



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**RECOMENDACIONES PARA LA PREVENCIÓN Y SOLUCIÓN DE LA
HUMEDAD POR CONDENSACIÓN EN VIVIENDAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

LUIS ANDRÉS RIVERA CASTRO

PROFESOR GUÍA:
GABRIEL RODRÍGUEZ JAQUE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MIGUEL BUSTAMANTE SEPÚLVEDA
EDGARDO GONZÁLEZ LIZAMA

SANTIAGO DE CHILE
MAYO 2012



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**RECOMENDACIONES PARA LA PREVENCIÓN Y SOLUCIÓN DE LA
HUMEDAD POR CONDENSACIÓN EN VIVIENDAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

LUIS ANDRÉS RIVERA CASTRO

COMISIÓN	NOTA (LETRAS)	NOTA (NÚMEROS)
GABRIEL RODRÍGUEZ JAQUE PROFESOR GUÍA	_____	_____
MIGUEL BUSTAMANTE SEPÚLVEDA PROFESOR CO-GUÍA	_____	_____
EDGARDO GONZÁLEZ LIZAMA PROFESOR INTEGRANTE	_____	_____

SANTIAGO DE CHILE
MAYO 2012

RESUMEN EJECUTIVO DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR : LUIS RIVERA CASTRO
FECHA : 08/05/2012
PROF. GUÍA : SR. GABRIEL RODRÍGUEZ J.

RECOMENDACIONES PARA LA PREVENCIÓN Y SOLUCIÓN DE LA HUMEDAD POR CONDENSACIÓN EN VIVIENDAS

El presente trabajo de título tiene por finalidad estudiar el fenómeno de la humedad por condensación superficial e intersticial en las viviendas, para posteriormente generar una base de recomendaciones que permitan prevenir y solucionar los problemas asociados a este tipo de humedad.

La humedad por condensación puede generar un sin número de daños en las viviendas, entre ellos se puede destacar la aparición de hongos y manchas en superficies de acabado, la pudrición en maderas, la corrosión en metales y el aumento de la conductividad térmica. Este último efecto es quizás el más importante debido a que repercute directamente en el confort de los habitantes del inmueble y por la actual situación de crisis energética que se vive en el mundo.

La humedad además, puede afectar directamente la salud de las personas, sobre todo a aquellas que presenten un sistema inmunológico débil como lo son bebés, niños, ancianos, embarazadas y personas con enfermedades respiratorias crónicas, provocando cuadros asmáticos, irritaciones a la garganta y ojos, tos, alergias, entre otras patologías.

Para llevar a cabo esta memoria se ha realizado una revisión bibliográfica, considerando la literatura nacional, entre ellos manuales y la normativa vigente, además de literatura internacional, en particular de países mediterráneos con climas similares a los de Chile. La idea es comprender de qué manera y bajo qué condiciones se produce la condensación superficial e intersticial para finalmente proponer recomendaciones basadas en criterios técnicos.

Este documento se realizó en conjunto con la Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT) de la Cámara Chilena de la Construcción, específicamente con el área de Eficiencia Energética, generando como resultado final un manual de buenas prácticas que servirá de herramienta técnica a profesionales de la construcción para prevenir el problema de la humedad por condensación en las viviendas.

“a mi pequeño hijo,
Lucas”

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, Rosa y Luis, a mi hermano Víctor, a mi tía Gema y a toda mi familia por haberme apoyado durante mis estudios y darme la posibilidad de llegar hasta acá. Agradezco también a mi polola, Mariela, por estar presente cada vez que la necesité durante la última parte de este proceso.

También agradezco a mi profesor guía, Gabriel Rodríguez, por haberme guiado durante todo el desarrollo de este trabajo y a los profesores Miguel Bustamante y Edgardo González por querer participar de esta memoria.

Quiero agradecer también a la Corporación de Desarrollo Tecnológico de la Cámara Chilena de la Construcción, CDT, y a su programa de becas para alumnos memoristas con el cual se financió el presente trabajo de título.

Finalmente agradecer al grupo técnico de trabajo y la ayuda que éste prestó para la realización de esta memoria, en especial a su coordinadora, Daniela Burgos, quien desde un principio confió en mí para realizar este trabajo.

Índice

RESUMEN EJECUTIVO DE LA MEMORIA.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
1 INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 CONTEXTO.....	15
1.2 Alcance.....	15
1.3 Guía de lectura	16
2 LA HUMEDAD	17
2.1 Tipos de humedad.....	17
2.1.1 Humedad por condensación	17
2.1.2 Humedad de lluvia.....	19
2.1.3 Humedad del suelo	19
2.1.4 Humedad de construcción	20
2.1.5 Humedad accidental	23
2.2. Ventajas de la prevención de la humedad	26
2.3. Conceptos Térmicos	26
2.3.1 Confort térmico.....	26
2.3.2 Mecanismos de transferencias de calor	27
2.3.3 Aislantes térmicos	28
2.3.4 Inercia térmica.....	28
2.3.5 Puentes térmicos.....	29
3 EL AGUA Y SU IMPORTANCIA EN LA VIVIENDA	31
3.1 El agua en la naturaleza y su importancia en la vida humana	31
3.1.1 El ciclo del agua.....	31
3.2 Propiedades del agua.....	32
3.2.1 Propiedades físicas	32
3.2.2 Propiedades químicas	32
3.3. Estados del agua y cambios de fase.....	33
3.3.1. Estado sólido.....	33
3.3.2 Estado líquido.....	33
3.3.3 Estado gaseoso	33

3.3.4	Cambios de fase.....	33
3.4.	Fenómenos de licuación-solidificación, vaporización-condensación.....	34
3.4.1	Licuación-solidificación.....	35
3.4.2	Vaporización-condensación.....	35
3.5	El agua en la vivienda y sus usos.....	36
3.6	Causas de evaporación de agua en la vivienda.....	37
3.6.1.	Lavado de ropa.....	37
3.6.2.	Cocinar.....	37
3.6.3.	Aseo personal.....	37
3.6.4.	Calefacción.....	37
3.6.5.	Número y actividad de habitantes.....	38
3.6.6.	Riego de plantas de interior.....	39
3.6.7	Riesgo de condensación.....	39
3.6.8	Riesgo de solidificación.....	40
3.7.	Humedad en la atmósfera.....	41
3.7.1	Humedad relativa y absoluta.....	41
3.7.2	Poder desecante del aire.....	41
3.7.3	Humedad atmosférica.....	42
3.7.4	Aire húmedo.....	44
3.8.	Efectos biológicos.....	47
3.9	Daños a la salud producto de la humedad.....	48
4	EFFECTO DE LA HUMEDAD EN MATERIALES.....	50
4.1	Comportamiento de materiales frente a la humedad.....	50
4.1.1	Materiales pétreos.....	51
4.1.2	Materiales hidráulicos.....	51
4.1.3	Materiales cerámicos.....	52
4.1.4	Maderas.....	52
4.1.5	Vidrio.....	53
4.1.6	Metales.....	53
4.1.7	Materiales varios.....	53
4.2	Daños en materiales producto de la humedad.....	54
4.2.1	Eflorescencias.....	54
4.2.2	Oxidación.....	54
4.2.3	Corrosión en metales.....	55

4.2.4	Otros daños asociados a la humedad.....	62
4.3	Aumento de la conductividad térmica en ciertos materiales de construcción debido a la humedad	62
4.3.1	Variación de la conductividad térmica en ladrillos.....	65
4.3.2	Variación de la conductividad térmica en materiales aislantes.....	67
5	CONDENSACIÓN	69
5.1	Propiedades de los materiales frente al vapor de agua	69
5.2	Presión de vapor de agua	72
5.2.1	Relaciones de interés	74
5.2.2	Humedad interior	75
5.3	Riesgo de condensación	76
5.3.1	Riesgo de condensación superficial	76
5.3.2	Diseño para evitar condensaciones superficiales	79
5.3.3	Riesgo de condensación intersticial	80
5.4	Zonas con riesgos de condensación en Chile	86
6	PREVENCIÓN Y SOLUCIONES.....	90
6.1	Consideraciones generales para prevenir la humedad por condensación	90
6.2	Ventilación como co-ayuda para prevenir la condensación	91
6.2.1	Ventilación al interior de la vivienda.	91
6.2.2	Consideraciones generales para ventilación en la vivienda.....	92
6.2.3	Ventilación en complejos de techumbre.....	94
6.3	Aislación térmica.....	97
6.3.1	Barrera de humedad.....	99
6.3.2	Barrera de vapor.....	99
6.4	Soluciones Constructivas	101
6.4.1	Techumbres.....	102
6.4.2	Muros.....	103
6.4.3	Pisos ventilados	106
6.5	Instalación de la barrera de vapor	108
6.6	Instalación de barrera de humedad.....	110
6.6.1	Muros.....	110
6.6.2	Techos.....	111
6.7	Aplicación de pintura anti-hongos.....	112
7	CONCLUSIONES.....	115

7.1	Conclusiones generales.	115
7.2	conclusiones condensación superficial	116
7.3	Conclusiones condensación intersticial	117
7.4	Proyectos futuros.....	117
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118
9	GLOSARIO	121
	ANEXOS.....	125
	Anexo A: Cálculo de la condensación intersticial.....	126
	Anexo B: Ejemplos de cálculo	131
	Anexo C: Conductividad térmica de materiales.....	145

Índice de figuras

Figura 2.1 Diagrama de tipos de condensación	18
Figura 2.2 Condensación superficial en techumbre fría.....	18
Figura 2.3 Humedad por capilaridad.	20
Figura 2.4 Influencia de la temperatura en el secado de la obra gruesa.	23
Figura 2.5 Humedad en una pared revestida interiormente con yeso, producto de la filtración en una cañería.	24
Figura 2.6 Esquema de distintos tipos de humedad en muros	29
Figura 2.7 Desfase de la temperatura interior por efecto de la inercia térmica.....	29
Figura 3.1 Ciclo del agua.	32
Figura 3.2 Diagrama de fase del agua.....	34
Figura 3.3 Riesgo de condensación	40
Figura 3.4 Ábaco psicrométrico.....	45
Figura 3.5 Gráfico psicrométrico, ejemplo.....	46
Figura 3.6 Hongos en paredes producto de la humedad.....	47
Figura 4.1 Gráfico vida útil Zinc v/s espesor.....	56
Figura 4.2 Esquema pila galvánica local.	57
Figura 4.3 Gráfico cualitativo de conductividad térmica v/s humedad.....	62
Figura 4.4 Variación de la conductividad térmica de un material macizo homogéneo, en función de su humedad	65
Figura 4.5 Relación “ λ húmedo/ λ seco” en función del porcentaje de humedad para ladrillohecho a mano y hecho a máquina	66
Figura 4.6 Variación de la conductividad térmica de materiales aislantes en función de la humedad (según EN ISO 10456).....	67
Figura 4.7 Variación de la conductividad térmica de una espuma rígida de poliestireno expandidocon densidad 19 kg/m ³ , en función de la humedad.....	68
Figura 5.1 Variación de la humedad interior en función de las clases de higrometría y la temperatura exterior.....	75
Figura 5.2 Elemento vertical con flujo de calor horizontal (muros).	77
Figura 5.3 Elemento horizontal con flujo de calor hacia arriba.	78

Figura 5.4 Elemento horizontal con flujo hacia abajo.....	78
Figura 5.5 Resistencia térmica acumulada en función de la temperatura de cada capa. ..	83
Figura 5.6 Esquema general del método gráfico para obtener temperaturas a partir de las resistencias térmicas de cada capa.	84
Figura 5.7 Perfil sin riesgo de condensación (izquierda) y con riesgo de condensación (derecha).....	86
Figura 6.1 Esquema de ventilación cruzada en elevación y planta.	92
Figura 6.2 Esquema de acceso a vivienda protegido del viento.	93
Figura 6.3 Correcta orientación del techo.	94
Figura 6.4 Esquema de ventilación por medio de respiradero.....	95
Figura 6.5 Esquema de ventilación por cámara de aire.....	95
Figura 6.6 Ventilación necesaria para techo frío (izquierda) y techo caliente (derecha)...	96
Figura 6.7 Celosía en alero para entrada de aire.....	96
Figura 6.8 Elemento con aislación térmica exterior.	97
Figura 6.9 Elemento con aislación térmica interior.	98
Figura 6.10 Barrera de humedad.....	99
Figura 6.11 Polietileno en muros.	100
Figura 6.12 Polietileno en techos.....	101
Figura 6.13 Techumbre estructurada con cercha.	102
Figura 6.14 Techumbre estructurada con vigas a la vista.	103
Figura 6.15 Techumbre estructurada con vigas ocultas.	103
Figura 6.16 Muro con barrera de vapor por el interior.....	104
Figura 6.17 Muros con barrera de humedad por el exterior.....	104
Figura 6.18 Muro con barrera de humedad permeable al vapor.	105
Figura 6.19 Muro con barrera de humedad impermeable al vapor de agua.....	105
Figura 6.20 Muro con barrera de humedad y barrera de vapor.....	106
Figura 6.21 Piso con vigas ventilado. Barrera de vapor por el interior y aislante térmico por el exterior.	106
Figura 6.22 Piso con vigas ventilado. Barrera de vapor y aislante térmico por el interior.	107
Figura 6.23 Piso con losa ventilado. Barrera de vapor y aislante térmico por el interior..	107
Figura 6.24 Unión de la barrera de vapor al aislante térmico.	108

Figura 6.25 Sellado de la barrera de vapor con cinta especial.....	109
Figura 6.26 Traslapo de la barrera de humedad.....	110
Figura 6.27 Procedimiento de instalación de ventanas y puertas después de aplicada barrera de humedad.	110
Figura 6.28 Barrera de humedad en techumbres.	112
Figura A.1 Difusión de vapor de agua en un elemento multi-capa sin condensación intersticial.....	127
Figura A.2 Difusión de vapor de agua en con condensación intersticial en un plano interfase.	128
Figura A.3 Difusión de vapor de agua con condensación intersticial en dos planos interfase.	129
Figura A.4 Evaporación desde una interfase del elemento.	130
Figura A.5 Ejemplo de cálculo de riesgo de condensación intersticial.	135
Figura A.6 Determinación de temperaturas por medio del método gráfico.....	135
Figura A.7 Perfil de presiones del ejemplo.....	140
Figura A.8 Muro ejemplo 5.....	141
Figura A.9 Perfil de presiones, ejemplo 5.....	144
Figura A.10 Solución muro, ejemplo 5.....	144

Índice de tablas

Tabla 2.1. Humedad de equilibrio en algunos materiales de construcción.	21
Tabla 2.2. Constante de secado en algunos materiales de construcción.	22
Tabla 2.3. Sensación de confort para distintos ambientes.	27
Tabla 3.1. Gasto de agua de artefactos sanitarios.	36
Tabla 3.2. Gasto diario de agua en recintos públicos y privados.....	36
Tabla 3.3. Dióxido de carbono y vapor de agua generado por kilogramo de combustible	38
Tabla 3.4. Agua evaporada por personas en función del tipo de actividad y la temperatura	39
Tabla 3.5. Saturación de humedad según temperatura.....	42
Tabla 3.6. Tabla psicrométrica.....	43
Tabla 4.1. Valores de corrosión del acero en micras por año.....	55
Tabla 4.2. Escala de potenciales de metales utilizados en construcción ordenados de mayor a menor potencial eléctrico.....	58
Tabla 4.3. Resistencia a la corrosión de algunos metales utilizado en la construcción	60
Tabla 4.4. Humedad atmosférica según zona climática en el mes de julio.....	63
Tabla 4.5. Factores multiplicadores de la conductividad térmica (λ) según humedad del ambiente climático.....	64
Tabla 4.6. Relación entre conductividad térmica húmeda y seca dependiendo de la humedad del material.....	64
Tabla 4.7. Densidad y λ seco de los materiales ensayados	65
Tabla 5.1. Factor de resistencia al vapor de agua y resistividad de algunos materiales de construcción	71
Tabla 5.2. Presión de saturación y humedad absoluta de saturación.....	73
Tabla 5.3. Clases de higrometría interior	75
Tabla 5.4. Valores de temperatura y humedad interiores recomendados.....	79
Tabla 5.5. Resistencias térmicas de las capas de aire superficiales en zonas con vientos inferiores a 10 km/h.....	82
Tabla 5.6. Zonas más propensas a producción de condensación	87
Tabla 5.7. Zonas térmicas de RT y su correspondencia con la zonificación climática habitacional NCh 1079.....	87

Tabla 6.1. Dirección predominante del viento y su velocidad media	93
Tabla 6.2. Resistencia a la difusión de vapor de agua de algunas barreras de vapor	100
Tabla A.1. Temperatura interior, exterior y humedad exterior, ejemplo 2	132
Tabla A.2. Resumen de cálculos, ejemplo 2	133
Tabla A.3. Resistencias térmicas para el ejemplo 3.....	135
Tabla A.4. Resumen de cálculos, ejemplo 4	138
Tabla A.5. Resumen de cálculos, ejemplo 5	142
Tabla A.6. Conductividad térmica de materiales	144

1 INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO

En enero de 2007 comenzó a regir en Chile una nueva reglamentación térmica que estableció condiciones mínimas de acondicionamiento térmico para las envolventes de viviendas, complementando así las disposiciones de acondicionamiento térmico de techumbres que dispuso la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), en su artículo 4.1.10, desde el año 2000, todo ello enmarcado en el programa de reglamentación del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) sobre acondicionamiento térmico de viviendas. Hoy en día el MINVU en conjunto con el Ministerio de Energía se encuentran trabajando en la tercera etapa del programa antes mencionado, correspondiente al sistema de calificación energética de viviendas en Chile. Es mucho lo que se ha avanzado en este tema, de hecho Chile es el primer país en Latinoamérica en incorporar a su reglamentación de construcciones exigencias de acondicionamiento térmico para todo tipo de viviendas. Sin embargo, está quedando fuera un aspecto fundamental a tratar: la humedad en las viviendas, tema principal del que trata el presente trabajo.

La humedad puede causar variados efectos en las viviendas y, consecuentemente, en la calidad de vida de sus habitantes, tales como daño en terminaciones, deterioro de elementos constructivos, aparición de mohos y hongos y hasta enfermedades de sus ocupantes, lo que repercute directamente en el deterioro del inmueble disminuyendo su vida útil. Sin embargo, el mayor daño que puede provocar en la vivienda es que la humedad:

- aumenta la conductividad térmica de los materiales.
- produce mayores gastos de energía de calefacción.
- daña materiales orgánicos, entre otros.

El gasto de energía adquiere mayor importancia en épocas de crisis energéticas, como la que estamos viviendo hoy en día.

1.2 ALCANCE

El presente estudio busca abordar el fenómeno de la humedad por condensación, tanto superficial como intersticial, en la vivienda, con un enfoque hacia los profesionales de la construcción: arquitectos, proyectistas y especificadores, ingenieros, constructores civiles, empresas constructoras e inmobiliarias, para que puedan tomar las mejores decisiones, basadas en criterios técnicos, con tal de prevenir la humedad por condensación y dar soluciones constructivas que sean de utilidad.

Este trabajo pretende ahondar en el fenómeno de la humedad por condensación de vapor de agua, identificando las causas en la formación de este tipo de humedad, los efectos que puede generar, las variables que influyen en su generación y la prevención y control

de la misma. Se tocan los problemas que se presentan en viviendas, además de la normativa y legislación asociada al tema.

El estudio pretende encontrar un equilibrio en cuanto al diseño adecuado de soluciones constructivas, resistencia térmica, ubicación de materiales de la envolvente, condiciones de uso, clima, etc., con el fin de minimizar y prevenir el desarrollo del fenómeno de condensación. Para ello se mostrarán algunos ejemplos prácticos de manera de ejemplificar la importancia de las variables antes mencionadas.

1.3 GUÍA DE LECTURA

Esta memoria se divide en nueve capítulos más un capítulo de anexos. El primer capítulo es una introducción que contextualiza al lector sobre la problemática y situación actual en que se encuentra el país sobre el tema de la humedad.

En el capítulo 2 se describen de manera general los tipos de humedades que afectan a una vivienda, además de introducir algunos conceptos térmicos necesarios para la posterior comprensión del documento.

El tercer capítulo habla sobre la importancia del agua en la vivienda, sobre sus propiedades y principales características, todo dentro del marco contextual del trabajo, además de identificar los principales entes generadores de vapor al interior del inmueble.

El capítulo 4 muestra los efectos que produce la humedad en los materiales utilizados en la construcción de las viviendas, tanto estructurales como en aquellos de terminación.

En el quinto capítulo se trata el tema de la condensación propiamente tal, específicamente se profundiza en el riesgo de que se produzca condensación superficial e intersticial, mostrando los procedimientos de cálculo respectivos.

El sexto capítulo trata sobre la prevención y solución al problema de la humedad por condensación en las viviendas, para ello se recomiendan algunas prácticas además de proponer soluciones constructivas que disminuyen la probabilidad de que aparezca la humedad.

El capítulo 7 y 8 corresponden a las conclusiones obtenidas del trabajo y a las referencias bibliográficas utilizadas para la realización de éste respectivamente.

Finalmente, el noveno y último capítulo corresponde a los anexos, en el cual se muestra un método para calcular la cantidad de agua condensada intersticialmente, ejemplos de cálculo y una tabla con la conductividad térmica de los materiales más utilizados en construcción.

2 LA HUMEDAD

2.1 TIPOS DE HUMEDAD

La humedad en la construcción causa diversas patologías en las viviendas, provocando una disminución del confort higrotérmico a la vez que puede comprometer el estado material de la vivienda, y hasta afectar la salud de las personas que la habitan. Esta humedad se convierte en un problema al momento que aparece de forma indeseada y en proporciones superiores a las aceptables. Los tipos de humedad que afectan la vivienda son principalmente de cinco tipos:

- Humedad de lluvia.
- Humedad accidental.
- Humedad del suelo.
- Humedad de construcción.
- Humedad de condensación.

2.1.1 Humedad por condensación

La condensación es el fenómeno por el cual el vapor de agua (gas) contenido en la atmosfera al enfriarse se transforma en agua líquida.

Para entender de buena manera esta fenomenología es necesario comprender los fenómenos de humedad del aire y los conceptos de humedad absoluta, relativa y punto de rocío. “Humedad absoluta” es la cantidad de vapor de agua contenido en un metro cúbico de aire en un cierto ambiente la que se expresa en gramos de agua por metro cúbico de aire seco. Cuando el aire ya no puede admitir más vapor de agua a una cierta temperatura se dice que está saturado. A la relación porcentual entre la humedad absoluta y la saturada se le llama “humedad relativa”, como se verá con mayor detalle más adelante. Si se tiene una cierta cantidad de vapor de agua en el ambiente a una cierta temperatura, el “punto de rocío” viene a ser aquella temperatura máxima a la cual el ambiente se satura de vapor de agua, por tanto mientras la temperatura del aire se mantenga por sobre la de rocío no habrá condensación, sin embargo si la temperatura del aire baja habrá condensación.

