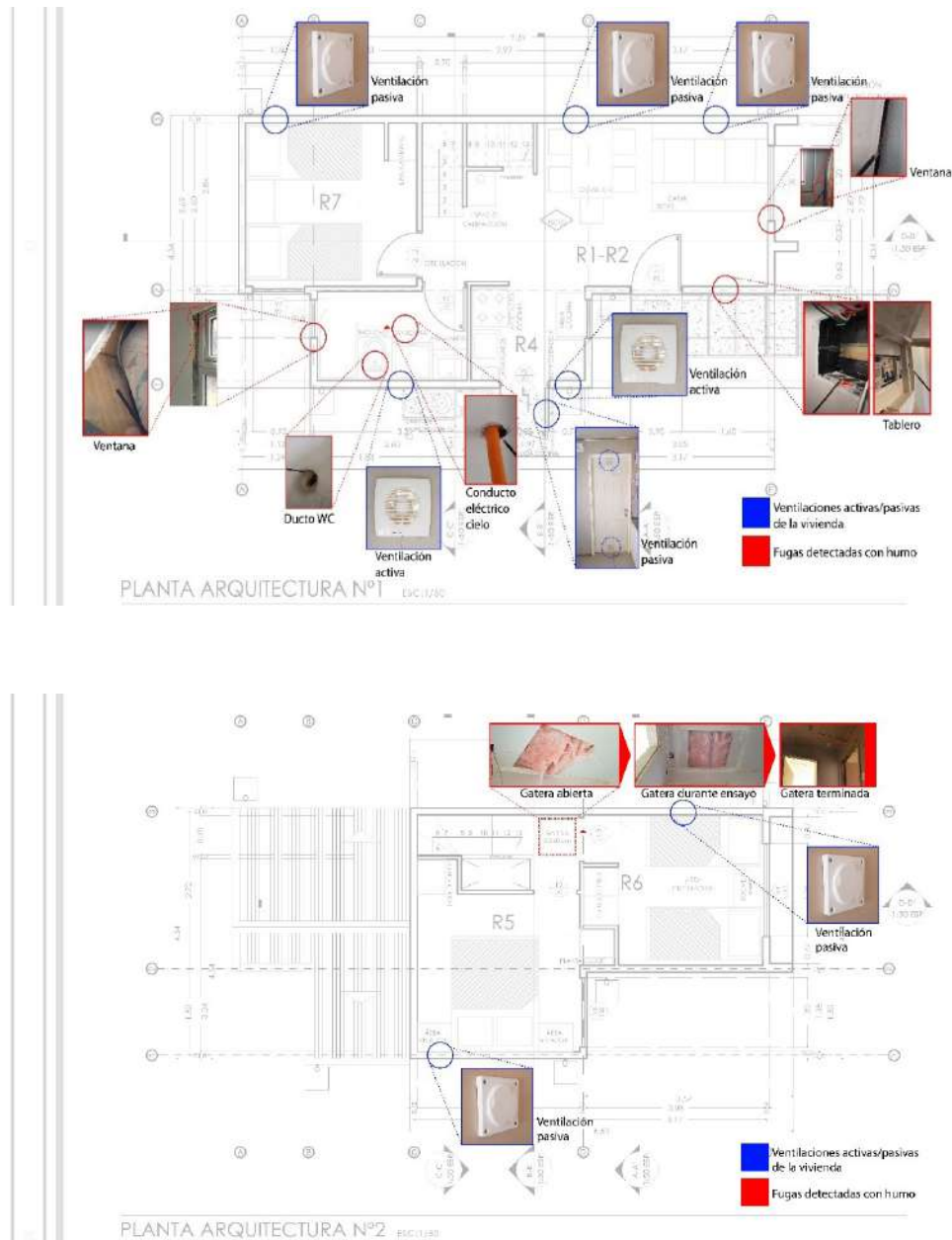


Figura 22: Ubicación y tipo de ventilación, extracción de aire y principales fugas detectadas con humo. Porvenir II, Osorno.

Especificaciones técnicas

Para el análisis de las especificaciones técnicas, se realiza una búsqueda en el documento de los puntos singulares, correspondientes a las nueve fichas, donde existen recomendaciones para resguardar la hermeticidad de las viviendas.

Primero, la búsqueda resulta compleja dado que las partidas especificadas no son iguales a las partidas que se especifican en las fichas, además se debe cruzar la información de los planos, especificaciones técnicas de arquitectura y especificaciones técnicas entregadas por el estudio de cumplimiento de PDA, el cual fue realizado por la empresa ingeniería sustentable. Para encontrar el detalle y especificación del punto (i) encuentros de solera inferior con sobrecimiento, se encontró algo de información en la parte “GENERALIDADES MADERA” donde se especifica lo siguiente: “*Todos los elementos que se encuentren expuestos al exterior, deberán quedar protegidos contra agentes medio ambientales considera sello bajo soleras inferiores que impidan el ingreso del viento, sello de neopreno tipo compriband como barrera de viento, retorno de 3 cm por ambos costados*” y luego en el mismo apartado indica: “*Se debe consultar un sello bajo las soleras inferiores u otra solución que impida el ingreso del viento, para aquellos que se encuentran hacia el exterior de la vivienda*”. Por otra parte, se encuentra disponible un detalle constructivo en un plano de arquitectura, el cual muestra que se debe incorporar un sello compriband bajo la solera y fieltro n°10 bajo solera retornando 3 cm a ambos lados, esta información concuerda con lo mencionado en el estudio de cumplimiento de PDA. Al comparar esta solución con la propuesta por el PDA, solo faltaría la incorporación del sello de poliuretano monocomponente. Además, indica en un apartado que en todas las zonas húmedas se considera sello de neopreno tipo Comprimband bajo solera.

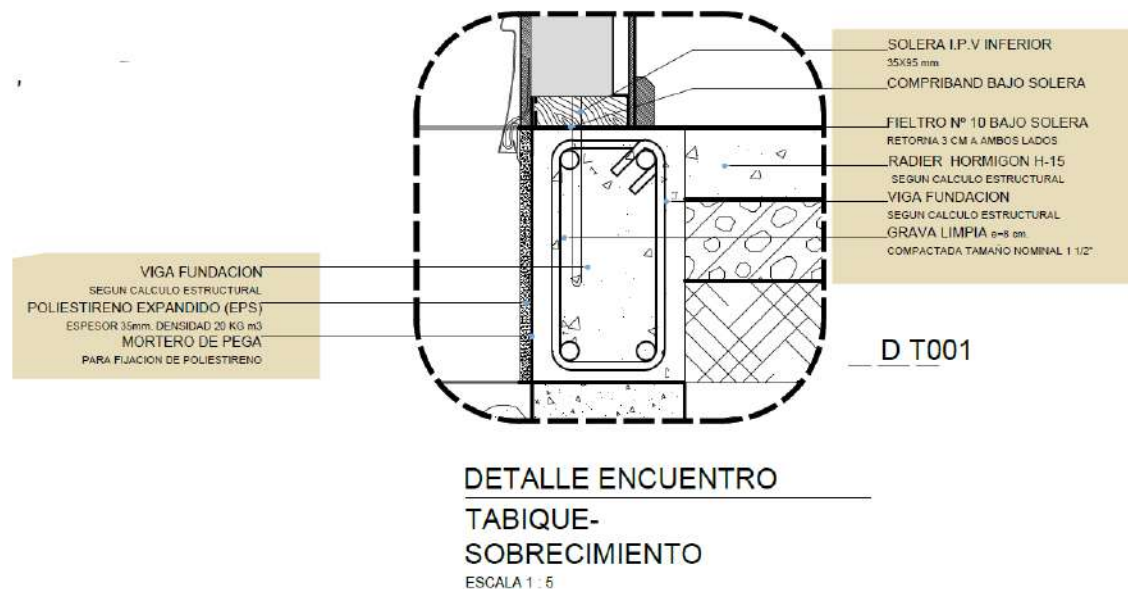


Figura 23: detalle encuentro tabique-sobrecimiento, plano de arquitectura Porvenir II, Osorno.

En cuanto a (ii) solera superior con alero en vivienda de tabiquería, se tiene en el mismo apartado de GENERALIDADES, en cuanto al tratamiento de las piezas de madera, se dice que se deberá considerar una barrera de humedad que sea impermeable al paso del agua y permeable al paso de vapor (en algunos apartados se indica que se considera membrana tipo Klover Pro). En plano de arquitectura se observa un detalle, el cual no indica sellos de poliuretano monocomponente.

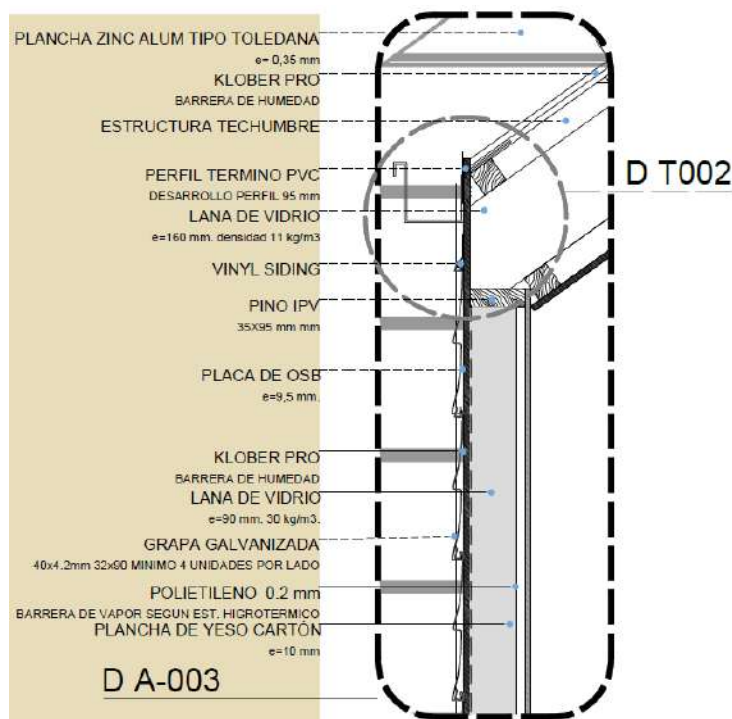


Figura 24: detalle encuentro solera superior con alero, plano de arquitectura Porvenir II, Osorno.

Para la singularidad número (iii) encuentro entre placas, se encuentra un detalle en planos de arquitectura y en especificaciones técnicas se menciona lo siguiente: “*se debe considerar sello entre encuentros de distinta materialidad en los que se generen separaciones.*” Se menciona también que en las zonas húmedas existirá sello de silicona pintable y no aparece más detalle en ninguno de los documentos analizados, pero en terreno se observa que los encuentros entre placas de yeso cartón están sellados todos (zonas húmedas y secas) con silicona.



Figura 25: unión entre placas de yeso cartón, cornisas y esquineros con silicona. Porvenir II, Osorno.

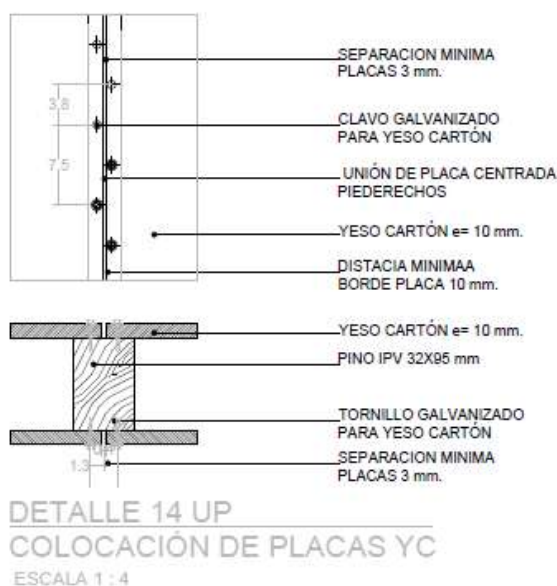


Figura 26: colocación de placas de yeso cartón, Porvenir II, Osorno.

Para el (iv) encuentro con artefactos eléctricos en muros, se tiene que en el encuentro con la barrera de vapor se debe utilizar cinta americana o de aluminio, manteniendo siempre una continuidad en el material. En el informe de cumplimiento de PDA se indica que todas las interrupciones generadas por ductos se debe utilizar un sello mono adhesivo. Pero no se especifica un sello de espuma de poliuretano ignífugo y tampoco una empaquetadura de polietileno expandido de 2 mm, como lo recomienda la ficha correspondiente. La misma situación ocurre para el punto (v) encuentro con artefactos eléctricos en cielos.



Figura 27: caja de enchufe en muro perimetral. Porvenir II, Osorno.

Para el punto (vi) ductos de ventilación en viviendas de tabiquería de madera, se tiene que la misma especificación anterior con respecto al tratamiento de la barrera de vapor. Las especificaciones técnicas solo indican la especificación de la ventilación y/o extracción de aire, pero no el tratamiento y cuidado que se debe tener con la estructura de madera. No se asegura la utilización de relleno de

espuma de poliuretano y sello de poliuretano monocomponente. La especificación técnica menciona lo siguiente: *“C.EX.3.1.- EXTRACTORES MECÁNICOS, VENTILADORES PASIVOS, SENSOR DE HUMEDAD. El diseño de ventilación se deje ejecutar conforme al diseño de ventilación, se contempla un extractor Mecánico en Cocina y Baño con Higrostat, asimismo extractores tipo Jonas, modelo “Renton R100 BTH” u otro similar, y aireadores tipo UFRO, en la cantidad que correspondan por cada espacio de la vivienda, cuyo detalle se muestra en los planos adjuntos de diseño de ventilación. Se debe considerar, además, la instalación de celosías de PVC 20x02 cm u otro similar en puertas interiores. Como opción, se puede dejar una abertura en la parte inferior de las puertas, de espesor mínimo 15mm, entre el piso y la puerta.”*

A continuación, se muestra la condición de las aberturas de la vivienda correspondientes a: (vii) ventanas y (viii) puertas. Primero se extraen las especificaciones técnicas de la partida, y luego se muestra un esquema con la terminación observada por vivienda estudiada.

Las especificaciones técnicas indican que:

“Para el control de infiltraciones de aire, todos los marcos de las puertas exteriores deben considerar un sello de silicona neutra por dentro de la vivienda, y un sello elastomérico en base a poliuretano por fuera de la vivienda. Todas las puertas exteriores deben considerar un burlete de PVC y goma autoadhesiva en el peinazo de la puerta por su parte interior. Este burlete debe ser instalado de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

Todas las puertas exteriores deben considerar la instalación de burlete de caucho perfil P de máx. 5mm de espesor, por todo el borde perimetral interior del marco de la puerta. Su instalación deberá ser de forma continua, de acuerdo con las especificaciones del fabricante.

Para el control de infiltraciones de aire todas las ventanas deben considerar un sello de silicona neutra por dentro de la vivienda, y un sello elastomérico en base a poliuretano por fuera de la vivienda. Estos sellos se deberán instalar en toda el área de contacto entre el marco de la ventana y el muro, de acuerdo a las especificaciones del fabricante.

Para el control de infiltraciones de aire, en el caso de ventanas correderas, se debe considerar un burlete adhesivo de caucho perfil E, colocado sobre todo el riel interior del marco de la ventana y un burlete de caucho adhesivo perfil P instalado por todo el resto del perímetro del marco, por ambos costados del perfil que lo constituye de acuerdo a las instrucciones del fabricante.

Para el caso de ventanas abatibles se deberá instalar un burlete perfil P por todo el perímetro del marco interior de la ventana, en la zona de contacto entre la hoja y el marco. Este burlete deberá ser instalado de forma continua, de acuerdo a las especificaciones del fabricante.”

Las especificaciones técnicas del proyecto también consideran propuestas realizadas por la Universidad de la Frontera, quienes de acuerdo con el Estudio de PDA de Osorno elaborado por el Depto. Ing. En Obras Civiles, Área Construcción Sustentable, propone los siguientes elementos constructivos adicionales:



C.EX.3.2.- BURLETES Y SELLOS AUTOADHESIVOS DE PUERTAS Y VENTANAS

También se deben considerar sellos autoadhesivos en todo el perímetro de los marcos, tanto de ventanas. Estos productos serán de la marca y modelo que el contratista estime conveniente, siempre y cuando permitan mantener el nivel de hermeticidad de la vivienda.

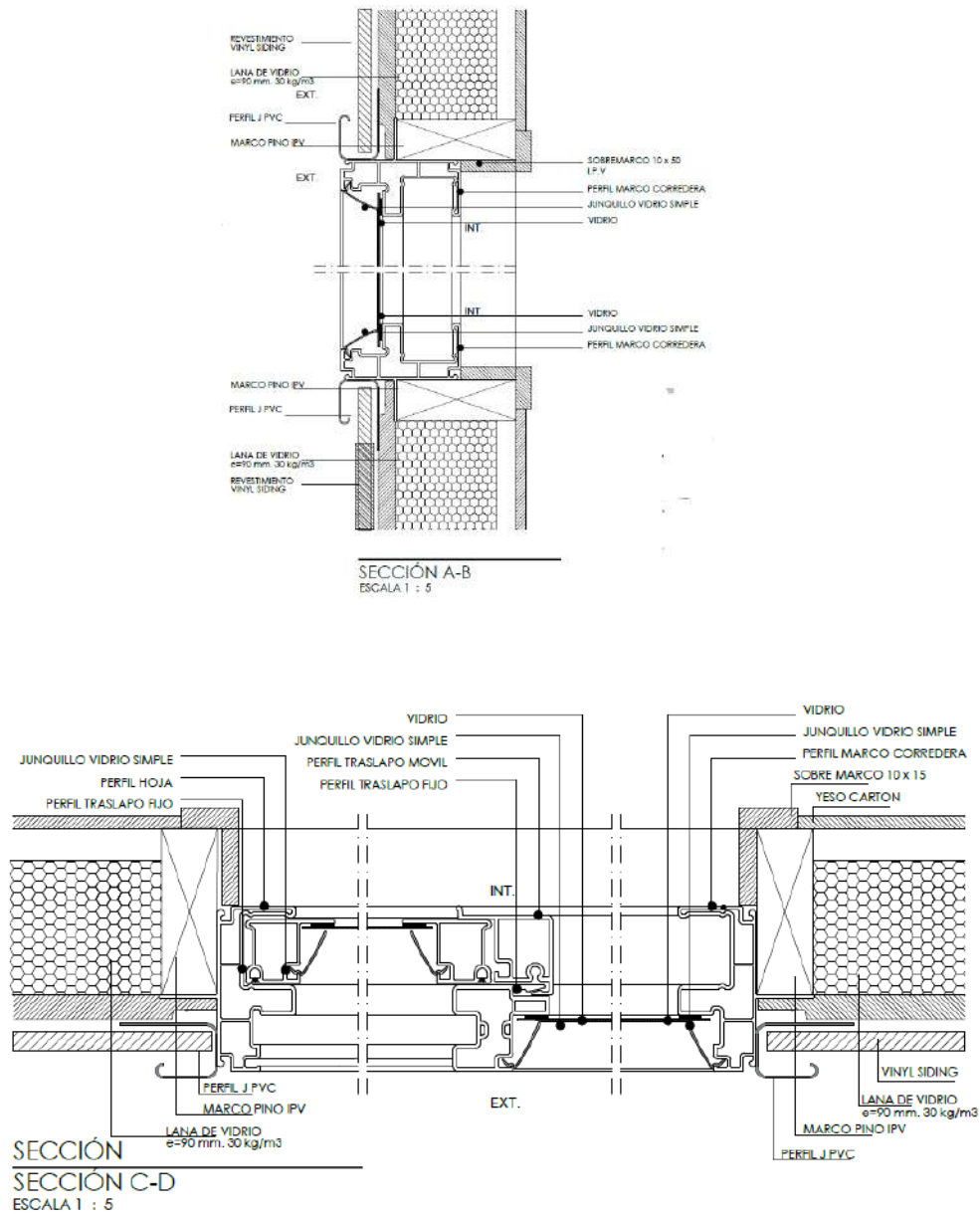


Figura 28: Detalles ventana, Porvenir II, Osorno.

En las viviendas de Porvenir II, no se identifican ductos de estufa, por lo tanto, el punto (ix) no aplica en este análisis.

En otras especificaciones que están directamente relacionadas con la hermeticidad de la vivienda se tiene el apartado de barrera de vapor y sellos, se observa que la barrera de vapor debe ser una lámina de polietileno de espesor mínimo 0,2 mm bajo el revestimiento interior de los muros perimetrales, y sobre el revestimiento de cielo. Esta barrera debe ser continua y sellada con cinta de tela americana o de aluminio, evitando al máximo los cortes y aplicando traslapo de 0,20 m como mínimo. Esto en la práctica ha significado un desafío por escasez del material, se ha debido reemplazar la cinta de tela americana por una espuma de poliuretano, lo cual para efectos del resguardo de la hermeticidad de la vivienda significa una mejora de la especificación.

También se especifican cuidados en los acopios, lo que es clave para el trabajo con materialidad predominante madera.

Dada la complejidad del cruce de información se recomienda realizar un documento centralizando la información incluyendo detalles constructivos con documentos tipo ficha que representan de forma visual la colocación y especificación de los elementos.

Para ilustrar y comparar la completitud de la especificación técnica se elabora un listado donde la evaluación es 0; 5 o 10. Donde 0 es que no se especifica el tema, 5 es que se especifica, pero le faltan detalles que pueden marcar una diferencia sustancial en los resultados de hermeticidad, y 10 corresponde a que la especificación está completa.



Figura 29: resumen especificaciones técnicas Osorno

PUERTO OCTAY

Información general y planos

Nombre del Proyecto	: Comité de vivienda Sin Casa Rural
Tipología	: 40 viviendas de un piso
Dirección	: Sector Agua Buena – Ruta U-955 km 8,25, Puerto Octay
Comuna	: Puerto Octay
Región	: Los Lagos
Código postal	: 5370000
País	: Chile
Constructora	: Ingesur Ltda.
Fecha de construcción	: octubre 2018 – febrero 2022
Elevación sobre el nivel del mar	: 250 metros

La vivienda tipo del comité Sin casa rural de Puerto Octay, se compone de una sola planta con dos dormitorios, un living comedor y cocina, más un baño. Además, contiene una logia dentro de la vivienda, este punto es muy relevante dado que la logia es un recinto ventilado y húmedo, por lo tanto, si es incorporado en el estudio de hermeticidad de la vivienda el desempeño será menor. Por lo tanto, se ha realizado el estudio incluyendo la logia y no incluyéndola, para tener un estándar de análisis similar en todas las edificaciones.

La comuna de Puerto Octay no cuenta con PDA, por lo tanto, no existe un estudio higrotérmico y solo se trabajará con las especificaciones técnicas del proyecto y los detalles arquitectónicos incluidos en los planos.



Figura 30: vivienda tipo, Sin Casa Rural, Puerto Octay

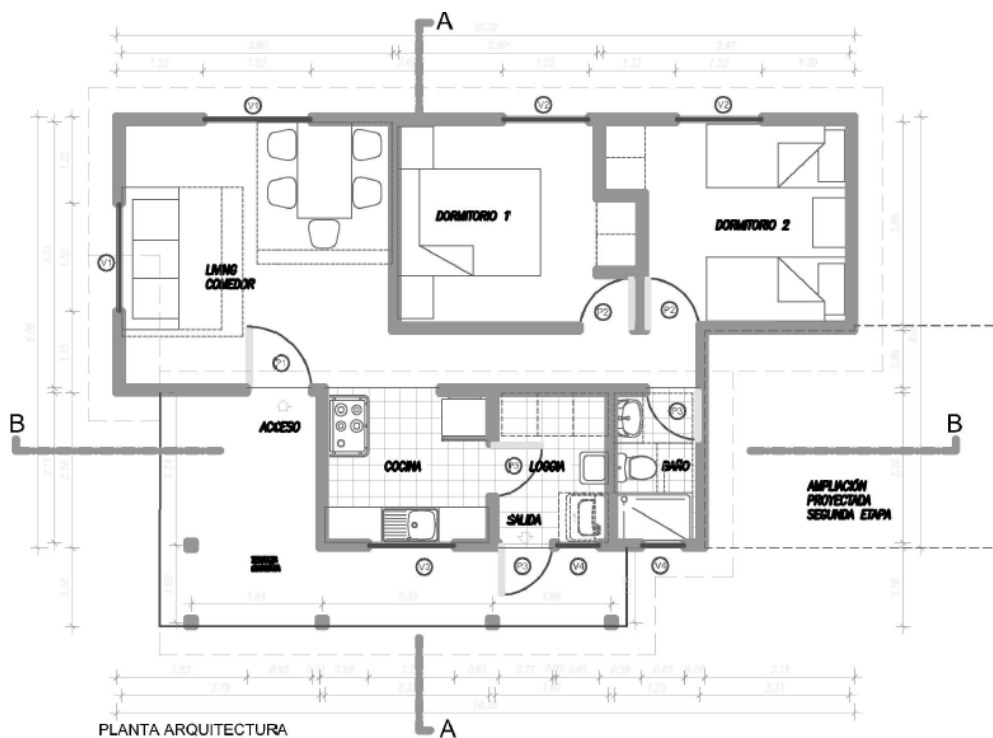


Figura 31: plano de planta vivienda comité Sin Casa Rural, Puerto Octay.