Este tipo de humedad (por condensación) se produce cuando la temperatura de algún elemento (pared, pilar, vidrio, etc.) es inferior al punto de rocío del ambiente. Por lo general este fenómeno se genera en invierno y se aprecia en superficies frías, tales como cristales y metales. Sin embargo la condensación puede producirse en los intersticios, entonces no es posible verla. Este fenómeno no sólo depende de la temperatura, sino también de la presión de vapor de agua, así cuando la temperatura baja o la presión de vapor aumenta, la posibilidad de que se produzca condensación se incrementará.

La humedad por condensación se puede presentar en dos formas, ellas son la condensación superficial y la condensación intersticial. La humedad por condensación superficial se presenta en superficies frías, como ya se mencionó en el párrafo anterior, en cambio la humedad intersticial se genera en el interior de las capas de un elemento perimetral y resulta más difícil de identificar debido a que no está a la vista.

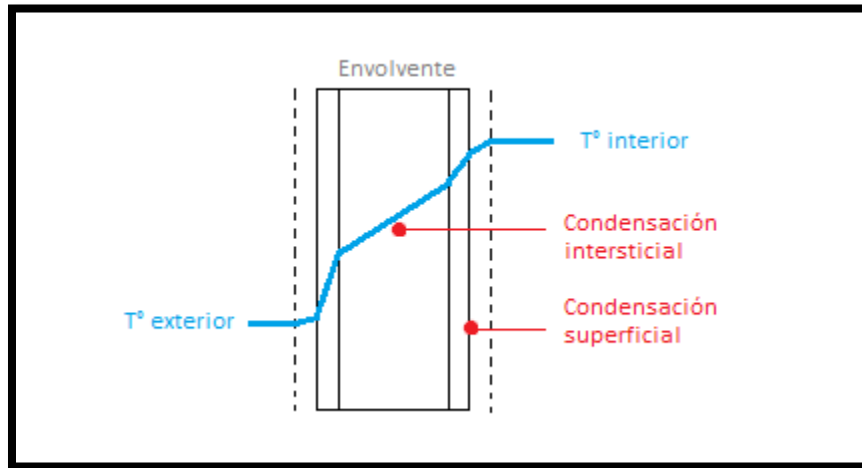


Figura 2.1 Diagrama de tipos de condensación

La condensación, tanto superficial como intersticial, se genera por la combinación de tres factores:

1. Baja temperatura exterior: la menor temperatura exterior se produce minutos después de la salida del sol (zona central de Chile) y generalmente en invierno, de preferencia en los muros con orientación sur, estos están más propensos a la condensación debido a que reciben menos radiación del sol.
2. Baja resistencia térmica de los elementos envolventes: como muros, rincones, esquinas, ventanas, antepechos, puentes térmicos, detrás de muebles, entre otros elementos que presenten una alta transmitancia térmica.
3. Alta humedad relativa en el aire interior: que puede tener su origen en el exceso de personas o de alta actividad física, uso de calefacción húmeda, falta de extractores en el baño y en la cocina, lavado, secado y planchado de ropa al interior de la casa, exceso de plantas o falta de ventilación.

Más adelante se profundizará en estos dos tipos de humedades por condensación.



Figura 2.2 Condensación superficial en techumbre fría.

2.1.2 Humedad de lluvia

Esta humedad ataca los muros exteriores y techumbres en zonas donde llueve con viento, afectando la envolvente de la vivienda; es común que se manifieste en juntas constructivas de diferentes elementos por medio de manchas y otros daños en el acabado exterior.

La humedad infiltrada se acrecienta si las precipitaciones, ya sea en forma de lluvia, granizo o nieve, se ven ayudadas por el viento, este último hace que la humedad penetre de mayor medida por los poros de los materiales, generando efectos perniciosos asociados a la humedad (eflorescencias, descascamientos, mohos, hongos, etc.).

En el caso de Chile, existen muchos lugares donde llueve con viento, es por lo mismo que se debe tener especial cuidado en aquellas viviendas que tengan cubiertas con poca pendiente y que no presenten puertas o ventanas bien ajustadas. En zonas costeras y en donde los vientos sean mayores a 25 km/h (como sucede desde la V región hacia el sur) es posible que llegue más agua de lluvia por m² de superficie vertical que por igual superficie de techo. Es común confundir este tipo de humedad con la de condensación luego de una lluvia y cuando ocurren cambios bruscos de temperatura, mientras que la humedad de lluvia infiltrada sólo aparece después de grandes precipitaciones y usualmente se manifiesta en partes altas de la casa.

La humedad por infiltración de lluvia es posible prevenirla tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- Diseñando pendientes de cubiertas adecuadas a la lluvia de la zona.
- Hermetizando perfectamente los bordes de puertas y ventanas.
- Colocar canaletas y bajadas de agua adecuadas.
- Usar bota aguas adecuados en ventanas.
- No utilizar revestimientos exteriores rugosos.
- Diseñar puertas y ventanas teniendo en consideración los vientos del sector; en Chile llueve predominantemente con vientos N, NW y W, por lo que se recomienda proteger contra la lluvia los muros, puertas y ventanas con estas orientaciones.

2.1.3 Humedad del suelo

Se produce porque la humedad del suelo es absorbida por los elementos que están en contacto con éste y producto de la capilaridad de los materiales sube, generalmente afectando al primer piso de la vivienda. Es causada por errores en la impermeabilización bajo las fundaciones, en el caso de viviendas y además en muros contra terreno (muros de subterráneos) en el caso de edificios.

La mayoría de los suelos en los que se construye se encuentran con algún grado de humedad, siendo esto imposible de evitar. En general, para cualquier tipo de suelo, se pueden encontrar tres capas: la capa freática, la capa de suelo saturado de agua y la capa de suelo húmedo. Si las fundaciones o algún elemento de la construcción están bajo la capa freática, el agua penetrará en la construcción no sólo por capilaridad, también lo

hará debido a la presión que ejerce el agua sobre el elemento, es por lo mismo que antes de construir es importante y recomendable realizar sondajes para saber el nivel freático.

El nivel freático varía ligeramente dependiendo de las lluvias y la estación del año, pero en general su profundidad es más o menos regular, por lo mismo se recomienda construir en partes altas y no en hendiduras del terreno, ya que estas se encuentran más cerca de la misma. Además de la cercanía con la capa freática, un mal sistema de drenaje, mala evacuación de aguas lluvias (cerca de los cimientos) y riego de jardines, son causas comunes de exceso de humedad en el suelo aledaño a los cimientos.

Para prevenirla se pueden tomar medidas tales como construir drenes, pozos absorbentes, ataguías, colocar barreras no capilares, juntas impermeables, realizar tratamientos hidrófugos, cámaras de aire o colocar cajones y barreras estancas. Las soluciones anteriores pueden resultar costosas en algunos casos, por lo tanto para no incurrir en gastos mayores se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- No construir en terrenos bajos permanentemente húmedos.
- Realizar sondajes para determinar el nivel freático, luego realizar un drenaje si es necesario.
- Proteger las fundaciones con films o geotextiles impermeables.
- Impermeabilizar el hormigón utilizado para las fundaciones y también el mortero de pega hasta la altura de 1m.
- Alejar las bajadas de aguas lluvias de los cimientos.
- No hacer jardines pegados a los cimientos.
- No impermeabilizar el exterior de los muros sino hasta 50 cm de altura.



Figura 2.3 Humedad por capilaridad.

2.1.4 Humedad de construcción

Es producida por el agua utilizada en procesos constructivos y que aún no ha sido evaporada, quedando esta retenida al interior de los elementos constructivos (un muro por ejemplo). Dependiendo del clima en donde se construya, este tipo de humedad demorará más o menos en evaporarse y en caso de no completarse la evaporación antes de las terminaciones aparecerán eflorescencias y desconches, entre otras.

La mejor manera de prevenir este tipo de humedad es considerando en el diseño materiales que se trabajen en seco y eventualmente permitir el correcto secado de aquellos materiales que en su utilización incorporaron agua a la obra gruesa. Por ejemplo, al utilizar elementos prefabricados queda excluida la humedad de construcción, esto debido a que las piezas vienen secas y se prescinde del agua en el montaje.

El secado de la obra gruesa se puede realizarse en forma natural o artificial.

1. Secado natural:

Consiste en dejar oreando la obra hasta un punto en que se encuentre lo suficientemente seca como para comenzar con las terminaciones. Es recomendable terminar la obra antes del verano para acelerar el proceso de secado, aún así existen materiales que pueden contener humedad por años.

Tabla 2.1. Humedad de equilibrio en algunos materiales de construcción.

Material	Humedad de equilibrio
	[% según su peso]
Madera	15,0-18,0
Mortero de cal	5,0-6,0
Mortero de cal-cemento	4,0-4,5
Mortero de cemento (1:3)	3,6-4,2
Mortero de cemento (1:4)	3,2-4,0
Mortero de cemento (1:6)	3,0-3,6
Ladrillo cerámico	1,8-2,1
Yeso	0,9-1,15

Los factores más relevantes de los que depende el secado de un material son las condiciones climáticas (temperatura, humedad del aire, velocidad del viento, entre otras) y la porosidad del material. Mientras mayor sea el diámetro de los poros más fácil será eliminar el agua, cómo es el caso de ladrillos, sin embargo en aquellos materiales que presentan una estructura fina (morteros de cemento, madera, etc.) el agua se evapora muy lentamente.

Para muros homogéneos, el tiempo necesario de secado se puede calcular con la fórmula que sigue:

$$T = s \cdot e^2$$

Donde T es el tiempo de secado en días, e es el espesor del muro en centímetros y s es un coeficiente que depende del material que componga el muro llamado constante de secado. En la tabla siguiente se observan valores para algunos materiales.

Tabla 2.2. Constante de secado en algunos materiales de construcción.

Material	s [días/cm ²]
Hormigón (dosificación 250 kg)	1,6
Hormigón de pómez	1,4
Hormigón celular	1,2
Ladrillo	0,28
Calizas (yeso)	1,2
Corcho	0,14
Mortero de cal	0,25
Mortero de cemento	2,5
Madera de pino	0,9

Realizando un cálculo rápido, para un muro de hormigón (s=1,6) de espesor de 15 cm, se tendrá:

$$T = 1,6 \cdot 15^2 = 360 \text{ días}$$

Esto dice que un muro de hormigón con un espesor normal debería secarse alrededor de 1 año, lo que en general no es posible debido al ritmo de avance de la obra.

Sin embargo esta fórmula vale en condiciones ambientales normales y por ende los valores obtenidos se deben tener en consideración sólo como una referencia en el caso de tener condiciones ambientales extremas.

2. Secado artificial:

En lugares con climas húmedos, como es el sur del país, el secado natural de la obra gruesa es prácticamente imposible. Es preferible secar la obra artificialmente antes de comenzar con los estucos y revoques, ya que estos dificultan aún más el proceso de evaporación del exceso de humedad.

Es importante tener en cuenta el tiempo de curado del elemento al que se le vaya a realizar un tratamiento para acelerar su secado, así se asegura un correcto funcionamiento del elemento estructural.

La mayor temperatura hace que el secado de la obra gruesa se acelera, tal como se muestra en el siguiente gráfico.

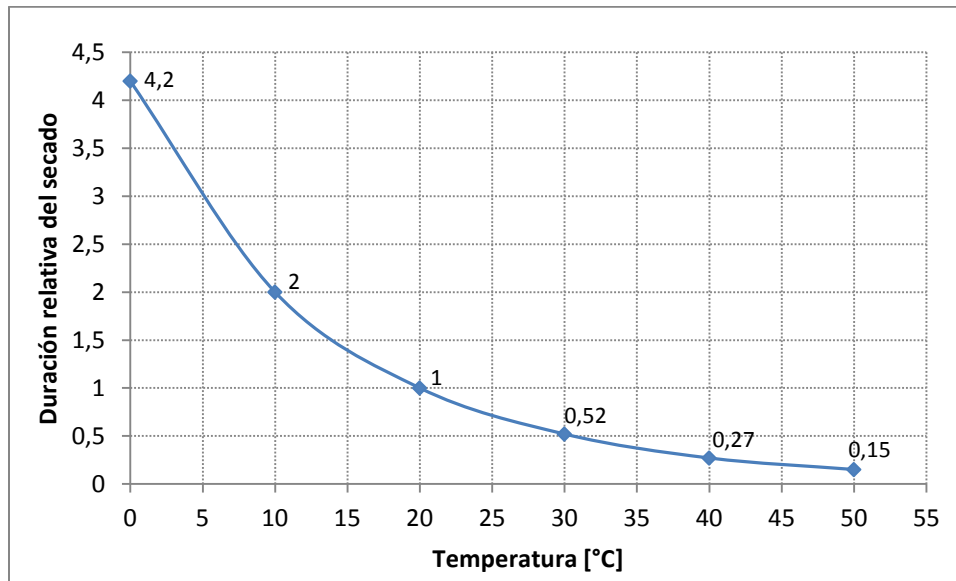


Figura 2.4 Influencia de la temperatura en el secado de la obra gruesa.

Este gráfico muestra que si la obra gruesa se deja secar a una temperatura de 10°C por ejemplo, el tiempo que tardará será el doble de que si se secara a 20°C, sin embargo también se aprecia que si se aumenta la temperatura de secado por algún medio, el tiempo disminuye considerablemente. Este medio puede ser aire caliente, calefacción, soleamiento, vientos, etc.

2.1.5 Humedad accidental

Es causada por alguna situación inesperada, accidental e imprevista como la rotura de cañerías, defectos de diseño, defectos de construcción o falta de mantención. El descuido de las personas, como fregar pisos con excesos de agua, también se considera como humedad accidental, en general son todas aquellas humedades que no se pueden clasificar en alguna de los otros cuatro tipos.

No es difícil determinar este tipo de humedades, por ejemplo cuando una cañería falla, el foco de la humedad es fácil de identificar para realizar la reparación correspondiente, sin embargo se puede confundir este tipo de humedad con la humedad por condensación que se puede generar sobre la superficie fría de una cañería.

Es importante tratar de controlar este tipo de humedad ya que en algunos casos puede provocar lesiones mecánicas de la construcción como asentamientos, esto se debe tener presente en zonas con suelos salinos, como suele ocurrir en el extremo norte del país.

Esta humedad se presenta de manera bastante aleatoria por lo que sólo se debe tener cuidado en el diseño y construcción para poder evitarla, además de hacer una mantención preventiva adecuada (ver figura 2.5).

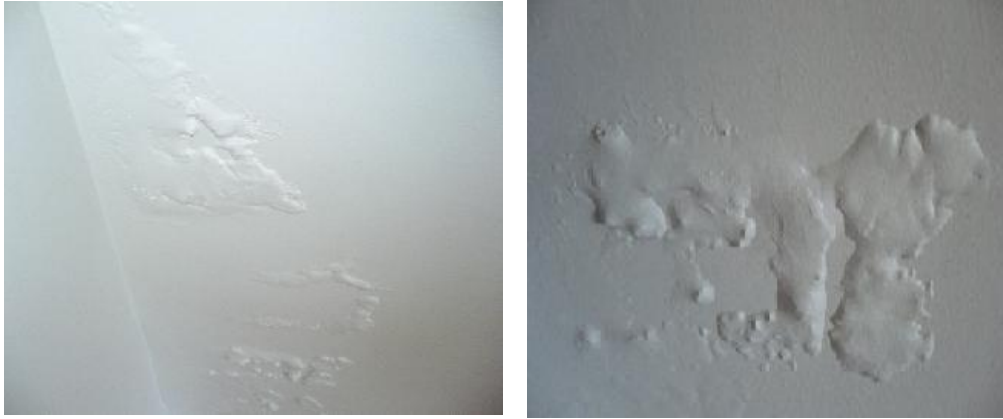


Figura 2.5 Humedad en una pared revestida interiormente con yeso, producto de la filtración en una cañería.

Para determinar el tipo de humedad en muros es de utilidad el siguiente esquema:

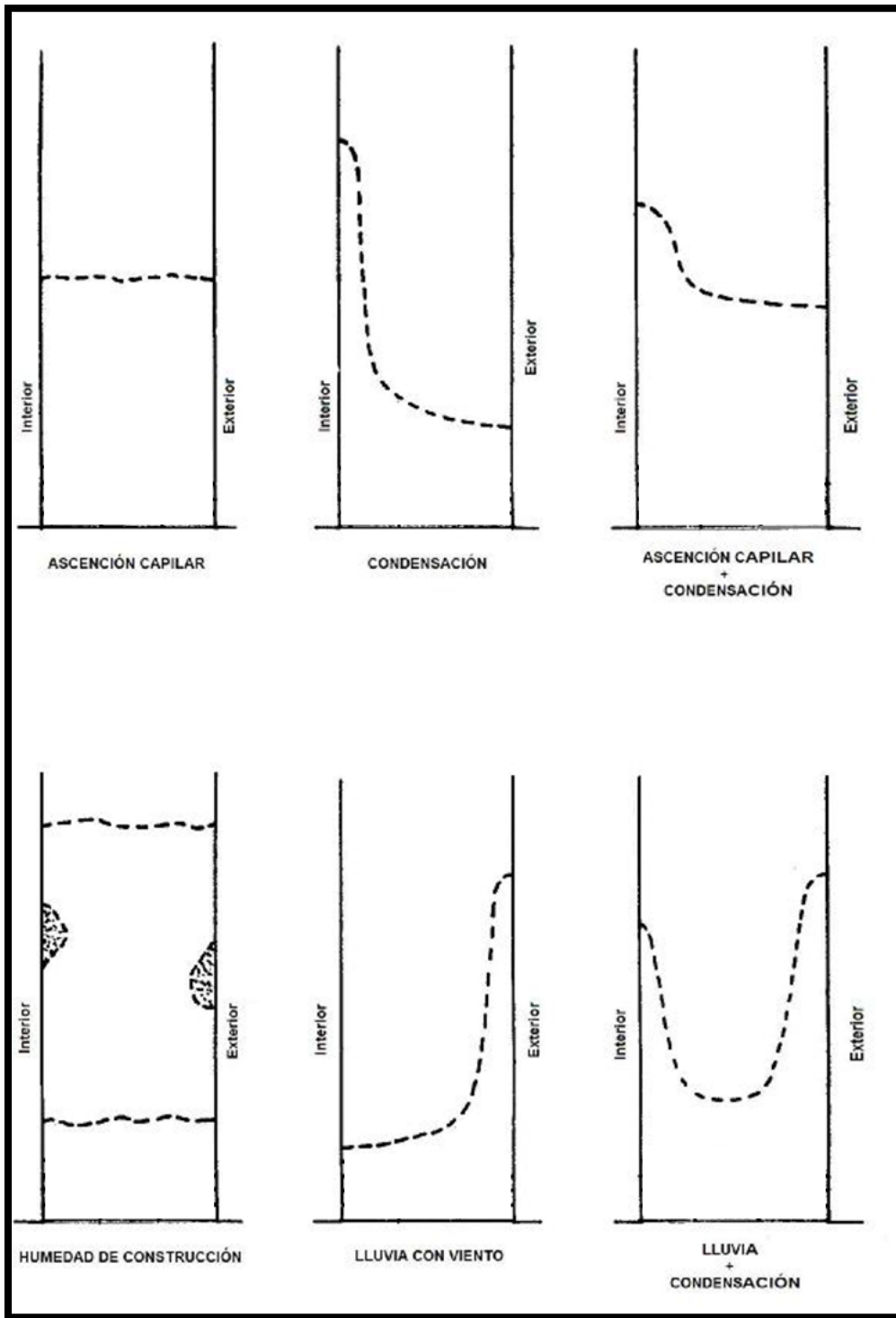


Figura 2.6 Esquema de distintos tipos de humedades en muros.

2.2. VENTAJAS DE LA PREVENCIÓN DE LA HUMEDAD

Prevenir la humedad tiene las siguientes ventajas:

- Disminuye la aparición de mohos u hongos. además de las enfermedades asociadas a estos microorganismos tales como alergias.
- Disminuyen de manera significativa otras enfermedades provocadas por la humedad, sobre todo en invierno.
- Aumenta la durabilidad de la vivienda y plusvalía, como así también de los materiales que la componen, (la humedad provoca deterioros como se ha señalado en la introducción de terminaciones tales como revestimientos).
- Aumenta los niveles de confort higrotérmico.
- Ahorra energía de calefacción, dependiendo de la zona climática y estación del año.

2.3. CONCEPTOS TÉRMICOS

2.3.1 Confort térmico

El confort es aquella condición que produce bienestar y comodidad térmica. Por lo tanto se puede inferir que confort térmico es aquella condición en donde las personas se sienten en equilibrio térmico con su entorno.

El confort térmico depende del metabolismo del cuerpo, de la radiación del entorno, de la evaporación del sudor, de la humedad y temperatura del aire, del movimiento del mismo, de la actividad física, de la alimentación y de la edad de la persona, entre otros factores que pueden llegar a ser más subjetivos. La sensación térmica, llamada también temperatura de confort solo depende de cuatro factores:

- Temperatura del aire.
- Temperatura de radiación de los elementos que nos circundan.
- Humedad del aire.
- Movimiento del aire (velocidad).

Se puede observar que el aire es el factor preponderante a la hora de determinar dicha temperatura.

En general se acepta que la temperatura de confort es de 20°C, pero se puede sentir confort dentro del rango de temperaturas de 18°C a 24°C, velocidad del aire menor a 1m/s y una humedad relativa del aire comprendida aproximadamente entre 30% a 75%.

Tabla 2.3. Sensación de confort para distintos ambientes.

Temperatura del aire	HR del aire	Velocidad del aire	Sensación térmica	Sensación de confort
[°C]	[%]	[m/s ²]	[°C]	-
25	100	0,1	25	caluroso
25	100	0,5	24	caluroso
25	100	1	23	tibio
25	100	1,5	22,2	tibio
25	80	0,1	23,5	tibio
25	80	0,5	23	tibio
25	80	1	22	agradable
25	80	1,5	21,3	agradable
25	60	0,1	22,8	agradable
25	60	0,5	22	agradable
25	60	1	21,2	agradable
25	60	1,5	20,5	agradable
25	40	0,1	21,3	agradable
25	40	0,5	21,5	agradable
25	40	1	20	agradable
25	40	1,5	19	agradable
20	100	0,1	19	agradable
20	100	0,5	18,5	agradable
20	100	1	17,3	frío
20	100	1,5	16,2	frío
20	60	0,1	18	frío
20	60	0,5	17,1	frío
20	60	1	16	frío
20	60	1,5	15	frío

Fuente: G. Rodríguez, Temperatura de Confort, Revista Bit N°27, septiembre 2002.

2.3.2 Mecanismos de transferencias de calor

Una vivienda está constantemente perdiendo o ganando calor dependiendo de las condiciones a las que esté expuesto. Este calor se puede transmitir de tres maneras:

- **Conducción:** es el calor que se transfiere por el contacto directo de las partículas de dos elementos a distintas temperaturas.
- **Convección:** es el calor que se transfiere por medio del movimiento del aire desde una zona con una cierta temperatura a otra de menor temperatura,

los fluidos al calentarse aumentan de volumen y disminuyen su densidad por lo cual ascienden desplazando al fluido de menor temperatura hacia abajo.

- **Radiación:** Es la transferencia de calor desde un elemento de mayor temperatura hacia uno de menor temperatura por medio de ondas electromagnéticas, no necesariamente a través de un medio material.

La idea de aislar térmicamente un recinto es tratar de disminuir estas transferencias de calor, en particular la transferencia por conducción.

La **conductividad térmica**, es la propiedad física de cualquier material, responsable de la transferencia de calor a través del mismo. Esta propiedad es elevada en los metales y en general aquellos con una alta densidad y baja en los gases y en materiales livianos o de baja densidad, como lo son el aire y los aislantes térmicos.

2.3.3 Aislantes térmicos

Un aislante térmico es aquel material que posee una alta resistencia térmica al paso del calor o bien un bajo coeficiente de conductividad térmica. El mejor aislante es el vacío ya que sólo transmite calor por radiación, sin embargo es muy difícil de conseguir. El mejor aislante que se puede colocar en construcción es el aire inmóvil y seco pero el utilizar aire como aislante no es muy factible, por tanto en la práctica se utilizan algunos materiales porosos, esponjosos, fibrosos, granulares, etc. que dejan incluidos gran cantidad de aire tales como los siguientes:

- Lana mineral.
- Lana de vidrio.
- Poliestireno expandido.
- Poliuretano expandido.
- Fibras textiles.
- Virutas, paja, entre otros.

Valores del coeficiente de conductividad térmica en función de la densidad, para diferentes materiales (no tan solo aislantes), se pueden encontrar en la norma NCh853.

2.3.4 Inercia térmica

La inercia térmica es la capacidad que tiene un cuerpo de conservar la energía térmica que contiene. En el caso de las viviendas y edificios la energía térmica que adquiere durante el día, producto del soleamiento, se libera suavemente durante la noche. Esto disminuye en parte la necesidad de calefacción en las noches de invierno, sin embargo en verano puede suceder lo contrario con el calor acumulado si no se cuenta con una ventilación apropiada que lo disipe.

La inercia térmica depende de la masa y del calor específico de los materiales. Edificios con una inercia térmica alta, por ejemplo de hormigón armado, son estables

térmicamente, o sea no varían su temperatura de manera brusca. Esta característica es importante en el diseño para poder conseguir un adecuado nivel de confort.

La inercia térmica presenta dos características ellas son la amortiguación de las temperaturas extremas y el retardo de la temperatura interior con respecto a la exterior en función del tiempo, en la figura que sigue se pueden apreciar estos dos fenómenos:

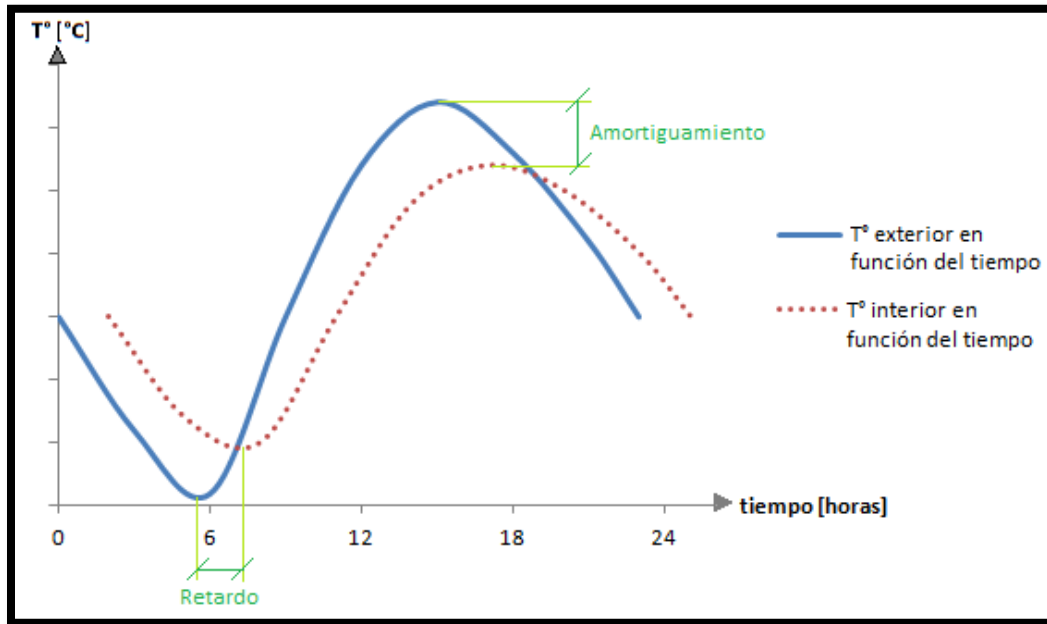


Figura 2.7 Desfase de la temperatura interior por efecto de la inercia térmica

2.3.5 Puentes térmicos

Los llamados puentes térmicos son zonas de la envolvente de un edificio donde la continuidad de la aislación térmica de un elemento constructivo se ve alterada por un elemento o material más conductor del calor. Puede deberse a cambios en el espesor del elemento, o a elementos estructurales más conductores tales como pilares y vigas de acero, de hormigón armado, etc.

En otras palabras un puente térmico es una junta de materiales con distintas características que produce una discontinuidad en la aislación, provocando en esa zona mayor transmisión de calor entre el interior y el exterior. Estas zonas poseen un riesgo de condensación mayor que el resto de la envolvente.

Los principales elementos en donde se pueden producir puentes térmicos son:

- Marcos metálicos de ventanas y puertas.
- Ventanas con vidrio monolítico o vidrio simple.
- Vigas, pilares, dinteles y losas de la envolvente.
- Cadenas de amarre, cadenas.
- Esquinas o ángulos en muros perimetrales.
- Estructuras metálicas de acero.

Por lo general es complicado determinar las pérdidas o ganancias de un puente térmico, sin embargo la mayoría de ellos se puede solucionar mediante refuerzo de la aislación térmica del elemento. En la NCh 853 hay ejemplos con los respectivos cálculos.

3 EL AGUA Y SU IMPORTANCIA EN LA VIVIENDA

3.1 EL AGUA EN LA NATURALEZA Y SU IMPORTANCIA EN LA VIDA HUMANA

El agua es el compuesto químico más abundante en la Naturaleza, sin embargo el agua dulce es escasa debido a que representa menos del 3% total del agua disponible en el planeta. El resto es agua salada principalmente de los mares. Aún más, el 70% del agua dulce está en forma de hielos de modo que el agua líquida dulce es menos del 1% del agua disponible en el planeta.

El agua dulce contiene pequeñas cantidades de sales minerales disueltas muchas veces beneficiosas para la vida animal y vegetal.

El agua cumple un complejo ciclo hidrológico a nivel planetario, en cuyas diferentes fases experimenta cambios químicos y físicos importantes disolviendo sales y gases participando en la vida acuática y otros procesos como la fijación de agua de cristalización en sales que cristalizan.

En el ciclo hidrológico el agua se puede encontrar sólida (como nieve y hielo), líquida (mares, ríos y lagos) y vapor gaseoso (humedad atmosférica). En el planeta el agua total permanece sensiblemente constante.

El agua es absolutamente necesaria no sólo para el hombre, sino también para todo el reino animal y vegetal. El cuerpo humano está conformado en un 70% de agua, sin embargo la importancia del agua para los humanos no queda ahí, ya que además de la bebida y la alimentación se ocupa gran cantidad en la vivienda, la agricultura, la ganadería, la industria, etc.

3.1.1 El ciclo del agua

Digamos que el ciclo comienza cuando el agua se evapora desde la superficie de los mares y continentes hacia la atmósfera. Cuando ésta se satura de vapor este condensa formando minúscula gotitas que se mantienen en suspensión formando nubes, que al ir creciendo son atraídas por gravedad hacia la superficie terrestre provocando las lluvias. En las alturas de las montañas y en los polos el agua queda atrapada en forma de hielos. El resto forma ríos, lagos y otros cursos que desaguan finalmente al mar. Parte de esa agua penetra en la tierra formando napas subterráneas. En su camino al mar el agua se va enriqueciendo en sales que finalmente salinizan el mar. De allí el ciclo vuelve a repetirse.

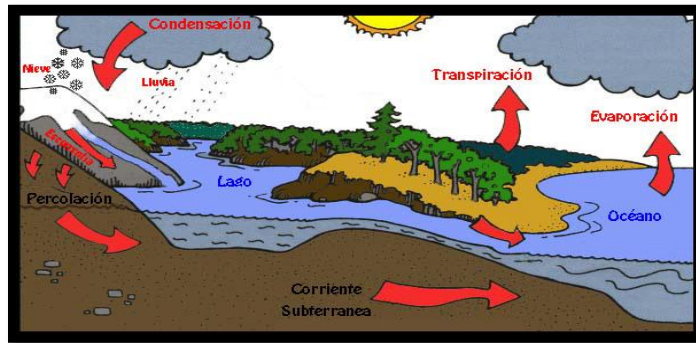


Figura 3.1 Ciclo del agua.

3.2 PROPIEDADES DEL AGUA

3.2.1 Propiedades físicas

Las principales propiedades físicas del agua son:

- El agua es insípida, incolora e inodora.
- Se presenta en estado sólido, líquido y gas.
- Su densidad es de 1.000 kg/m³ a la temperatura de 4°C.
- El punto de fusión es de 0°C y el punto de ebullición de 100°C, a la presión atmosférica normal de 760 mm de Hg (1 atmósfera)

Es importante mencionar que el agua posee una **capacidad calorífica** superior a cualquier otro líquido o sólido, siendo su calor específico de 4,186 kJ/(kg K) (1 kcal/(kg °C)) esto significa que una masa de agua puede desprender o absorber grandes cantidades de calor sin sufrir grandes variaciones de temperatura lo que tiene influencia significativa en el clima (los océanos tardan en calentarse o enfriarse).

El calor latente de vaporización es de 2.336 kJ/kg (540 kcal/kg) y el de fusión es de 333,9 kJ/kg (80 kcal/kg) aproximadamente.

El agua presenta el fenómeno de **capilaridad** a través del cual se alimentan los vegetales y en la construcción genera problemas de humedad debido a que sube el agua desde el suelo hacia los muros de los edificios.

3.2.2 Propiedades químicas

El agua está presente en la gran mayoría de los procesos químicos que se dan en la naturaleza, fundamentalmente en disoluciones salinas y otras.

- Reacciona con óxidos y metales formando hidróxidos y con los anhídros formando ácidos.
- Hidrata a las sales anhídros y disuelve a las solubles.
- Ioniza las sales minerales formando electrolitos.
- Es el más eficaz disolvente de la naturaleza.

3.3. ESTADOS DEL AGUA Y CAMBIOS DE FASE

El agua se puede encontrar en la naturaleza en tres estados o fases, estas son: hielo (estado sólido), agua (estado líquido) y vapor de agua (estado gaseoso). A continuación, se describen dichos estados de manera contextualizada con el trabajo.

3.3.1. Estado sólido

El agua es uno de los pocos elementos en la naturaleza que se expande al congelarse, por lo cual su densidad disminuye y es la razón de que el hielo flote en el agua. Debido a esta expansión, es que el agua se transforma en un agente dañino al introducirse en micro-fisuras que puedan presentar algunos materiales porosos tales como hormigones y ladrillos cuando esa agua se congela.

3.3.2 Estado líquido

El agua líquida tiene densidad máxima de 1000 kg/m³ a la temperatura de 4°C y a la presión atmosférica normal. La densidad disminuye ligeramente a otras temperaturas.

El agua líquida es la que genera daños en los materiales de construcción debido a su acción física y química.

3.3.3 Estado gaseoso

El agua se evapora fácilmente a cualquier temperatura. A 100°C y a presión atmosférica lo hace violentamente. El aire solo puede contener una pequeña cantidad de agua en forma de vapor (gas) en su seno, depende de la temperatura y de la presión atmosférica. Esta cantidad difícilmente supera el 2% en peso.

3.3.4 Cambios de fase

El agua puede pasar fácilmente si se calienta desde un estado inicial sólido a líquido y de líquido a gas (vapor) y si se enfría ocurre el proceso inverso. Esto se conoce como cambios de estado o cambios de fase. Se debe básicamente a que el agua puede ganar o perder energía, lo que altera su estructura provocando que se formen o deshagan enlaces (en su mayoría enlaces tipo puente de hidrógeno), lo que da pie a dichos cambios de fase.

Los cambios de fase son:

- Vaporización: paso del estado líquido al estado gaseoso.
- Condensación: paso del estado gaseoso al estado líquido.
- Fusión o licuación: paso del estado sólido al estado líquido.
- Congelación o solidificación: paso del estado líquido al estado sólido.

- Sublimación: paso del estado sólido al estado gaseoso.
- Sublimación inversa: paso del estado gaseoso al estado sólido.

Para el caso del agua, el punto de fusión y el inverso de congelación se producen a 0°C , mientras que el de ebullición-condensación ocurre a 100°C en condiciones normales de presión de 1 atm. El diagrama de fases para el agua permite ver para una presión y temperatura dadas, el estado en que se encuentra ésta.

El punto en que pueden existir en equilibrio entre los tres estados se le denomina punto triple y se produce aproximadamente a $0,01^{\circ}\text{C}$ y a la presión de 611,73 Pa (0,006 atm).

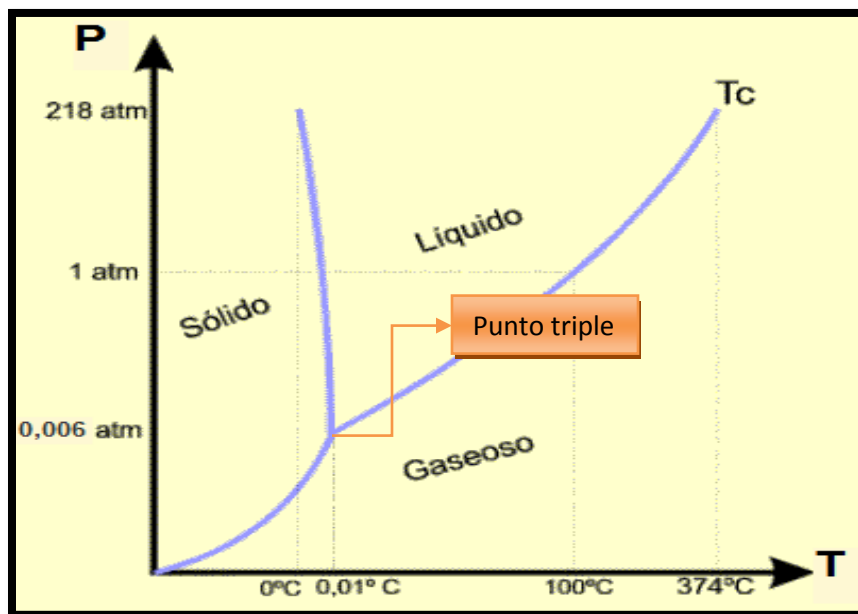


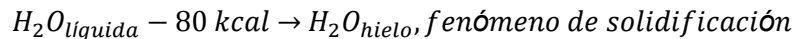
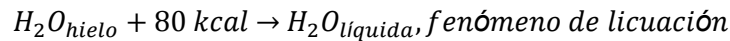
Figura 3.2 Diagrama de fase del agua

3.4. FENÓMENOS DE LICUACIÓN-SOLIDIFICACIÓN, VAPORIZACIÓN-CONDENSACIÓN

Los cambios de fase dependen de las condiciones de temperatura y presión a las que se encuentre el agua. Cuatro son los más importantes en el presente estudio y corresponden a los que ocurren en condiciones ambientales comunes, ellos son licuación-solidificación y vaporización-condensación.

3.4.1 Licuación-solidificación

Esta fenomenología es representada por las siguientes ecuaciones químicas, por kilogramo de agua:



La licuación es un proceso endotérmico debido a que necesita absorber energía calórica para llevarse a cabo, además en este proceso existe un punto (llamado punto de fusión) en que la temperatura del agua se mantiene constante hasta la total licuación del hielo existente que corresponde a 0°C a presión atmosférica normal.

La solidificación por su parte es un proceso exotérmico, vale decir libera calor para llevarse a cabo. En este caso existe el punto de solidificación o también llamado de congelación, el que corresponde a la temperatura en que el líquido se solidifica. Mientras ello ocurre la temperatura permanece constante durante el cambio siendo, como se dijo, 0°C.

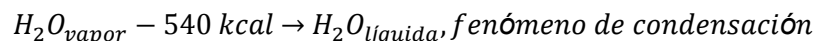
Dentro de una vivienda o edificio es poco común encontrar agua sólida, por lo tanto el fenómeno de licuación-solidificación es importante estudiarlo en el exterior donde sí suele producirse en tiempo frío. Esto puede ser muy perjudicial en la construcción debido a que el agua al congelarse se expande y produce la meteorización de algunos materiales porosos.

3.4.2 Vaporización-condensación

La vaporización es el paso del estado líquido al gaseoso que se lleva a cabo por medio de la evaporación desde la superficie del agua a temperaturas inferiores a 100 °C y finalmente por la ebullición que a presión normal ocurre a 100°C. La evaporación ocurre cuando las moléculas del líquido adquieren energía suficiente para vencer la tensión superficial escapando al aire adyacente; este proceso se acelera a medida que la temperatura es mayor. En la ebullición toda la masa del agua alcanza la temperatura de ebullición, por tanto todas las moléculas de agua se evaporan en cualquier parte del líquido en que estén, no sólo en la superficie. La condensación es el paso opuesto del estado gaseoso al líquido y para ello el vapor de agua necesita desprender energía (reacción exotérmica).

El vapor de agua no es dañino para los materiales, pero el agua líquida si lo es como anteriormente se ha explicado.

Las ecuaciones que representan estos fenómenos, por kilogramo de agua son:



El calor latente de vaporización o condensación es de 2259 kJ/kg (540 kcal/kg) mientras que el calor latente de fusión o solidificación es de 333,7 (80 kcal/kg). Estos valores son

muy elevados, sobre todo el de vaporización y se debe a que para pasar del estado líquido a gaseoso es necesario romper los enlaces tipo puentes de hidrógeno que existen entre las moléculas de agua.

3.5 EL AGUA EN LA VIVIENDA Y SUS USOS

Como ser vivo los humanos necesitamos imperiosamente agua para vivir. No sólo para beber y en los alimentos sino también para innumerables actividades en el hogar, tales como aseo personal, lavado de ropa, aseos en general, cocinar, regar, etc. Según la UNESCO una persona de un país en vías de desarrollo puede gastar entre 60 a 150 litros de agua diarios, mientras que en un país desarrollado este consumo puede superar los 500 litros.

En Chile el Reglamento de Instalaciones Domiciliarias de Agua potable y Alcantarillado entrega algunos valores para el gasto instalado de llaves de agua potable en artefactos sanitarios, además de algunos valores referenciales de consumo de agua para diferentes actividades:

Tabla 3.1. Gasto de agua de artefactos sanitarios.

Tipo de Artefacto	Gasto L/min	
	Agua fría	Agua caliente
DUCHA	10	10
BAÑO TINA	15	15
LAVATORIO	8	8
LAVAPLATOS	12	12
LAVADERO	15	15
LAVACOPAS	12	12

Fuente: Anexo N°3 RIDDA

Tabla 3.2. Gasto diario de agua en recintos públicos y privados.

Casa Habitación	150-450 L/hab/día
Edificio de departamento con arranque único, comprendidos usos domésticos, lavado, riego, calefacción.	450 L/hab/día
Edificio de departamentos. Con arranque independiente o remarcador e incluyendo sólo uso doméstico.	200-300 L/hab/día
Establecimientos educacionales	50 L/alumno ext./día
	100 L/alumno mp./día
	200 L/alumno int./día
Establecimientos hospitalarios	1.300-2.000 L/cama/día
Locales industriales por operarios por turno	150 L/día
Locales comerciales y oficinas	150 L/empleo/día
	10 L/m2/día como mínimo
Bares, restaurantes, fuentes de soda y similares	40 L/m2/día
Salas de espectáculos, sin considerar acondicionamientos de aire	25 L/butaca/día
Jardines y prados	10 L/m2/día
Dispensarios, policlinicas y otros establecimientos similares	100 L/m2/día
Regimientos y cuarteles (a lo cual hay que agregar otros consumos)	200 L/hombre/día
Hoteles y residenciales	200 L/cama/día

Fuente: Anexo N°4 RIDDA

3.6 CAUSAS DE EVAPORACIÓN DE AGUA EN LA VIVIENDA

3.6.1. Lavado de ropa

El lavado de ropa en sí no produce mucho vapor de agua, pero el secado de ropa es el que entrega gran cantidad de vapor al ambiente. Actualmente las lavadoras modernas entregan la ropa lavada y centrifugada, sin embargo esta última retiene una cantidad importante de agua de alrededor de 1,5 veces su peso. Peor es el caso si la ropa se estruja a mano pues retiene cerca de 2,5 veces su peso en agua. Si la ropa es secada al interior de un recinto, toda esta agua se va al ambiente en forma de vapor, pudiendo llegar a generar del orden de 10 kg de vapor de agua al día en un lavado de ropa de una familia. El planchado de ropa es otra actividad que entrega vapor al ambiente.

3.6.2. Cocinar

La cocina es otra fuente generadora de vapor de agua, sobre todo aquellas que no poseen una campana extractora de aire, debido a que la mayoría de los alimentos que consumimos deben ser hervidos o preparados con agua,

Al cocinar se puede llegar a generar hasta 500 g de vapor de agua por hora, en el momento de máxima producción de vapor.

3.6.3. Aseo personal

Es probable que el cuarto de baño sea el lugar más propenso a la condensación debido a que los baños, en especial la ducha si es con agua caliente, generan gran cantidad de vapor que fácilmente satura su atmósfera.