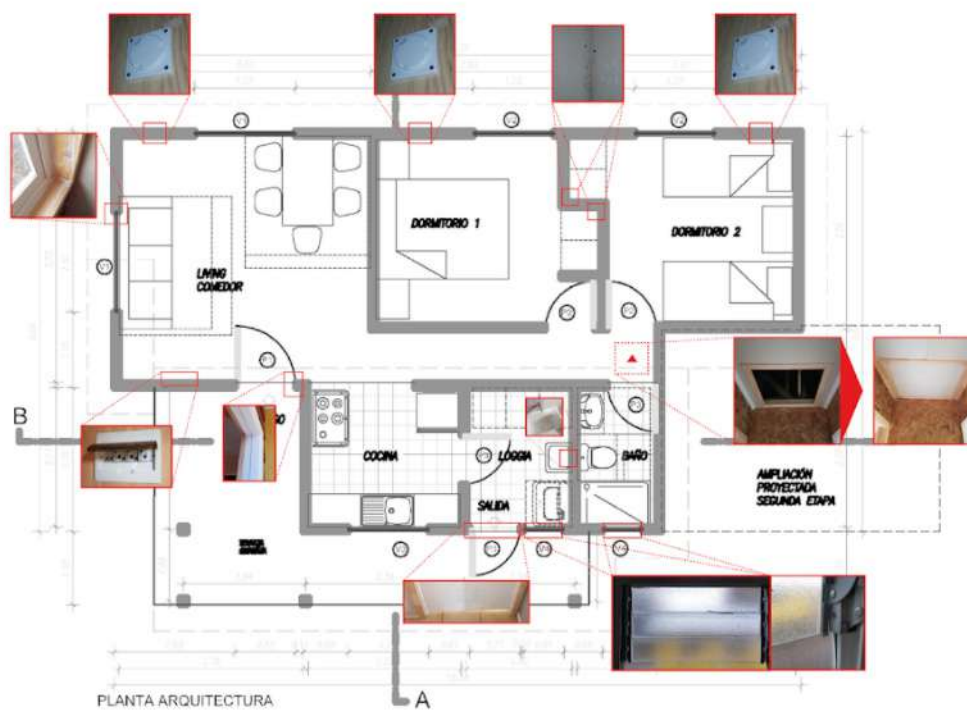


Figura 32: Identificación de ventilaciones y principales puntos de infiltraciones, comite sin casa rural, Puerto Octay.

Especificaciones técnicas

Para el punto (i) del encuentro de la solera inferior con el sobrecimiento se tiene en la especificación técnica lo siguiente: *“Se debe consultar un sello del tipo compriband en todo el perímetro de la vivienda bajo solera basal. Todas las maderas asentadas sobre hormigón serán protegidas con carbonileum en todas sus caras. Mismo tratamiento para las piezas de madera en contacto con la ducha.”*; según las fichas no se estaría aplicando el sello de poliuretano monocomponente. En los planos, no se encuentra ningún detalle.

En cuanto a (ii) el encuentro de la solera superior con el alero, no se encuentra especificado ningún sello ni tratamiento ni en las especificaciones técnicas ni en los planos de arquitectura. Por otro lado, para los (ii) encuentros entre tabiques, se tiene que debido a que el sistema constructivo utilizado se compone de Paneles SIP, se especifica una unión con sello impermeable. En obra, se observa sello de silicona en los recintos húmedos y no se observan sellos en los recintos secos.



Figura 33: sello de silicona entre paneles, comité sin casa rural, Puerto Octay.

Para el punto (iv) y (v) con respecto al tratamiento de cajas y ductos de electricidad en muros y cielos, no se especifica ninguna medida de cuidado, ni sellos para evitar infiltraciones. En obra, no se observa ningún tratamiento.

Con respecto al punto (vi) de las ventilaciones y ductos, se indica la instalación de Jonas 3” según fabricante, quien no indica los cuidados que se debe tener para resguardar la hermeticidad de la vivienda.

El punto (ix) correspondiente a la salida del ducto de la estufa, se tiene que las viviendas cuentan con una cocina integrada con ducto que atraviesa la techumbre, pero este ítem no se encuentra ni en planos ni en especificaciones técnicas.



Figura 34: cocina/estufa integrada en la vivienda, comité sin casa rural, Puerto Octay.

Para las aberturas, tanto puertas como ventanas, se tiene según especificación lo siguiente *“Para control de infiltraciones de aire, las ventanas correderas deben considerar burlete adhesivo de caucho perfil E, sobre el riel interior del marco y un burlete de caucho adhesivo perfil P en todo el perímetro el marco.”* Y para las puertas se indica solo que se incorpora botagua en la parte inferior. Por lo tanto, las especificaciones y planos de puertas y ventanas no contemplan soluciones de sellos y barreras para resguardar la hermeticidad de la vivienda.

En resumen, se tiene que la especificación técnica no es suficiente para asegurar la calidad de la vivienda y su desempeño frente a las infiltraciones de aire, ya que ningún criterio esta especificado a cabalidad y la gran mayoría de ellos no cuenta con ninguna especificación.

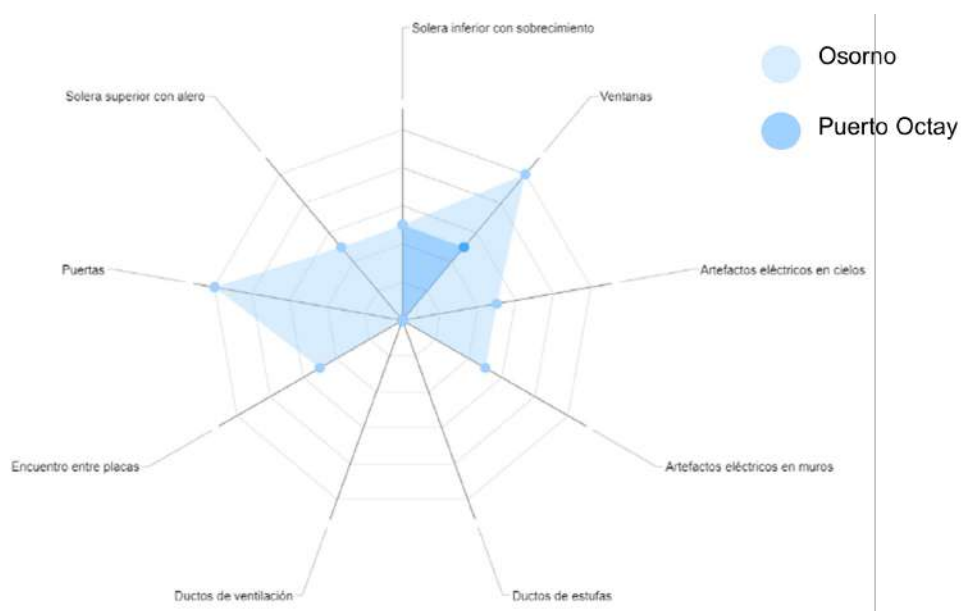


Figura 35: resumen de especificaciones técnicas para la Región de Los Lagos

REGIÓN DE LOS RÍOS

VALDIVIA

Información general y planos

Nombre del Proyecto	: Proyecto de Loteo Nueva Ilusión
Tipología	: 95 viviendas
Dirección	: Ruta T-424
Comuna	: Valdivia
Región	: Los Ríos
Código postal	: 5090000
País	: Chile
Constructora	: Peña y Peña Ltda
Fecha de construcción	: noviembre 2019 – mayo 2022
Elevación sobre el nivel del mar	: 5 metros

El proyecto de Guacamayo II, es realizado por la misma empresa que Porvenir II, es el mismo proyecto y tiene las mismas especificaciones técnicas, por lo tanto, no serán repetidas en este apartado.

Un beneficio de la construcción del mismo proyecto es la mejora continua y especialización, se observa una mejoría en el desempeño y construcción de estas viviendas en cuanto a la hermeticidad.



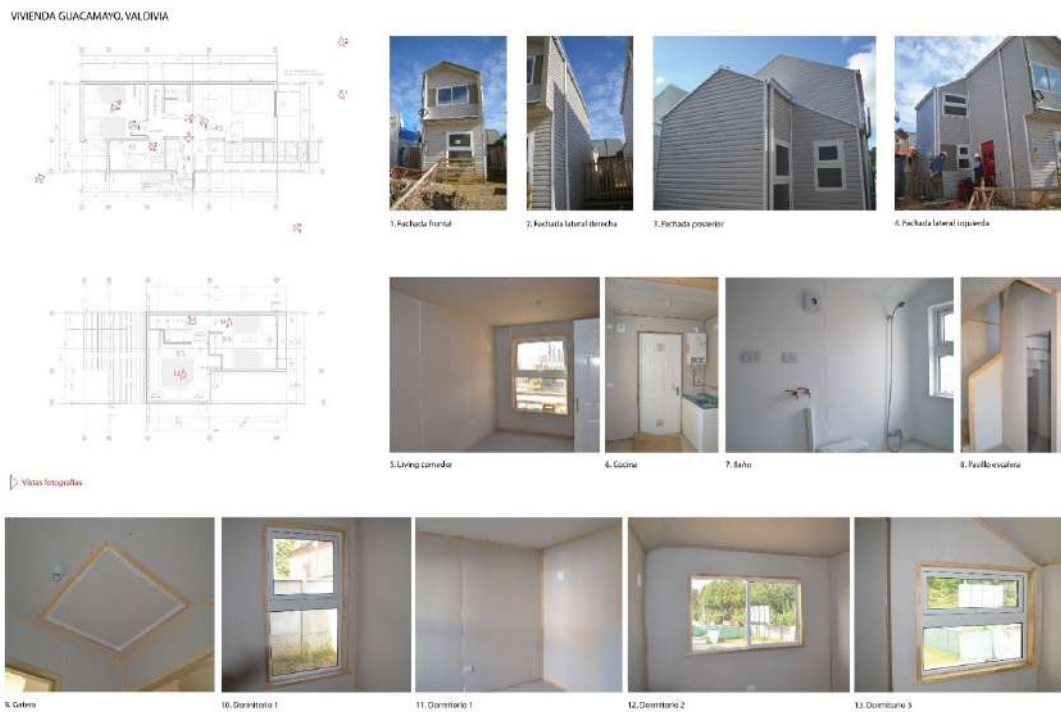


Figura 36: planos de planta elevaciones y vista de los recintos de las viviendas de Guacamayo II, Valdivia.

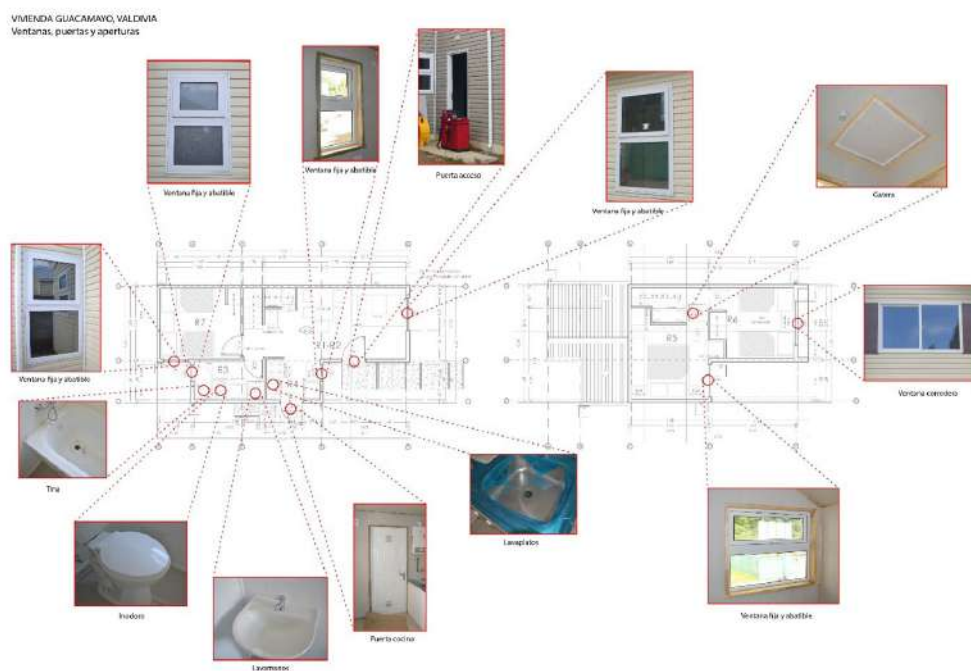


Figura 37: ubicación de aperturas en viviendas, Guacamayo II, Valdivia.

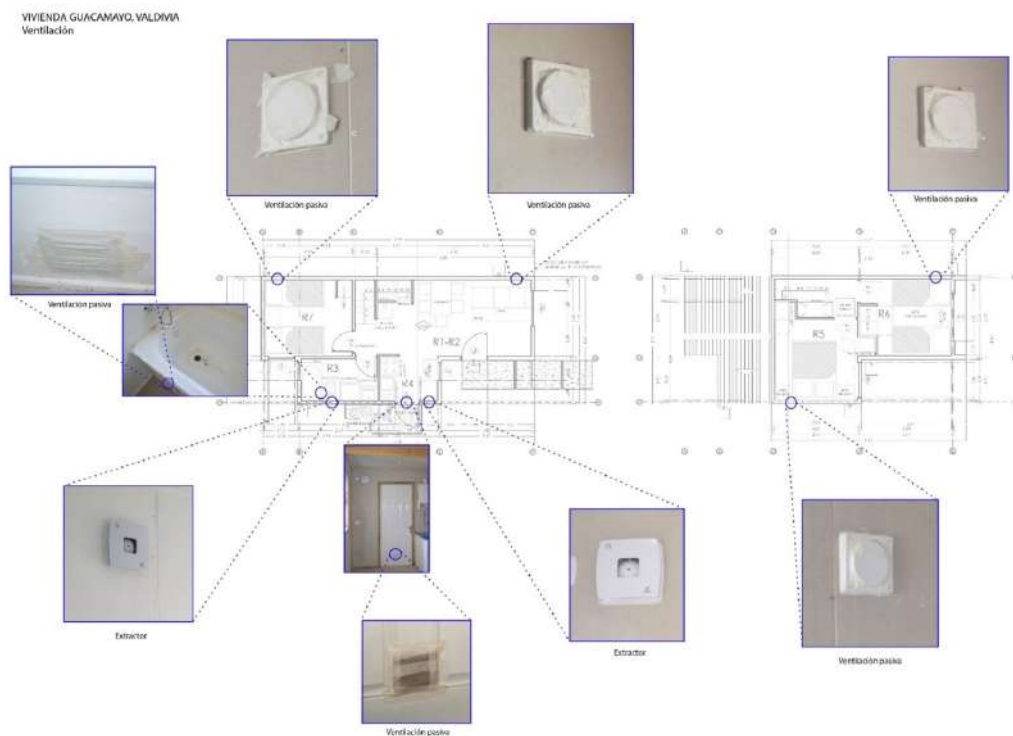


Figura 38: ubicación de ventilaciones en viviendas, Guacamayo II, Valdivia.

A modo de resumen, se incorpora la tabla de completitud de especificaciones técnicas comparando los proyectos ya evaluados.

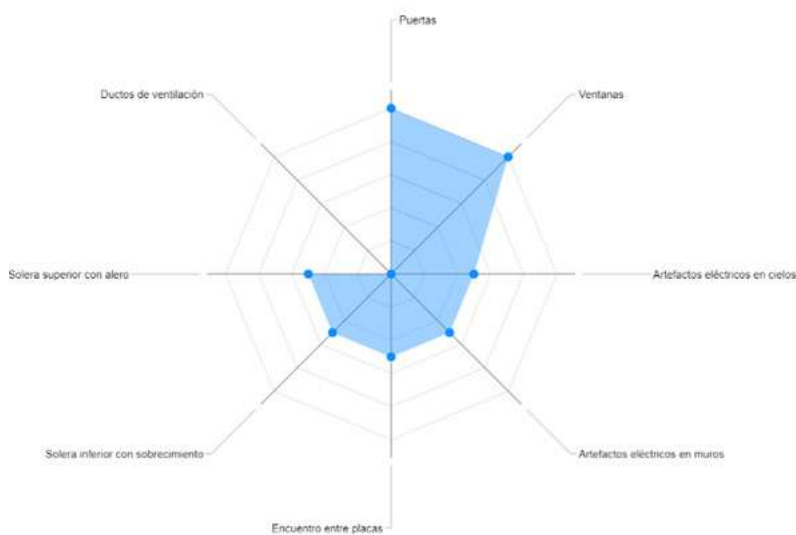


Figura 39: Resumen de completitud de especificaciones técnicas Valdivia.

LOS LAGOS

Información general y planos

Nombre del Proyecto	: Comité de vivienda Nueva Esperanza Folilco
Tipología	: 57 viviendas aisladas
Dirección	: Folilco
Comuna	: Los Lagos
Región	: Los Ríos
Código postal	: 5170000
País	: Chile
Constructora	: W & M SpA.
Fecha de construcción	: marzo 2020 – marzo 2022
Elevación sobre el nivel del mar	: 31 metros

Las viviendas construidas en Folilco, se componen de tres dormitorios un baño y living comedor cocina integrada. Son de solo un piso y la comuna no está afecta a la regulación del PDA.

VIVIENDA FOLILCO, VALDIVIA



Figura 40: plano de planta y recintos, Folilco, Los Lagos.

VIVIENDA FOLILCO, VALDIVIA
Ventanas, puertas y aperturas

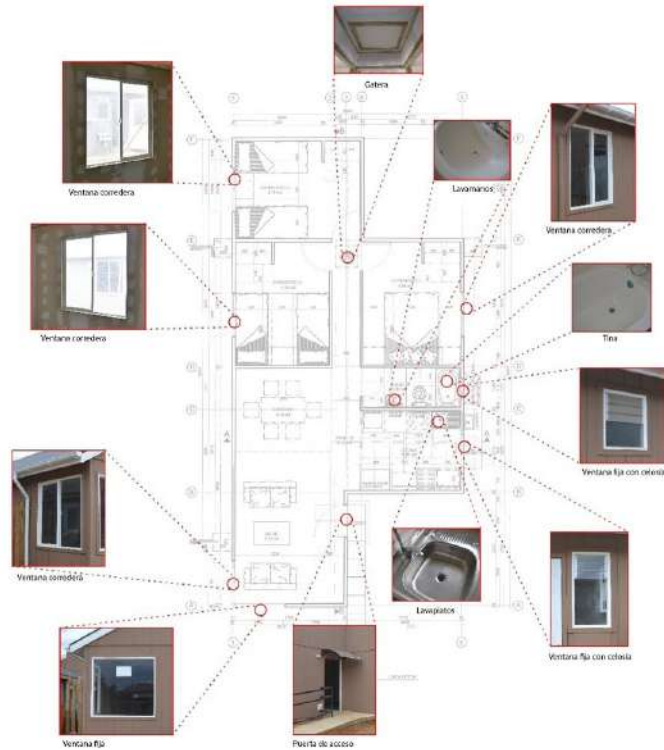


Figura 41: detalle de ubicación y tipo de aperturas, Folilco, Los Lagos.

VIVIENDA FOLILCO, VALDIVIA
Ventilación

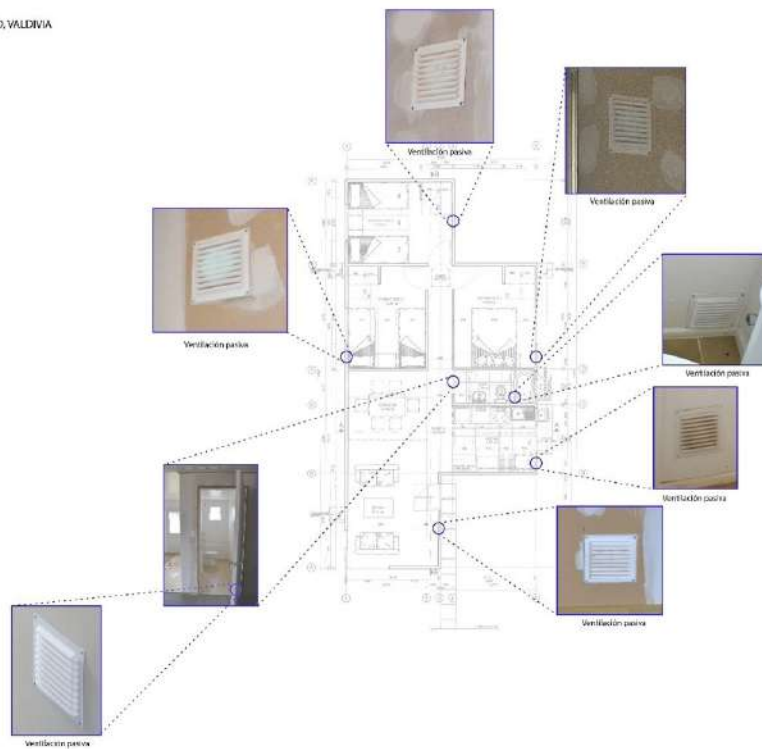


Figura 42: detalle de ubicación y tipo de ventilaciones, Folilco, Los Lagos

Especificaciones técnicas

Respecto a (i) encuentro de solera inferior con sobrecimientos se especifica “considerar un sello de cinta de espuma de poliuretano impregnado con bitumen asfáltico bajo solera de piso. Además, se considera forro perimetral como terminación de hojalatería para revestimiento exterior” si bien la solución no es la misma indicada en las fichas de hermeticidad, esta comuna no está afecta a PDA y el objetivo de evitar las infiltraciones por desniveles generados entre la solera inferior y el sobrecimiento debería cumplirse con el elemento especificado, de todas maneras se recomienda también agregar un sello de poliuretano monocomponente para asegurar la continuidad de la envolvente en todo momento. En cuanto a (ii) la solera superior con el alero, no se observa ninguna especificación de sellos.

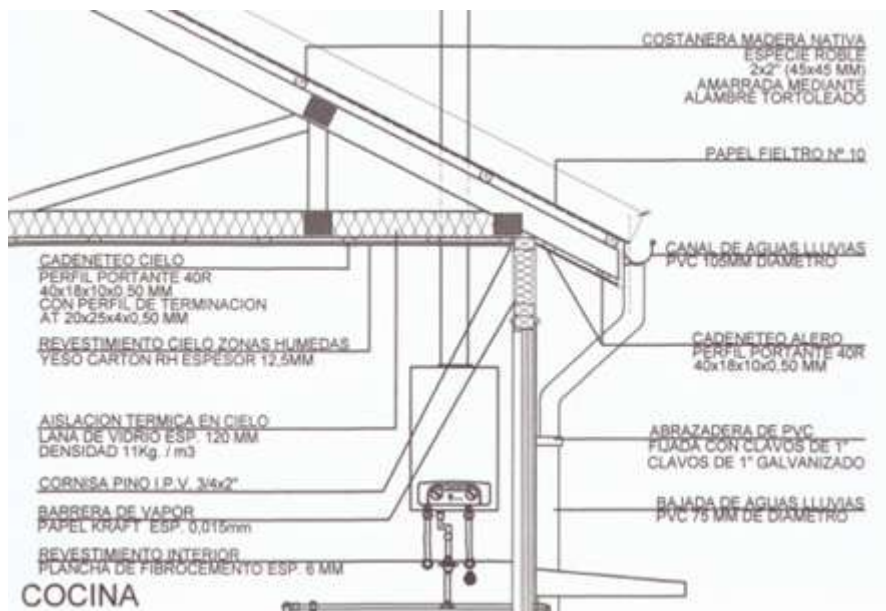


Figura 43: detalle encuentro panel de muro con alero, Foliico, Los Lagos.

De los (iii) encuentro entre paneles se tiene que para las zonas húmedas se especifica sello de silicona y para las zonas secas se especifica masilla base junta pro y cinta de fibra junta pro o similar. Al igual que para el punto anterior se tiene que esta no es la solución recomendada por las fichas de hermeticidad, pero es una solución alternativa que debería cumplir con el objetivo.



Figura 44: unión entre paneles, Foliico, Los Lagos.

En cuanto a los encuentros de cajas eléctricas con muros y cielos, no se encuentra ninguna protección o cuidado especial ni en planos ni en especificaciones. Sucediendo lo mismo para ductos de ventilación.

Luego para ventanas, se consulta sello de silicona neutra en las uniones y encuentros, acorde con lo especificado en las fichas, pero no es una solución idónea dado que requiere mantenimiento, por recambio de los sellos los cuales no siempre responden bien a las condiciones del ambiente.

En el caso de las puertas, se debe considerar según especificación un sello de silicona neutra por el interior y un sello elastomérico en base a poliuretano por fuera de la vivienda. Además, se debe considerar burlete de PVC y goma autoadhesiva en el peinazo de la puerta en su parte interior. En adición, se deberá instalar un burlete de caucho perfil P por todo el borde interior del marco.

Finalmente, esta tipología de vivienda no contempla estufa, por lo tanto, no aplica el punto 9. Es así como en resumen se obtiene lo siguiente.



Figura 45: Resumen de completitud de especificaciones técnicas por proyecto región Los Ríos.

REGIÓN DE LA ARAUCANÍA

TEMUCO

Información general y planos

Nombre del Proyecto	: Megaproyecto Labranza
Tipología	: Varios comités de vivienda total 355 viviendas aisladas.
Dirección	: Calle el Bosque 691, Labranza
Comuna	: Labranza
Región	: La Araucanía
Código postal	: 4780000
País	: Chile
Constructora	: Luis Sáez Th. Limitada
Fecha de construcción	: octubre 2019 – febrero 2022
Elevación sobre el nivel del mar	: 120 metros

El Megaproyecto Labranza se compone de tres comités de vivienda, y dos tipologías principales se analizará en este estudio la vivienda con dos aguas, pero se muestra de todas maneras el resultado obtenido para vivienda de un agua.

También se observa que las viviendas en ambas tipologías tienen en general una menor envolvente ya que son pareadas, o en trenes de vivienda, esto hace que los muros de los dormitorios del segundo nivel sean adiabáticos (aledaño a un recinto con la misma temperatura, y no con la temperatura exterior), pero aparece un piso ventilado.





Figura 46: vivienda de un agua sin alero, Labranza, Temuco



Figura 47: planos de planta, fotos de elevaciones y recintos de las viviendas en Labranza, Temuco.