En el baño se puede generar del orden de 1000 g de vapor de agua por hora.

3.6.4. Calefacción

Los sistemas de calefacción pueden dividirse en dos tipos:

- calefacciones secas.
- calefacciones húmedas.

Los sistemas de calefacción secas son aquellos que queman combustibles de cualquier tipo y expulsan los gases quemados al exterior sin contaminar los ambientes que temperan. Entre ellas se cuentan la calefacción por agua caliente, aire caliente, chimeneas a leña y las estufas con chimenea que queman combustibles sólidos, líquidos o gaseosos y que son, generalmente, de tiro balanceado. También las estufas eléctricas de cualquier tipo.

Los sistemas de calefacción húmeda son aquellos que queman combustibles a base de hidrocarburos (kerosene, gas licuado, natural o de ciudad) y que, al ser de llama abierta (sin expulsión de gases quemados al exterior), dejan en los ambientes dichos gases. El vapor de agua que aumenta la humedad ambiental e incrementa los riesgos de condensación al interior de los recintos. En efecto, los hidrocarburos contienen importante porcentaje de hidrógeno que durante la combustión se combina con el oxígeno del aire para producir agua. Lamentablemente estas estufas son las más usadas en nuestro país siendo, generalmente, la principal causa de condensaciones en la vivienda.

La calefacción de llama abierta generalmente de estufas a parafina o a gas genera vapor de agua en cantidad apreciable. Un kg de combustible puede produce las siguientes cantidades de vapor de agua:

Tabla 3.3. Dióxido de carbono y vapor de agua generado por kilogramo de combustible.

Combustible (1Kg)	Aparato	Dióxido de Carbono	Vapor de Agua
		[kg]	[kg]
Kerosene	Estufas y cocinas	3,10	2,50
Gas licuado	Estufas y cocinas	3,00	1,60
Gas natural	Estufas y cocinas	2,75	2,25

Fuente: G. Rodríguez, Contaminación atmosférica intradomiciliaria, Revista Bit N°67.

3.6.5. Número y actividad de habitantes

Los habitantes de un inmueble son una fuente generadora de vapor de agua continua debido la transpiración y la respiración. La cantidad de vapor de agua que evapora una persona depende en gran medida de la actividad física que esté realizando y en menor medida de su masa corporal, tal como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 3.4. Agua evaporada por personas en función del tipo de actividad y la temperatura.

Actividad	Vapor de agua [g/h] producido por una persona según temperatura:			
	10°C	15°C	20°C	25°C
Reposo	36	36	45	66
Trabajo ligero	54	72	110	175
Trabajo normal	66	120	170	205
Trabajo muy pesado	155	215	300	350

Fuente: F. García, Estudio teórico experimental de humedad por condensación en edificios.

Tomando en cuenta que en promedio una persona genera unos 50 g/h y considerando que permanece unas 12 horas en la vivienda, se estima que la producción de vapor de agua es de 0,6 kg/día por habitante. Si se considera una familia de 4 personas se tiene una producción de vapor de agua no menor de 2,4 kg/día. Este fenómeno toma relevancia durante la noche cuando toda la familia está reunida.

3.6.6. Riego de plantas de interior

Esta actividad entrega menor vapor de agua al ambiente que las otras, sin embargo es una fuente que generalmente no se toma en cuenta y que produce vapor por transpiración de las plantas. Toda el agua usada en el riego termina por evaporarse.

3.6.7 Riesgo de condensación

En la estación invernal de lugares con climas fríos, como es el caso de Chile, se produce una marcada diferencia de temperatura y de presión de vapor de agua entre interior y exterior. Mientras mayor es esa diferencia, mayor es el riesgo de condensación, más aún cuando la temperatura ambiente interior al ser mayor puede contener más agua en forma de gas (humedad relativa) pero al bajar la temperatura o subir la presión de vapor, especialmente en muros y elementos que dan al exterior, hay gran probabilidad que el aire se sature creciendo el riesgo que la humedad condense.

No sólo la temperatura y la presión de vapor influyen en este proceso, sino también las condiciones de uso al interior de la vivienda, sobre todo las actividades descritas en el punto 2.6 de este capítulo. Si el vapor de agua encuentra superficies con una temperatura menor a la temperatura de rocío, condensará superficialmente sobre ellas. En una vivienda normal la condensación se dará primero en ventanas y metales, luego en paredes y muros de la envolvente.

Debido a la diferencia de presión de vapor entre el interior del recinto y el exterior, el vapor de agua tratará de salir vía envolvente al exterior. Si los materiales son permeables al vapor este puede penetrarlos y condensar también en el interior del elemento (muro, techo o piso ventilado), lo que constituye la llamada condensación intersticial que puede causar mucho daño material al no manifestarse visiblemente al exterior. Este fenómeno puede causar una disminución del aislamiento térmico del elemento en cuestión, con las

consiguientes pérdidas de energía de calefacción y mayor riesgo de condensación (ver G. Rodríguez, Revista Bit N°s 57 y 58). Para prevenir el riesgo de condensación intersticial es mejor tener una aislación térmica exterior, como es el caso del sistema EIFS o el de fachada ventilada, como veremos oportunamente.

En la figura que sigue, a la izquierda se aprecia un muro en el que no existe riesgo de condensación intersticial y a la derecha el mismo muro, pero con riesgo de condensación intersticial, esto debido a que la presión de vapor del elemento, supera la presión de vapor de saturación (ver capítulo 4).

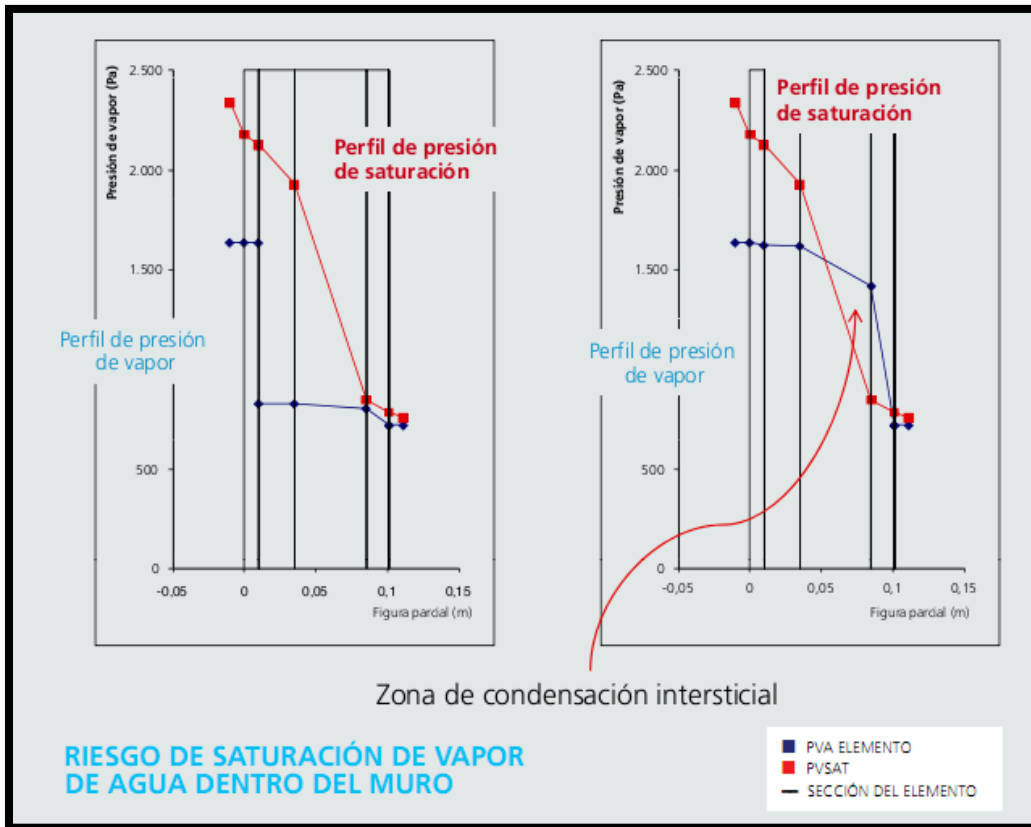


Figura 3.3 Riesgo de condensación

Fuente: Revista Bit 75

3.6.8 Riesgo de solidificación

Ocurre en las zonas dónde se alcanzan temperaturas inferiores a 0°C, especialmente en la Cordillera de los Andes y extremo sur del país. Es importante tenerlo en cuenta ya que si el vapor de agua condensa al estado líquido y la temperatura exterior es extremadamente baja, puede darse el proceso de solidificación dentro de algún elemento de la envolvente y si este elemento es rígido, el material que lo compone se meteorizará, como en el caso de hormigones y ladrillos.

3.7. HUMEDAD EN LA ATMÓSFERA

3.7.1 Humedad relativa y absoluta

La **Humedad Absoluta** es la cantidad de vapor de agua, expresada en gramos por metro cúbico de aire seco (o kg de aire seco) de un cierto ambiente. Cuando el aire no soporta más vapor de agua se dice que está saturado.

La **Humedad Relativa** es el cociente entre el contenido de vapor de agua contenido en un ambiente respecto a la humedad absoluta de saturación a la temperatura de ese ambiente, expresado en porcentaje. Las fórmulas matemáticas para obtener la humedad relativa son:

$$\%HR = \frac{HA}{HA_{sat}} \cdot 100$$

$$o \ \%HR = \frac{p_v}{p_{sat}} \cdot 100$$

donde:

$\%HR$: Porcentaje de humedad relativa del ambiente [%].

HA : Humedad absoluta $\left[\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g de aire seco}} \right]$ o $\left[\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{ de aire seco}} \right]$

HA_{SAT} : Humedad de saturación $\left[\frac{\text{g H}_2\text{O}}{\text{g de aire seco}} \right]$ o $\left[\frac{\text{gr H}_2\text{O}}{\text{m}^3 \text{ de aire seco}} \right]$

p_v : Presión de vapor parcial [Pa].

p_{sat} : Presión de saturación [Pa].

Como se mencionó en el Capítulo Introducción, la humedad relativa determina la sensación de confort, si ésta es baja puede causar pérdidas de calor del cuerpo por medio de la evaporación del agua provocando sequedad de la piel y de las membranas mucosas, en cambio si es alta se hace muy difícil evaporar el sudor y por ende no enfriar el cuerpo. Esta humedad se puede medir con instrumentos llamados higrómetros o psicrómetros .

3.7.2 Poder desecante del aire

Para una cierta condición de temperatura y presión, la diferencia entre el peso de vapor saturado y el peso del vapor contenido en el aire se conoce como **poder desecante del aire**. Por ejemplo si un lugar está a 18°C con un 70% de humedad se tendrá un poder desecante del aire de 30%, y así sucesivamente. El poder desecante porcentual del aire es el complemento de la humedad relativa. La cantidad de vapor de agua saturante es

más alta a medida que la temperatura es mayor, por lo tanto mientras más caliente y más seco sea el aire, mayor será el poder desecante de éste y mayor será la velocidad de evaporación del agua.

3.7.3 Humedad atmosférica

Como ya se ha mencionado, los seres humanos necesitamos un cierto grado de humedad en el ambiente para estar en confort, esta suele estar en un rango que varía entre 30% a 75% de humedad relativa. Dentro de la vivienda, la humedad atmosférica puede ser similar a la exterior, mayor o menor, ello depende del uso que se le dé a la vivienda, de la generación de vapor, de temperatura y ventilación, así como del clima exterior que en un momento dado puede existir.

La cantidad máxima de humedad atmosférica es directamente proporcional a la temperatura del aire interior del inmueble. En la tabla que sigue se puede observar la humedad de saturación según la temperatura del aire

Tabla 3.5. Saturación de humedad según temperatura.

Temperatura [°C]	Humedad máxima del aire [g H2O/m³]	Temperatura [°C]	Humedad máxima del aire [g H2O/m³]
-5	3,37	14	12,03
-4	3,64	15	12,82
-3	3,92	16	13,59
-2	4,22	17	14,43
-1	4,55	18	15,31
0	4,89	19	16,25
1	5,23	20	17,22
2	5,6	21	18,25
3	5,98	22	19,33
4	6,39	23	20,48
5	6,82	24	21,68
6	7,28	25	22,93
7	7,76	26	24,24
8	8,28	27	25,64
9	8,82	28	27,09
10	9,39	29	28,62
11	10,01	30	30,31
12	10,64	31	31,89
13	11,32	32	33,64

Fuente: F. Ulsamer, Las humedades en la construcción.

Dicho de otra manera, en la tabla aparece la humedad máxima que puede soportar el aire, para cada temperatura. A dicho valor se le llama temperatura de rocío o de condensación.

La tabla que sigue permite determinar la humedad atmosférica utilizando dos termómetros comunes. Para ello, uno de los termómetros debe registrar la temperatura del aire en seco, esto es de manera normal, y el otro en húmedo, esto es con el bulbo dentro de un

recipiente con agua pura. Con la lectura del termómetro seco y la diferencia entre las lecturas de los termómetros se puede obtener la humedad del aire.

La humedad relativa [%] corresponde a la fila superior y en color blanco, mientras que la humedad absoluta [g/m^3] corresponde a la fila inferior y de color celeste.

Tabla 3.6. Tabla psicrométrica.

		Diferencia entre las lecturas de dos termómetros [°C]														
Lectura del termómetro seco [°C]	°C	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
	10	100	94	87	80	74	68	62	56	50	45	39	33	28	22	16
9,35		8,79	8,13	7,48	6,92	6,36	5,8	5,24	4,67	4,21	3,65	3,09	2,62	2,06	1,5	
11	100	94	87	81	75	69	63	58	52	46	41	36	30	25	19	
	9,95	9,35	8,66	8,06	7,46	6,86	6,27	5,77	5,17	4,58	4,08	3,58	2,98	2,49	1,89	
12	100	95	89	83	76	71	65	59	54	48	43	38	33	28	22	
	10,6	10,07	9,43	8,8	8,06	7,53	6,89	6,25	5,72	5,09	4,56	4,03	3,5	2,97	2,33	
13	100	95	89	83	77	72	66	61	55	50	45	40	35	30	25	
	11,3	10,7	10,06	9,38	8,7	8,14	7,46	6,89	6,21	5,65	5,08	4,52	3,95	3,39	2,82	
14	100	95	89	84	78	73	67	62	57	52	47	42	37	32	28	
	12	11,4	10,68	10,08	9,36	8,76	8,04	7,44	6,84	6,24	5,67	5,04	4,44	3,84	3,36	
15	100	95	89	84	78	73	68	63	58	53	49	44	39	34	30	
	12,75	12,11	11,35	10,71	9,94	9,31	8,67	8,03	7,39	6,76	6,25	5,61	4,97	4,33	3,82	
16	100	95	89	84	79	74	69	64	59	55	50	45	41	36	32	
	13,55	12,87	12,06	11,38	10,7	10,03	9,35	8,67	7,99	7,45	6,77	6,1	5,55	4,88	4,34	
17	100	95	90	85	80	75	70	65	61	56	52	47	43	38	34	
	14,35	13,63	12,91	12,2	11,48	10,76	10,04	9,33	8,75	8,04	7,46	6,74	6,17	5,45	4,88	
18	100	95	90	85	80	75	71	66	62	57	53	49	44	40	36	
	15,25	14,49	13,72	12,96	12,25	11,44	10,83	10,06	9,45	8,69	8,08	7,47	6,71	6,1	5,49	
19	100	95	90	86	81	76	72	67	63	58	54	50	46	42	38	
	16,15	15,34	14,53	13,89	13,08	12,27	11,63	10,82	10,17	9,37	8,72	8,07	7,43	6,78	6,14	
20	100	95	91	86	81	77	72	68	64	59	55	52	47	43	40	
	17,15	16,29	15,61	14,75	13,89	13,2	12,36	11,66	10,98	10,12	9,43	8,92	8,06	7,37	6,86	
21	100	95	91	87	82	78	74	69	65	61	57	53	49	45	41	
	18,2	17,29	16,56	15,83	14,92	14,2	13,47	12,66	11,83	11,1	10,37	9,65	8,92	8,19	7,46	
22	100	96	91	87	82	78	74	70	66	62	58	54	50	47	43	
	19,25	18,48	17,52	16,75	15,78	15,01	14,24	13,47	12,7	11,93	11,16	10,39	9,62	9,05	8,28	
23	100	96	91	88	83	78	74	70	66	63	59	56	52	48	44	
	20,4	19,58	18,56	17,95	16,93	15,91	15,1	14,28	13,46	12,85	12,04	11,42	10,61	9,79	8,98	
24	100	96	91	88	83	79	75	72	67	63	60	57	53	50	46	
	21,6	20,74	19,66	19,01	17,93	17,06	16,2	15,55	14,47	13,61	12,96	12,31	11,45	10,8	9,94	

25	100	96	92	88	84	80	76	72	68	64	61	58	54	51	47
	22,85	21,94	21,02	20,11	19,19	18,28	17,37	16,45	15,54	14,62	13,94	13,25	12,34	11,65	10,74
26	100	96	92	88	84	80	76	73	69	66	62	59	55	52	48
	24,15	23,18	22,22	21,25	20,29	19,32	18,35	17,63	16,66	15,94	14,97	14,25	13,28	12,56	11,59
27	100	96	92	88	84	80	77	73	69	66	63	60	56	52	49
	25,5	24,48	23,46	22,44	21,42	20,4	19,63	18,61	17,59	16,83	16,06	15,3	14,28	13,26	12,49
28	100	96	93	89	85	81	78	74	70	67	63	60	57	53	51
	27	25,92	25,11	24,03	22,95	21,87	21,06	19,98	18,9	18,09	17,01	16,2	15,39	14,31	13,77
29	100	96	93	89	86	81	78	74	71	67	64	61	58	55	52
	28,5	27,36	26,5	25,36	24,51	23,08	22,23	21,09	20,23	19,09	18,24	17,38	16,53	15,67	14,82
30	100	96	93	89	86	82	78	75	72	68	65	62	59	55	53
	30,1	28,9	27,99	26,79	25,89	24,68	23,48	22,57	21,37	20,47	19,56	18,66	17,76	16,55	15,95
31	100	97	94	90	86	82	79	75	72	69	65	62	59	56	53
	31,75	30,8	29,84	28,57	27,3	26,03	25,08	23,81	22,86	21,91	20,64	19,68	18,73	17,78	16,83
32	100	97	94	90	87	83	79	76	72	69	66	63	60	57	54
	33,5	32,49	31,49	30,15	29,14	27,8	26,46	25,46	24,12	23,11	22,11	21,1	20,1	19,09	18,09
33	100	97	94	90	88	84	80	76	73	70	67	64	61	58	55
	25,3	34,24	33,18	31,77	31,06	29,65	28,24	26,83	25,77	24,71	23,65	22,59	21,53	20,47	19,41

Fuente: C. Rougeron, Aislamiento acústico y térmico en la construcción.

3.7.4 Aire húmedo

El aire atmosférico normalmente contiene cierto porcentaje de humedad (agua en estado gaseoso) dependiente de la temperatura. Cuando la humedad es máxima (estado saturado) se dice que la humedad relativa es 100% (por ejemplo cuando está lloviendo). Si el contenido de humedad, para cierta temperatura, se expresa en % se dice que es humedad relativa del aire. En cambio si la humedad se expresa en el contenido de agua que el aire contiene (g/m³) se dice que se trata de humedad absoluta a esa temperatura. El gráfico siguiente muestra las curvas de humedad relativa y contenido de humedad absoluta en función de la temperatura, llamado gráfico psicrométrico del aire. Este gráfico está confeccionado con los datos de saturación de humedad de Federico Ulsamer, Tabla 2.5.

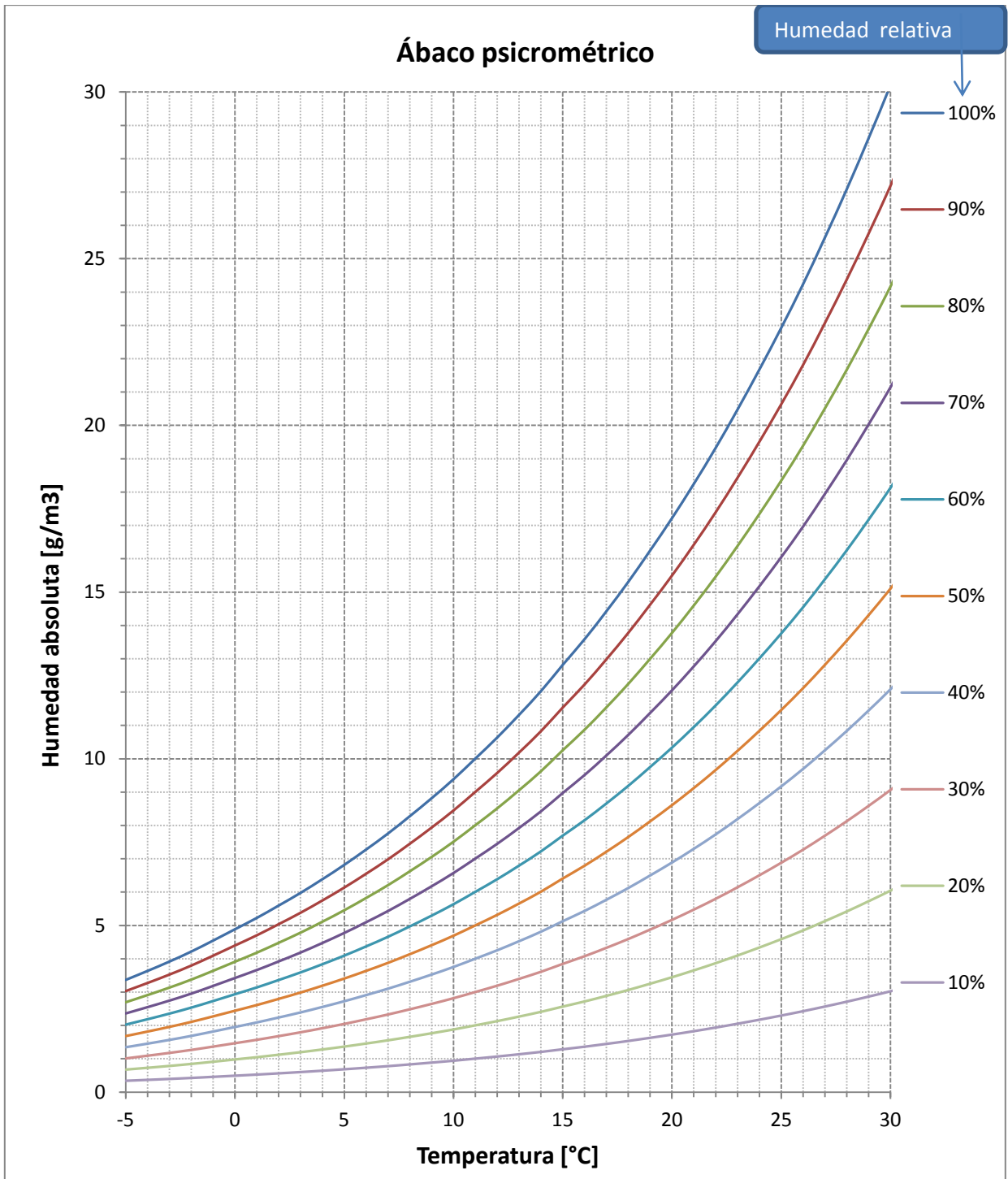


Figura 3.4 Ábaco psicrométrico.

Así por ejemplo a 20°C y a una humedad relativa del 70% se tendrá una cantidad de humedad absoluta en el ambiente de $12 \text{ g}/\text{m}^3 \text{ de aire}$ (ver figura 2.4). Si la temperatura

baja, la humedad relativa aumenta, pero solo puede hacerlo hasta 100% (curva de saturación) en cuyo punto el aire no admite más vapor; si la temperatura sigue bajando el exceso de vapor tiene que forzosamente condensar en agua líquida. La temperatura a la que se produce condensación es la temperatura de rocío, en el ejemplo (ver figura 2.5) la temperatura de rocío es de 14°C.

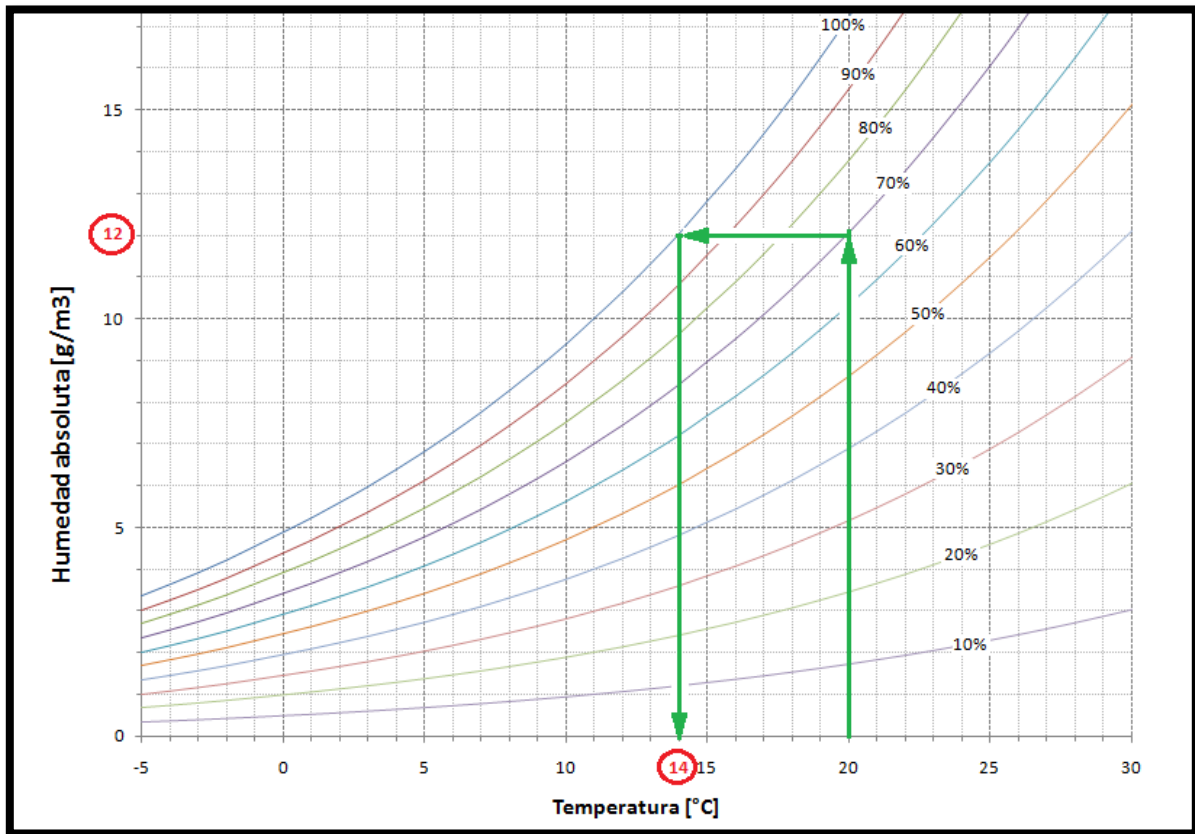


Figura 3.5 Gráfico psicrométrico, ejemplo.

3.8. EFECTOS BIOLÓGICOS

El principal efecto biológico que trae consigo la humedad del aire en la vivienda es la formación de mohos, micro-hongos y fungosidades. Estos organismos se clasifican según su tamaño pudiendo ser fucus o líquenes, hongos tubulares o ascomicetes y pectiniformes.

Los mohos pueden formar capas de diversas tonalidades debido a su grosor y consistencia algodonosa, ello conlleva a que aparezcan manchas de muy mal aspecto, sin embargo esto no es lo único que hace repulsivos a este tipo de microorganismos, ya que además producen bastantes gases. Al desprender olores, los mohos se delatan incluso en lugares donde están completamente ocultos, como por ejemplo en paredes donde los muebles no permiten verlos o incluso dentro de la misma pared. Es por ello que se recomienda, por ejemplo, no tener alimentos en despensas pegadas a paredes donde exista riesgo de condensación y no sea posible asear ni ventilar, en estos lugares los alimentos se estropean rápidamente.



Figura 3.6 Hongos en paredes producto de la humedad.

Este tipo de hongos microscópicos se alimentan de materia orgánica. Se desarrollan generalmente en superficies como cornisas y molduras de hormigón, yeso u otros. Sin embargo estos microorganismos no pueden desarrollarse en todas partes ya que además de nutrirse necesitan de humedad, ciertas condiciones de calor y oscuridad.

La humedad es la condición base para que el moho se desarrolle y por tanto, deben prevenirse las condensaciones y sus causas. El calor y la ventilación ayudan a que no aparezcan mohos, debido a que se evapora el agua.

Al eliminar la humedad de un lugar, el moho se seca y muere o queda en estado latente esperando que las condiciones de humedad le sean favorables. Cabe mencionar que los hongos aparecieron antes que los seres humanos en la Tierra y por lo mismo son más resistentes a ciertos agentes, pudiendo estar encapsulados muchos años si las condiciones ambientales les son adversas. Por ello hay que limpiar exhaustivamente las superficies para eliminarlos por completo.

Los lugares de la casa más propensos a que aparezcan colonias de hongos son el baño y la cocina debido a la gran producción de vapor de agua que en estas habitaciones se producen. Si existe condensación en estos lugares, sumado a una mala ventilación, poca luz y una temperatura superior a 5°C, sin duda alguna aparecerán estos indeseados microorganismos.

Las pinturas fungicidas ayudan en gran medida a disminuir la aparición de mohos y hongos, sin embargo si las condiciones de humedad, temperatura, mala ventilación y poca luz se mantienen en el tiempo, tarde o temprano aparecerán los hongos.

Las paredes frías y húmedas pueden mejorarse con adecuadas aislaciones (menor U)

En resumen, calentar, aislar y ventilar es la mejor forma de combatir la formación de mohos. El uso de pinturas fungicidas previa limpieza ayuda a tal efecto, pero no es una solución perenne.

3.9 DAÑOS A LA SALUD PRODUCTO DE LA HUMEDAD

La humedad ambiental no es tan sólo un problema estético o material sino que también puede atacar la salud de las personas que se encuentran expuestas a ella.

La mayoría de las enfermedades asociadas a la humedad son producidas por mohos y esporas que se multiplican en el aire. Existen personas a las que la combinación de estos agentes les puede generar una serie de efectos nocivos, tales como:

- Congestión nasal.
- Irritaciones a la garganta.
- Tos.
- Irritaciones a los ojos.
- Alergias.
- Cuadros asmáticos.
- Infecciones.

Es más fácil que estas patologías se desarrollen en personas que tengan un sistema inmunológico débil, entre ellos bebés, niños, embarazadas y ancianos, pero sobre todo en aquellas personas que presenten alguna enfermedad respiratoria crónica, por lo que se recomienda no exponerse en ambientes húmedos.

En general la humedad produce enfermedades broncopulmonares que pueden gatillar la aparición de otras enfermedades más críticas.

Algunos estudios han relacionado afecciones del aparato respiratorio con la exposición a lugares con presencia de humedad y mohos en personas consideradas sanas. Según un estudio publicado en *Environmental Health Perspectives*, la humedad en la vivienda duplica la probabilidad de desarrollar asma en los niños.

La exposición en ambientes húmedos puede producir cansancio, escalofríos, sensación de malestar, dificultad para respirar, pies fríos, dolores de cabeza, etc. Las personas con problemas reumáticos pueden sentir un aumento de sus molestias y dolores.

4 EFECTO DE LA HUMEDAD EN MATERIALES

4.1 COMPORTAMIENTO DE MATERIALES FRENTE A LA HUMEDAD

La humedad de agua líquida produce numerosos efectos perniciosos en muchos materiales de construcción, especialmente aquellos que pueden estar sometidos a la intemperie, a aguas apozadas o a alta humedad permanente.

Los efectos pueden ser de variada índole, tales como: variaciones de conductividad térmica que afecta el poder aislante, daños estructurales, alteraciones de forma y volumen, corrosiones en metales y aleaciones, efectos biológicos en materiales orgánicos, entre otros.

Estos efectos dependen del tiempo que el agua actúa sobre un material, de la temperatura, de ciclos de hielo-deshielo o de evaporación-condensación, de la porosidad del material, de las sales solubles que el material pueda tener en su interior o que el agua pueda aportar, etc.

Si bien es complicado explicar el comportamiento de los materiales de una construcción frente a la humedad, es conveniente conocer las fenomenologías básicas para prevenir futuros problemas durante el uso de la vivienda, problemas que son difíciles de resolver si se producen una vez terminada la construcción. Desde el punto de vista de los materiales de construcción estos se pueden dividir en:

- Materiales pétreos, que son aquellos de origen natural formado por áridos de todo tipo desde piedras, labradas o naturales, chancados y rodados. Estos materiales son de alta densidad y, en general, impermeables al agua.
- Materiales hidráulicos, formados por hormigones, estucos y yesos. Estos materiales son de variadas densidades; en general, los de menor densidad son más porosos y permeables al agua.
- Materiales cerámicos son aquellos preparados a partir de arcillas o caolines cocidos a altas temperaturas. Entre ellos están los ladrillos, las tejas, las losetas refractarias para pisos y los azulejos. Los más porosos son permeables al agua.
- Los vidrios de ventanas ocupan un lugar especial en la construcción por su uso y gran variedad de tipos, por lo cual se tratan en forma separada. Son impermeables al agua, pero en ellos se producen frecuentemente condensaciones en épocas de frío.
- Maderas y sus derivados. Son materiales celulósicos provenientes de la explotación forestal de árboles. Les afecta el agua líquida en exceso no obstante que en su composición normal contienen humedad en porcentajes bajos.
- Materiales metálicos, especialmente acero estructural, aluminio, bronce, cobre y algunos otros. Sufren corrosiones y oxidaciones. En épocas de frío, los metales que forman puentes térmicos suelen experimentar condensaciones en sus superficies.

- Materiales varios, especialmente para uso como aislantes y terminaciones, tales como el fibrocemento, espumas, fieltros, láminas, papeles, pinturas, impermeabilizantes, etc.

A continuación se describen aquellos materiales usados en la construcción que son más afectados por la humedad, sea agua líquida, hielo o vapor.

4.1.1 Materiales pétreos

Los pétreos usados en la construcción son impermeables. No obstante pueden ocurrir filtraciones de agua entre juntas cuando entre ellos se usan morteros de pega no impermeables. Si ello ocurre en cimientos u otros elementos en zonas de heladas fuertes, pueden producirse solidificación del agua con el consiguiente aumento de volumen, cuya fuerza de expansión es tan fuerte que puede separar grandes bloques pétreos, debilitándolos estructuralmente.

4.1.2 Materiales hidráulicos

Son aquellos que se cristalizan con ayuda de agua de amasado, principalmente hormigones de masa, morteros de pega, estucos y yesos. Los hormigones son hechos a base de cementos hidráulicos que imitan la piedra natural y que permite ser reforzado con acero conformando el hormigón armado. Las densidades varían grandemente dependiendo de los agregados que usen y de sus dosificaciones.

El yeso anhidro está constituido por sulfato de calcio que toma dos moléculas de agua para cristalizar. Se usa como enlucidos y estucos. También se usa extensamente en la fabricación de planchas de yeso-cartón y molduras.

No presentan alteraciones de importancia en presencia de humedad, aunque los hormigones de menor densidad y los yesos pueden formar capilares que le permiten trasladar agua incluso hacia arriba por ascensión capilar. El sulfato de calcio húmedo puede producir corrosiones en metales en contacto con él, además no presenta resistencia a la intemperie por lo que se utiliza sólo en interiores.

El hormigón pesado, suficientemente vibrado, presenta poca capacidad de absorber humedad, haciéndolo de manera muy lenta, debido a que no existe una red capilar como en el caso de materiales más porosos.

Si la humedad en un muro de hormigón armado logra penetrar, en el caso de la humedad por condensación por ejemplo, puede provocar corrosión en su armadura y a la larga pérdida importante en la resistencia estructural.

Los hormigones livianos presentan una mayor cantidad de poros y burbujas de aire, por tanto la cantidad de agua que pueden absorber es también mayor. En general estos hormigones absorben humedad con facilidad pero la disipan de manera lenta (hormigón celular por ejemplo), por lo que deben protegerse las armaduras que contengan.

4.1.3 Materiales cerámicos

Los materiales cerámicos o refractarios datan desde las más antiguas civilizaciones. Tempranamente el hombre aprendió que las tierras arcillosas al ser calentada al fuego se vitrificaban. Comenzó así la alfarería de utensilios domésticos. La arcilla se encuentra abundantemente en casi todo el mundo. Se ha formado por lenta descomposición físico-química (hace unos 100 millones de años) de rocas feldespáticas, tales como el granito. Los yacimientos más puros son blancos llamados caolines con los cuales se fabrica la porcelana. Con las tierras arcillosas se fabrican ladrillos para la construcción. En Chile es común el ladrillo hecho a mano llamado “chonchón”, pero actualmente las construcciones usan ladrillos hechos a máquina, mucho más regulares en sus características y con una gran variedad de formas y tamaños. Se fabrican macizos y huecos lo que permite alivianar la construcción y reforzar su interior por medio de enfierradura (muros reforzados). Los ladrillos se usan principalmente para confeccionar muros uniéndolos por medio de mortero de pega a base de cemento. En general los muros de ladrillo deben protegerse debidamente de la lluvia o de aguas apozadas, por ejemplo en sobrecimientos.

Como en la construcción de muros se necesita que los ladrillos se humedezcan para no extraer agua del mortero de pega, los muros una vez construidos dejan importante cantidad de agua aprisionada en su interior. Ello es causa de numerosos problemas posteriores.

4.1.4 Maderas

La madera es un material orgánico compuesto principalmente de celulosa y lignina con gran cantidad de capilares por donde la savia alimenta al árbol desde sus raíces. Las maderas usadas en la construcción provienen de diferentes tipos de árboles. Los de rápido crecimiento, tales como pino radiata (llamado comúnmente pino insigne) y álamo, producen maderas de baja densidad ($\approx 400 \text{ kg/m}^3$), en cambio los árboles de lento crecimiento producen maderas de alta densidad ($\approx 1000 \text{ kg/m}^3$) tales como roble o alerce. Las maderas de baja densidad cambian su volumen según la cantidad de humedad que contienen, a mayor humedad la madera se hincha más dando pie a torceduras y cambios de volumen indeseables. Es necesario proteger la madera frente a la humedad ya que el exceso de ésta fomenta la aparición de mohos y hasta de pudrición. Además las maderas blandas pueden ser atacadas por insectos destructores (termitas), presentes en varias regiones del país. Las maderas duras son muy resistentes al agua por lo que se pueden usar al exterior de las construcciones con gran durabilidad (tejuelas, puertas, ventanas, protecciones, etc.).

La madera es muy versátil en su uso. Permite ocuparla en estructuras, revestimientos, elementos secundarios como puertas y ventanas, andamios, mobiliario, etc. A partir de ella se obtiene una gran cantidad de productos derivados que tienen una amplia aplicación en construcción. Entre ellos pueden mencionarse: tableros contrachapados, tableros de partículas, tableros de fibra, tableros de lana de madera aglomerada con diversos productos, entre otros. Cada uno de estos productos tiene sus propias cualidades y usos. Casi todos son dañados por el agua líquida, por tanto no son aptos para su uso en el exterior a menos que se les protejan convenientemente.

4.1.5 Vidrio

Los vidrios son arenas o silicatos fundidos insensibles a la humedad, sin embargo, dada su mala resistencia térmica, las ventanas son los primeros elementos donde se suele depositar agua de condensación, que si es abundante, corre por ellos haciendo daño en los marcos y juntas. La tecnología actual produce una gran cantidad de tipos de vidrios con características distintas ópticas, acústicas, térmicas, ornamentales, etc. Los vidrios son muy frágiles y no soportan tensiones mecánicas.

4.1.6 Metales

Los metales presentan una alta impermeabilidad al agua y vapor de agua. Dada su elevada conductividad térmica pueden formar puentes térmicos que facilitan la condensación de vapor de agua sobre su superficie.

Los metales, en contacto con agua ligeramente salina (electrolitos), forman pares galvánicos generando corrientes eléctricas locales que los corroen rápidamente. Esta materia se trata más adelante con cierto detalle.

4.1.7 Materiales varios

Existen variedad de otros materiales que no pueden ser clasificados en alguna de las categorías anteriores, entre ellos se puede destacar:

- Fibrocemento.
- Espumas.
- Filtros.
- Láminas.
- Pinturas y papeles.
- Impermeabilizantes, entre otros.

En el caso de aquellos materiales de fibrocemento, como lo son paneles, tejas, siding, etc. y aquellos materiales impermeabilizantes, como lo son algunas pinturas, láminas o filtros, la presencia de humedad no altera sus propiedades y se comportan de buena forma en presencia de ésta. Por el contrario, aquellos materiales aislante térmicos, ven alteradas sus propiedades de conductividad térmica al estar en presencia de humedad.

4.2 DAÑOS EN MATERIALES PRODUCTO DE LA HUMEDAD

La humedad puede atacar de diferentes formas a los materiales que se utilizan en la construcción, ya sea en aquellos que forman parte de la estructura resistente, tales como hormigón, ladrillos y madera, o en materiales de terminación tales como yeso, las pinturas, papeles, revestimientos, y estucos, entre otros.

Los principales daños que se pueden mencionar son eflorescencias en muros de ladrillo u hormigón, crecimiento de mohos y hongos, pudrición e hinchamientos en el caso de maderas, oxidaciones y corrosiones en el caso de metales, y otros., todo lo cual acorta la vida útil de los elementos, daña la plusvalía del inmueble, produce sobre gastos de mantenimiento y, en suma, deteriora la calidad de vida de los habitantes.

4.2.1 Eflorescencias

Se generan cuando los materiales contienen sales solubles en su interior o cuando los materiales pueden absorber agua con sales disueltas. Al aflorar la humedad a la superficie, ésta arrastra la solución de sales y debido a que el agua comienza a evaporarse, aumenta la concentración de estas sales hasta su saturación, en cuyo caso empieza a cristalizarse. Esta fenomenología produce manchas blanquecinas sobre la superficie de los muros formándose cristalizaciones algodonosas de lento crecimiento. Cuando la cristalización se da en el interior del material se le llama criptoeflorescencia.

La permeabilidad, la velocidad de evaporación, la capilaridad y porosidad del material condicionan la aparición de eflorescencias. Las eflorescencias pueden aparecer producto de cualquiera de los cinco tipos de humedades señaladas en el punto 1.3, sin embargo la humedad del suelo por ascensión capilar y la de construcción son las que las hacen aparecer.

Generalmente las manchas blancas por eflorescencia afectan a muros de ladrillos, morteros, hormigones y elementos de yeso.

4.2.2 Oxidación

Consiste en un proceso químico en el cual la superficie de un metal interacciona con el oxígeno del aire y del agua, generalmente por exposición a la intemperie en presencia de humedad, sobre todo si ésta penetra el material o el óxido generado.

Los metales por lo general son muy inestables químicamente y no se encuentran en su estado puro en la naturaleza, salvo algunas excepciones como el oro o el platino (los llamados metales nobles), sino que en diferentes formas químicas, especialmente los óxidos que son más estables.

La oxidación se desarrolla de manera más lenta en ambientes secos que en ambientes húmedos y por lo general va de la mano con la corrosión, algunas veces de manera simultánea, sin embargo es importante mencionar que en algunos casos la oxidación protege al metal de ulterior penetración por causa de este mismo fenómeno, no así la corrosión.

4.2.3 Corrosión en metales

Los metales están presentes de muchas formas en la materiales . Se pueden emplear en marcos de ventanas, láminas, planchas o también como refuerzo de estructuras. Los metales en presencia de agua, como se explicó, se pueden oxidar y/o corroer. Es importante mencionar que la humedad por sí sola no es la causa principal de la corrosión, sino el hecho que en el agua se disuelven sales formándose electrolitos que producen corrientes eléctricas locales que corroen el metal.

La atmósfera y los suelos salinos cercanos a zonas costeras son especialmente proclives a producir condiciones de corrosión dadas las condiciones climáticas de lluvias o neblinas salinas. Similar cosa ocurre en zonas industriales donde pueden producirse lluvias ácidas.

En efecto, los anhídridos sulfuroso, sulfúrico, carbónico, nitrosos, y otros, en presencia de agua producen ácidos muy corrosivos. Las atmósferas industriales además de los ácidos generan otros compuestos dañinos no tan sólo para metales, sino que también para materiales pétreos tales como hormigones, tejas, fibrocemento, pinturas y otros, produciendo desconches, descascamientos y otros daños.

Hay metales y aleaciones que resisten mejor las corrosiones, tales como los aceros inoxidable, duraluminios anodizados, etc. El grado de corrosión en un elemento metálico depende del mismo metal, de la atmósfera y de los compuestos ácidos o sales que forman los electrolitos.