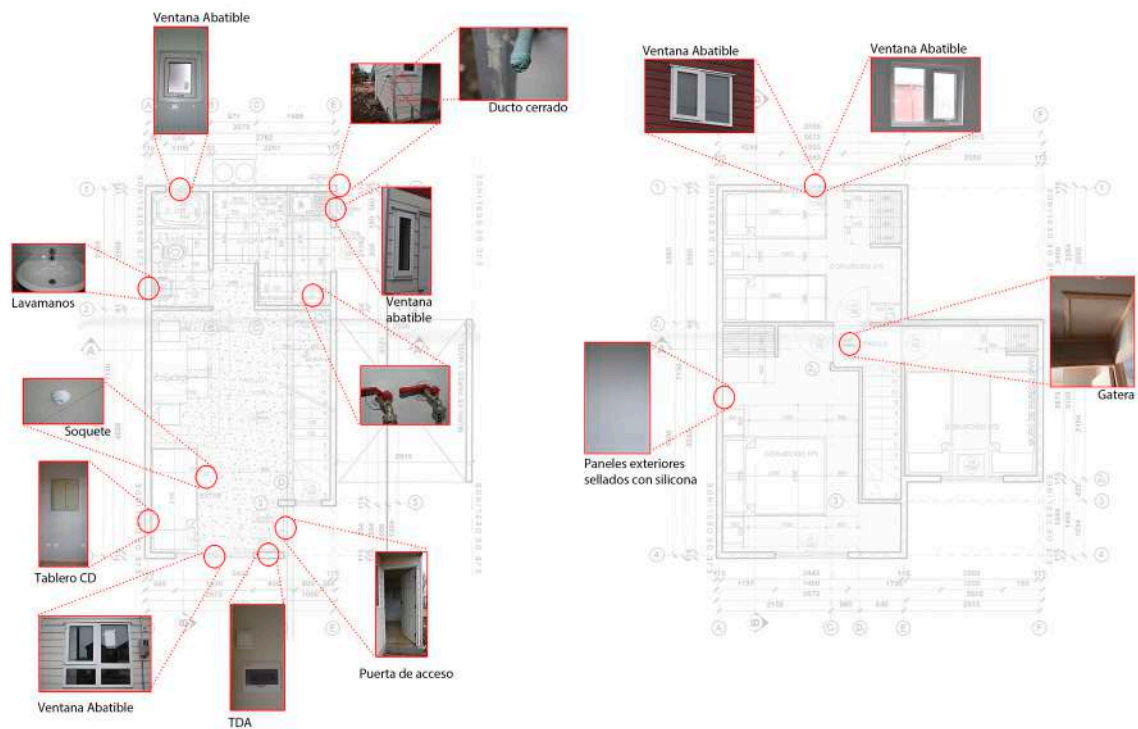


Figura 48: ubicación de aperturas y principales puntos de fuga, Labranza, Temuco.

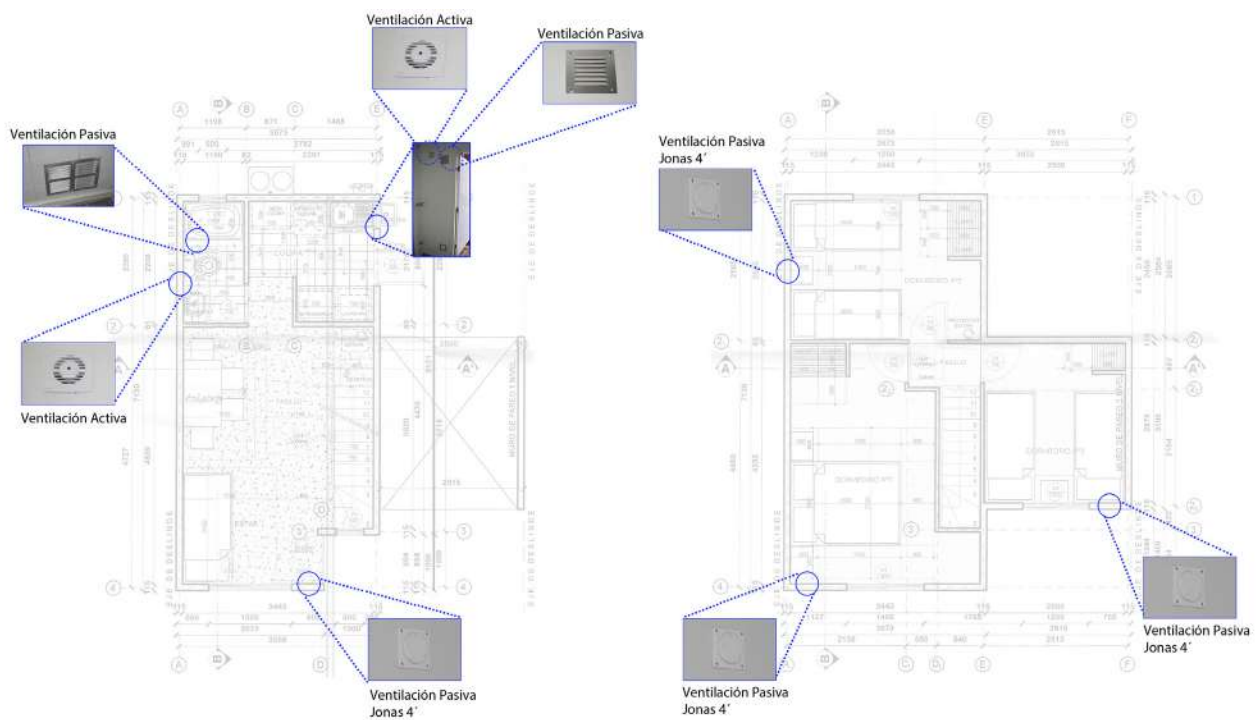


Figura 49: diagrama de posición de ventilaciones, vivienda Labranza, Temuco.

Especificaciones técnicas

De los encuentros entre solera inferior y sobrecimiento, se considera sello de neopreno tipo compriband bajo solera, y una barrera de humedad de 3 cm por ambos costados de la solera. En la

Figura 50 se observa la solera recubierta completamente, lo importante para este punto es que no quede ningún espacio entre la solera y el sobrecimiento, además de que se debe asegurar la continuidad de la aislación y sistema constructivo solo esto permitirá evitar el paso del aire.

En cuanto al encuentro de la solera superior con el alero, no se especifica ningún sello ni tratamiento especial de las barreras de humedad y de vapor, tal como se muestra en la siguiente imagen.



Figura 50: solera inferior en viviendas de Labranza, Temuco.

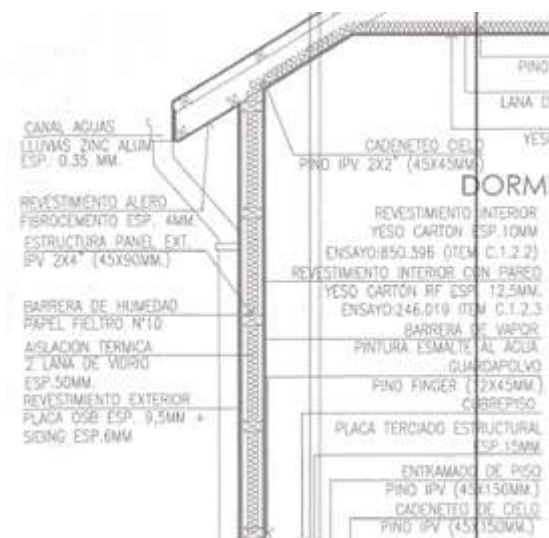


Figura 51: detalle constructivo encuentro solera superior con alero, Labranza, Temuco.

Para la unión entre placas se detalla claramente que en las zonas húmedas se deberá utilizar sellos de silicona, pero para la unión entre placas en sectores secos pero que pertenezcan a la envolvente de la vivienda no se detalla un tipo de unión, pero se especifica una barrera de vapor correspondiente a pintura esmalte al agua, y para su aplicación se pierden las uniones.

En cuanto a las instalaciones eléctricas, ductos de ventilación y ducto de estufa tanto en techumbre como en cielo, no se presentan especificaciones que detallen la forma de instalación protegiendo la continuidad de la envolvente.



Figura 52: ducto de estufa, Labranza, Temuco.

Para las puertas, se considera sello de silicona por el interior y sello elastomérico en base a poliuretano por el exterior. Además, se considera burlete de PVC y goma autoadhesiva en el peinazo de la puerta por su parte interior, y burlete de caucho perfil P de máx 5 mm de espesor, por todo el borde perimetral interior del marco de la puerta. Cumpliendo así con todas las recomendaciones de las fichas de hermeticidad.

Para las ventanas, se considera sello de silicona neutra por dentro de la vivienda y un sello elastomérico en base a poliuretano por fuera. En las ventanas correderas se deberá instalar un burlete adhesivo perfil E, y burlete de caucho adhesivo perfil P instalado entre el marco de la ventana y el muro.

Si bien será abordado en recomendaciones, es importante destacar que existen tipos de ventanas que resguardan de mejor forma la hermeticidad de las viviendas, por ejemplo, las ventanas abatibles tienen un cierre mucho más hermético que las ventanas tipo correderas.

En resumen, las especificaciones técnicas analizadas hasta este punto del informe son las siguientes:

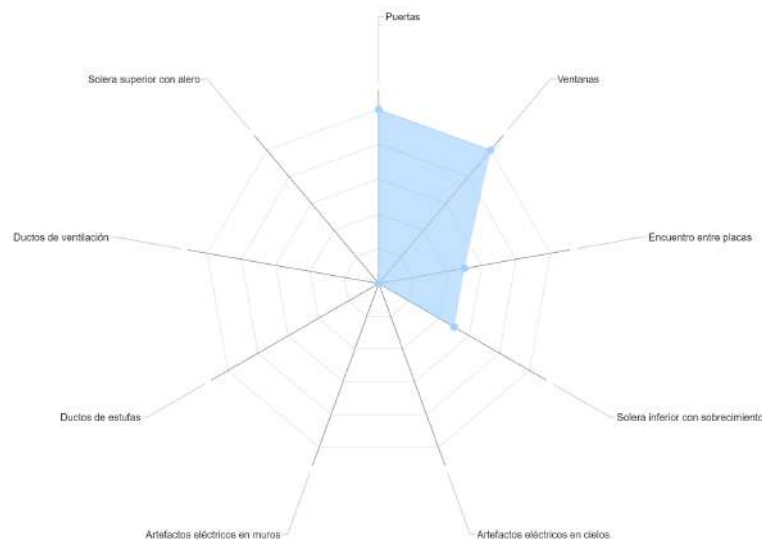


Figura 53: resumen completitud de las especificaciones técnicas por proyecto, incluido Temuco.

PILLANLELBÚN

Información general y planos

Nombre del Proyecto	: Comité de vivienda el renacer de Pillanlelbún
Tipología	: 159 viviendas aisladas
Dirección	: Manuel Novoa, Pillanlelbún
Comuna	: Lautaro
Región	: La Araucanía
Código postal	: 4860000
País	: Chile
Constructora	: Dadelco
Fecha de construcción	: octubre 2019 – octubre 2021
Elevación sobre el nivel del mar	: 154 metros

Las viviendas de Pillanlelbún son de dos plantas y cuentan con 3 dormitorios, un baño, y un sector living comedor más cocina integrada.

Será destacado en las recomendaciones, pero la composición y distribución de los recintos de la vivienda, es importante para el resguardo de la hermeticidad de estas, se recomienda que los recintos ventilados tales como cocina y baño sean cerrados, creando así una barrera mayor para los recintos habitables.





Figura 54: planos de planta, elevaciones e imágenes de los recintos de las viviendas del Renacer de Pillanlelún, Lautaro

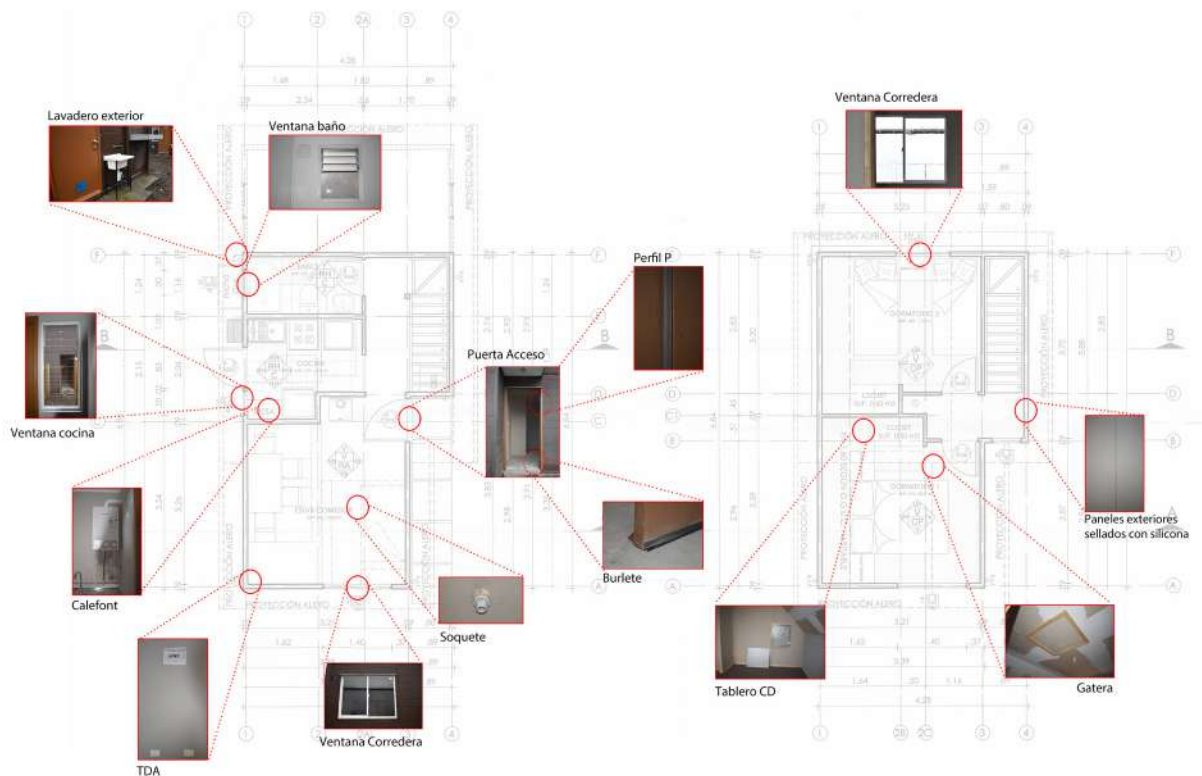


Figura 55: detalle de ubicación de aperturas y principales puntos de infiltración.

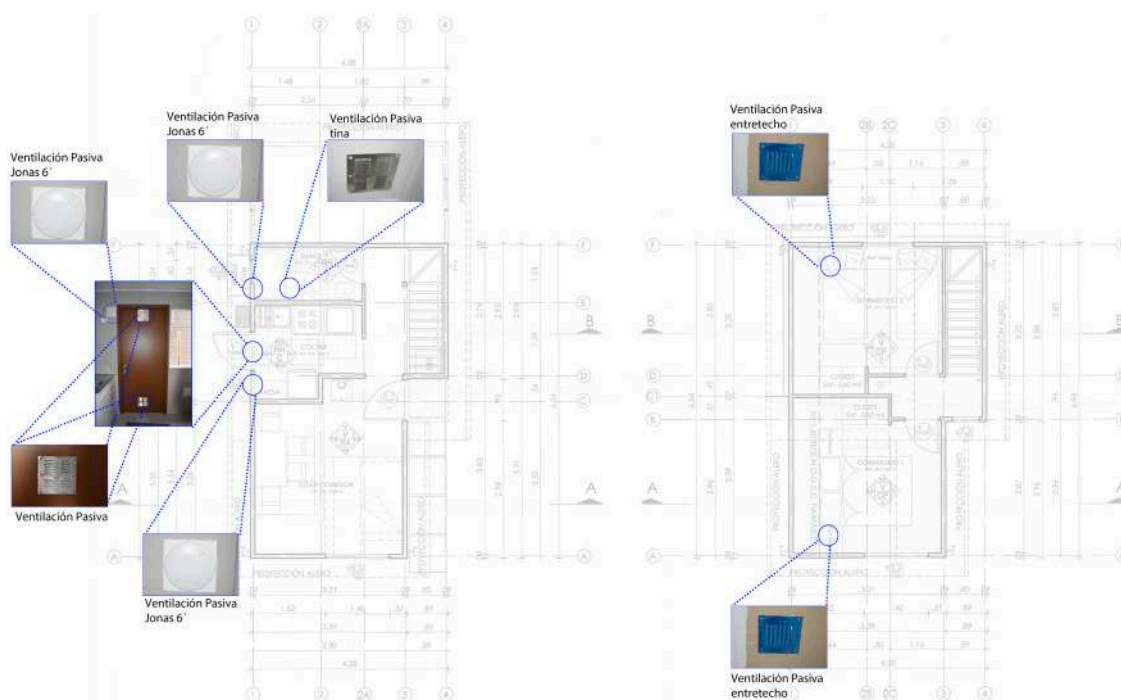


Figura 56: ubicación de ventilaciones en las viviendas del Renacer de Pillanlelbún, Lautaro.

Especificaciones técnicas

Las especificaciones técnicas de este proyecto destacan en **negrita** las características más relevantes como materialidades, dimensiones y distanciamientos; esto facilita la comprensión. Pero los planos de arquitectura no cuentan con el detalle suficiente.

Primero, para el encuentro entre solera inferior y sobrecimiento se considera sello de neopreno tipo Compriband bajo solera y barrera de humedad con retorno de 3 cm por ambos lados de la solera. Para el encuentro de la solera superior con el alero. Pero no se incorpora sello de poliuretano monocomponente.

Al igual que en las especificaciones anteriores, se indica **silicona neutra pintable con fungicida** para sellar la unión entre placas en zonas húmedas. En cambio, en zonas secas, no se indica sello en ninguna de las partidas, pero si se incorpora en la especificación que se deberá considerar **sello de silicona pintable entre placas**, para pintar con esmalte a agua de poro cerrado en todo el revestimiento interior perimetral, que actúa como barrera de vapor.

En la partida de ventanas se identifica la principal diferencia entre el presupuesto y especificación de viviendas sociales en comunas con y sin PDA, en las comunas sin PDA la especificación de ventanas para zonas húmedas corresponde a **ventanas con operador de cierre**, con un mínimo de 3 láminas o ventana practicable, para asegurar la ventilación de los recintos. Esto, significa una apertura grande ya que no se pueden cerrar por completo, permitiendo el flujo de aire constante y así las infiltraciones. A pesar de la tipología de la ventana, la especificación técnica contempla todos los sellos y burletes recomendados por las fichas de hermeticidad, lo cual deja de tener sentido ya que la hermeticidad se pierde de todas formas por el espacio libre sin posibilidad de cierre entre las láminas del paño vidriado.



Figura 57: ventana con tres hojas y operador de cierre, Pillanlelbún, Lautaro.

Para las puertas se especifican todos los sellos recomendados, pero en obra se identifican algunas falencias debido a la deformación que sufren los elementos producto de la humedad y otros factores climáticos, que no se enfrentan de buena forma en la fase de construcción y acopio.

Por último, para los sellos y protecciones que se deberían incorporar en la unión de las instalaciones y cajas eléctricas y de ventilación con los muros y cielos, no se observan detalles de especificación. Es así, como en resumen de los seis proyectos analizados se obtiene que la completitud de las especificaciones técnicas es la siguiente.

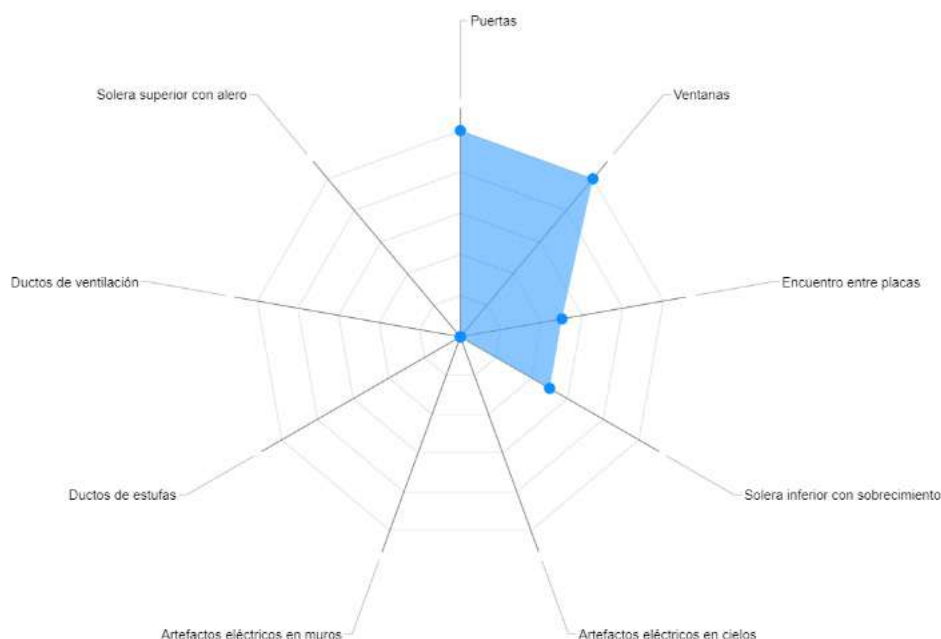


Figura 58: completitud de las especificaciones técnicas de la región de La Araucanía (iguales).

OBSERVACIONES GENERALES DE LA CONSTRUCCIÓN Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Es muy relevante analizar en conjunto las especificaciones técnicas y la fase de construcción de cada proyecto, así se comprende el panorama de mejor forma y se pueden levantar las barreras existentes para lograr buenos desempeños de hermeticidad en las viviendas sociales de estructura de madera.

Según el Manual de Hermeticidad al Aire de Edificaciones¹ se tiene que, para los sistemas livianos, a los cuales corresponde la construcción en madera, las infiltraciones más incidentes según las diferentes singularidades de la vivienda no están identificadas y se clasifican como “otros” es decir no se conoce con exactitud desde donde provienen dificultando así generar soluciones, este es el principal problema de la hermeticidad en las viviendas de madera.

Tabla 8: incidencia de singularidades o elementos en la hermeticidad de las viviendas

Singularidad o elemento	Cambios de aire por hora a 50Pa	% incidencia
Celosías baño y cocina	3,69	7%
Ventanas	0,11	0,2%
Puerta principal	1,2	2%
Puerta secundaria	1,3	2%
Instalaciones eléctricas	0,71	1%
Tapa gatera	0,33	1%
Ducto chimenea	0,27	0%
Encuentro sobrecimiento-muro	0,73	1%
Encuentro muro-cielo	6,19	11%
Otros	40,35	74%
TOTAL	54,88	100%

²¹ Citec UBB y DECON UC, «Manual de Hermeticidad al aire de Edificaciones».

Con base en los resultados de la tabla anterior, los esfuerzos para mejorar el desempeño de las viviendas deberían enfocarse en descubrir la fuente de infiltraciones definida como “otros”. La construcción con entramado de madera se caracteriza por la gran cantidad de uniones que se deben realizar, y es en cada unión donde se puede generar un punto de infiltraciones, es por eso que se requiere de una capa continua de la envolvente la cual tenga los sellos necesarios para asegurar la estanqueidad.

Además, el mismo documento, realizó una lista de los principales puntos de fuga de aire para construcciones livianas esta lista es:

1. Intersección losa inferior/muro exterior vertical
2. Intersección marco ventana/muro exterior vertical
3. Muros livianos
4. Perforaciones a muros exteriores verticales
5. Intersección techumbre inclinada/estructura de cielo.
6. Perforaciones a losa para paso de instalaciones
7. Intersección techumbre inclinada/muro exterior vertical
8. Perforaciones a techumbre inclinada
9. Intersección techumbre inclinada/lucarna o ventana
10. Intersección entrepiso/muro exterior vertical
11. Intersección dintel puerta/muro exterior vertical
12. Cámara inspección cielo falso o muros
13. Instalaciones eléctricas
14. Perforación a radier o losa inferior para instalaciones

De estos puntos de fuga, las fichas de hermeticidad elaboradas por MINVU resuelven varios, pero no todos. Además, como se analizaron las especificaciones técnicas de los diferentes proyectos se tiene que el nivel de detalle y completitud es bajo, ya que las especificaciones más completas cumplían con apenas un 56% de lo detallado en fichas de hermeticidad, por lo tanto, aún queda un trecho por mejorar en la documentación de los proyectos.



Respecto a los ensayos en cada uno de los proyectos se enfrentaron diferentes complejidades. En Osorno, proyecto Porvenir II, la única vivienda terminada era la vivienda piloto, pero se realizaron ensayos a 20 viviendas, para lograr una uniformidad en los resultados y representatividad de la hermeticidad de las viviendas, se procede a tapar con poliestireno, cinta adhesiva y cinta de enmascarar diferentes singularidades tales como tableros de alumbrado TDA, algunas tapas eléctricas, entre otras. Esto también puede haber afectado los resultados, dado que no es la forma en que quedarán dispuestos los elementos en la fase de operación de las viviendas.



Figura 59: Elementos del Lote 08, sellados con polietileno y cinta adhesiva. Porvenir II, Osorno.

En la medida que las viviendas están menos acabadas se obtienen generalmente resultados más altos, es decir, un peor rendimiento frente a las infiltraciones de aire. El resultado más elevado se observa en el lote 35, en el cual se observan ciertos aspectos no abarcados en los lotes con mejor rendimiento.



Figura 60: a) cinta adhesiva mal instalada en el encuentro con la ventana, b) ventanas sin sobre marco, c.1) ausencia de cajas y tapas eléctricas, c.2) ausencia de sellos en los encuentros de las placas de yeso cartón.

Las pruebas de humo realizadas en estas viviendas indican que las mayores fugas se encuentran en el tablero de alumbrado y en el encuentro con las ventanas cuando estas no cuentan con el sobre marco de madera, sellado. Además, en menor medida, se encuentran fugas por el sistema de alambrado, cajas eléctricas y enchufes.

La mayor parte de las infiltraciones se encuentran, en pequeños errores constructivos, como cintas adhesivas mal instaladas y cortes poco precisos. Es claro que uno de los principales problemas de un bajo detalle en la especificación técnica es el tratamiento que se debe tener para realizar las pasadas por de los ductos de ventilación.



Figura 61: pasada para elementos de ventilación, Porvenir II, Osorno.

Luego en el proyecto de Labranza, se observan otros problemas constructivos o de falta de terminación tales como ausencia de sellos en el perímetro exterior de las ventanas, y desprolijidad en los cortes del revestimiento exterior. Además, se muestra un problema constructivo en el encuentro del muro vertical con el sobrecimiento, se especifica un perfil corta gotera, pero la geometría de este genera que la lluvia se dirija hacia el interior del muro provocando humedades que afectan el confort interior de la vivienda y disminuyen la vida útil de la misma.



Figura 62: ausencia de sello en perímetro exterior de ventana, Labranza, Temuco.



Figura 63: problema constructivo en Labranza, Temuco.

Además, de estos detalles ya presentados existen deficiencias en el acopio de los materiales y deformación de los mismos lo que genera infiltraciones por ejemplo en las puertas secundarias como se muestra a continuación.



Figura 64: problemas de acopio en zonas lluviosas, Puerto Octay, Los Lagos.



Figura 65: deformación de puerta genera apertura en la parte superior, Pillanlelbún, Lautaro.

COSTOS ASOCIADOS A LOS SELLOS Y ELEMENTOS PARA LA HERMETICIDAD DE LAS VIVIENDAS

Para obtener buenos resultados de hermeticidad y que estos se mantengan a lo largo de la vida útil de las viviendas se requiere invertir en sellos y barreras. A continuación, se presentan algunos costos de las soluciones más utilizadas para resguardar la hermeticidad de las viviendas.

Los costos son obtenidos desde los valores del PPPF 2015 y están disponibles en las fichas de hermeticidad de Temuco y los porcentajes del costo total se calculan con una base de 1.000 UF/vivienda.

Para las soluciones de encuentros entre solera inferior y sobrecimiento; y encuentro entre solera superior y alero, se considera que el sello compriband ya está incluido en los costos, y solo se incorpora un sello de espuma de poliuretano, o sello de poliuretano monocomponente, el costo de dicha partida es de 0,058 UF/ml que para un aproximado de 25 metros lineales por vivienda, para cada encuentro es un total de 50 m es un total de 2,9 UF por vivienda, costo que resulta con una incidencia menor al 0,3% del costo de la vivienda.

Tabla 9: análisis de precio unitario soluciones de sello de poliuretano monocomponente para encuentros de soleras con sobrecimientos y aleros

SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA PARA LA HERMETICIDAD AL PASO DEL AIRE sello en encuentro de solera inferior con sobrecimiento y encuentro solera superior con alero					
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
1	Sello de espuma de poliuretano	un	0,15	0,305	0,046
2	Pérdida	%	0,01	0,127	0,001
3	Ayudante	HD	0,02	0,4332	0,0087
4	Leyes sociales	%	29		0,0025
TOTAL					0,0582

El costo de las soluciones propuestas para el encuentro de los muros y cielos con las cajas de instalaciones eléctricas corresponde a lo expresado en la siguiente tabla, 0,2777 UF/unidad aproximadamente se estiman 40 cajas eléctricas, lo que corresponde 11, 1 UF/vivienda, representando menos de un 1,11% del presupuesto de la vivienda.

Tabla 10: análisis de precio unitario de sellos en canalizaciones y cajas eléctricas

SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA PARA LA HERMETICIDAD AL PASO DEL AIRE sello en canalizaciones y cajas eléctricas en muro de tabiquería de madera					
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
1	Sello poliuretano inyectado tipo Sika Boom	un	0,090	0,305	0,027
2	Sello de goma o terminal	un	1	0,016	0,016
3	Sello de silicona acrílica	un	0,09	0,102	0,009
4	Pérdida	%	0,01	0,127	0,001
5	Ayudante	HD	0,4	0,4332	0,1733
6	Leyes sociales	%	29		0,0503
TOTAL					0,2777

El manejo con las pasadas necesarias para los ductos de ventilación en muros tiene un costo de 0,4195 UF/unidad en general se tienen 6 unidades de ventilación por vivienda, correspondiente a un monto total de 2,517 UF/vivienda lo que representa menos de un 0.3% del costo total de la vivienda.

Tabla 11: análisis de precio unitario de sellos para la hermeticidad en ductos de ventilación

SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA PARA LA HERMETICIDAD AL PASO DEL AIRE Sellos para la hermeticidad en ductos de ventilación muro de madera					
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
1	Sello poliuretano inyectado tipo Sika Boom	un	0,15	0,305	0,046
2	Sello elastomérico tipo Sikaflex construcción	un	0,110	0,236	0,026
3	Sello de silicona neutra	un	0,110	0,102	0,011
4	Pérdida	%	0,010	0,127	0,001
5	Ayudante	HD	0,6	0,4332	0,2599
6	Leyes sociales	%	29		0,0754
TOTAL					0,4195

Los costos asociados a la hermeticidad en las ventanas de las viviendas se dividen en dos grandes tipologías, las ventanas tipo corredera y las ventanas tipo abatibles, ya que se requieren diferentes sellos para cada una. En el caso de ventanas correderas se tiene que el costo por unidad es aproximadamente de 0,6617 UF esto es una estimación puesto que no todas las ventanas correderas tienen las mismas dimensiones. Por otro lado, las ventanas abatibles tienen un costo de sellos de 0,5369 UF, el costo es menor ya que no se requiere de burlete de caucho tipo E. En cada vivienda hay aproximadamente 6 ventanas, es decir, en el caso más desfavorable se tiene un costo total de 3,972 UF por vivienda, representando menos de un 0.4% del costo de la vivienda.

Tabla 12: análisis de precio unitario para encuentro de marco de ventana corredera con muro de madera

SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA PARA LA HERMETICIDAD AL PASO DEL AIRE Encuentro de marco de ventana corredera con un muro de madera					
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
1	Sello elastomérico tipo Sikaflex construcción	m2	0,200	0,2491	0,0498
2	Burlete de caucho perfil P	uni	1	0,125	0,125
3	Burlete de caucho perfil E	uni	1	0,1248	0,1248
4	Sello silicona neutro	uni	0,6	0,1018	0,0611
5	Pérdida	%	0,010	0,3607	0,0036
6	Limpieza	uni	1	0,018	0,018
7	Ayudante	HD	0,5	0,4332	0,2166
8	Leyes sociales	%	29		0,0628
TOTAL					0,6617

Tabla 13: análisis de precio unitario para encuentro de marco de ventana abatible con muro de madera

SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA PARA LA HERMETICIDAD AL PASO DEL AIRE Encuentro de marco de ventana abatible con un muro de madera					
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
1	Sello elastomérico tipo Sikaflex construcción	m2	0,200	0,2491	0,0498
2	Burlete de caucho perfil P	uni	1	0,125	0,125
3	Sello silicona neutro	uni	0,6	0,1018	0,0611
4	Pérdida	%	0,010	0,3607	0,0036
5	Limpieza	uni	1	0,018	0,018
6	Ayudante	HD	0,5	0,4332	0,2166
7	Leyes sociales	%	29		0,0628
TOTAL					0,5369

Finalmente, los costos para el encuentro entre el marco de las puertas con los muros de entramado de madera corresponden a 0,9205 UF por unidad de puerta, en general se cuenta con solo 2 puertas que dan al exterior por lo tanto el costo de esta partida para la vivienda completa es de 1,841 UF lo que corresponde a menos de un 0,2% del presupuesto total de las viviendas.

Tabla 14: análisis de precio unitario para encuentro de marco de puerta con un muro de entramado de madera

SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA PARA LA HERMETICIDAD AL PASO DEL AIRE Encuentro de marco de puerta corredera con un muro de madera					
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Total
1	Sello elastomérico tipo Sikaflex construcción	m2	0,3	0,2491	0,0747
2	Burlete de caucho perfil P	uni	1	0,125	0,125
3	Burlete PVC y goma autoadhesivo	uni	1	0,1989	0,1989
4	Sello silicona neutro	uni	0,96	0,1018	0,0977
5	Pérdida	%	0,010	0,4964	0,0050
6	Limpieza	uni	1	0,028	0,028
7	Ayudante	HD	0,7	0,4332	0,3032
-8	Leyes sociales	%	29		0,0879
TOTAL					0,9205

Además de este análisis de precios unitarios, se debe considerar en los costos el uso de cintas americanas para fijar las barreras de vapor y de humedad, eliminando la utilización de grapas dado que son posibles causas de infiltraciones, estas cintas tienen un costo mayor a las grapas, pero de todas maneras en el total de las mejoras que se deben realizar no se contempla el alza del presupuesto en más de un 2,3% del costo total.

RESULTADOS

En este apartado se analizarán los resultados de los ensayos de hermeticidad y sus sensibilidades dado que los ensayos fueron realizados de formas diferentes para analizar diferentes desempeños de las viviendas. Primero se presentan los resultados resumidos por proyecto y se comparan con el estándar esperado, luego se analizan diferentes variables que podrían haber afectado los resultados.

RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE HERMETICIDAD SEGÚN PROYECTO

En la siguiente imagen se muestran los proyectos analizados y su ubicación geográfica, además se identifica que al lado derecho de la imagen se encuentran aquellas comunas que no cuentan con Plan de Descontaminación Atmosférica y a la izquierda las comunas que si están reguladas. Es posible notar una diferencia dado que el tamaño de los círculos indica una relación de los recambios de volumen de aire por hora a 50 Pascales, por ejemplo, se observa que el círculo más pequeño corresponde a la comuna de Valdivia y el más grande a la comuna de Puerto Octay.

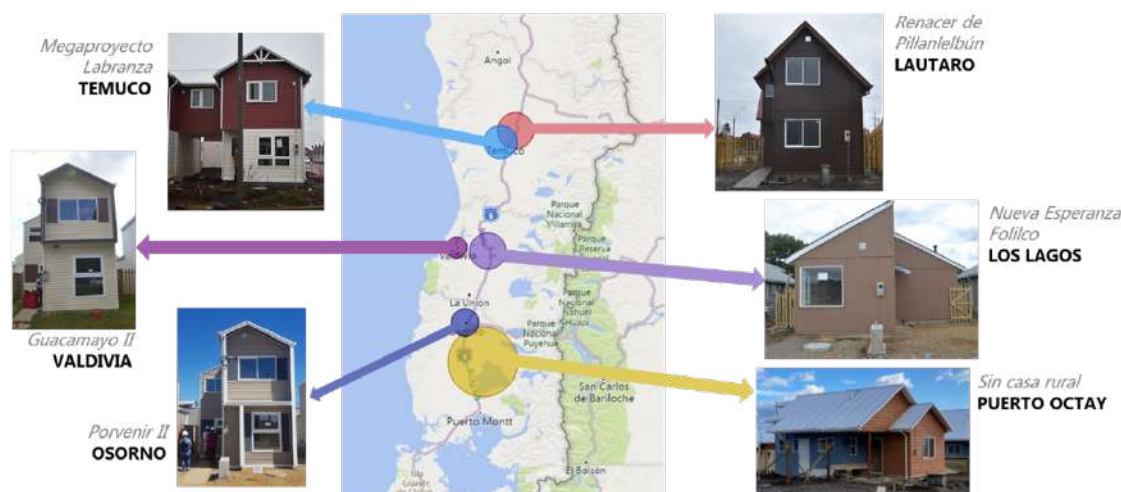


Figura 66: localización e individualización de los resultados promedio de ensayos de hermeticidad en comunas afectas y no afectas a regulación PDA.

A continuación, la Figura 67 muestra los resultados de hermeticidad promedio de cada localidad ensayada, los colores se condicen con la imagen anterior. Cabe destacar que se separa el estudio por: regiones, Los Lagos, Los Ríos y La Araucanía; regulación, con o sin PDA (a la izquierda con PDA a la derecha sin PDA). Además, en el gráfico se incorporan con diseño de línea parámetros de evaluación: en gris se observa la línea base de hermeticidad al paso del aire en viviendas de materialidad ligera (madera) según el Manual de hermeticidad al aire²² y se observa el promedio nacional de hermeticidad en viviendas; en amarillo punteado la reglamentación del PDA de Temuco

²² Citec UBB y DECON UC.

que corresponde a 7 ach, y en naranja punteado la reglamentación PDA de Osorno y Valdivia correspondiente a 5 ach.

A grandes rasgos se puede observar que ningún proyecto cumple con la reglamentación actual, pero en Valdivia el proyecto de Guacamayo II se acerca bastante teniendo un promedio de 5,3 ach cuando el límite máximo según la reglamentación es de 5,00 ach. Se observa también que el promedio obtenido en todos los ensayos realizados es de 14,96 ach a 50Pa; además para cada comuna ensayada se ha agregado una barra de error con la cual se muestra el rango del 90% de los ensayos realizados. En general se cuenta con una desviación estándar de 9,9, es decir, un rango de 5 a 24,92 ach esto es alentador con respecto a los valores que se tenían de forma bibliográfica.

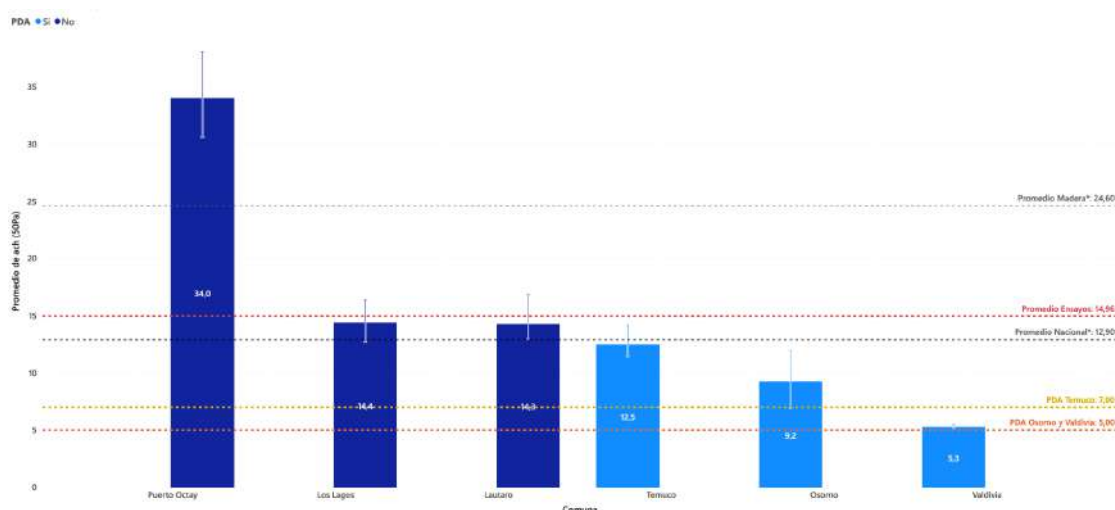


Figura 67: promedio de renovaciones de aire por hora en las comunas evaluadas, comparado con criterios de evaluación. *dato obtenido desde el Manual de Hermeticidad²³

Tal como se observa en la Figura 67, las comunas que están afectas a la regulación PDA tienen mejores resultados en cuanto al desempeño hermético. Pero, también existe una segunda correlación con la completitud de las especificaciones técnicas relacionadas con la hermeticidad, esto se observa en la Figura 68, donde se observa que en el cuadrante superior izquierdo están las comunas con mayor completitud de especificaciones técnicas y menor indicador de cambios de aire por hora (ach n50); las líneas punteadas representan el valor promedio del 50%. Es así como Valdivia y Osorno tienen las EETT más completas y el promedio de ach n50 más bajo, así mismo Puerto Octay tiene el indicador ach más elevado y las EETT menos completas. Se observa también que las comunas de Los Lagos y Lautaro tienen EETT más completas que Temuco, pero esta última tiene un mejor desempeño de hermeticidad, esto se explicaría por la especificación en si misma, es decir, los elementos que se utilizan en las viviendas no afectas a PDA, tales como las ventanas con operador de cierre las cuales tienen características deficientes en cuanto al control de infiltraciones de aire. Es por esto que la principal diferencia se da por estar afectos o no a la normativa y en segundo lugar se encuentra la importancia de unas especificaciones técnicas completas.

²³ Citec UBB y DECON UC.

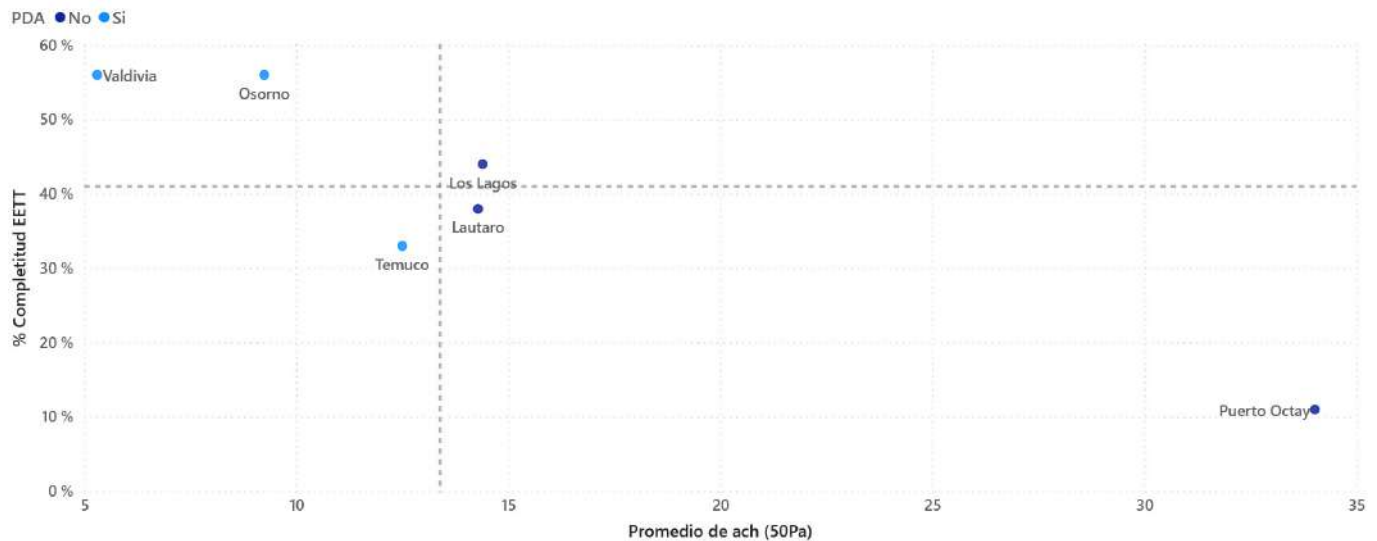


Figura 68: relación de desempeño hermético versus el porcentaje de completitud de las EETT en términos de partidas relacionadas con la hermeticidad de las viviendas.

Los principales aspectos por considerar para obtener resultados óptimos, fuera de la regulación, son: (i) especificaciones técnicas, completas y detalladas; (ii) capacitación del equipo profesional; (iii) capacitación de la mano de obra; (iv) correcto acopio y utilización de los materiales; (v) criterios de inspección y seguimiento de estas; y por último (vi) características del diseño de la vivienda.

También se analizó el factor de forma de las viviendas, calculado según la superficie de envolvente de muros versus el volumen de la vivienda. En este aspecto, no se encontraron relaciones directas o representativas, el factor de forma promedio es de 0.83 con una desviación estándar de 0.13; pero como se observa en la Figura 69 una relación lineal, el $R = 0.23$, por lo que para esta muestra las variables no están relacionadas. En cambio, el análisis de la relación de la superficie de envolvente opaca versus la superficie de vanos, si tiene una relación directa en el desempeño de hermeticidad al paso del aire, si bien el $R=0.69$, lo que no representa una relación directa y estrecha, si se puede inferir que con una relación de vanos/opaco menor se obtiene un $n50$ menor.

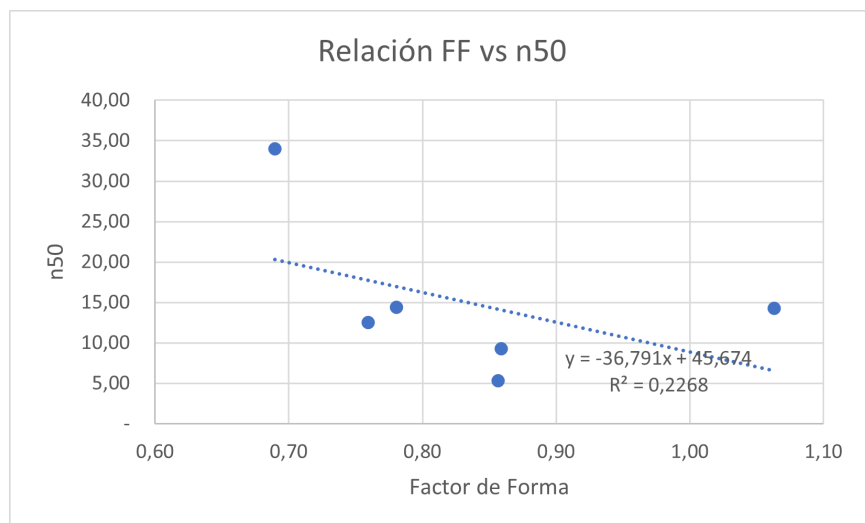


Figura 69: relación factor de forma versus n50

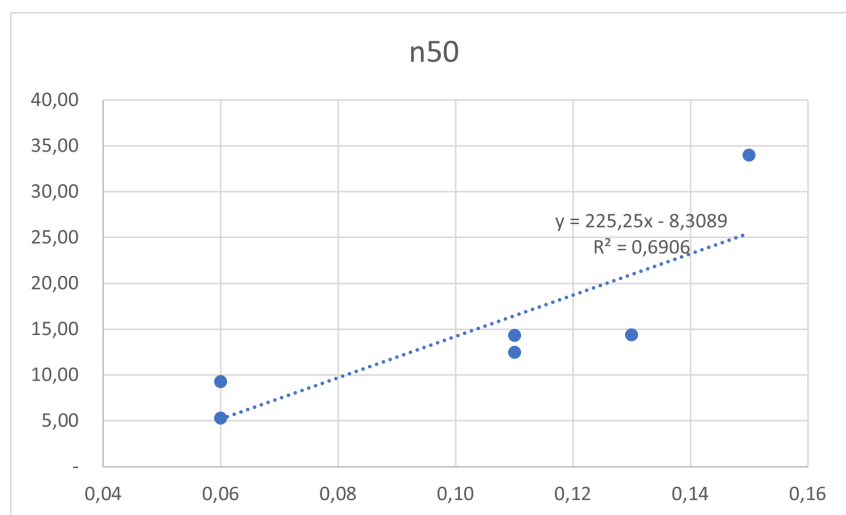


Figura 70: relación superficie vano envoltente/superficie opaca versus n50

RESULTADOS INDIVIDUALIZADOS

Para realizar un análisis particular de las viviendas ensayadas se dispone de la tabla resumen siguiente, donde se puede observar el valor de hermeticidad de la vivienda en ach a 50Pa, y el EfLa.