En general se pueden encontrar cuatro tipos de atmósferas, según la influencia en el grado de corrosión de un metal, ellas son:

1. Atmósfera industrial: Se producen en sectores con presencia de fábricas e industrias, generadoras de compuestos químicos corrosivos.
2. Atmósfera urbana: sectores residenciales con presencia de industrias pequeñas, locomoción, chimeneas, etc.
3. Atmósfera costera o marina: ambiente sin contaminación industrial pero con presencia salina en el aire proveniente del mar y también del suelo.
4. Atmósfera rural: sólo presencia de humedad en el aire, con muy baja concentración de impurezas en éste.

En función de estas atmósferas, la siguiente tabla muestra algunos valores para la corrosión.

Tabla 4.1. Valores de corrosión del acero en micras por año.

metal	tipo de atmósfera			
	Industrial [μm]	Urbana [μm]	Costera [μm]	Rural [μm]
acero sin galvanizar	120	70	50	40
acero galvanizado	15	7,5	5	2,5

Fuente: F. Ulsamer, "Las humedades en la construcción".

El gráfico siguiente muestra la vida útil del zinc en función de su espesor para cada tipo de ambiente.

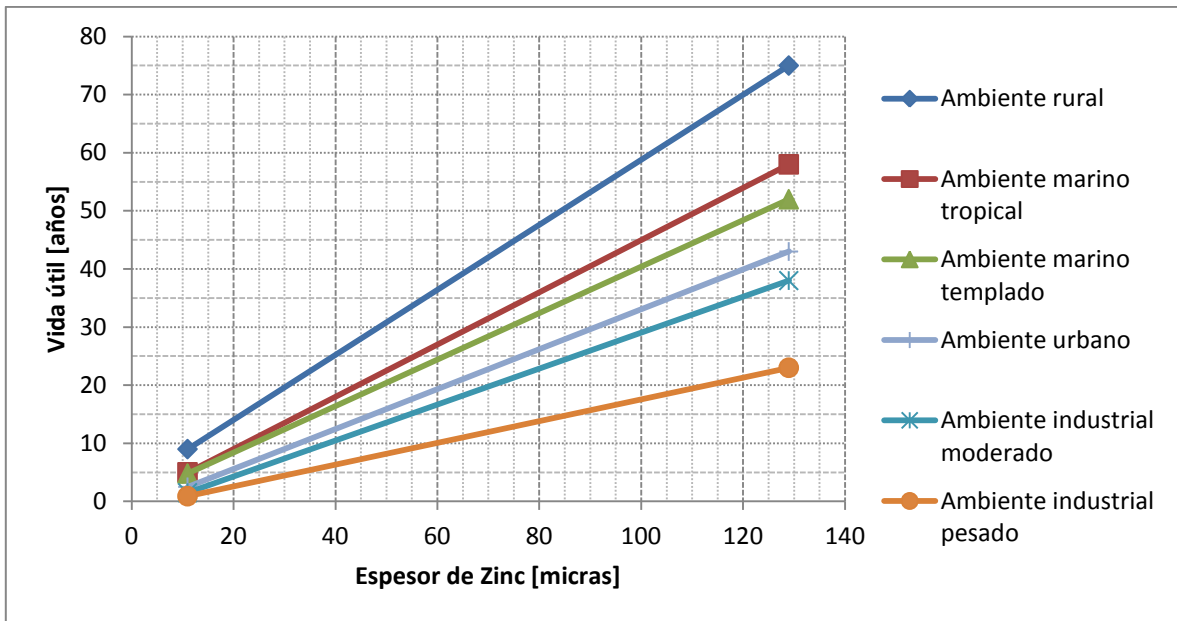


Figura 4.1 Gráfico vida útil Zinc v/s espesor.

El acero galvanizado es protegido con un recubrimiento de zinc. Cuando el metal no es galvanizado la corrosión puede ser 10 veces mayor, tal como se aprecia en la tabla anterior.

A la corrosión se le suele llamar oxidación electrolítica. La corrosión se produce entre la zona anódica y catódica del elemento metálico o cuando dos metales distintos se ponen en contacto. Al interponerse entre ellos un electrolito se genera una pila galvánica que genera una corriente eléctrica que termina por ionizar a uno de los metales (ver figura).

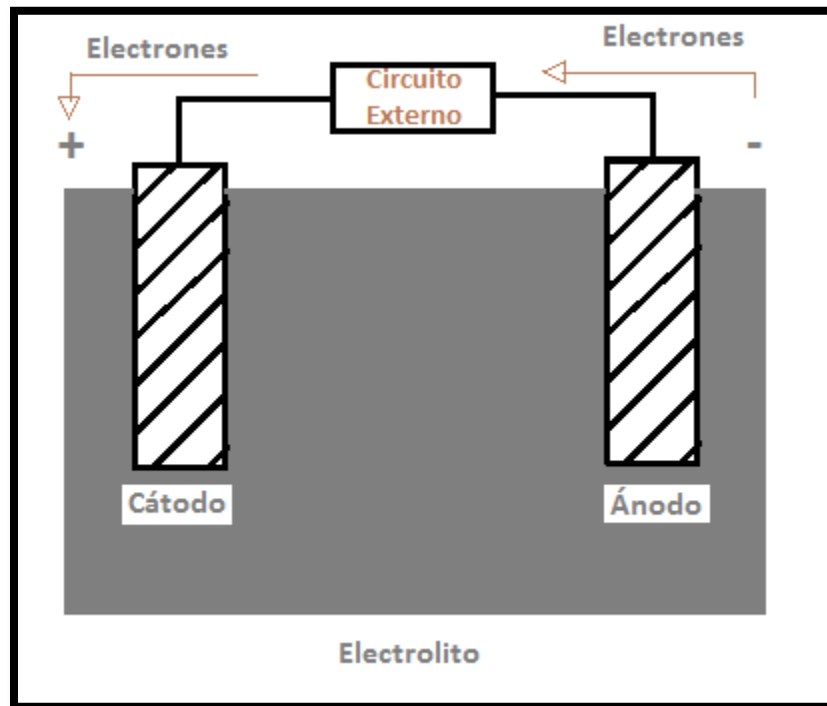


Figura 4.2 Esquema pila galvánica local.

Un metal al corroerse ocupa mayor volumen que en su estado inicial, esto cobra relevancia cuando el metal se encuentra contenido entre otros materiales (ejemplo barras de acero estructural dentro del hormigón) debido que al expandirse puede generar fisuras y grietas.

Existen diferentes tipos de corrosión, según la pila galvánica que se genere. Entre los principales tipos de corrosión se distinguen:

1. Corrosión por oxidación

Es el tipo de corrosión más común y se genera justo después de la oxidación. En el caso del hierro, la capa de óxido generada es porosa y no protege al resto del metal, por lo tanto cuando la superficie se humedece, por condensaciones, agua de lluvia, humedad ambiental, etc., el óxido se transforma en hidróxido férrico, el que posee un potencial eléctrico mayor al del hierro. La pila electrolítica queda formada por el hierro (ánodo), hidróxido férrico (cátodo) y el agua que permanece en los poros de la capa de óxido, dando paso al flujo de electrones que provoca finalmente la corrosión del hierro que lo transforma de Fe en iones Fe^{++} .

En otros metales, tal como en aluminio también se produce este proceso, pero la capa de óxido que se genera en la superficie es mucho más compacta con lo cual la oxidación no penetra sino algunos milésimas de milímetro, protegiendo al metal de ulterior corrosión.

2. Corrosión por par galvánico

La corrosión galvánica se produce en lugares muy puntuales, por ejemplo donde se perfora la capa protectora o galvanizado. En este caso la corrosión se desarrolla entre dos metales diferentes entre los cuales se interpone un electrolito para formar la pila galvánica.

El metal que presente el potencial eléctrico más bajo hará las veces de ánodo y el que tiene el potencial mayor será el cátodo, la corrosión entonces afectará la zona anódica que en este caso será el metal con menor potencial eléctrico.

Como regla de diseño, el agua debe escurrir siempre desde los metales que tienen un menor potencial eléctrico hacia el que tiene un potencial mayor, esto se debe tener en consideración en techos y fachadas metálicas para que la construcción no presente problemas de corrosión. La tabla que sigue muestra algunos metales ordenados desde menor al mayor potencial eléctrico.

Tabla 4.2. Escala de potenciales de metales utilizados en construcción ordenados de mayor a menor potencial eléctrico.

METAL	ION	POTENCIAL [V]	
Aluminio	Al + + +	-1,670	Más activos: mayor
Magnesio	Mg + +	-1,340	tendencia a la
Zinc	Zn + +	-0,762	corrosión
Cromo	Cr + + +	-0,710	
Hierro	Fe + +	-0,440	
Níquel	Ni + +	-0,250	
Estaño	Sn + +	-0,136	Menos activos :menor
Plomo	Pb + +	-0,126	tendencia a la
Cobre	Cu + +	+0,345	corrosión

3. Corrosión diferencial

Esta corrosión se produce generalmente en elementos metálicos horizontales debido a que una parte está seca y la otra en presencia de humedad. La parte seca hace de cátodo y la húmeda de ánodo, por lo tanto será el sector húmedo el que se corroe.

Esta corrosión se puede observar con mayor frecuencia en las fachadas de los edificios en lugares donde se forma óxido o picaduras puntuales generadas por la acumulación de agua.

4. Corrosión intergranular

Esta forma de corrosión es poco común y se produce en aleaciones por defectos en el proceso de producción (por ejemplo mala proporción en los componentes de una aleación). Este tipo de corrosión es la que puede atacar a los aceros inoxidable u otras aleaciones.

5. Corrosión por inmersión

En este caso la destrucción del metal se produce por disolución del mismo al estar inmerso en agua. El metal se ioniza y posteriormente estos iones se combinan con los del hidrógeno de las moléculas de agua, con lo que se genera una capa de hidróxido que se disuelve en el agua dependiendo del pH del líquido.

Este tipo de corrosión se puede dar en casi todos los metales. Si el hidróxido metálico se mantiene dentro de un cierto rango de pH, la capa de óxido actuará como protectora, de lo contrario se corroerá el metal.

6. Resistencia a la corrosión de metales utilizados en construcción

La tabla que sigue muestra la resistencia de algunos metales, los más utilizados en construcción, frente a la corrosión en presencia de diferentes agentes atmosféricos.

Tabla 4.3. Resistencia a la corrosión de algunos metales utilizado en la construcción.

Metal	Resistencia a la corrosión según			
	Atmósfera	Otros materiales de construcción	Aguas	Otros metales
Aluminio y aleaciones	Generalmente alta aunque depende de la aleación y del grado de contaminación de la atmósfera. Baja cuando está en contacto directo con humos.	Con productos obtenidos de cementos Portland o aluminosos y con cal grasa y magra su resistencia es baja. Es atacado por algunas maderas. En entornos húmedos es probable que lo ataquen pastas de yeso.	Buena al agua de lluvia si es que esta previamente no pasa por elementos de cobre. Poca a las aguas sucias, sobre todo si el suministro se ha hecho con cobre o en presencia de detergentes hidróxidos. Buena contra el agua de mar para determinadas aleaciones.	Baja en contacto con cobre y aleaciones de este metal. Buena en contacto con zinc o cadmio, el acero inoxidable lo ataca pero de manera insignificante.
Hierro fundido o de fundición	Buena, más aún si se conserva la primera capa desde la fundición	En general buena con los materiales que normalmente está en contacto. Baja en tierras vegetales, en suelos con sulfatos y bacterias o con cenizas.	Buena en contacto con aguas limpias, baja si hay sales y el agua está caliente. La corrosión aumenta si el agua es de mar y disminuye si hay depósitos calcáreos.	Baja en contacto con cobre y sus aleaciones, plomo, cromo y acero inoxidable. De menor forma disminuye en contacto con aluminio y sus aleaciones.
Cobre y aleaciones	Excelente bajo condiciones normales. La corrosión comienza si hay exposición directa a humos.	Excelente salvo en presencia de amoniaco, espumante para hormigones y de ácidos orgánicos provenientes de maderas. La resistencia baja si es recubierto con una película de carbonatos.	En general muy buena, pueden existir ataques en cubiertas donde haya algas musgos o líquenes (aguas ácidas). Baja resistencia a aguas con dióxido de carbono disuelto.	Muy buena, puede bajar cuando algunos recubrimientos de estaño sobre cobre o latón presenten poros o defectos.

Plomo	Muy alta resistencia gracias a la formación de carbonatos y sulfatos. Baja resistencia a humos que contengan ácido acético.	Relativamente baja a álcalis que provienen de productos húmedos obtenidos de cementos y con algunas maderas.	Buena para la mayoría de las aguas, disminuye cuando el agua ha recogido ácidos y materia orgánica durante su trayecto.	Corrosión rápida donde no existe entrada de aire y en contacto con aceros en situaciones de fuerte exposición atmosférica. Se reduce en contacto con cobre, cromo, acero inoxidable y níquel.
Acero inoxidable	Generalmente excelente, aunque depende de la composición.	Muy buena incluso estando enterrado en cualquier terreno.	Excelente para conducir aguas no contaminadas en exceso. Su resistencia baja con aguas de mar salinas con cloruros o estancadas.	No lo afectan salvo si el contacto es en presencia de aguas de mar.
Acero	En general pobre, pero mejora de forma significativa si se forman aleaciones con otros metales.	Disminuye si es embebido en hormigones que contengan exceso de cloruro cálcico. Es atacado por pastas de yeso y materiales orgánicos (maderas y plásticos) que desprenden ácidos. Baja resistencia en contacto con terrenos, cenizas y escorias.	Baja resistencia a las aguas dulces y más baja si hay sales, aireación y altas temperaturas. Baja resistencia al agua de mar, en aguas ácidas se acelera el proceso de corrosión. Los depósitos calcáreos ayudan a disminuir el ataque.	Resistencia reducida en contacto con cobre y sus aleaciones, plomo, acero inoxidable y cromo, ésta se reduce aún más si el electrolito es muy conductor. En aguas puras el cambio de potencial es a 60°C aproximadamente y es corroído por el zinc.
Zinc	Débil resistencia si la capa protectora no es lo suficientemente densa y no está bien adherida. En presencia de sulfuros baja aún más.	Baja a los ataques de álcalis que provienen de cementos y a ataques ácidos. Baja en contacto con algunas maderas.	Su resistencia es muy variable según el tipo de sales y gases disueltos, el ataque crece cuando la temperatura aumenta.	Baja resistencia en general.

Fuente: C. Broto, "Enciclopedia Broto de patologías de la construcción".

4.2.4 Otros daños asociados a la humedad

En el capítulo anterior se vio que la humedad puede provocar la aparición de mohos y hongos. Estos agentes biológicos son destructivos especialmente en el caso de las maderas, generando por ejemplo la pudrición de éstas. La llamada pudrición húmeda (pudrición generada por hongos) no es tan dañina como la que generan algunos insectos, aun así es necesario evitarla ya que si afecta a elementos estructurales principales (vigas y pilares por ejemplo), puede eventualmente llegar al colapso de la estructura.

La humedad además puede provocar desprendimientos y grietas, ambos debido a que en presencia de agua se manifiestan algunos elementos infiltrados que posteriormente se dilatan, por lo general sales que cristalizan u óxidos en elementos metálicos recubiertos.

Las decoloraciones se presentan en zonas o elementos constructivos defectuosamente aislados, por ejemplo cuando existe aislación térmica pero no es uniforme, el fenómeno se genera incluso en ambientes secos y con temperaturas por encima del punto de rocío.

4.3 AUMENTO DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN CIERTOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DEBIDO A LA HUMEDAD

Como ya se ha mencionado, la humedad provoca variados efectos en ciertos materiales de construcción. Tal como la disminución en la aislación térmica de materiales porosos. Ello se debe a que los poros presentes en el material, están llenos de aire con una conductividad de este $(\lambda_{\text{aire quieto}} = 0,026 \frac{W}{m \cdot K})$ pero al humedecerse el material, los poros con aire se llenan de agua cuya conductividad térmica es 22 veces mayor que la del aire $(\lambda_{\text{Agua}} = 0,58 \frac{W}{m \cdot K})$. La consecuencia es que el material se hace más conductor del calor. Se producen así pérdidas o ganancias de calor indeseables cuando estos materiales forman parte de la envolvente. Este fenómeno produce mayores gastos de energía para acondicionamiento térmico.

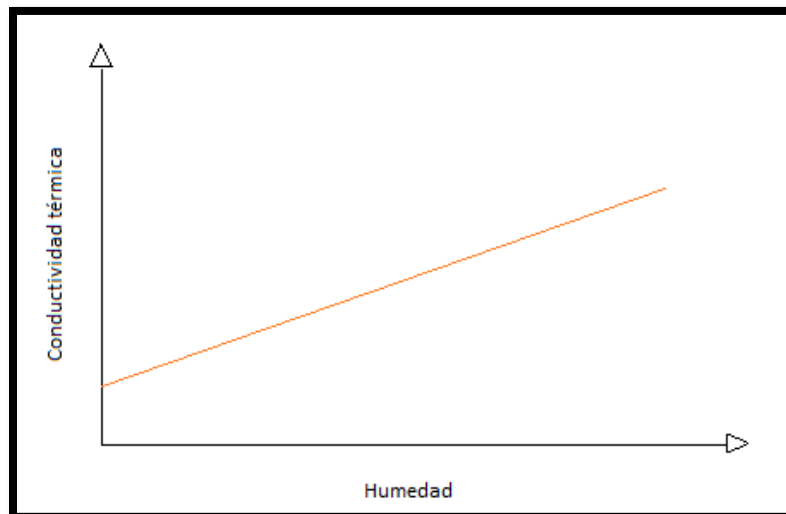


Figura 4.3 Gráfico cualitativo de conductividad térmica v/s humedad.

Desde el año 2007 la OGUC, en su artículo 4.1.10, exige un valor mínimo para la aislación de todos los elementos envolventes de las viviendas (mínima resistencia térmica) o lo que es lo mismo exige una máxima transmitancia térmica (U) equivalente. Las normas suponen que las mediciones de la conductividad de los materiales se hacen en estado seco, por tanto los valores que recomienda la OGUC son valores en estado seco. Como al humedecerse los materiales se pierde un poco la capacidad aislante, en la práctica no se cumple con las disposiciones de la OGUC que considera estos materiales secos. Un elemento (muro, losa, etc.) en estado húmedo presentará un valor de resistencia térmica inferior a lo que dispone la OGUC.

La norma NCh853, en su anexo A, presenta un listado de conductividades térmicas dejando expresa constancia que son valores de materiales en estado seco y a una temperatura media de 20°C.

En general la mayoría de las localidades en Chile presentan un clima húmedo a excepción de ciertas zonas desérticas y cordilleranas, tal como se muestra en la tabla 3-e (humedad relativa en el mes de julio).

Tabla 4.4. Humedad atmosférica según zona climática en el mes de julio.

Zona	Ciudad	Humedad relativa [%]	clasificación clima según NCh1079
Norte Litoral (NL)	Iquique	75	Normal
	La Serena	80	Húmedo
Norte Desértico (ND)	Calama	35	Seco
Norte Valle Transversal (NVT)	Copiapó	60	Normal
	Ovalle	75	Normal
Central Litoral (CL)	Valparaíso	78	Normal
	Constitución	85	Húmedo
Central Interior (CI)	Santiago	79	Normal
	Chillán	81	Húmedo
Sur Litoral (SL)	Concepción	88	Húmedo
	Valdivia	89	Húmedo
Sur Interior (SI)	Traiguén	86	Húmedo
	Osorno	86	Húmedo
Sur Extremo (SE)	Ancud	87	Húmedo
	Aysén	90	Húmedo
	Punta Arenas	80	Húmedo
Andino (An)	Potrerosillos	23	Seco
	El Teniente	61	Normal
	Lonquimay	82	Húmedo

Fuente: NCh1079.Of2008

Existe poca información respecto a la verdadera conductividad térmica de materiales húmedos. R. Cadiergues propone multiplicar la conductividad térmica seca por los factores que se indican en tabla 3.5 cuando el material está en ambientes húmedos.

Tabla 4.5. Factores multiplicadores de la conductividad térmica (λ) según humedad del ambiente climático.

Material que compone el muro	clima seco	clima templado	clima húmedo
hormigón	1,40	1,70	2,00
yeso	1,30	1,60	2,15
mortero	1,30	1,60	1,90
ladrillo	1,20	1,45	1,65
madera	1,16	1,19	1,25

Fuente: R. Cadiergues, "Aislamiento y protección de las construcciones".

Nota: La norma NCh1079 en su anexo B, considera clima seco cuando la humedad es menor de $HR \leq 35\%$ (humedad relativa muy baja) y un clima húmedo cuando la humedad relativa es mayor de $HR \geq 80\%$ (humedad relativa muy alta).

M. Croiset entrega un gráfico (figura 3.4) en donde se puede obtener la relación entre la conductividad térmica húmeda y la conductividad térmica seca para materiales macizos homogéneos, en función de la cantidad de humedad que contengan

Tabla 4.6. Relación entre conductividad térmica húmeda y seca dependiendo de la humedad del material.

Material	Humedad	λ húmedo/ λ seco
Cerámica cocida	1%	1,300
Hormigón de agregados pesados ordinarios	3%	1,575
Hormigón de puzolana o de escoria expandida	4%	1,675
Hormigón celular de autoclave	6%	1,840

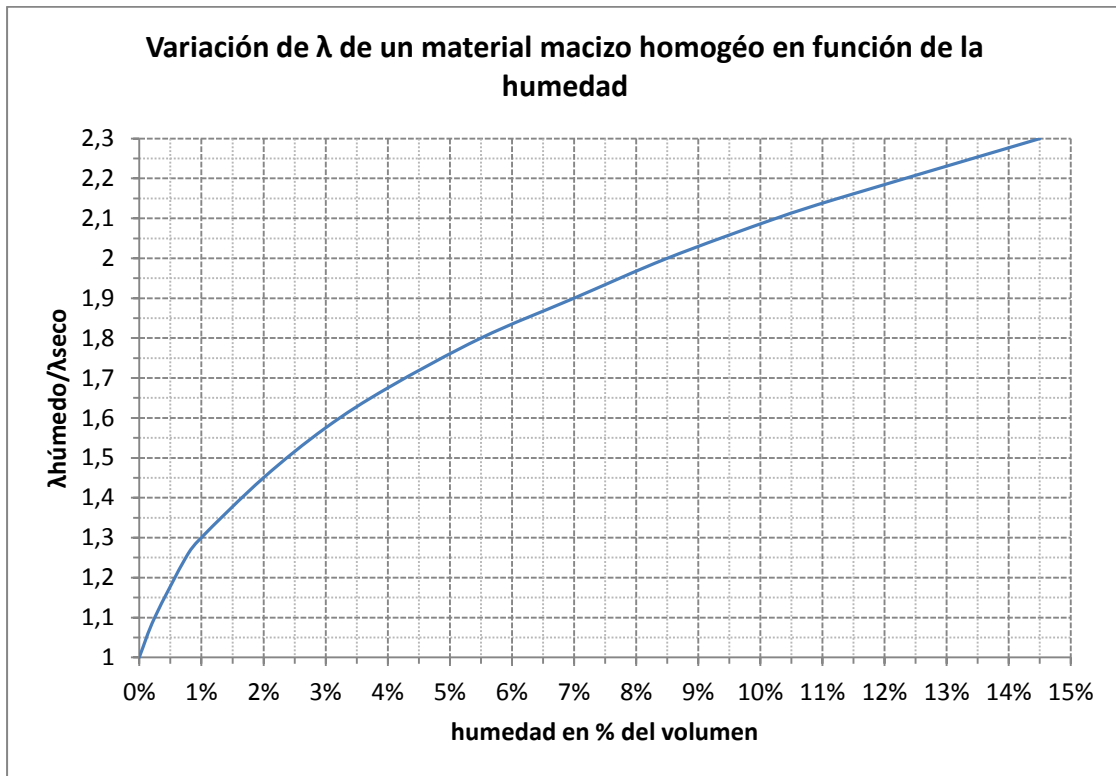


Figura 4.4 Variación de la conductividad térmica de un material macizo homogéneo, en función de su humedad.