Tabla 15: resultados de ensayos individualizados

N°	Región	Comuna	Constructora	Proyecto	ach (50Pa)	EfLa 4 Pa	PDA
1	Los Lagos	Osorno	Peña & Peña	Porvenir II	7,00	252,5	Si
2	Los Lagos	Osorno	Peña & Peña	Porvenir II	8,46	258,8	Si
3	Los Lagos	Osorno	Peña & Peña	Porvenir II	5,93	162,7	Si
4	Los Lagos	Osorno	Peña & Peña	Porvenir II	8,54	229,2	Si
5	Los Lagos	Osorno	Peña & Peña	Porvenir II	6,59	198,4	Si
6	Los Lagos	Osorno	Peña & Peña	Porvenir II	8,01	210,4	Si
7	Los Lagos	Osorno	Peña & Peña	Porvenir II	9,36	253,9	Si
8	Los Lagos	Osorno	Peña & Peña	Porvenir II	7,35	176,6	Si
9	Los Lagos	Osorno	Peña & Peña	Porvenir II	7,10	208,1	Si
10	Los Lagos	Osorno	Peña & Peña	Porvenir II	10,83	363,2	Si
11	Los Lagos	Osorno	Peña & Peña	Porvenir II	7,64	250,0	Si
12	Los Lagos	Osorno	Peña & Peña	Porvenir II	6,99	226,0	Si
13	Los Lagos	Osorno	Peña & Peña	Porvenir II	13,78	364,8	Si
14	Los Lagos	Osorno	Peña & Peña	Porvenir II	10,80	271,2	Si
15	Los Lagos	Osorno	Peña & Peña	Porvenir II	9,68	282,6	Si
16	Los Lagos	Osorno	Peña & Peña	Porvenir II	11,40	311,3	Si
17	Los Lagos	Osorno	Peña & Peña	Porvenir II	11,81	235,2	Si
18	Los Lagos	Osorno	Peña & Peña	Porvenir II	10,38	272,8	Si
19	Los Lagos	Osorno	Peña & Peña	Porvenir II	10,66	287,4	Si
20	Los Lagos	Osorno	Peña & Peña	Porvenir II	12,56	402,1	Si
21	Los Lagos	Osorno	Peña & Peña	Nueva Ilusión	9,68	281,0	Si
22	Los Lagos	Osorno	Peña & Peña	Nueva Ilusión	10,98	293,6	Si
23	Los Lagos	Puerto Octay	Ingesur Ltda	Sin Casa Rural	33,49	1133,0	No
24	Los Lagos	Puerto Octay	Ingesur Ltda	Sin Casa Rural	32,57	1119,0	No

N°	Región	Comuna	Constructora	Proyecto	ach (50Pa)	EfLa 4 Pa	PDA
25	Los Lagos	Puerto Octay	Ingesur Ltda	Sin Casa Rural	30,69	1019,0	No
26	Los Lagos	Puerto Octay	Ingesur Ltda	Sin Casa Rural	33,87	1135,5	No
27	Los Lagos	Puerto Octay	Ingesur Ltda	Sin Casa Rural	34,35	1123,0	No
28	Los Lagos	Puerto Octay	Ingesur Ltda	Sin Casa Rural	30,38	971,3	No
29	Los Lagos	Puerto Octay	Ingesur Ltda	Sin Casa Rural	37,55	1313,5	No
30	Los Lagos	Puerto Octay	Ingesur Ltda	Sin Casa Rural	39,30	1270,0	No
31	La Araucanía	Temuco	Luis Sáez	Megaproyecto Labranza	11,97	307,3	Si
32	La Araucanía	Temuco	Luis Sáez	Megaproyecto Labranza	12,56	348,2	Si
33	La Araucanía	Temuco	Luis Sáez	Megaproyecto Labranza	12,38	309,0	Si
34	La Araucanía	Temuco	Luis Sáez	Megaproyecto Labranza	11,61	320,0	Si
35	La Araucanía	Temuco	Luis Sáez	Megaproyecto Labranza	9,66	252,4	Si
36	La Araucanía	Temuco	Luis Sáez	Megaproyecto Labranza	11,75	310,5	Si
37	La Araucanía	Temuco	Luis Sáez	Megaproyecto Labranza	12,44	332,2	Si
38	La Araucanía	Temuco	Luis Sáez	Megaproyecto Labranza	12,47	338,7	Si
39	La Araucanía	Temuco	Luis Sáez	Megaproyecto Labranza	14,67	447,2	Si
40	La Araucanía	Temuco	Luis Sáez	Megaproyecto Labranza	13,43	355,3	Si
41	La Araucanía	Temuco	Luis Sáez	Megaproyecto Labranza	11,48	317,9	Si
42	La Araucanía	Temuco	Luis Sáez	Megaproyecto Labranza	12,48	351,0	Si
43	La Araucanía	Temuco	Luis Sáez	Megaproyecto Labranza	14,18	388,3	Si
44	La Araucanía	Temuco	Luis Sáez	Megaproyecto Labranza	11,64	311,4	Si
45	La Araucanía	Temuco	Luis Sáez	Megaproyecto Labranza	11,65	s/i	Si
46	La Araucanía	Temuco	Luis Sáez	Megaproyecto Labranza	14,02	397,2	Si
47	La Araucanía	Temuco	Luis Sáez	Megaproyecto Labranza	10,86	s/i	Si
48	La Araucanía	Temuco	Luis Sáez	Megaproyecto Labranza	12,03	287,9	Si
49	La Araucanía	Temuco	Luis Sáez	Megaproyecto Labranza	15,02	385,0	Si
50	La Araucanía	Temuco	Luis Sáez	Megaproyecto Labranza	13,69	351,9	Si
51	La Araucanía	Lautaro	Dadelco	El Renacer de Pillanlelbún	17,61	238,4	No
52	La Araucanía	Lautaro	Dadelco	El Renacer de Pillanlelbún	14,62	313,9	No

N°	Región	Comuna	Constructora	Proyecto	ach (50Pa)	EfLa 4 Pa	PDA
53	La Araucanía	Lautaro	Dadelco	El Renacer de Pillanlelbún	16,80	394,6	No
54	La Araucanía	Lautaro	Dadelco	El Renacer de Pillanlelbún	12,95	317,3	No
55	La Araucanía	Lautaro	Dadelco	El Renacer de Pillanlelbún	16,52	404,6	No
56	La Araucanía	Lautaro	Dadelco	El Renacer de Pillanlelbún	13,65	374,2	No
57	La Araucanía	Lautaro	Dadelco	El Renacer de Pillanlelbún	17,45	347,2	No
58	La Araucanía	Lautaro	Dadelco	El Renacer de Pillanlelbún	13,07	291,8	No
59	La Araucanía	Lautaro	Dadelco	El Renacer de Pillanlelbún	14,45	397,4	No
60	La Araucanía	Lautaro	Dadelco	El Renacer de Pillanlelbún	15,04	409,2	No
61	La Araucanía	Lautaro	Dadelco	El Renacer de Pillanlelbún	12,93	297,9	No
62	La Araucanía	Lautaro	Dadelco	El Renacer de Pillanlelbún	13,74	359,5	No
63	La Araucanía	Lautaro	Dadelco	El Renacer de Pillanlelbún	13,84	365,6	No
64	La Araucanía	Lautaro	Dadelco	El Renacer de Pillanlelbún	13,60	364,5	No
65	La Araucanía	Lautaro	Dadelco	El Renacer de Pillanlelbún	12,78	295,8	No
66	La Araucanía	Lautaro	Dadelco	El Renacer de Pillanlelbún	14,20	406,6	No
67	La Araucanía	Lautaro	Dadelco	El Renacer de Pillanlelbún	12,99	340,0	No
68	La Araucanía	Lautaro	Dadelco	El Renacer de Pillanlelbún	13,03	323,5	No
69	La Araucanía	Lautaro	Dadelco	El Renacer de Pillanlelbún	13,46	336,7	No
70	La Araucanía	Lautaro	Dadelco	El Renacer de Pillanlelbún	12,97	326,8	No
71	Los Ríos	Los Lagos	W&M	Nueva Esperanza Folilco	14,29	252,0	No
72	Los Ríos	Los Lagos	W&M	Nueva Esperanza Folilco	11,60	257,4	No
73	Los Ríos	Los Lagos	W&M	Nueva Esperanza Folilco	18,48	470,9	No
74	Los Ríos	Los Lagos	W&M	Nueva Esperanza Folilco	14,05	588,9	No
75	Los Ríos	Los Lagos	W&M	Nueva Esperanza Folilco	14,15	277,4	No
76	Los Ríos	Los Lagos	W&M	Nueva Esperanza Folilco	13,82	322,2	No
77	Los Ríos	Valdivia	Peña & Peña	Guacamayo	5,19	113,3	Si
78	Los Ríos	Valdivia	Peña & Peña	Guacamayo	5,15	106,8	Si
79	Los Ríos	Valdivia	Peña & Peña	Guacamayo	5,57	137,1	SI

Se tiene como resultado que para todos los ensayos el promedio de renovaciones de aire es de 14,12 ach con una desviación estándar de 7,36 ach.

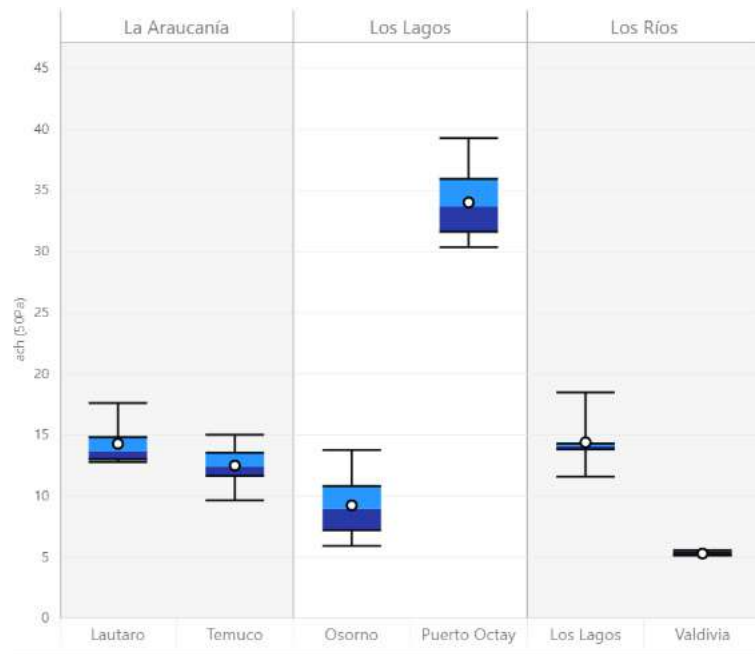


Figura 71: resultados individualizados por proyecto

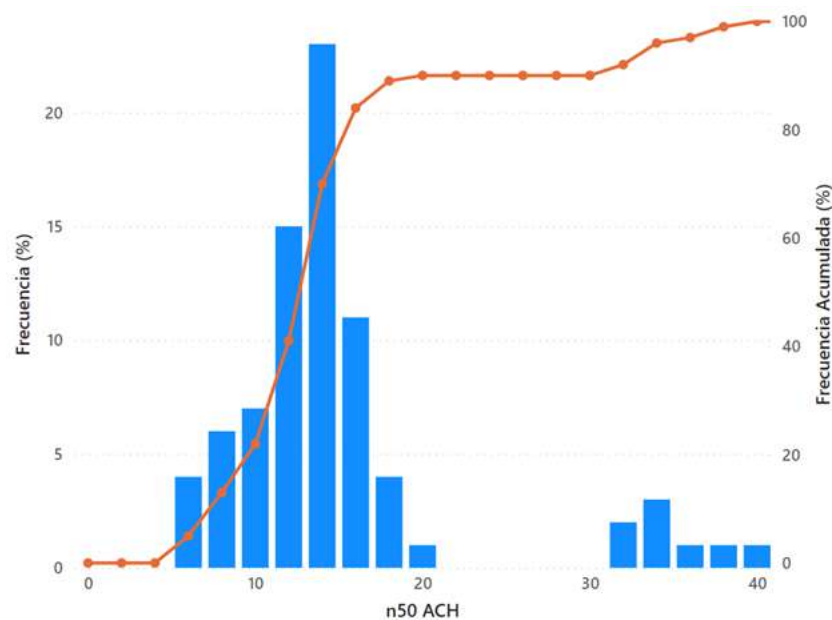


Figura 72: frecuencia y frecuencia acumulada de valores de hermeticidad (n50) de la muestra ensayada.

Del gráfico anterior se observa que el 70% de las viviendas ensayadas tiene resultados inferiores a 14 ach, la concentración de resultados está entre las 12 y 16 ach, siendo la moda 14 ach; también se observa que hay datos aislados por sobre las 32 ach, estos corresponden a la comuna de Puerto Octay.

COMUNA DE OSORNO

Los resultados generales se encuentran todos realizados según la metodología antes descrita y se adaptan a los estándares requeridos por la norma NCh3295.

A continuación, se muestra una tabla resumen de los resultados combinados de cada muestra ensayada en la comuna de Osorno. De los cuales se obtiene un promedio de cambios de aire por hora de 9.24 ACH a 50Pa y un promedio de 260.85 cm² de infiltraciones EfLa a 4 Pa.

Tabla 16: Resultados de infiltraciones para las 20 muestras ensayadas

Muestra	Lote	ACH 50Pa	EfLa 4 Pa
1	2	7,0	252,5
2	3	8,5	258,8
3	8	5,9	162,7
4	13	8,5	229,2
5	14	6,6	198,4
6	21	8,0	210,4
7	23	9,4	253,9
8	27	7,3	176,6
9	28	7,1	208,1
10	32	10,8	363,2
11	33	7,6	250,0
12	34	7,0	226,0
13	35	13,8	364,8
14	68	10,8	271,2
15	69	9,7	282,6
16	70	11,4	311,3
17	71	11,8	235,2
18	72	10,4	272,8
19	73	10,7	287,4
20	87	12,6	402,1

Para lograr estándares de 5 renovaciones de aire por hora a 50 pascales (ACh_{50}) en la vivienda y el grado de estanqueidad al viento de $7 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ a 100 pascales en puertas y ventanas, el estudio de la Universidad de la Frontera UFRO, propone lo siguiente:

- Para el control de infiltraciones se considera como barrera de aire el elemento “placa de OSB” y/o “barrera de vapor” (polietileno). La barrera debe ser continua y sellada con cinta mono adhesiva, evitando al máximo los cortes y traslapando 0.05 m como mínimo el sello. En caso de los ductos de instalaciones sanitarias, eléctricas u otra, se debe utilizar el mismo tipo de cinta para encamisar la interrupción de la barrera, manteniendo siempre una continuidad en el material. Además, se deben considerar sellos mono adhesivos en todas las canalizaciones y perforaciones de las instalaciones (cualquiera sea su función) según las exigencias del decreto supremo 47 (DS N°47).
- Se debe aplicar sello en sobrecimientos previo al montaje de solera inferior de amarre mediante espuma tipo compriband, con el fin de evitar que la humedad ascienda por capilaridad al muro y además evitar pérdidas de energía por infiltraciones.
- También se deben considerar burletes bajo las puertas y sellos auto adhesivos en todo el perímetro de los marcos, tanto de puertas como ventanas. Estos productos serán de la marca y modelo que la empresa estima conveniente, siempre y cuando permitan mantener el nivel de hermeticidad de la vivienda.

Teniendo en cuenta estas consideraciones a la hora de construir, se muestran los resultados obtenidos en las 20 viviendas ensayadas. Se tiene que: (i) ninguna vivienda cumple con las exigencias del PDAO; (ii) La gran mayoría de las viviendas tienen un desempeño mejor al promedio nacional; (iii) Todas las viviendas muestran un estándar de renovaciones de aire mucho mejor que el promedio de las viviendas construidas con madera. El valor máximo obtenido fue de 13.78 ach correspondiente a la vivienda N° 35 la cual no se encontraba totalmente terminada. Por otro lado, el mínimo obtenido fue de 5,93 ach; la desviación estándar fue de 2,14 y el promedio es de 9.24 ach. Es preocupante la desviación estándar ya que para dar cumplimiento a la normativa se requiere como máximo obtener 5 ach, pero con una desviación estándar de 2,14 la variabilidad y posible riesgo de que las viviendas no cumplan el estándar es elevado. Esto se podría originar por la falta de un estándar de construcción el cual debiese ser inspeccionado con criterios claros y medibles, para lo cual se requiere de capacitación de la mano de obra y de los profesionales.

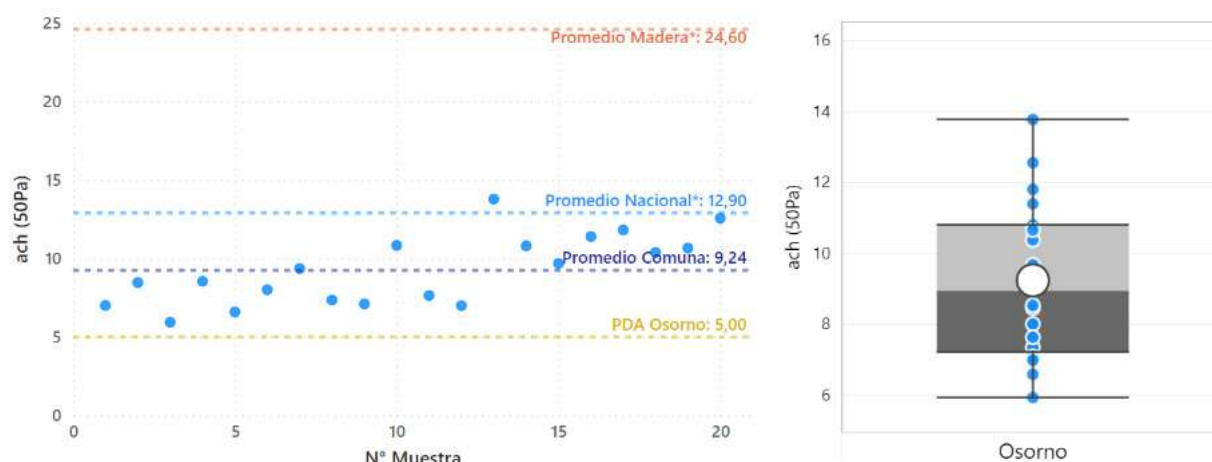


Figura 73: gráfico de los resultados de ACh50 para cada muestra ensayada, Osorno, Los Lagos. *dato obtenido desde el Manual de Hermeticidad²⁴

24 Citec UBB y DECON UC.

COMUNA DE PUERTO OCTAY

Esta comuna presenta los resultados más desfavorables, e incluso se posiciona por sobre el promedio de las viviendas de madera, obteniendo un promedio de 34,02 ach con una desviación estándar de 3,10. La vivienda con mejor desempeño obtuvo un valor de 30,38 ach y la peor 39,30 ach; la diferencia es de un 23%.

Los principales problemas observados en la vivienda corresponden a que la arquitectura incorpora la logia dentro de la vivienda, y este es un espacio muy ventilado aumentando así las renovaciones de aire por hora. Se realizó el ensayo dejando ese espacio fuera y el resultado fue un 29% mejor. También tiene un cielo inclinado sin cielo falso en la parte del living comedor, esto genera un volumen de aire mayor que podría traer problemas.

Se destaca que en la comuna de Puerto Octay no existe regulación de infiltraciones de aire, y el conocimiento de esta característica de las viviendas es mínimo. No existe capacitación en la mano de obra y tampoco en el equipo profesional.

Este proyecto ha tenido que enfrentar grandes problemas logísticos, por lo que ha tardado su construcción y han quedado viviendas sin terminar por largos periodos de tiempo, esto puede ser una causa de deterioro de los materiales lo que desencadenaría problemas de hermeticidad.

Como se comentó en la presentación del estudio, es importante la hermeticidad en las viviendas ya que afecta directamente en el confort interior para visualizar este problema de mejor forma se puede analizar el valor de EfLa 4 Pa el cual en promedio es de 1135,5 cm² esto significa tener un vano abierto constantemente de 1 metro por 11,35 cm, al no poder cerrar este espacio se genera una pérdida de calor en la vivienda la cual desencadena en mayores gastos de calefacción.

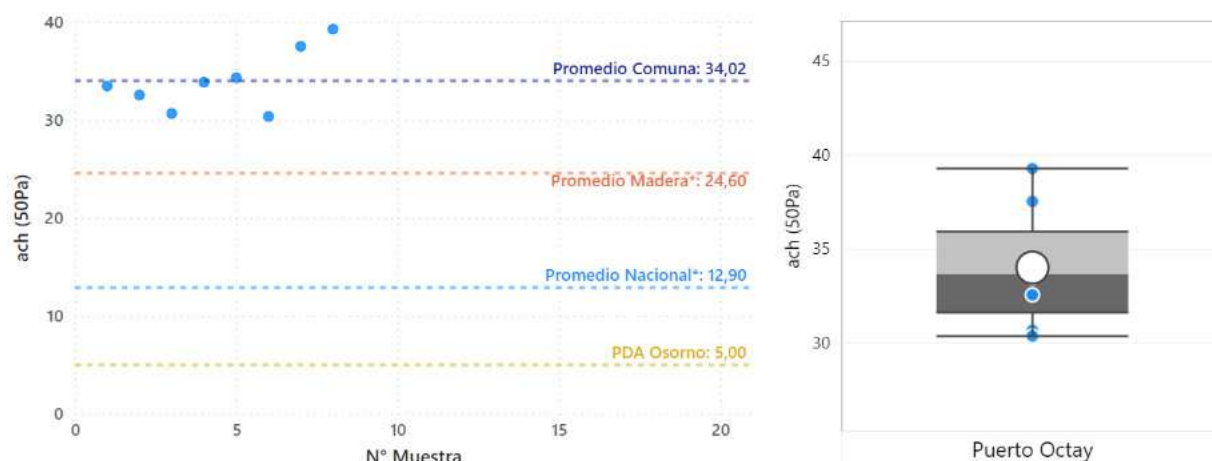


Figura 74: gráfico de los resultados de ACh50 para cada muestra ensayada, Puerto Octay, Los Lagos. *dato obtenido desde el Manual de Hermeticidad²⁵

25 Citec UBB y DECON UC.

COMUNA DE VALDIVIA

En la comuna de Valdivia se analizaron tres viviendas piloto del proyecto Guacamayo II, el promedio fue de 5,30 ach y la desviación estándar de 0,23; si bien la muestra es menor debido a la disponibilidad de viviendas para ensayar dado el avance constructivo del proyecto, los resultados son muy similares entre sí lo que es indicativo de un estándar de construcción similar.

La reglamentación del PDAV es de 5 ach como máximo, si bien esta exigencia no se cumple la diferencia es menor, quizás con mejorar las especificaciones técnicas acorde a las recomendaciones del PDA se podrá obtener el resultado deseado.

Es relevante, que la constructora es la misma del proyecto Porvenir II de Osorno, y ya había trabajado antes en proyectos que incorporaban criterios de hermeticidad en este sentido la empresa constructora ha ganado experiencia en el tema y las soluciones especificadas se logran cada vez mejor, desencadenando un mejor rendimiento de hermeticidad.

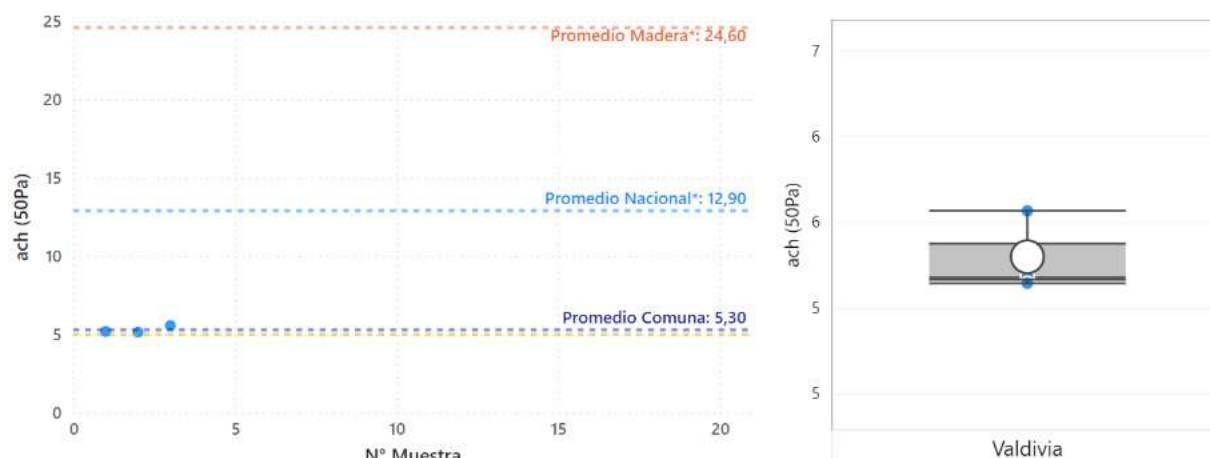
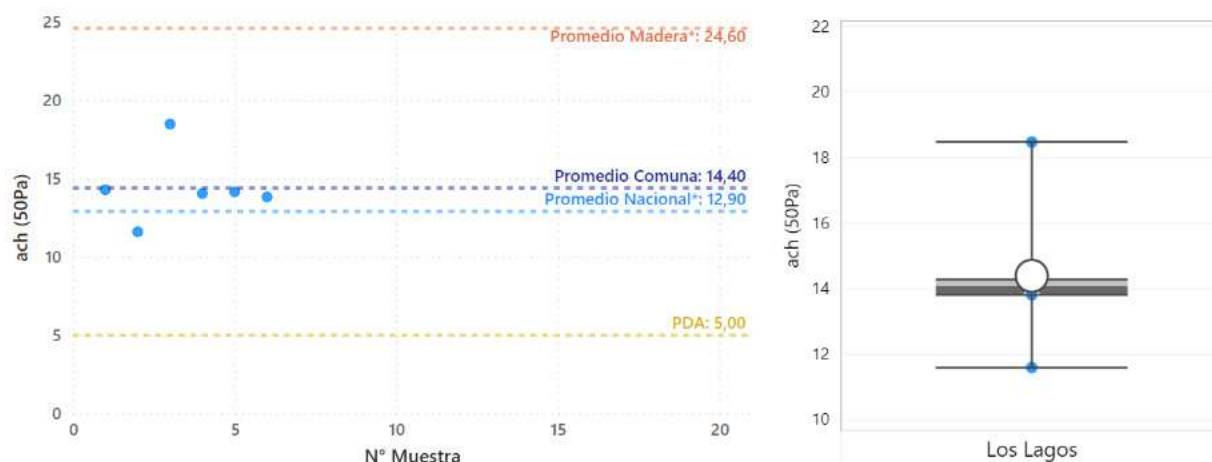


Figura 75: resultados de ACh50 para cada muestra ensayada, Valdivia, Los Ríos. *dato obtenido desde el Manual de Hermeticidad²⁶

²⁶ Citec UBB y DECON UC.

COMUNA DE LOS LAGOS

En Folilco se desarrolló un modelo de vivienda de un piso, se analizaron 6 viviendas las cuales tenían diferentes avances de construcción, el mejor resultado obtenido fue de 11,6 ach y el peor de 18,48 ach. Se debe considerar que para la vivienda más desfavorable no se contaba con cajas eléctricas y faltaban algunos esquineros y guardapolvos, esto último no debería afectar en la hermeticidad de la vivienda ya que la continuidad de la envolvente se da por la estructura del muro barreras de humedad y vapor más placas. La desviación estándar de los resultados es de 2,23 esto corresponde a un 15%.



COMUNA DE TEMUCO

En el Megaproyecto Labranza, las viviendas ya se encontraban terminadas si bien la desviación estándar es de 1,33 la variabilidad que existe entre las diferentes viviendas es alta, el mejor resultado fue de 9,66 ach y el valor más alto es de 14,18 ach, existiendo una diferencia de un 46% esto deja en evidencia que las especificaciones técnicas no son suficientes, ya que todas las viviendas deberían ser iguales, ante esto es importante el papel de la inspección de calidad que asegure el estándar de la vivienda.

El cumplimiento de la normativa es exigente se requiere reducir las infiltraciones en aproximadamente 5,5 renovaciones de aire por hora, esto requiere de esfuerzos conjuntos para entregar los recursos que sean necesarios tanto para incorporar nuevas partidas en los itemizados técnicos, capacitar al personal y obtener experiencia en la materialización de soluciones para la hermeticidad de las viviendas.

²⁷ Citec UBB y DECON UC.

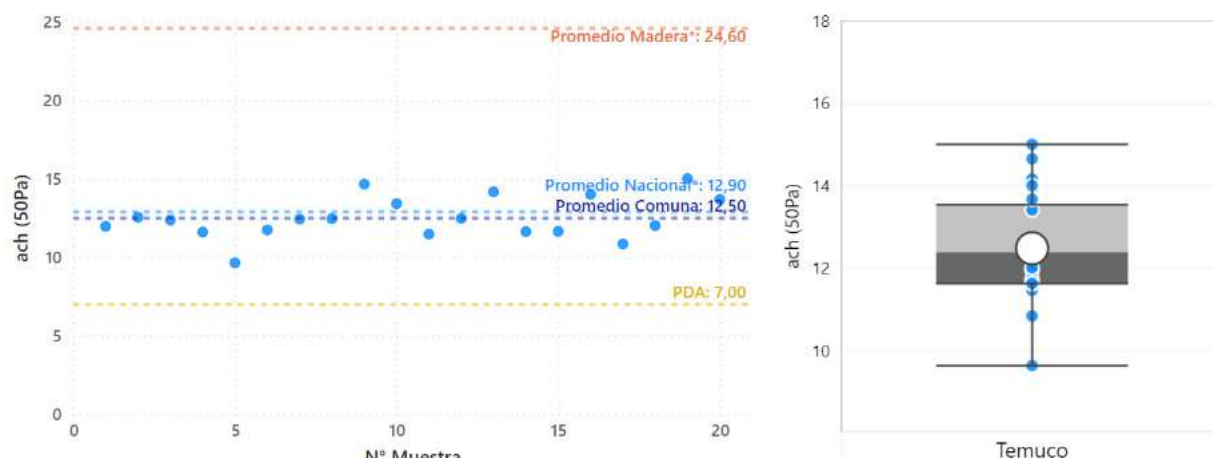


Figura 77: resultados de ACh50 para cada muestra ensayada, Temuco, La Araucanía. *dato obtenido desde el Manual de Hermeticidad²⁸

COMUNA DE LAUTARO

En esta comuna se obtuvo el mejor resultado de hermeticidad de viviendas de las comunas que no están afectas a la regulación del Plan de Descontaminación Atmosférica, se tiene que el promedio es de 14,29 ach y es muy similar a los resultados obtenidos en Temuco que si cuenta con PDA y recursos asociados a ello. Por lo tanto, si por ejemplo se cambiaran las ventanas del proyecto de Pillanlelbún, los resultados de hermeticidad serían muy alentadores.

Cabe destacar que en este proyecto tanto la FTO como el profesional Residente de obra, cursan un diplomado de eficiencia energética donde estudian la hermeticidad de las viviendas. En este proyecto los profesionales a cargo están capacitados, tanto propia de la empresa constructora como de la inspección de obras.

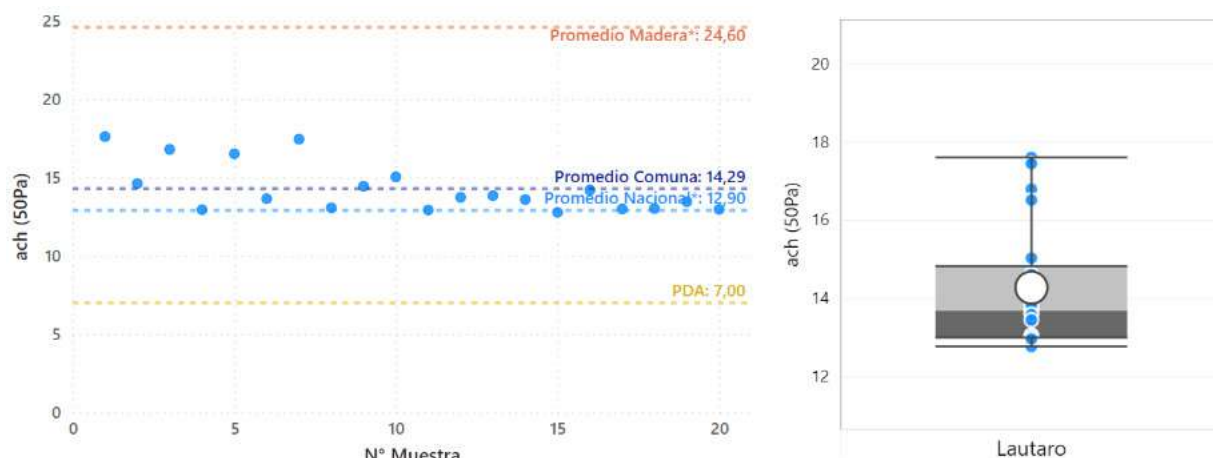


Figura 78: resultados de ACh50 para cada muestra ensayada, Lautaro, La Araucanía *dato obtenido desde el Manual de Hermeticidad²⁹

²⁸ Citec UBB y DECON UC.

²⁹ Citec UBB y DECON UC.

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE HERMETICIDAD DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS

A partir del análisis realizado en los apartados anteriores, se ha detectado la necesidad de identificar en qué soluciones constructivas y/o en qué elemento de la solución constructiva se debe poner énfasis para lograr mejores desempeños de hermeticidad haciendo un análisis costo beneficio de cada propuesta.

Primero se realizó una revisión bibliográfica de diferentes formas de analizar el desempeño hermético de soluciones constructivas. En Chile existe una normativa referente al tema correspondiente a la NCh 3294/2013 - Materiales de construcción – Determinación de la permeabilidad al aire de los materiales – Método de ensayo³⁰. Esta normativa si bien define un método para determinar la permeabilidad al aire de los materiales de construcción, solo permite analizar el material en una probeta rígida o de hoja flexible de 1x1 m; pero no evalúa la permeabilidad al aire de las soluciones de unión. Además, como no se cuenta con el equipamiento necesario para la medición de flujo de aire con una tasa desde 0.001 L/s hasta 18.8 L/s con tolerancia de ± 3 , se decidió realizar una simulación de espacio a ensayar con una línea base conocida, que permita estimar la permeabilidad al aire de diferentes soluciones.

METODOLOGÍA DE ENSAYO

MÓDULO DE ENSAYO

Este módulo se conforma de un recinto de 120x120x200 cm, el cual en la elevación 01 cuenta con dos perforaciones de diámetro 16 mm, la elevación 02 es completamente cerrada; la elevación 03 tiene el espacio de 180x82 para la ubicar la puerta sopladora, y finalmente la elevación 04 cuenta con un espacio de 99x94 mm para la ubicación de muestras. Todas las uniones se encuentran selladas con cintas Rothoblaas tipo *easyband* y *sealband*.



Figura 79: a) estructura de la base del módulo; b) estructura principal del módulo y c) elevación 01

30 INN, «NCh3294 Materiales de construcción - Determinación de la permeabilidad al aire de los materiales - Método de ensayo» (2013).

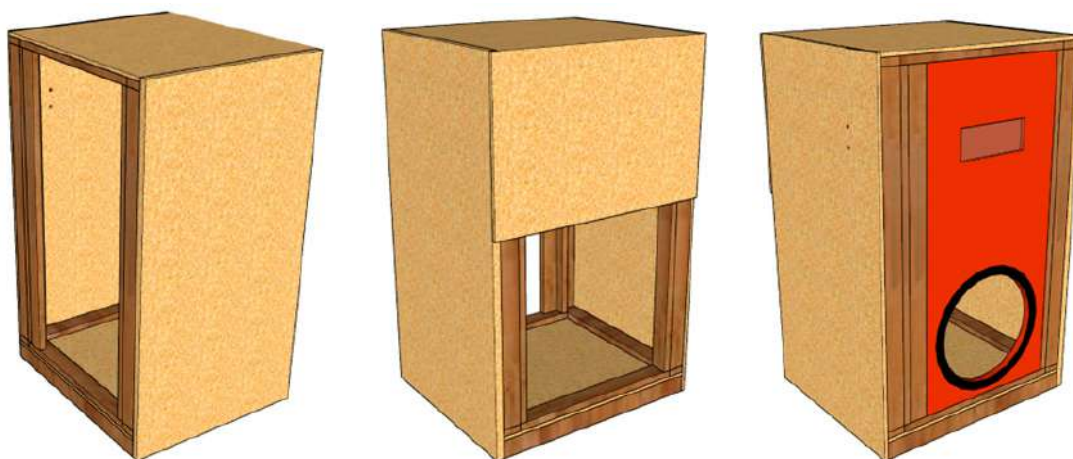


Figura 80: a) elevación 02; b) elevación 03 y c) elevación 04

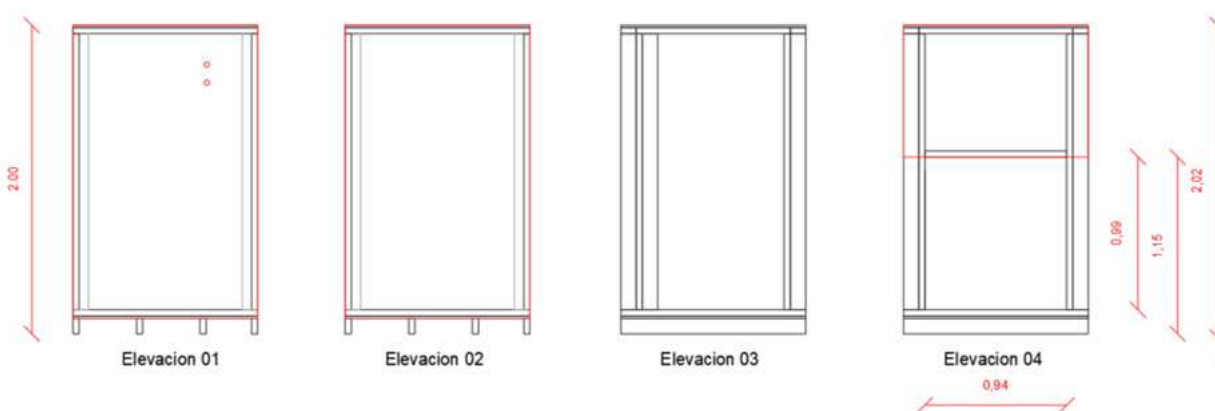


Figura 81: detalle de elevaciones del módulo de ensayos



Figura 82: elevación 04 módulo de ensayos con sellos.



Figura 83: sellos interiores del módulo de ensayo

OBTENCIÓN DE LA LÍNEA BASE

Para obtener la línea base se sella el espacio de muestra con polietileno y cinta adhesiva americana, dadas las condiciones de ensayo y el equipamiento disponible, para lograr obtener medidas válidas se utilizó el rango más pequeño correspondiente a R29 y se realizaron dos perforaciones de diámetro 16 mm para lograr realizar la curva con diferencias de presión desde los 60Pa hasta los 15Pa. Se realizó una línea base para cada día de ensayo promediando 4 ensayos; dos al inicio y dos al final de la jornada de mediciones. La desviación estándar de los promedios de línea base es de 0.551 correspondiente a un 6% del promedio, por lo tanto, para analizar los resultados de cada muestra se toma el valor promedio diario de la línea base.

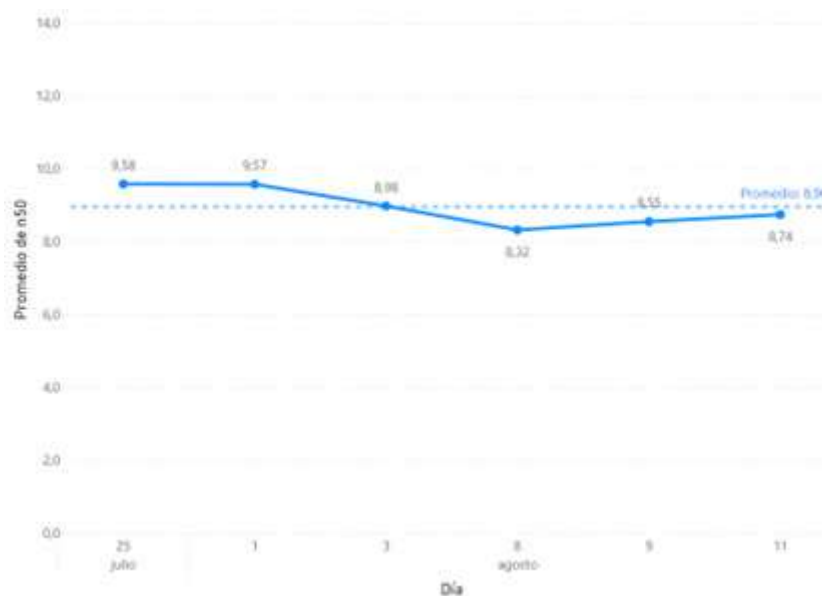


Figura 84: Líneas base consideradas para los ensayos.

La metodología para el cálculo de diferencial de impacto en la hermeticidad al paso del aire de las soluciones se obtuvo, restando el valor de la línea base del día en el cual se realizaron los ensayos.

ENSAYOS REALIZADOS POR TIPO DE SOLUCIÓN CONSTRUCTIVA

Se realizaron ensayos a cuatro tipos de soluciones constructivas: (i) unión de ventana con el entramado de muro; (ii) unión y sello de muros; (iii) tipo de sellos en la unión de soleras y (iv) sellos en las instalaciones eléctricas, específicamente caja de enchufes. Para cada una de estas soluciones se utilizaron tres estándares: (i) Sin PDA, que corresponde al mínimo normativo correspondiente; (ii) con PDA, el cual se aplica a ciertas zonas regidas por estos planes, y (iii) buenas prácticas, correspondiente a sellos con los materiales y sellos disponibles en Chile, apuntando al mejor desempeño ante las infiltraciones de aire.

A continuación, se describen las soluciones que fueron analizadas, la fecha de los ensayos y su línea base correspondiente; el costo de la aplicación de la solución en base a los costos de los materiales 2022 y rendimientos obtenidos del software *Notrasnoches 2022*.

Se evidencia que, para todas las soluciones estudiadas, se observó un mejor desempeño para el estándar de buenas prácticas, seguido por el estándar con PDA y finalmente la solución sin sellos. Pero el impacto o diferencia generada entre una solución y otra depende en gran medida del ítem de estudio.

SOLUCIONES DE UNIÓN DE VENTANA

Para las soluciones de ventana se realizaron tres tipos de ensayos, como se detalla en la figura siguiente. Para hacer el análisis solo de la unión de ventana se tapó la celosía de la misma con polietileno y cinta adhesiva; además a las mediciones se les resta la línea base del día, así la diferencia corresponde a las infiltraciones de aire de la unión y no de otra cosa.

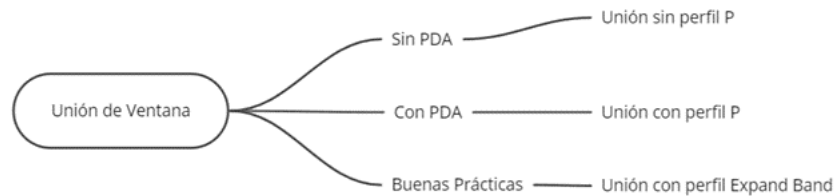


Figura 85: soluciones de unión de ventana ensayadas.



Figura 86: Imágenes del ensayo de unión de ventana

Al realizar los ensayos se obtuvo que la utilización de sellos tipo Expand Band y Perfil P, genera un impacto del 96% y 65% respectivamente. Debido a esto resulta relevante la incorporación de los sellos a las viviendas.

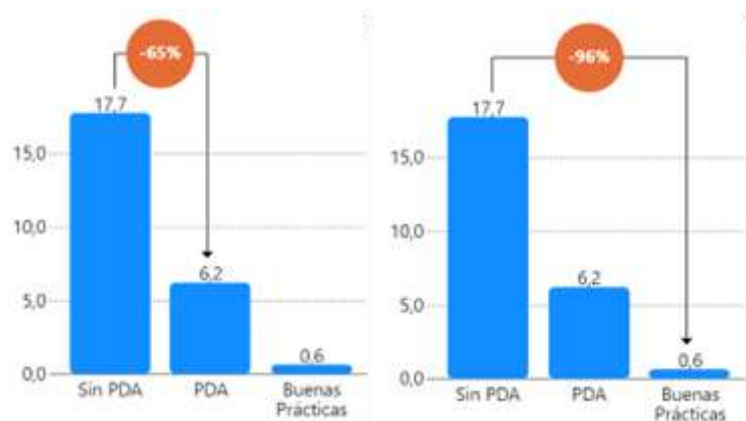


Figura 87: Variación porcentual en el n50 de solución de unión de ventanas para estándar: sin PDA, PDA y Buenas Prácticas

Respecto a los valores en relación a la eficiencia de la solución y el costo de la misma, se tiene que la incorporación de sellos es necesaria, pero para llegar a buenas prácticas se requiere una inversión de un 25% más.

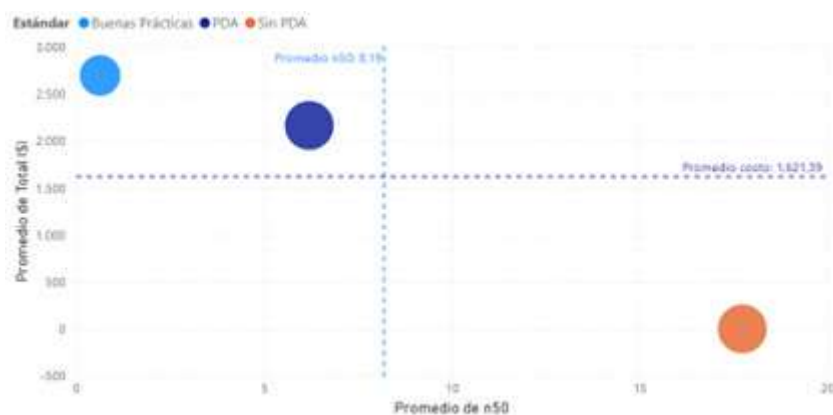


Figura 88: costo de soluciones por unidad fundamental en este caso metro lineal.

Con base en el análisis de los datos obtenidos de los 8 ensayos realizados, y los márgenes de error asociados a cada muestra se logran analizar 72 datos. Se observa que a medida cuando la cantidad de cambios de aire por hora a 50Pa es mayor, la desviación estándar es mayor; perdiendo precisión en las medidas.

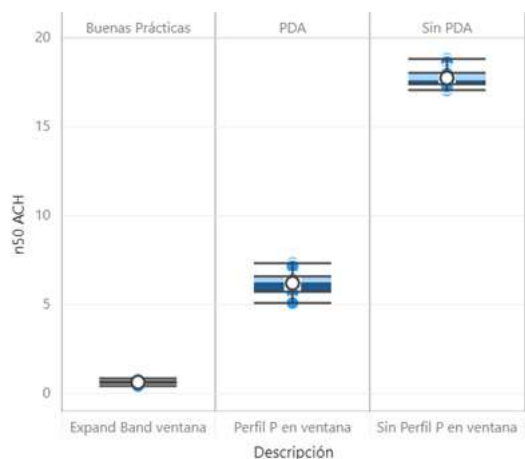


Figura 89: dispersión de ensayos por tipo de solución

SOLUCIONES DE MURO

Las soluciones de muro siguen la misma lógica, siendo evaluadas para los tres estándares a estudiar. Se realizaron muestras de una solución estándar sin PDA correspondiente a ninguna utilización de sellos. Para el estándar PDA se analizaron 3 soluciones, y finalmente para el estándar de buenas prácticas se analizaron 6 tipos de soluciones, combinando diferentes tipos de sellos. El desglose de las muestras se observa en la Figura 90.

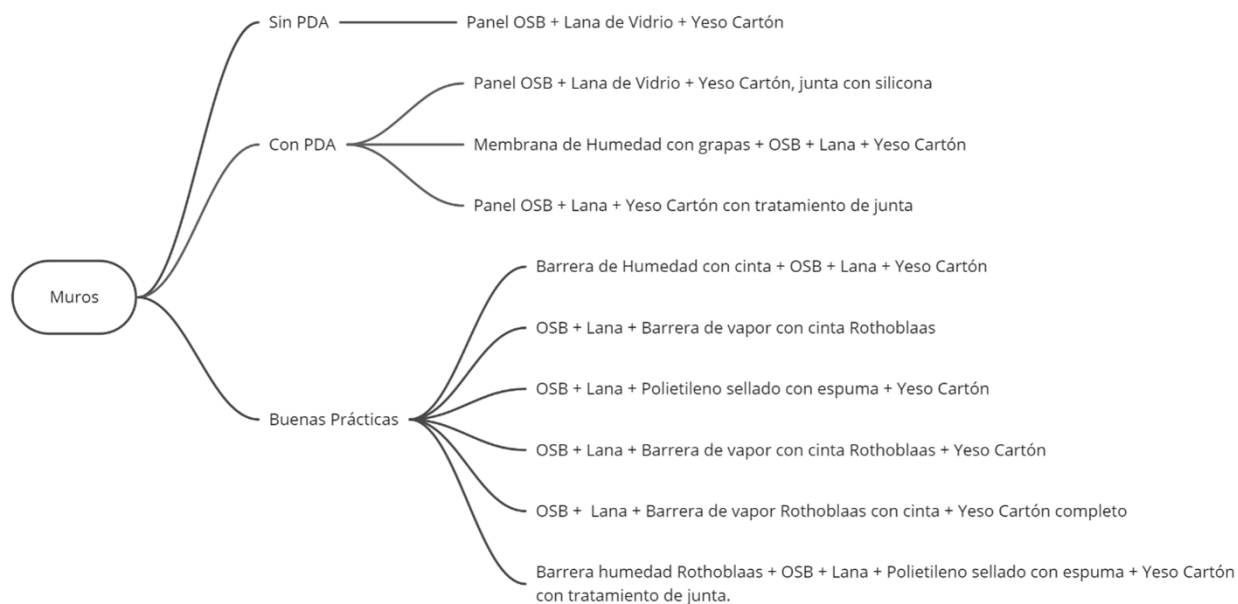


Figura 90: soluciones de muro ensayadas.

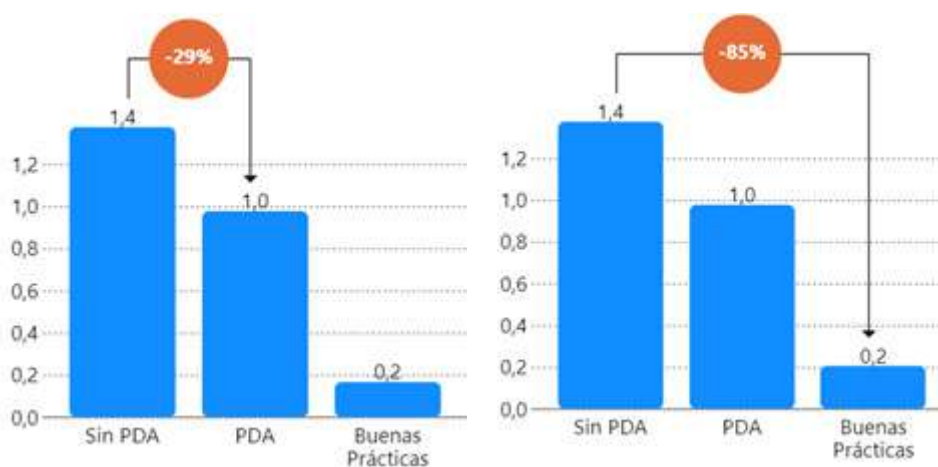


Figura 91: variación porcentual entre diferentes estándares para solución de muro

Si bien, el impacto de la utilización de mejores estándares genera diferencias entre el 29% y el 85%, el valor de cambios es alto. Para obtener un estándar PDA se debe invertir un 73% menos que para lograr un estándar de buenas prácticas. Pero es importante destacar que la diferencia en ach es menor a 1,2 ach; por lo tanto, es importante priorizar los esfuerzos para lograr un sistema que funcione de manera óptima en su conjunto.

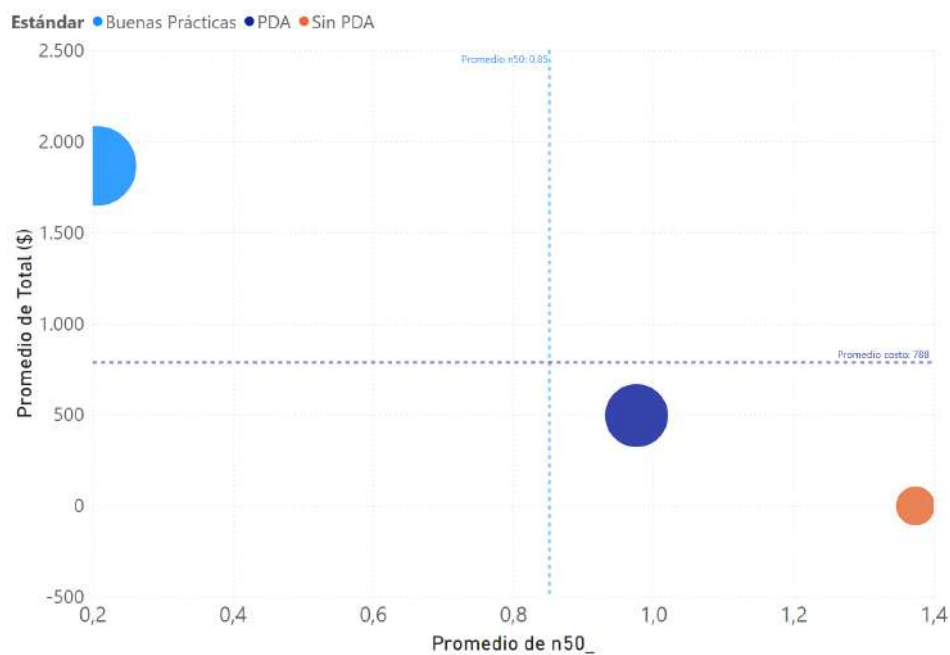


Figura 92: costo de soluciones por unidad fundamental en este caso metro lineal.

Para el caso del estudio de los muros se realizó un análisis con base en 216 observaciones correspondientes a 24 ensayos. Se observa que variadas soluciones de estándar PDA tienen diferente rendimiento, es así como la solución de OSB/Lana de vidrio/Yeso cartón con tratamiento de junta es muy similar al estándar de buenas prácticas, y el tratamiento de junta es considerablemente más efectivo que la unión con silicona.

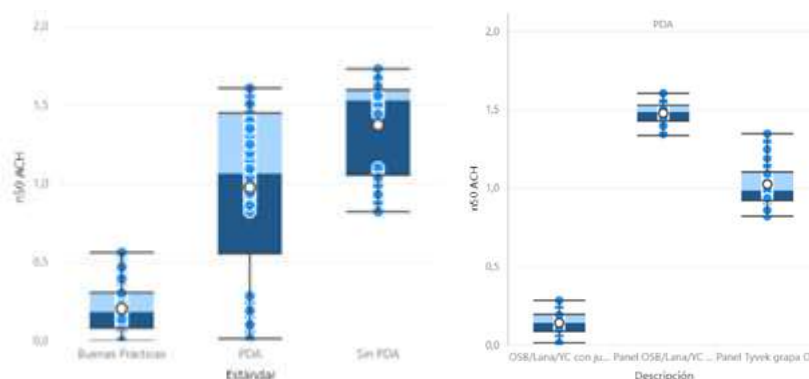


Figura 93: dispersión de muestras ensayadas por tipo de solución y desglose de estándar PDA.