Fuente: M. Croiset, "Humedad y temperatura en los edificios".

4.3.1 Variación de la conductividad térmica en ladrillos

Experiencias hechas por G. Rodríguez y R. Erazo en el IDIEM (ver Revista Bit 58, aislamiento térmico: humedad en elementos envolventes II) en ladrillos, mediante el método del anillo de guarda, se muestran en tabla 3.7 y gráficos siguientes.

Tabla 4.7. Densidad y λ seco de los materiales ensayados.

Material	densidad [kg/m ³]	λ seco [W/(m ² ·°C)]
ladrillo artesanal	1.625	0,47
ladrillo industrial	1.920	0,41

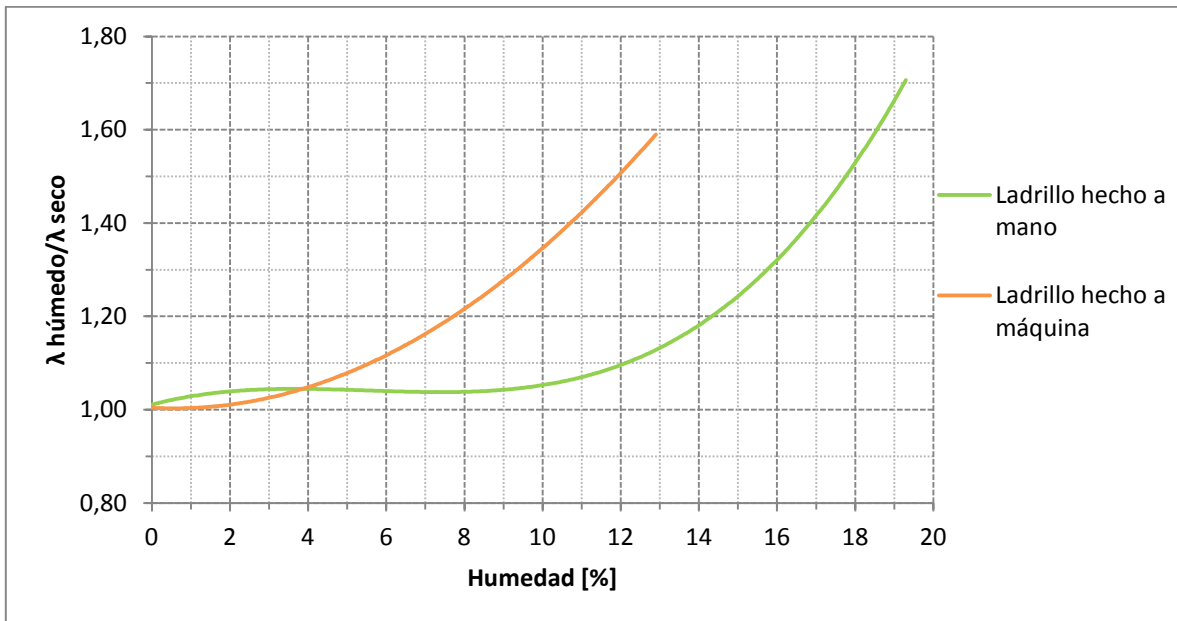


Figura 4.5 Relación “ λ húmedo/ λ seco” en función del porcentaje de humedad para ladrillo hecho a mano y hecho a máquina.

Fuente: R. Erazo, Variación de la conductividad térmica con la humedad en materiales de construcción.

Se puede apreciar en las dos curvas que la conductividad térmica de los ladrillos aumenta a medida que la humedad del material aumenta.

4.3.2 Variación de la conductividad térmica en materiales aislantes

Los aislantes son otro tipo de materiales que ven alteradas significativamente sus propiedades térmicas al estar en contacto con la humedad, la presencia de esta última depende de la capacidad de absorción del aislante y de la cantidad que condense o se evapore.

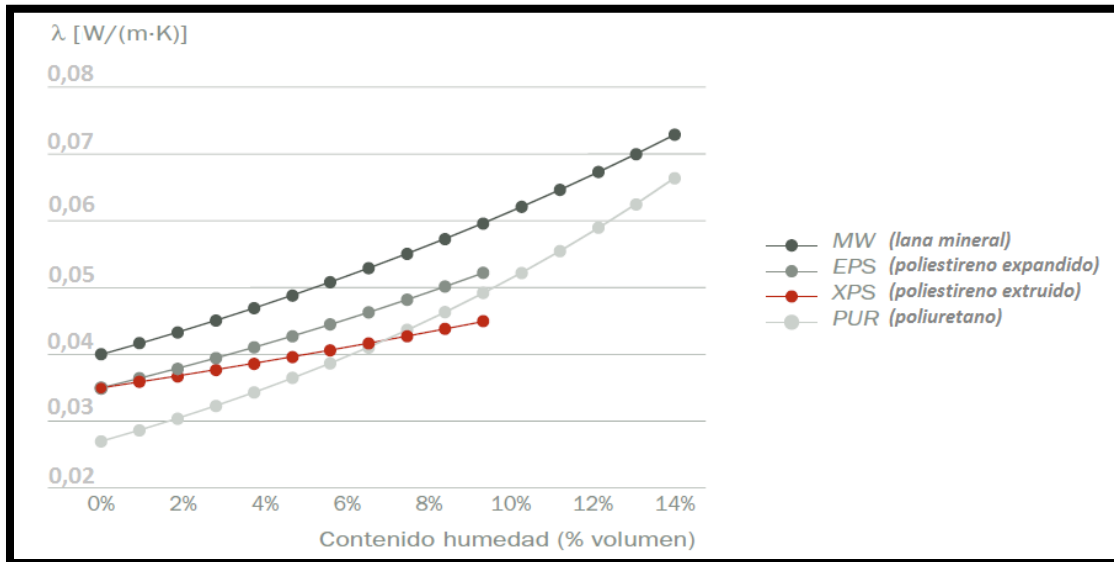


Figura 4.6 Variación de la conductividad térmica de materiales aislantes en función de la humedad (según EN ISO 10456).

Fuente: Soluciones de aislamiento térmico con poliestireno extruido XPS para una edificación sostenible, AIPEX.

Los aislantes térmicos tienen por finalidad no dejar pasar el calor, sin embargo en el gráfico anterior muestra la importancia que la humedad puede llegar a tener en estos materiales, se observa que el poliuretano por ejemplo, aumenta al doble su conductividad térmica cuando la humedad está en torno al 10% de su volumen y algo similar sucede con los otros materiales en presencia de humedad. Un poco más adelante se verá la relevancia de colocar una barrera de vapor por la cara interior para que el material aislante en cuestión no se humedezca.

El siguiente gráfico muestra la variación de la conductividad térmica de una espuma rígida de poliestireno expandido, con una densidad aparente de 19 kg/m³.

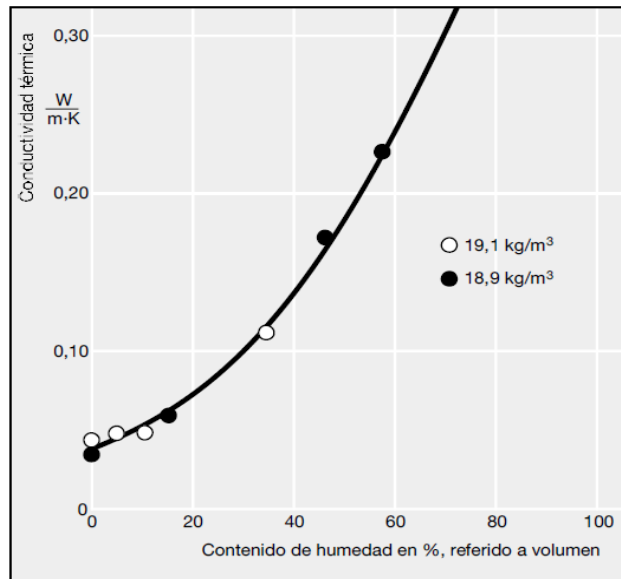


Figura 4.7 Variación de la conductividad térmica de una espuma rígida de poliestireno expandido con densidad 19 kg/m³, en función de la humedad.

Fuente: BASF Aktiengesellschaft, Información técnica Styropor, Marzo 2001.

5 CONDENSACIÓN

5.1 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES FRENTE AL VAPOR DE AGUA

Ciertos materiales permiten el paso de vapor de agua a través de ellos, esta cualidad se llama **permeabilidad al vapor de agua** y se define como la cantidad de vapor de agua que se transmite a través de un material de espesor dado por unidad de área, unidad de tiempo y de diferencia de presión parcial de vapor a cada lado. La permeabilidad se puede calcular como sigue:

$$\delta = 0,185 \cdot \frac{1}{\mu} \quad (5.1)$$

donde:

δ : Permeabilidad al vapor de agua $\left[\frac{\text{g}\cdot\text{m}}{\text{MN}\cdot\text{s}}\right]$.

μ : Factor de resistencia a la difusión de vapor [adimensional].

El factor “ μ ” es un factor de resistencia a la humedad propio de cada material (ver tabla 5.1) y se define como la relación entre la permeabilidad del aire y la del material en estudio, por lo tanto por definición se tiene que $\mu_{\text{AIRE}} = 1$.

El recíproco de la permeabilidad se llama **resistividad al vapor de agua** y se define como la resistencia de un material homogéneo al paso de vapor, por unidad de espesor.

$$r_V = \frac{1}{\delta} \quad (5.2)$$

donde:

r_V : Resistividad al vapor de agua $\left[\frac{\text{MN}\cdot\text{s}}{\text{g}\cdot\text{m}}\right]$.

El fenómeno de la difusión de vapor de agua se explica por leyes análogas a las de transmisión de calor en régimen permanente, así es como la permeabilidad al vapor de agua es el símil del coeficiente de conductividad térmica.

Conocida la permeabilidad o su recíproco (la resistividad) al vapor de agua de un material, se puede obtener su **resistencia a la difusión de vapor** y su **permeanza**:

$$R_V = \frac{e}{\delta} = e \cdot r_V \quad (5.3)$$

$$\Delta = \frac{1}{R_V} \quad (5.4)$$

donde:

R_V : Resistencia a la difusión de vapor de agua $\left[\frac{\text{MN}\cdot\text{s}}{\text{g}}\right]$.

e : Espesor del material [m].

Δ : Permeanza al vapor de agua $\left[\frac{\text{g}}{\text{MN}\cdot\text{s}}\right]$.

Es común encontrar en la construcción elementos compuestos de varias capas distintas, en estos casos la resistencia a la difusión de vapor se calcula como la sumatoria de las resistencias de las capas componentes de dicho elemento, esto es:

$$R_V = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\delta_i} = \frac{e_1}{\delta_1} + \frac{e_2}{\delta_2} + \dots + \frac{e_n}{\delta_n} = e_1 \cdot r_{V1} + \dots + e_n \cdot r_{Vn} \quad (5.5)$$

Finalmente el flujo de vapor se calcula como la relación entre la diferencia de presión parcial de vapor de agua entre las dos caras del elemento y la resistencia al vapor de agua.

$$i = \frac{\Delta p}{R_V} \quad (5.6)$$

La tabla siguiente muestra valores del factor de resistencia a la difusión de vapor y de la resistividad de algunos materiales.

Tabla 5.1. Factor de resistencia al vapor de agua y resistividad de algunos materiales de construcción.

Material	μ	$\Gamma_V \left[\frac{\text{MN}\cdot\text{s}}{\text{g}\cdot\text{m}} \right]$
Aglomerado de corcho, placa de	16,7	92
Aglomerado de madera, tablero	2,7 ... 10,9	15,0 ... 60,0
Aire en movimiento	0	0
Aire en reposo	1	5,5
Aluminio, hoja de	90.909.000	500.000.000
Cartón-yeso, placa de	8,2 ... 10,9	45,0 ... 60,0
Contrachapado de madera	272,7 ... 1.090,9	1.500,0 ... 6.000,0
Enfoscado de cemento	18,2	100
Enlucido de yeso	10,9	60
Espuma elastomérica	8.727,3	48.000
Fibro cemento	220 ... 250	1.190,0 ... 1350,0
Hormigón celular curado al vapor	14	77
Hormigón con espumantes	3,6	20
Hormigón en masa	5,5 ... 18,2	30,0 ... 100,0
Ladrillo cerámico hueco	5,5	30
Ladrillo cerámico macizo	10	55
Ladrillo cerámico perforado	6,5	36
Ladrillo silicocalcáreo	8,4 ... 22,9	46,0 ... 126,0
Lana de roca	1,7 ... 1,9	9,6 ... 10,5
Lana de vidrio	1,6	9
Maderas	8,2 ... 13,6	45,0 ... 75,0
Metales	∞	∞
Piedra natural	27,3 ... 81,8	150,0 ... 450,0
Poliestireno expandido	25,1 ... 46,0	138,0 ... 253,0
Poliestireno extruido	95,1 ... 190,4	523,0 ... 1047,0
Polietileno reticulado	1745,5	9600
Polietileno, lámina de	418181,4	2300000
Poliuretano aplicado in situ, espuma de	13,8 ... 14,9	76,0 ... 82,0
Poliuretano, panel de espuma de	17,5 ... 33,5	96,0 ... 184,0
Vidrio	∞	∞
Vidrio celular	∞	∞

Fuente: "Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental", F. Javier Neila G. y César Bedoya F.

5.2 PRESIÓN DE VAPOR DE AGUA

Todo gas ejerce una presión sobre el recipiente que lo contiene y el vapor de agua no es una excepción. La presión de vapor de agua es aquella que el vapor ejerce sobre los elementos de la envolvente siendo mayor cuanto mayor es la temperatura. En invierno, caso más favorable para que se produzca condensación, esta presión será mayor en el interior de la vivienda que en el exterior.

Para calcular la presión de vapor exterior y la humedad en volumen, se utilizan las ecuaciones 5.7 y 5.8 respectivamente, éstas además permiten definir las condiciones de humedad del aire exterior.

$$p_e = \varphi_e \cdot p_{sat}(\theta) \quad (5.7)$$

$$v_e = \varphi_e \cdot v_{sat}(\theta) \quad (5.8)$$

donde:

p_e : Presión de vapor exterior.

$p_{sat}(\theta)$: Presión de vapor de saturación a la temperatura θ .

φ_e : Humedad relativa exterior.

v_e : Humedad en volumen exterior.

$v_{sat}(\theta)$: Humedad en volumen de saturación a la temperatura θ .

La humedad del ambiente interior se puede obtener por medio de:

- Ecuaciones, si es que ya se conoce la presión de vapor exterior.

$$p_i = p_e + \Delta p \quad (5.9)$$

$$v_i = v_e + \Delta v \quad (5.10)$$

Δp y Δv se obtienen del tipo de uso del edificio (ver figura 5.1) y se deben multiplicar por 1,1 como factor de seguridad para el cálculo.

- Mediante una constante, en ambientes climatizados por ejemplo. En estos casos se añade un 5% como margen de seguridad.

La presión de vapor de saturación y la humedad en volumen de saturación se pueden obtener de la tabla 5.2 o alternativamente en el caso de la presión de saturación de las fórmulas 5.11 y 5.12.

$$p_{sat}(\theta) = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}}, \text{ para } \theta \geq 0^\circ\text{C} \quad (5.11)$$

$$p_{sat}(\theta) = 610,5 \cdot e^{\frac{21,875 \cdot \theta}{265,5 + \theta}}, \text{ para } \theta < 0^\circ\text{C} \quad (5.12)$$

e : Función exponencial $\approx 2,71$.

Tabla 5.2.Presión de saturación y humedad absoluta de saturación.

θ	p_{sat}	v_{sat}	θ	p_{sat}	v_{sat}
[°C]	[Pa]	[kg/m³]	[°C]	Pa	[kg/m³]
-20	103	0,00088	11	1312	0,00999
-19	113	0,00096	12	1402	0,01064
-18	124	0,00105	13	1497	0,01132
-17	137	0,00115	14	1598	0,01204
-16	150	0,00126	15	1704	0,0128
-15	165	0,00138	16	1817	0,0136
-14	181	0,00151	17	1937	0,01444
-13	198	0,00165	18	2063	0,01533
-12	217	0,0018	19	2196	0,01626
-11	237	0,00196	20	2337	0,01725
-10	259	0,00213	21	2486	0,01828
-9	283	0,00232	22	2642	0,01937
-8	309	0,00252	23	2808	0,02051
-7	338	0,00274	24	2982	0,02171
-6	368	0,00298	25	3166	0,02297
-5	401	0,00324	26	3359	0,0243
-4	437	0,00351	27	3563	0,02568
-3	475	0,00381	28	3778	0,02714
-2	517	0,00413	29	4003	0,02866
-1	562	0,00447	30	4241	0,03026
0	611	0,00484	31	4490	0,03194
1	656	0,00518	32	4752	0,03369
2	705	0,00555	33	5027	0,03552
3	757	0,00593	34	5316	0,03744
4	813	0,00634	35	5619	0,03945
5	872	0,00678	36	5937	0,04155
6	935	0,00724	37	6271	0,04374
7	1001	0,00773	38	6621	0,04603
8	1072	0,00825	39	6987	0,04843
9	1147	0,0088	40	7371	0,05092
10	1227	0,00938			

Fuente: Anexo E NCh1973.Of2008

De las ecuaciones 5.11 y 5.12, si se despeja la temperatura se obtienen las fórmulas que siguen para la temperatura:

$$\theta = \frac{237,3 \cdot \ln\left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)}{17,269 - \ln\left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)}, \text{ para } p_{sat} \geq 610,5 \text{ Pa} \quad (5.13)$$

$$\theta = \frac{265,5 \cdot \ln\left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)}{21,875 - \ln\left(\frac{p_{sat}}{610,5}\right)}, \text{ para } p_{sat} < 610,5 \text{ Pa} \quad (5.14)$$

\ln : Logaritmo natural o logaritmo en base e.

5.2.1 Relaciones de interés

La presión de vapor de agua se relaciona con la humedad por volumen de la siguiente manera:

$$p = v \cdot R_v \cdot T \quad (5.15)$$

donde:

$$R_v: \text{ Constante de gas para el agua} = 462 \frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{K}}.$$

T : Temperatura absoluta [K].

Además se tiene que la diferencia de humedad entre el interior y el exterior, también conocido como exceso de humedad interior es:

$$\Delta v = v_i - v_e = \frac{G}{n \cdot V} \quad (5.16)$$

donde:

G : Tasa de producción de humedad interior [kg/h].

n : Tasa de renovación de aire [1/h].

V : Volumen interior [m^3].

Con esto se obtiene la relación entre la diferencia de presión interior y exterior:

$$\Delta p = \Delta v \cdot R_v \cdot \frac{(T_i + T_e)}{2} = \frac{G}{n \cdot V} \cdot R_v \cdot \frac{(T_i + T_e)}{2} \quad (5.17)$$

5.2.2 Humedad interior

La norma NCh1973.Of2008 en su anexo A define cinco clases de humedad interior, estas dependen del tipo de edificio clasificado según su uso.

Tabla 5.3. Clases de higrometría interior.

clase de higrometría	tipo edificio
1	Zonas de almacenamiento
2	Oficinas, tiendas
3	Viviendas con baja ocupación
4	Viviendas con alta ocupación, pabellones deportivos, cocinas, cantinas, edificios calefaccionados con estufas sin chimenea de evacuación de gases de combustión
5	Edificios especiales (lavanderías, restaurantes, piscinas entre otros)

El gráfico que sigue permite determinar los límites de diferencia de presión y de exceso de humedad para cada clase de higrometría. Al realizar los cálculos se recomienda tomar el límite superior de cada clase.

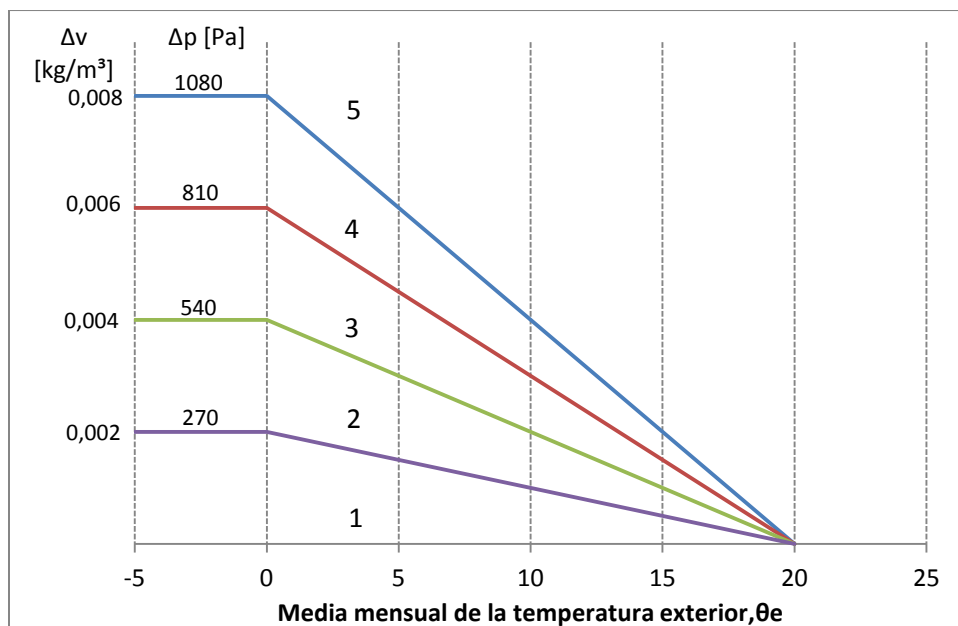


Figura 5.1 Variación de la humedad interior en función de las clases de higrometría y la temperatura exterior.