UNIÓN DE SOLERAS

Se ensayaron 4 soluciones de unión de solera, una para el estándar sin PDA una con PDA y dos con buenas prácticas. Cabe destacar que durante la elaboración de las muestras se observa que la condición de la solera de amarre y solera inferior es un factor muy relevante, se debe trabajar con madera seca y sin deformaciones para obtener estos resultados.



Figura 94: uniones de solera ensayadas.



Figura 95: variación porcentual entre diferentes estándares para solución de unión de soleras.

En este ensayo, se obtiene un resultado diferente a lo esperado ya que la solución sin sellos marca un promedio n50 60% menor, por lo tanto, un mejor rendimiento. Esto se puede explicar por la alta variabilidad del ensayo de estándar PDA, lo cual puede afectar el promedio obtenido.

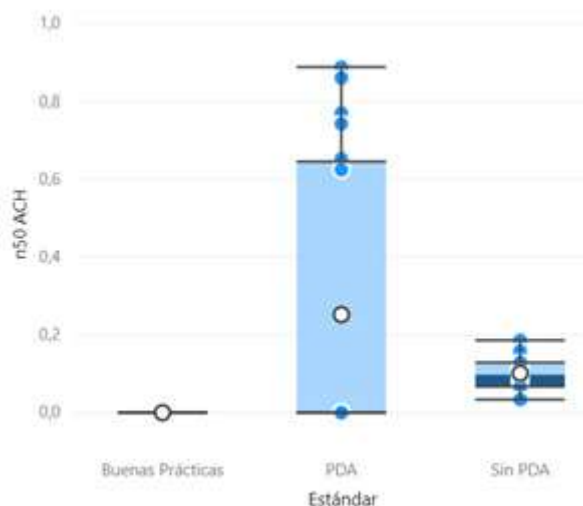


Figura 96: dispersión de muestras ensayadas por tipo de solución

En este caso, no se justifica la inversión en soluciones con estándar Buenas Prácticas ni PDA, dado que la utilización de piezas de madera de alto estándar reflejaría un costo menor para la solución. De todas formas, para obtener un 0.1 más de hermeticidad se pueden utilizar estándares de buenas prácticas.

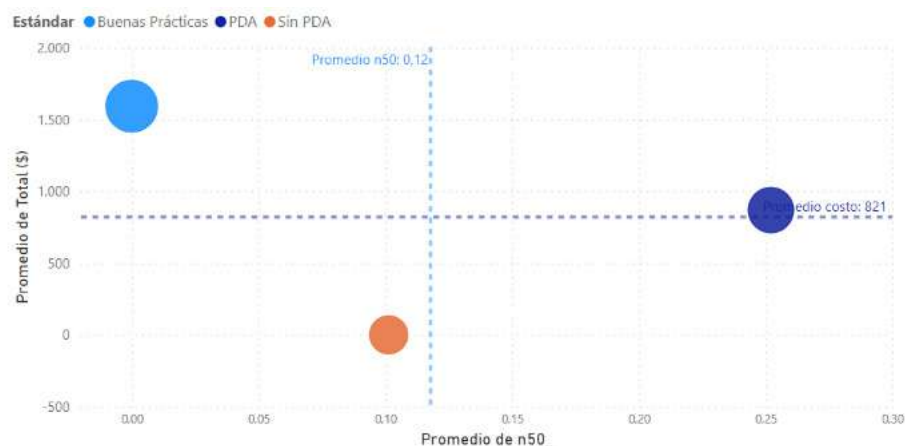


Figura 97: costo de soluciones por unidad fundamental en este caso metro lineal.

UNIÓN DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS

Para la unión de instalaciones eléctricas se considera una caja sin sellos para el estándar sin PDA. Se considera una caja con los sellos especificados en la ficha de hermeticidad del PDA de Osorno para el estándar PDA y finalmente una caja con sellos y sellos a la barrera de vapor para la solución de buenas prácticas.



Figura 98: Soluciones de unión de instalaciones eléctricas ensayadas.

Se observa que la variación entre la solución sin PDA y la con PDA es de un 90% pero solo 0,6 ach de diferencia, por lo tanto, el impacto real de la solución no es tan elevado. Se observa una variabilidad en los resultados de los ensayos de caja sin sellos bastante alto: 0,7 ach, pero se destaca una concentración de resultados hacia el primer quintil, lo que indica que el promedio es mayor que la mediana.

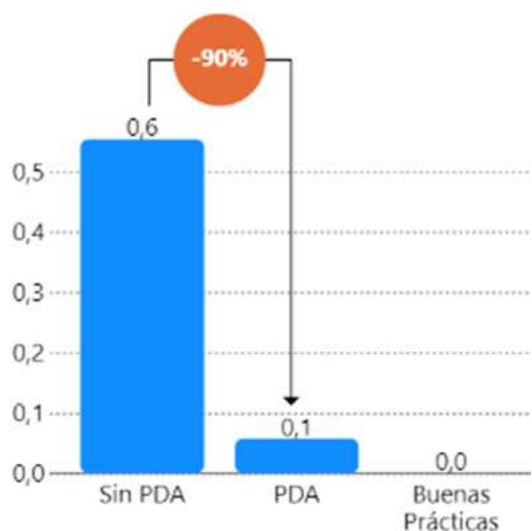


Figura 99: variación porcentual entre diferentes estándares para solución de instalaciones eléctricas.

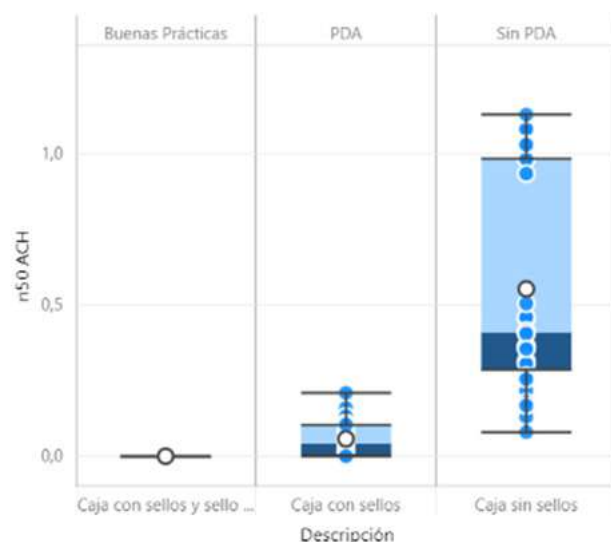


Figura 100: dispersión de muestras ensayadas por tipo de solución

Finalmente, el costo de implementar un mejor estándar para mejorar la hermeticidad de la solución es relevante solo cuando se requieran alcanzar límites menores a los 0.6 ach; de todas formas el costo de la implementación de la solución no es muy elevado, pero se requiere experticia para la elaboración de los sellos dado que no existen en el mercado y la materialización con los productos disponibles es muy detallista, esto puede presentar una barrera a la hora de incorporar estas soluciones en las viviendas.

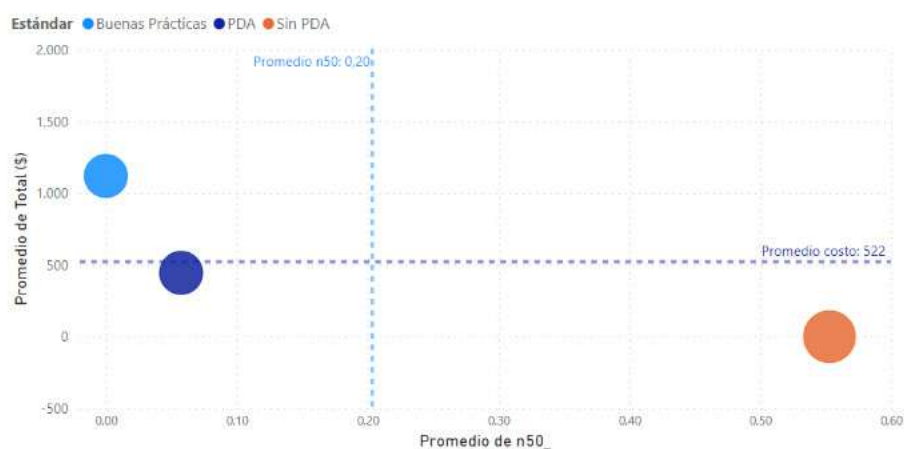


Figura 101: costo de soluciones por unidad fundamental en este caso unidad de caja enchufe.

RECOMENDACIONES PARA LOGRAR UN BUEN DESEMPEÑO EN LA HERMETICIDAD DE LAS VIVIENDAS

En este apartado se mencionarán diferentes medidas que se pueden adoptar para obtener mejores desempeños en cuanto a la hermeticidad de las viviendas. La gran mayoría de las recomendaciones se extrae de bibliografía tanto nacional como internacional.

Lo primero que se debe entender para diseñar viviendas herméticas es que las infiltraciones de aire y la ventilación de la vivienda son cosas separadas que deben tener un diseño propio. La diferencia principal está en el control. La ventilación debe y puede ser controlada, pero las infiltraciones son pasos de aire involuntarios. El objetivo debe ser construir herméticamente y ventilar de forma apropiada³¹.

Los beneficios de construir y habitar viviendas herméticas, son entre otros, los siguientes: (i) evitar corrientes de aire; (ii) ahorrar energía en calefacción y enfriamiento de las viviendas; (iii) evitar condensaciones, suele ocurrir que las zonas donde se producen infiltraciones son lugares fríos propensos a producir condensación; (iv) protección acústica, las infiltraciones de aire permiten el paso del sonido y ruido por lo tanto evitarlas generará un mejor estándar acústico, lo mismo ocurre con el (v) traspaso de olores; (vi) protección del gas radón en cual se genera en el subsuelo y una construcción hermética reduciría la posibilidad de inhalación del gas³².

Para lograr estos beneficios a continuación se presentan algunas recomendaciones:

LA REGLA DEL LÁPIZ

Para lograr la hermeticidad de las viviendas lo más importante es asegurar la continuidad, para esto se utiliza la regla del lápiz o método de la línea roja, donde en un plano de sección del edificio debe ser posible trazar una línea continua para delinear la envolvente de la vivienda.

DE LOS MATERIALES

Es necesario que los materiales utilizados para obtener la continuidad de la línea roja sean herméticos, y además se debe detallar correctamente la forma de unión entre el mismo material y entre materiales diferentes, para cada tipo de unión existe un tipo de cinta o material que asegure la hermeticidad.

³¹ Citec UBB y DECON UC.

³² Control y gestión de obras, «Hermeticidad en vivienda: tan desconocida como necesaria», Control y gestión de obras (blog), 7 de octubre de 2020, <https://controlygestiondeobras.es/hermeticidad-vivienda/>.

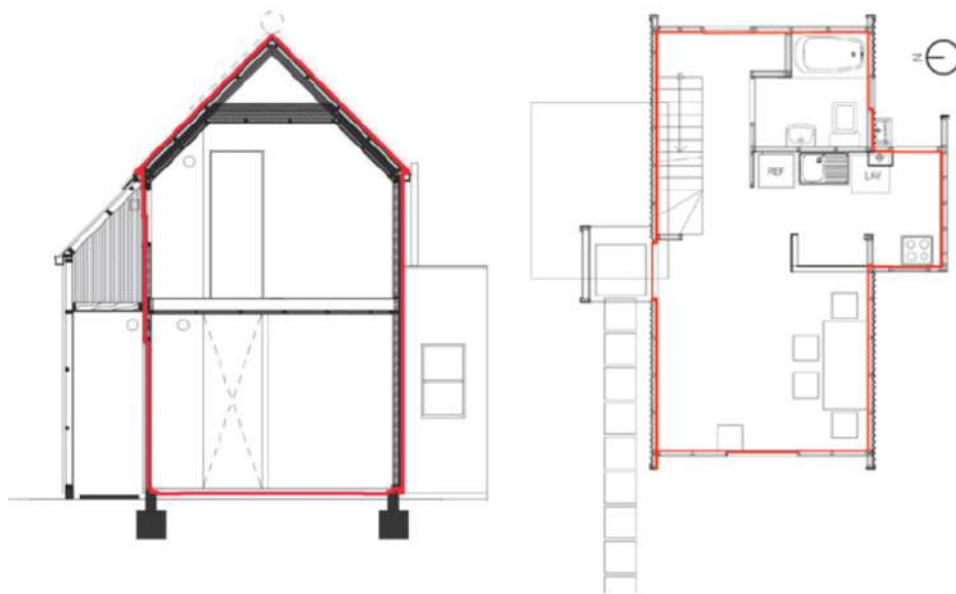


Figura 102: método de la línea roja o regla del lápiz³³

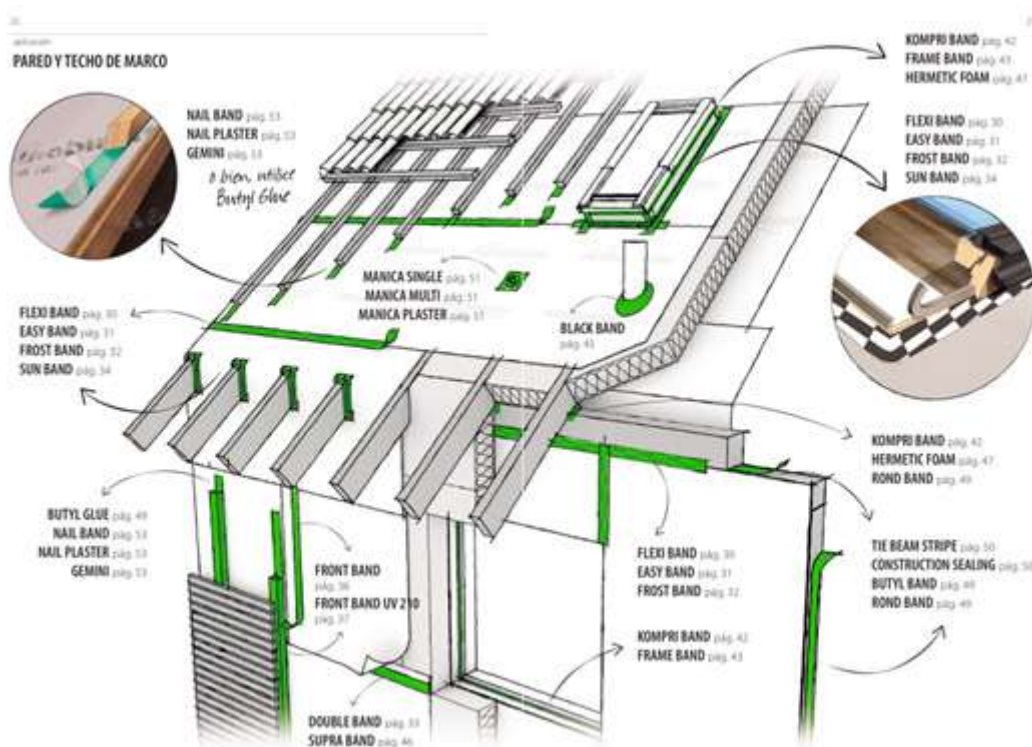


Figura 103: cintas y sellos que se pueden utilizar en muros y techumbres³⁴

³³ Citec UBB y DECON UC, «Manual de Hermeticidad al aire de Edificaciones».

³⁴ ROTHOBLAAS, «Smartbook Hermeticidad», accedido 25 de agosto de 2022, <https://pdf.archiexpo.es/pdf/rotho-blaas/hermeticidad/60438-279149.html>.

Es importante una buena especificación de los materiales debido a que existen algunos como sellos de silicona o espuma de poliuretano que pierden sus propiedades estancas con el paso del tiempo y el impacto de las condiciones climáticas, por lo que se debe tener en cuenta que esos sellos se deben renovar.

Respecto al punto anterior, existen dos ubicaciones para los sellos, a la vista y al interior del sistema constructivo, para esta última la reparación y/o recambio en muchas ocasiones puede ser más destructiva que constructiva, debido a que se debe levantar el revestimiento. Por lo tanto, la recomendación es utilizar sellos, barreras y láminas que aseguren la estanqueidad para todos los años de vida útil de la vivienda, para esto también es necesario velar por una correcta instalación y no hacer agujeros, además de asegurar el buen estado de los materiales, principalmente al resguardar las condiciones de acopio de estos.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Las especificaciones técnicas cumplen un rol muy relevante en la hermeticidad de las viviendas. Se debe definir en la etapa de diseño, ya que los sellos y barreras en su mayoría son parte del interior de los revestimientos, lo que dificulta un reacondicionamiento para la hermeticidad. Los únicos sellos que se pueden instalar y recambiar con facilidad son aquellos que están visibles, por ejemplo, burletes de puertas y ventanas y sellos de silicona.

Una barrera importante de las especificaciones técnicas es la complejidad para mostrar las soluciones. Para ejecutar un proyecto se requiere revisar toda la información: planos, especificaciones, detalles, itemizados, presupuestos, entre otros. Muchas veces estos documentos no tienen los detalles suficientes, por ejemplo, en la especificación técnica de maderas generalidades se detalla que se debe incorporar un sello entre la solera inferior y el sobrecimiento, pero este no se detalla en el plano o es difícil encontrar donde se considera esta partida en el Itemizado.

Una opción, es la utilización de la metodología BIM donde no se trabaja con planos sino con modelos los cuales deberían incluir las soluciones incorporadas en las viviendas para asegurar la hermeticidad.

Se debe mejorar la forma en la cual se muestra la información, una buena solución es la unificación de las soluciones de hermeticidad, en fichas las cuales se incorporen al legajo de planos, itemizados y EETT.

CAPACITACIÓN

La capacitación se divide en tres áreas: (i) mano de obra, (ii) profesionales de obra y arquitectos y (iii) inspectores de obra. Para la mano de obra, se recomienda capacitación general de que significa la hermeticidad y como lograr buenos resultados siguiendo las indicaciones de instalación de los fabricantes. En caso de ser factible, se recomienda entregar certificados de capacitación los cuales entreguen un valor agregado a las personas.



Como ya ha sido mencionado en capítulos anteriores, la hermeticidad se logra principalmente cuando se desarrolla desde la etapa de diseño, es por esto, que los arquitectos diseñadores de los proyectos deben conocer a cabalidad las soluciones constructivas que aseguran la hermeticidad al paso del aire, es así como las fichas disponibles en MINVU son un recurso mínimo. Además, se debe encargar de mostrar estos detalles en planos y especificarlos en documentos técnicos.

Por otro lado, los profesionales de obra, quienes comúnmente se encargan del presupuesto, cotizaciones y llevar a cabo los proyectos, requieren de capacitación para realizar una correcta solicitud de materiales, guiar la construcción y asegurar el estándar de calidad especificado. De esta misma forma y para evitar la dispersión de resultados, se recomienda una inspección técnica de obra rigurosa y estándar, para lo cual los inspectores técnicos deben estar debidamente capacitados.

CONSIDERAR LA VIVIENDA COMO UN TODO

Como se ha tratado en este estudio, se tiene que la hermeticidad responde a un conjunto de soluciones y no por elemento aislado. Es así como tener una unión de solera muy hermética pero una unión de ventana poco hermética dará como resultado una vivienda poco hermética, porque los flujos de aire aumentarían por la ventana.

En este sentido, se debe ser consciente en el diseño y especificación técnica para la hermeticidad al paso del aire, de equilibrar las soluciones para obtener resultados a nivel vivienda óptimos.

CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO DE LA VIVIENDA

En cuanto a las características propias de la vivienda, para reducir las infiltraciones se recomienda diseñar para evitar las incidencias del viento, para esto el manual de hermeticidad al aire de edificación aconseja una protección en el acceso y en zonas más ventosas incluso se aconseja una doble piel. Si bien estas recomendaciones no son eficientes en costo para las viviendas se debe tener en consideración diseñar resguardando las inclemencias del viento.

La característica más relevante acorde a la construcción de viviendas sociales con madera corresponde a realizar un diseño completo de la vivienda analizando cada singularidad, pues no se obtienen resultados beneficiosos si, por ejemplo, solo se incorporan sellos y barreras, pero no se especifican ventanas y puertas herméticas.



BIBLIOGRAFÍA

Citec UBB y DECON UC. «Manual de Hermeticidad al aire de Edificaciones», 2014.

Control y gestión de obras. «Hermeticidad en vivienda: tan desconocida como necesaria». *Control y gestión de obras* (blog), 7 de octubre de 2020. <https://controlygestiondeobras.es/hermeticidad-vivienda/>.

INFOR. «El Dilema de la Leña. ¿Cómo reducir la contaminación del aire sin incrementar el costo en calefacción?» Boletín BES, Bosques - Energía - Sociedad: Observatorio de los Combustibles Derivados de la Madera OCDM, octubre de 2015. <https://bibliotecadigital.infor.cl/bitstream/handle/20.500.12220/20966/31499.pdf;jsessionid=09D806E38A211B8757F3A59E074D75D6?sequence=1>.

INN. NCh 44 – Procedimientos de muestreo para inspección por atributos – Planes de muestreo indexados por nivel de calidad aceptable (AQL) para la inspección lote por lote (2007).

———. NCh 3295 - Aislación térmica – Determinación de la permeabilidad del aire en edificios – Método de presurización por medio del ventilador (2013).

———. NCh3294 Materiales de construcción - Determinación de la permeabilidad al aire de los materiales - Método de ensayo (2013).

Ministerio de Vivienda y Urbanismo. *Estándares de construcción sustentable para viviendas de Chile*. Vol. IV: Materiales y Residuos, 2018.

———. «Planes de Descontaminación Atmosférica». Accedido 25 de agosto de 2022. <https://www.minvu.gob.cl/planes-de-descontaminacion-atmosferica/>.

NHBC Foundation. *Ageing and Airtightness: How Dwelling Air Permeability Changes over Time*. NHBC Foundation, 2011. <https://www.nhbcfoundation.org/publication/ageing-and-airtightness/>.

NTM 011/3 2014 Requisitos y mecanismos de acreditación para acondicionamiento ambiental de las edificaciones. Parte 3: Calidad del aire interior. (2014).

Ossio, F., A. De Herde, y L. Veas. «Exigencias europeas para infiltraciones de aire: Lecciones para Chile». *Revista de la construcción* 11, n.o 1 (abril de 2012): 54-63. <https://doi.org/10.4067/S0718-915X2012000100006>.

Poza-Casado, Irene, Vitor E. M. Cardoso, Ricardo M. S. F. Almeida, Alberto Meiss, Nuno M. M. Ramos, y Miguel Ángel Padilla-Marcos. «Residential Buildings Airtightness Frameworks: A Review on the Main Databases and Setups in Europe and North America». *Building and Environment* 183 (1 de octubre de 2020): 107221. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107221>.

ROTHOBLAAS. «Smartbook Hermeticidad». Accedido 25 de agosto de 2022. <https://pdf.archiexpo.es/pdf/rotho-blaas/hermeticidad/60438-279149.html>.

Waldo Bustamante, Rodrigo Cepeda, Paula Martínez, y Hernán Santa María. «Eficiencia energética en vivienda social: un desafío posible.», 253-82. Concurso Políticas Públicas, 2009. <https://politicaspUBLICAS.uc.cl/wp-content/uploads/2015/02/eficiencia-energetica-en-vivienda-social-un-desafio-posible.pdf>.

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1:	Distribución de zonas donde se realizaron ensayos Blower Door	9
Figura 2:	mapa ilustrativo de regulación de hermeticidad según zonas térmicas (basado en NTM 011/3-2014). Detalle de las regiones y comunas estudiadas donde se observa que las comunas de Osorno y Valdivia las cuales están afectas a PDA este es menos restrictivo que la propuesta de norma.	13
Figura 3:	línea base de clase de infiltraciones de aire para diferentes materialidades. Fuente: modificado desde CitecUBB, 2014.	15
Figura 4:	contexto normativo de hermeticidad en Europa	17
Figura 5:	cambios en la hermeticidad de las viviendas con el paso del tiempo.	18
Figura 6:	(i) ficha solución constructiva para la hermeticidad al paso del aire en encuentro solera inferior con sobrecimiento en vivienda con estructura de madera, PDA Valdivia.	19
Figura 7:	(ii) ficha solución constructiva para la hermeticidad al paso del aire en encuentro solera superior con alero en vivienda con estructura de madera, PDA Osorno.	20
Figura 8:	(iii) ficha solución constructiva para la hermeticidad al paso del aire en encuentro de placas de revestimiento de la misma materialidad, PDA Osorno.	21
Figura 9:	(iv) ficha solución constructiva para la hermeticidad al paso del aire en encuentro de artefactos eléctricos con muros, PDA Osorno.	22
Figura 10:	(v) ficha solución constructiva para la hermeticidad al paso del aire en encuentro de artefactos eléctricos con cielos, PDA Osorno.	23
Figura 11:	(vi) ficha solución constructiva para la hermeticidad al paso del aire en el traspaso de ductos de ventilación en viviendas de tabiquería de madera, PDA Osorno.	24
Figura 12:	(vii) ficha solución constructiva para la hermeticidad al paso del aire en las ventanas de viviendas de tabiquería de madera, PDA Osorno	25
Figura 13:	(viii) ficha solución constructiva para la hermeticidad al paso del aire en las puertas de viviendas de tabiquería de madera, PDA Osorno	26
Figura 14:	(ix) ficha solución constructiva para la hermeticidad al paso del traspaso de ducto de estufa a través de techumbre, PDA Valdivia.	27
Figura 15:	partes del blower door 5000 retrotec. Fuente: Retrotec	29
Figura 16:	Instalación de Blower Door Retrotec 5000	29

Figura 17:	range de ajuste para el ventilador Fuente: FanTestic ©.	30
Figura 18:	a la izquierda fuente de poder, a la derecha manómetro digital. Fuente: Retrotec .	30
Figura 19:	vivienda tipo Porvenir II, Osorno.	34
Figura 20:	Planta arquitectura 1er piso vivienda tipo: regular. Porvenir II, Osorno.	35
Figura 21:	Planta arquitectura 2do piso vivienda tipo: regular. Porvenir II, Osorno.	35
Figura 22:	Ubicación y tipo de ventilación, extracción de aire y principales fugas detectadas con humo. Porvenir II, Osorno.	36
Figura 23:	detalle encuentro tabique-sobrecimiento, plano de arquitectura Porvenir II, Osorno.	37
Figura 24:	detalle encuentro solera superior con alero, plano de arquitectura Porvenir II, Osorno.	38
Figura 25:	unión entre placas de yeso cartón, cornisas y esquineros con silicona. Porvenir II, Osorno.	38
Figura 26:	colocación de placas de yeso cartón, Porvenir II, Osorno.	39
Figura 27:	caja de enchufe en muro perimetral. Porvenir II, Osorno.	39
Figura 28:	Detalles ventana, Porvenir II, Osorno.	41
Figura 29:	resumen especificaciones técnicas Osorno	42
Figura 30:	vivienda tipo, Sin Casa Rural, Puerto Octay	43
Figura 31:	plano de planta vivienda comité Sin Casa Rural, Puerto Octay.	44
Figura 32:	Identificación de ventilaciones y principales puntos de infiltraciones, comité sin casa rural, Puerto Octay.	44
Figura 33:	sello de silicona entre paneles, comité sin casa rural, Puerto Octay.	45
Figura 34:	cocina/estufa integrada en la vivienda, comité sin casa rural, Puerto Octay.	46
Figura 35:	resumen de especificaciones técnicas para la Región de Los Lagos.	46
Figura 36:	planos de planta elevaciones y vista de los recintos de las viviendas de Guacamayo II, Valdivia.	48
Figura 37:	ubicación de aperturas en viviendas, Guacamayo II, Valdivia.	48
Figura 38:	ubicación de ventilaciones en viviendas, Guacamayo II, Valdivia.	49
Figura 39:	Resumen de completitud de especificaciones técnicas Valdivia.	49

Figura 40:	plano de planta y recintos, Folilco, Los Lagos.	50
Figura 41:	detalle de ubicación y tipo de aperturas, Folilco, Los Lagos.	51
Figura 42:	detalle de ubicación y tipo de ventilaciones, Folilco, Los Lagos	51
Figura 43:	detalle encuentro panel de muro con alero, Folilco, Los Lagos.	52
Figura 44:	unión entre paneles, Folilco, Los Lagos.	52
Figura 45:	Resumen de completitud de especificaciones técnicas por proyecto región Los Ríos.	53
Figura 46:	vivienda de un agua sin alero, Labranza, Temuco	55
Figura 47:	planos de planta, fotos de elevaciones y recintos de las viviendas en Labranza, Temuco.	55
Figura 48:	ubicación de aperturas y principales puntos de fuga, Labranza, Temuco.	56
Figura 49:	diagrama de posición de ventilaciones, vivienda Labranza, Temuco.	56
Figura 50:	solera inferior en viviendas de Labranza, Temuco.	57
Figura 51:	detalle constructivo encuentro solera superior con alero, Labranza, Temuco.	57
Figura 52:	ducto de estufa, Labranza, Temuco.	58
Figura 53:	resumen completitud de las especificaciones técnicas por proyecto, incluido Temuco.	59
Figura 54:	planos de planta, elevaciones e imágenes de los recintos de las viviendas del Renacer de Pillanlelbún, Lautaro	61
Figura 55:	detalle de ubicación de aperturas y principales puntos de infiltración.	61
Figura 56:	ubicación de ventilaciones en las viviendas del Renacer de Pillanlelbún, Lautaro.	62
Figura 57:	ventana con tres hojas y operador de cierre, Pillanlelbún, Lautaro.	63
Figura 58:	completitud de las especificaciones técnicas de la región de La Araucanía (iguales).	63
Figura 59:	Elementos del Lote 08, sellados con polietileno y cinta adhesiva. Porvenir II, Osorno.	66
Figura 60:	a) cinta adhesiva mal instalada en el encuentro con la ventana, b) ventanas sin sobre marco, c.1) ausencia de cajas y tapas eléctricas, c.2) ausencia de sellos en los encuentros de las placas de yeso cartón.	66

Figura 61:	pasada para elementos de ventilación, Porvenir II, Osorno.	67
Figura 62:	ausencia de sello en perímetro exterior de ventana, Labranza, Temuco.	68
Figura 63:	problema constructivo en Labranza, Temuco.	68
Figura 64:	problemas de acopio en zonas lluviosas, Puerto Octay, Los Lagos.	69
Figura 65:	deformación de puerta genera apertura en la parte superior, Pillanlelún, Lautaro.	69
Figura 66:	localización e individualización de los resultados promedio de ensayos de hermeticidad en comunas afectas y no afectas a regulación PDA.	74
Figura 67:	promedio de renovaciones de aire por hora en las comunas evaluadas, comparado con criterios de evaluación. *dato obtenido desde el Manual de Hermeticidad . . .	75
Figura 68:	relación de desempeño hermético versus el porcentaje de completitud de las EETT en términos de partidas relacionadas con la hermeticidad de las viviendas.	76
Figura 69:	resultados individualizados por proyecto	77
Figura 70:	frecuencia y frecuencia acumulada de valores de hermeticidad (n50) de la muestra ensayada.	77
Figura 71:	gráfico de los resultados de ACh50 para cada muestra ensayada, Osorno, Los Lagos. *dato obtenido desde el Manual de Hermeticidad	81
Figura 72:	gráfico de los resultados de ACh50 para cada muestra ensayada, Puerto Octay, Los Lagos. *dato obtenido desde el Manual de Hermeticidad	81
Figura 73:	resultados de ACh50 para cada muestra ensayada, Valdivia, Los Ríos. *dato obtenido desde el Manual de Hermeticidad	83
Figura 74:	resultados de ACh50 para cada muestra ensayada, Los Lagos, Los Ríos. *dato obtenido desde el Manual de Hermeticidad	84
Figura 75:	resultados de ACh50 para cada muestra ensayada, Temuco, La Araucanía. *dato obtenido desde el Manual de Hermeticidad	85
Figura 76:	resultados de ACh50 para cada muestra ensayada, Lautaro, La Araucanía *dato obtenido desde el Manual de Hermeticidad	86
Figura 77:	a) estructura de la base del módulo; b) estructura principal del módulo y c) elevación 01	87
Figura 78:	a) elevación 02; b) elevación 03 y c) elevación 04	87
Figura 79:	detalle de elevaciones del módulo de ensayos.	88
Figura 80:	elevación 04 módulo de ensayos con sellos.	89



Figura 81:	sellos interiores del módulo de ensayo	89
Figura 82:	Líneas base consideradas para los ensayos.	89
Figura 83:	soluciones de unión de ventana ensayadas.	89
Figura 84:	Imágenes del ensayo de unión de ventana.	90
Figura 85:	Variación porcentual en el n50 de solución de unión de ventanas para estándar: sin PDA, PDA y Buenas Prácticas	91
Figura 86:	costo de soluciones por unidad fundamental en este caso metro lineal.	91
Figura 87:	dispersión de ensayos por tipo de solución	92
Figura 88:	soluciones de muro ensayadas.	92
Figura 89:	variación porcentual entre diferentes estándares para solución de muro	92
Figura 90:	costo de soluciones por unidad fundamental en este caso metro lineal.	93
Figura 91:	dispersión de muestras ensayadas por tipo de solución y desglose de estándar PDA.	93
Figura 92:	uniones de solera ensayadas.	94
Figura 93:	variación porcentual entre diferentes estándares para solución de unión de soleras.	94
Figura 94:	dispersión de muestras ensayadas por tipo de solución.	95
Figura 95:	costo de soluciones por unidad fundamental en este caso metro lineal.	95
Figura 96:	Soluciones de unión de instalaciones eléctricas ensayadas.	95
Figura 97:	variación porcentual entre diferentes estándares para solución de instalaciones eléctricas.	96
Figura 98:	dispersión de muestras ensayadas por tipo de solución.	96
Figura 99:	costo de soluciones por unidad fundamental en este caso unidad de caja enchufe.	97
Figura 100:	método de la línea roja o regla del lápiz	97
Figura 101:	cintas y sellos que se pueden utilizar en muros y techumbres	97
Figura 102:	gráfico de filtraciones de aire - presurización	99
Figura 103:	gráfico de filtraciones de aire - despresurización	99

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1:	regulación de infiltraciones de aire a nivel nacional según PDA vigente	11
Tabla 2:	estándar de infiltraciones de aire en comunas en las cuales se realizó el levantamiento	12
Tabla 3:	clase de infiltración de aire máxima permitida para la envolvente térmica. Fuente: NTM 011/2014	12
Tabla 4:	estándares de hermeticidad para envolventes de viviendas normalizados a 50Pa.	16
Tabla 5:	número de viviendas por proyecto	28
Tabla 6:	Lista de chequeo previa a la realización del ensayo blower door.	31
Tabla 7:	Tipos de vivienda en Porvenir II, Osorno, Los Lagos.	33
Tabla 8:	incidencia de singularidades o elementos en la hermeticidad de las viviendas	64
Tabla 9:	análisis de precio unitario soluciones de sello de poliuretano monocomponente para encuentros de soleras con sobrecimientos y aleros.	70
Tabla 10:	análisis de precio unitario de sellos en canalizaciones y cajas eléctricas	71
Tabla 11:	análisis de precio unitario de sellos para la hermeticidad en ductos de ventilación	71
Tabla 12:	análisis de precio unitario para encuentro de marco de ventana corredera con muro de madera	72
Tabla 13:	análisis de precio unitario para encuentro de marco de ventana abatible con muro de madera	72
Tabla 14:	análisis de precio unitario para encuentro de marco de puerta con un muro de entramado de madera.	73
Tabla 15:	resultados de ensayos individualizados	78
Tabla 16:	Resultados de infiltraciones para las 20 muestras ensayadas	82
Tabla 17:	Puntos de datos de presurización media	110
Tabla 18:	Puntos de datos de presurización corregida.	111
Tabla 19:	Logaritmos de puntos de datos de flujo y presión	112
Tabla 20:	Puntos de datos de despresurización medidos	112
Tabla 21:	puntos de datos de despresurización corregida.	113
Tabla 22:	Logaritmos de puntos de datos de flujo y presión	114

ANEXOS

DATOS PARA INGRESO DE INFORMACIÓN AL PROGRAMA DE CÁLCULO FANTESTIC®

A continuación, se muestra el detalle de resultados y procedimientos de un ensayo correspondiente a la muestra de la manzana A, lote 14, casa piloto. Los resultados de todas las muestras se resumen en una tabla, para facilitar la lectura y análisis de los datos obtenidos, luego se describen observaciones particulares correspondientes a las características similares entre cada lote.

LÍMITES DE ENSAYO DE VERIFICACIÓN

La vivienda es de dos pisos con una altura piso a cielo de 4.9 m. Y se ubica a 39 m sobre el nivel del mar (E).

La diferencia de temperatura entre el interior y el exterior y la altura de la edificación no debe ser menor que $200 \text{ m } ^\circ\text{C}$. En este caso, la edificación con una altura de piso a cielo de 4.9 m. La diferencia de temperatura entre el interior y el exterior es de 0.7°C , multiplicadas estas diferencias de temperatura dan $4.9 \text{ m} \times 0.7^\circ\text{C} = 3.43 \text{ m } ^\circ\text{C}$; por lo tanto, se aprueba el ensayo.

La velocidad promedio del viento es de 1 m/s y la temperatura exterior es de 24.3°C , lo que cumple las especificaciones del numeral 8.5 de la NCh3295.

Se realizan 10 mediciones de flujo y diferencia de presión se hacen entre 10 Pa y 60 Pa, lo que cumple los requisitos del numeral 8.10 de la NCh3295.



DATOS DE PRESURIZACIÓN

El range utilizado en esta medición corresponde a B2 para los puntos 1 y 2 y desde el punto 3 en adelante el range utilizado fue B4.

Tabla 17: Puntos de datos de presurización media

Punto	Diferencia de presión en la envolvente de la edificación [Pa]	Flujo medido a través de medidor de flujo [m ³ /s] ^a
1	24,96	0,157083
2	29,69	0,176132
3	33,55	0,189958
4	37,66	0,205325
5	44,70	0,218788
6	50,28	0,238589
7	54,16	0,248217
8	59,34	0,263581
9	64,77	0,279061
10	68,36	0,290281

a) Este flujo medido es corregido para la temperatura y la densidad del aire que fluye a través del medidor de flujo y es el flujo volumétrico en las condiciones de medición

Nota 1	: Compensación inicial de presión =	-0,77
Nota 2	: Compensación final de presión =	0,98
Nota 3	: Compensación promedio de presión (dPeff) =	-0,105
Nota 4	: Temperatura exterior (Text)	24,3
Nota 5	: Temperatura interior (Tint)	25
Nota 6	: Velocidad del aire =	1
Nota 7	: Producto dif t° y altura (m C°) =	3,43

Tabla 18: Puntos de datos de presurización corregida

Punto	Diferencia de presión en la envolvente de la edificación Pa	Flujo medido a través de medidor de flujo m3/s
1	25,07	0,1575
2	29,80	0,1765
3	33,66	0,1904
4	37,77	0,2058
5	44,81	0,2193
6	50,39	0,2392
7	54,27	0,2488
8	59,45	0,2642
9	64,88	0,2797
10	68,47	0,2910

Los datos de la tabla anterior son representados gráficamente en la siguiente figura. Luego, se muestra la tabla de los logaritmos de los puntos para definir los coeficientes de flujo C, y exponente de presión n.

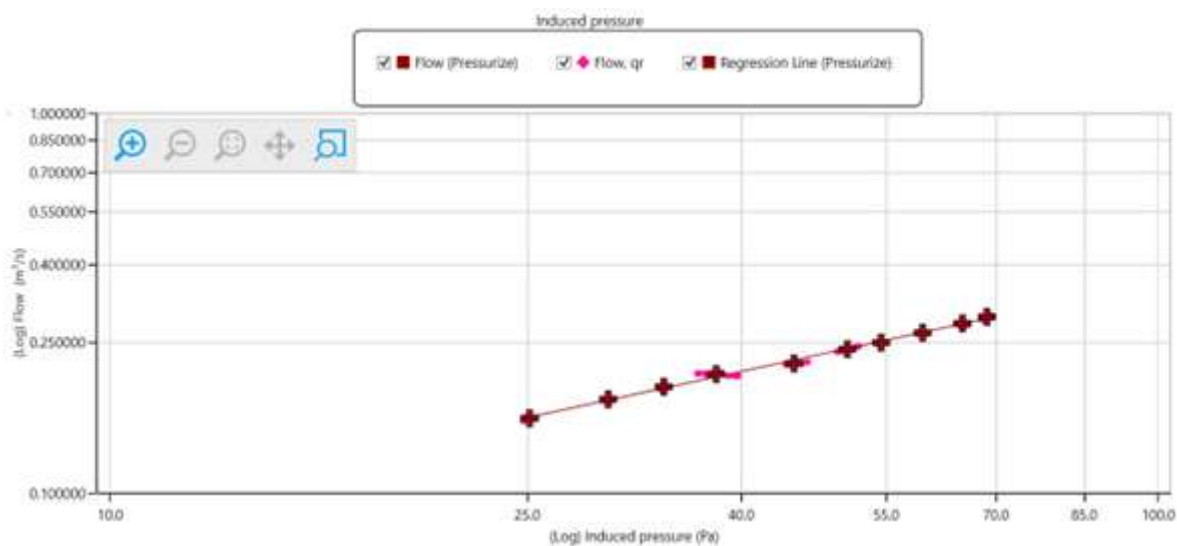


Figura 104: gráfico de filtraciones de aire - presurización

Tabla 19: Logaritmos de puntos de datos de flujo y presión

Punto	Ln diferencia de presión en la envolvente de la edificación Pa	Ln flujo medido a través de medidor de flujo m ³ /s
1	3,2215	1,8486
2	3,3943	1,7342
3	3,5162	1,6586
4	3,6314	1,5808
5	3,8023	1,5173
6	3,9197	1,4307
7	3,9939	1,3911
8	4,0851	1,3310
9	4,1725	1,2740
10	4,2263	1,2346

El indicador de área de filtración es el utilizado por la norma NCh3295, pero los requerimientos de hermeticidad generales y del PDAO se encuentran en unidades de cambio de aire por hora (ach).

Una vez obtenidos estos datos se procede a la obtención de datos de despresurización y luego se hace un promedio entre ambos para obtener el resultado final.

DATOS DE DESPRESURIZACIÓN

Para los cálculos de despresurización, se realizan exactamente los mismos pasos detallados anteriormente, por lo tanto, en esta sección solo se mostrarán las tablas de resultado del ensayo de despresurización de la vivienda Manzana A, Lote 14, casa piloto.

Tabla 20: Puntos de datos de despresurización medidos

Punto	Diferencia de presión en la envolvente de la edificación Pa	Flujo medido a través de medidor de flujo m ³ /s
1	-24,85	0,175049
2	-29,91	0,189350
3	-37,96	0,218533
4	-39,71	0,224163
5	-45,06	0,242760
6	-49,63	0,264300
7	-55,01	0,284556
8	-59,73	0,298000
9	-64,31	0,318056
10	-68,27	0,343125

Nota 1	: Compensación inicial de presión =	0,79
Nota 2	: Compensación final de presión =	0,19
Nota 3	: Compensación promedio de presión (dPeff) =	-0,49
Nota 4	: Temperatura exterior (Text)	24,3
Nota 5	: Temperatura interior (Tint)	25
Nota 6	: Velocidad del aire =	1
Nota 7	: Producto dif t° y altura (m C°) =	3,43

Tabla 21: puntos de datos de despresurización corregida

Punto	Diferencia de presión en la envolvente de la edificación Pa	Flujo medido a través de medidor de flujo m3/s
1	-25,34	0,1755
2	-30,40	0,1898
3	-38,45	0,2190
4	-40,20	0,2247
5	-45,55	0,2433
6	-50,12	0,2649
7	-55,50	0,2852
8	-60,22	0,2987
9	-64,80	0,3188
10	-68,76	0,3439

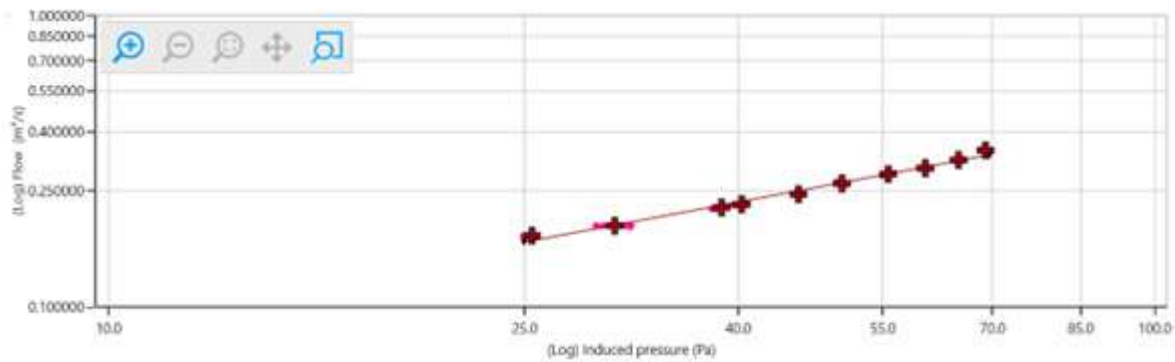


Figura 105: gráfico de filtraciones de aire - despresurización

Tabla 22: Logaritmos de puntos de datos de flujo y presión

Punto	Ln diferencia de presión en la envolvente de la edificación Pa	Ln flujo medido a través de medidor de flujo m³/s
1	3,2324	1,7403
2	3,4144	1,6618
3	3,6494	1,5185
4	3,6939	1,4930
5	3,8188	1,4133
6	3,9144	1,3283
7	4,0164	1,2545
8	4,0980	1,2083
9	4,1713	1,1432
10	4,2306	1,0673

Los parámetros resultantes de estos datos corresponden a los siguientes:

$$C_o = 0.01925 \frac{m^3}{sPa^n}$$

$$n = 0.6721$$

$$A_L = 189,66 \text{ cm}^2$$

$$ACH_{50Pa} = 6.943$$

DATOS COMBINADOS DE PRESURIZACIÓN Y DESPRESURIZACIÓN

El coeficiente de filtración $C_{o, combinado}$ es el promedio de los valores C_o para presurización y despresurización.

$$C_{o, combinado} = 0.5 * (0.02344 + 0.01925) = 0.02134 \frac{m^3}{sPa^n}$$

El exponente de filtración $n_{combinado}$ es el promedio de los valores n para presurización y despresurización.

$$n_{combinado} = 0.5 * (0.5937 + 0.6721) = 0.63293$$

El área de filtración $A_{L combinado}$ es el promedio de los valores A_L para presurización y despresurización.

$$A_{L combinado} = 0.5 * (207.07 + 189.66) = 198.37 \text{ cm}^2$$

Los cambios de aire por hora $ACH_{50Pa, combinado}$ corresponden al promedio de los valores de ACH_{50Pa} para presurización y despresurización.

$$ACH_{50Pa, combinado} = 0.5 * (6.234 + 6.943) = 6.59$$

NORMATIVA DE CÁLCULO

La normativa de cálculo como se explicó en la metodología se basa en la norma NCh 3295 of. 2013, utilizada en el programa FanTestic ©

Para demostrar la metodología de cálculo y ecuaciones utilizadas para la obtención de los datos de infiltraciones de aire, se realiza a modo de ejemplo la muestra lote 14 para presurización, del conjunto de viviendas Porvenir II, Osorno, Los Lagos.

Obtención de la compensación promedio de presión (dPeff):

Ecuación 1: compensación promedio de presión (dPeff)

$$0.5 * (-0.77 - 0.98) = -0.105$$

Debido a que este es un ensayo de presurización, las tasas medidas de flujo de aire a través del medidor de flujo se convierten en tasas de flujo a través de la envolvente usando las siguientes ecuaciones:

Ecuación 2: densidad del aire interior y exterior

$$\rho_{in} = 12041 \left(1 - \frac{0.0065 * 39}{293}\right)^{5.2553} * \left(\frac{293}{25 + 273}\right) = 1.179 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_{in} = 12041 \left(1 - \frac{0.0065 * 39}{293}\right)^{5.2553} * \left(\frac{293}{24.3 + 273}\right) = 1.181 \frac{kg}{m^3}$$

Ecuación 3: tasa de filtración de aire

$$Q_0 = Q \frac{\rho_{out}}{\rho_{in}} = 0.157083 * \left(\frac{1.181}{1.179}\right) = 0.1575 \frac{m^3}{s}$$

Además, cada diferencia de presión tiene la compensación de presión -0.105 Pa sustraída de ella, por ejemplo, para el elemento 1:

$$24.96 - (-0.105) = 25.07$$

Esto da como resultado los datos corregidos que se muestran en la siguiente Tabla 18 para presión y flujo.

Ecuación 4: varianza del registro de presión

$$S_{\ln(dP)}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\ln(dP)_i - \overline{\ln(dP)})^2$$

$$= \frac{1}{10-1} ((3.2215 - 3.7963)^2 + (3.3943 - 3.7963)^2 + \dots (4.2263 - 3.7963)^2) = 0.11797$$

Ecuación 5: varianza del registro de flujo

$$S_{\ln(Q)}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\ln(Q)_i - \overline{\ln(Q)})^2$$

$$= \frac{1}{10-1} ((1.8486 - 1.5001)^2 + (1.7342 - 1.5001)^2 + \dots (1.2346 - 1.5001)^2) = 0.04168$$

Ecuación 6: covarianza del registro de la presión y el registro de flujo

$$S_{\ln(dP)\ln(Q)} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\ln(dP)_i - \overline{\ln(dP)})(\ln(Q)_i - \overline{\ln(Q)}) = 0.0700$$

Ecuación 7: exponente de presión

$$n = \frac{S_{\ln(dP)\ln(Q)}}{S_{\ln(dP)}^2} = 0.5937$$

Ecuación 8: coeficiente de filtración de aire

$$C = \exp^{\bar{y}-n\bar{x}} = \exp(1.5001 - 0.5937 * 3.7963) = 0.0234 \frac{m^3}{sPa^n}$$

Para hacer las correcciones a las condiciones estándares, se debe calcular la densidad y viscosidad en las condiciones estándares y de medición como sigue:

Ecuación 9: viscosidad del aire dinámico

$$\mu = \frac{1.458 * 10^{-6} * (25 + 273)^{0.5}}{1 + \frac{110.4}{25 + 273}} = 0.018365 \frac{kg}{m * s}$$

$$\mu_{ref\ 20^\circ C} = 0.01813 \frac{kg}{m * s}$$

Ecuación 10: densidad del aire

$$\rho = 1.2041 \left(1 - \frac{0.0065 * 39}{293}\right)^{5.2553} = 1.1986 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_0 = 1.2041 \frac{kg}{m^3}$$

Ecuación 11: Coeficiente de filtración de aire corregido

$$C_o = C \left(\frac{\mu}{\mu_{ref\ 20^\circ C}}\right)^{2n-1} \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{1-n} = 0.0234 \frac{m^3}{sPa^n}$$

Ecuación 12: área de filtración a 4 Pa

$$A_L = C_o \left(\frac{\rho_o}{2}\right)^{0.5} (dP)^{n-0.5}$$

$$A_L = 0.0234 \left(\frac{1.2041}{2}\right)^{0.5} (4)^{0.5937-0.5} = 207.07 \text{ cm}^2$$

Ecuación 13: Cambios de aire por hora

$$ACH_{50Pa} = \frac{Q * 3.6}{Volumen} = \frac{0.239 * 3.6 * 1000}{138} = 6.234$$

ESTUDIO Y GUÍA DE RECOMENDACIONES
PARA LA HERMETICIDAD AL PASO DEL AIRE
EN VIVIENDAS DE ENTRAMADO DE MADERA