Fuente: NCh 1973.Of2008

5.3 RIESGO DE CONDENSACIÓN

Como se ha mencionado, las condensaciones pueden ocurrir en superficies (condensación superficial) o en el interior de un elemento constructivo (condensación intersticial).

Por lo general la condensación se produce en elementos que conforman la envolvente de la vivienda debido a que los ambientes que el cerramiento separa pueden presentar diferencias significativas de temperatura y humedad. En Santiago, por ejemplo, la temperatura de invierno es cercana a 0°C, por tanto si se considera una temperatura interior de confort de 20°C, existe un gradiente de temperatura importante entre la cara interior y la exterior de un muro de la envolvente por ejemplo y también una diferencia de presión de vapor de agua significativa.

A continuación se verá el riesgo de que ocurra condensación superficial y/o intersticial basado en la norma NCh1973.Of2008 que reemplazó su versión anterior NCh1973.Of1987 y a la norma NCh1980.Of1988, sin embargo se hará referencia a estas dos últimas debido a que presentan métodos muy sencillos para obtener el riesgo de que se produzca condensación.

5.3.1 Riesgo de condensación superficial

Es difícil que dentro de una vivienda no se produzca condensación superficial, sobre todo cuando las temperaturas exteriores son bajas como es el caso del invierno. Este tipo de condensación se debe principalmente a la alta humedad relativa del aire y a las bajas temperaturas de los elementos de la envolvente, las que pueden tener su origen en:

- Resistencia térmica baja de la envolvente.
- Existencia de puentes térmicos (elementos estructurales como vigas o pilares de H.A. o metal o estructuras livianas como marcos de ventana, dinteles, esquinas, etc.).
- Temperatura exterior baja (invierno).
- Mala ventilación de ambientes interiores.
- Fuentes generadoras de vapor (ver capítulo II)
- Entrada de aire húmedo a la vivienda, entre otros.

Para determinar el riesgo de que se genere condensación superficial es necesario determinar la temperatura superficial interior en todos los elementos de la envolvente y compararla con la temperatura de rocío (ver tabla 3.5).

$$\text{Si } \theta_{Si} > \theta_{Rocío} \Rightarrow \text{no hay riesgo de condensación}$$

$$\text{Si } \theta_{Si} \leq \theta_{Rocío} \Rightarrow \text{hay riesgo de condensación}$$

La temperatura superficial se puede determinar de dos maneras, la primera es calculándola con la ecuación 5.18:

$$\theta_{Si} = \theta_i - U \cdot R_{Si}(\theta_i - \theta_e) \quad (5.18)$$

donde:

θ_{Si} : Temperatura superficial interior.

θ_i : Temperatura del aire interior (generalmente 20°C).

θ_e : Temperatura del aire exterior.

U : Transmitancia térmica del elemento.

R_{Si} : Resistencia térmica de la capa de aire interior (ver tabla 5.5).

Al utilizar esta fórmula se deben tener presente las siguientes consideraciones:

- Temperatura interior de 20°C (condición de confort).
- Humedad relativa interior no mayor al 75% (condición de confort).
- Temperatura exterior mínima del mes más frío (julio, ver NCh1079).

La otra forma es utilizando los ábacos que siguen, en ellos se entra con la diferencia entre la temperatura interior y exterior ($\theta_i - \theta_e$) y la transmitancia térmica del elemento (U), con esto se obtiene un valor de ($\theta_i - \theta_{Si}$), de donde se debe despejar la temperatura superficial interior:

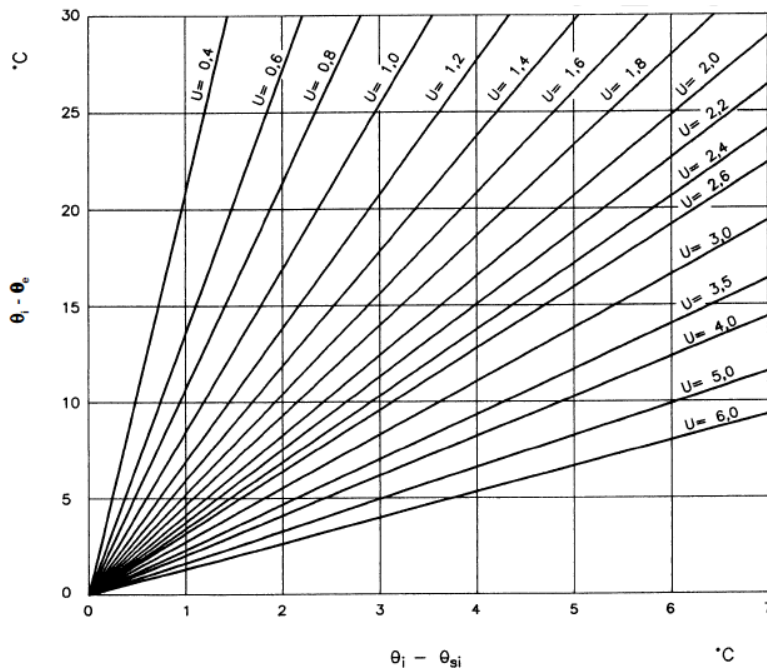


Figura 5.2 Elemento vertical con flujo de calor horizontal (muros).

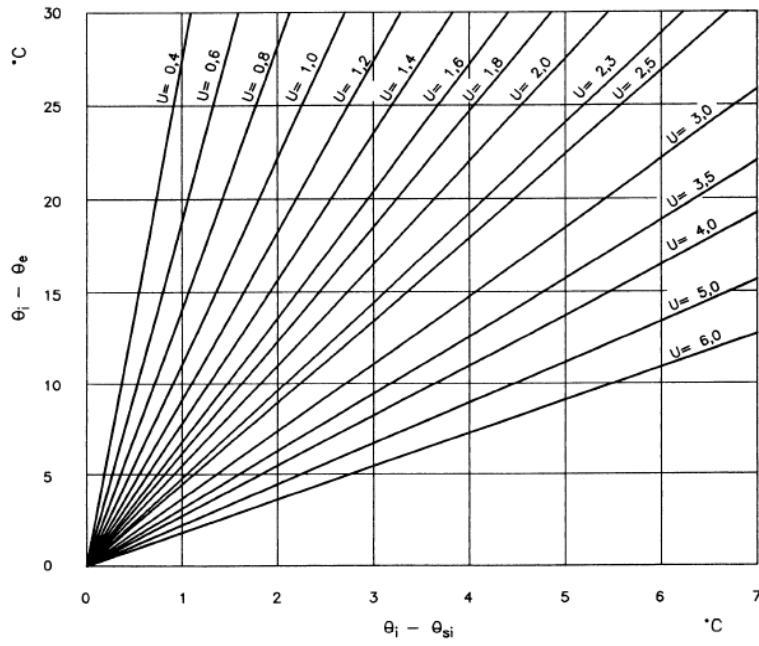


Figura 5.3 Elemento horizontal con flujo de calor hacia arriba.

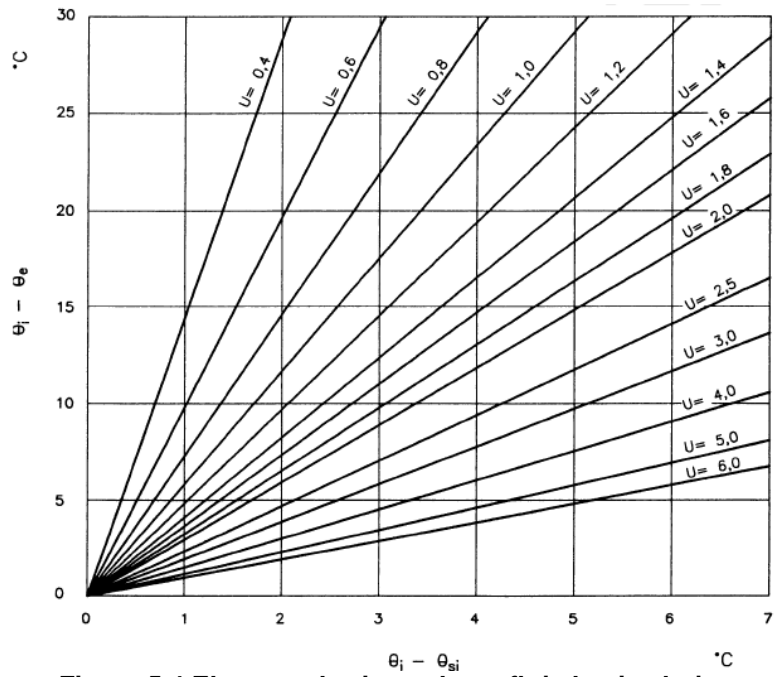


Figura 5.4 Elemento horizontal con flujo hacia abajo.

5.3.2 Diseño para evitar condensaciones superficiales

El procedimiento que sigue es el que exige la actual norma NCh.1973.Of2008, para ello se deben seguir los siguientes pasos:

1. Definir la temperatura exterior como la media de la temperatura mínima anual sobre una base de información climática (consultar NCh1079.Of2008), con ella obtener la presión de saturación de vapor exterior.
2. Considerar una humedad relativa exterior como 95% ($\varphi = 0,95$), en el caso de no tener información de la humedad relativa promedio de cada mes, y calcular la presión de vapor o la humedad en volumen exterior con las ecuaciones 5.7 y 5.8.
3. Definir la temperatura interior según tabla 5.4.

Tabla 5.4. Valores de temperatura y humedad interiores recomendados.

tipo de edificio	temperaturas mínimas en invierno	porcentaje de humedad máxima de diseño recomendado
Edificios residenciales (dormitorios, cocina, recepciones, etc.)	20	75
Edificios residenciales (bodegas, áreas comunes, etc.)	16	75
Oficinas, salas de conferencias, auditorios	20	75
Cafeterías, restaurant	20	75
Salas de clases	20	75
Jardín infantil	17,5	75
Centros comerciales	16	75

4. Convertir Δv o Δp (obtenidos de la figura 5.1) en presión de vapor interior o humedad interior por medio de las ecuaciones 5.9 y 5.10.
5. Considerando ahora una humedad relativa máxima aceptable de 100% ($\varphi = 1,0$) en la superficie, calcular la humedad de saturación mínima aceptable en volumen o la presión de vapor de saturación mínima aceptable con las ecuaciones 5.7 y 5.8.
6. Determinar la temperatura superficial mínima aceptable ($\theta_{si,min}$) a partir de la humedad de saturación mínima aceptable o de la presión de vapor de saturación

mínima aceptable determinada en el punto anterior con las ecuaciones 5.13 y 5.14.

7. Con la temperatura mínima aceptable ($\theta_{si,min}$), la temperatura prevista del aire interior (θ_i) determinada en 3 y la temperatura exterior (θ_e) determinada en 1, calcular el **factor de temperatura exigido** para la envolvente del edificio ($f_{Rsi,min}$) mediante la ecuación:

$$f_{Rsi,min} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad (5.19)$$

Este cálculo se debe hacer para todos los meses del año, el mes crítico es aquel con un mayor valor de $f_{Rsi,min}$, a este valor se le llama $f_{Rsi,max}$. Por lo tanto el factor de temperatura de la superficie interior de un elemento se debe diseñar para que siempre se cumpla que:

$$f_{Rsi} > f_{Rsi,max}$$

Para calcular el factor de temperatura de un elemento se tiene que en elementos planos es:

$$f_{Rsi} = \frac{U^{-1} - R_{si}}{U^{-1}} \quad (5.20)$$

Nota: un factor de temperatura negativo ($f_{Rsi,min} < 0$), significa que la temperatura exterior es mayor a la temperatura superficial aceptable, por ende no existe riesgo de condensación superficial, en dicho caso no es necesario exigir un factor de temperatura ya que las condiciones climáticas no permiten la generación de condensación.

5.3.3 Riesgo de condensación intersticial

Como se vio en el capítulo II, existen diversas fuentes que generan vapor de agua al interior de una vivienda, esto produce un aumento en la presión de vapor al interior de los recintos, ocasionando una diferencia entre la presión de vapor de agua interior con la exterior. Al ser la presión de vapor mayor al interior del recinto, este vapor tenderá a desplazarse en el interior del elemento hacia la zona de menor presión de vapor (caso de muros, techos o pisos ventilados). Durante este proceso, conocido como difusión de vapor de agua, es que se puede generar el fenómeno de condensación intersticial.

En conclusión, para evitar este indeseable fenómeno es imprescindible colocar una barrera de vapor por el lado caliente del elemento.

5.3.3.1 Cálculo de determinación de ocurrencia de condensación intersticial

1. Cálculo de temperaturas en las diversas capas de un elemento

Primero se deben determinar las temperaturas a través del elemento constructivo (muro, techo o piso), esto se debe realizar conforme a la norma NCh 1971 la que permite calcular la temperatura en diferentes puntos de una sección por medio de un método analítico o alternativamente por medio de un método gráfico muy sencillo.

Para realizar este cálculo es necesario recordar las fórmulas de resistencia térmica que siguen:

$$R_i = \frac{e_i}{\lambda_i} \quad (5.21)$$

donde:

R_i : Resistencia térmica de la capa i

e_i : Espesor de la capa i

λ_i : Conductividad térmica de la capa i

$$R_T = \frac{1}{U} = R_{si} + \sum_{i=1}^n R_i + R_{se} \quad (5.22)$$

donde:

R_T : Resistencia térmica total.

$\sum_{i=1}^n R_i$: Suma de todas las capas componentes del elemento constructivo.

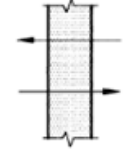
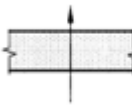

R_{si} : Resistencia térmica de la capa superficial de aire interior.

R_{se} : Resistencia térmica de la capa superficial de aire exterior.

Las resistencias térmicas de las capas de aire, tanto interior como exterior están dadas en la norma NCh 853 y se muestran en la tabla 5.5., en el Anexo C se muestran las conductividades térmicas de diferentes materiales utilizados en construcción.

En lugares donde existan vientos con velocidades superiores a 10 km/h, la resistencia de la capa de aire exterior puede desprejarse. En Santiago, por ejemplo, se considera el aporte en resistencia térmica de la capa de aire exterior dado que no hay vientos importantes. Sin embargo en zonas costeras y en muchas localidades del sur del país se debe considerar $R_{se} = 0$.

Tabla 5.5. Resistencias térmicas de las capas de aire superficiales en zonas con vientos inferiores a 10 km/h.

Resistencias térmicas de superficie en $m^2 \cdot K/W$					
Posición del elemento y sentido del flujo de calor		Situación del elemento			
		Separación con espacio exterior o local abierto		Separación con otro local, desván o cámara de aire	
		R_{si}	R_{se}	R_{si}	R_{se}
Flujo horizontal en elementos verticales o con pendiente mayor de 60° respecto a la horizontal		0,13	0,04	0,13	0,13
Flujo ascendente en elementos horizontales o con pendiente menor o igual a 60° respecto a la horizontal		0,10	0,04	0,10	0,10
Flujo descendente en elementos horizontales o con pendiente menor o igual a 60° respecto a la horizontal		0,17	0,05	0,17	0,17

Para saber hacia dónde va el flujo de calor, es importante tener presente que éste siempre va desde la parte más caliente hacia la más fría, así en invierno por ejemplo se tendrá un ambiente cálido al interior de la vivienda y uno frío al exterior de la misma, por lo tanto el calor del recinto tiende a salir hacia el exterior generando un flujo horizontal saliente (desde el recinto al exterior) en paredes, un flujo vertical ascendente en techos y un flujo vertical descendente en pisos ventilados. En verano, la situación se invierte pero no tiene importancia pues no hay riesgo de condensación.

2. Determinación de las temperaturas superficiales e intersticiales de un elemento envolvente con fines de determinar el riesgo de condensación

El caso que importa es el de condiciones de invierno, ya que en esta época del año es cuando se manifiesta con mayor frecuencia la condensación. El fin de calcular las resistencias térmicas de las capas componentes de un elemento en particular, es que cada capa por la que fluye calor, sufrirá una caída de temperatura (entre sus caras) proporcional a su resistencia térmica. Esto se aprecia en la figura 5.5, en donde el eje de las abscisas representa la resistencia térmica de cada capa y el eje de las ordenadas la temperatura de cada punto de interés o de cada capa.

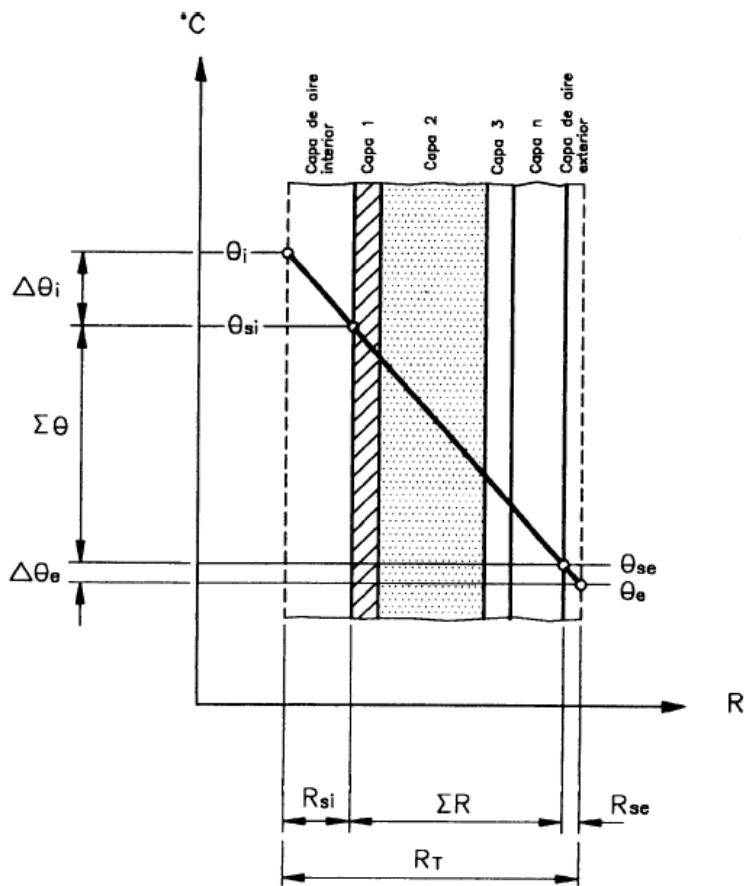


Figura 5.5 Resistencia térmica acumulada en función de la temperatura de cada capa.

Con todo lo anterior ya se puede calcular la temperatura de un punto cualquiera en un elemento de construcción, para ello existen dos métodos:

- **Método analítico**

Este método utiliza la ecuación 5.23 para determinar las temperaturas de las capas que conforman al elemento.

$$\Delta\theta_n = (\theta_i - \theta_e) \frac{R_n}{R_T} \quad (5.23)$$

donde:

$\Delta\theta_n$: Caída de temperatura en la capa n.

θ_i : Temperatura interior.

θ_e : Temperatura exterior.

R_n : Resistencia térmica de la capa n.

R_T : Resistencia térmica total.

- **Método gráfico**

De la misma manera que en la figura 5.5 se hace un gráfico de resistencia térmica (en eje x) v/s temperatura (en eje y). La idea es identificar dónde comienza y dónde termina la resistencia térmica de cada capa para así obtener la temperatura de sus caras. Además se debe agregar el valor de las resistencias de la capas de aire interior y exterior si corresponde, tal como se muestra en la figura siguiente:

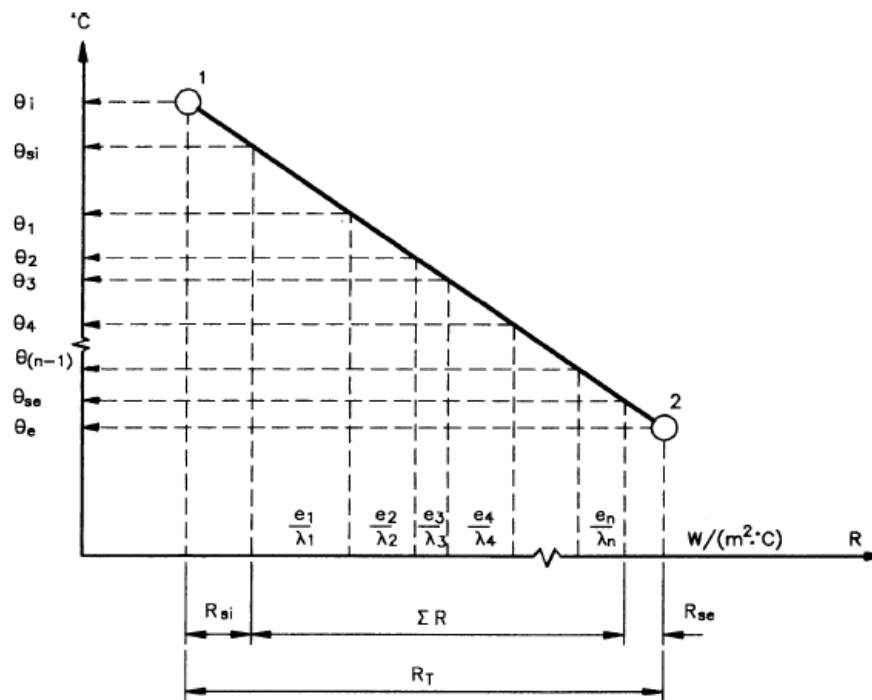


Figura 5.6 Esquema general del método gráfico para obtener temperaturas a partir de las resistencias térmicas de cada capa.

Una vez ubicadas las resistencias de todas las capas, se ubica en el plano la temperatura interior (punto 1) correspondiente a la resistencia de la capa interior y la temperatura exterior correspondiente a la resistencia de la capa de aire exterior (punto 2) si es que existe. Ubicados estos puntos, se traza una línea recta que permite obtener por interpolación la temperatura de cada capa que hay en el elemento en estudio.

Determinadas las temperaturas interiores en el elemento envolvente y con ayuda del ábaco psicrométrico se determina el riesgo de condensación en algunas zonas del elemento. Si hay flujo de vapor en el interior, esto es si el elemento no tiene barrera de vapor, habrá condensación intersticial.

3. Determinación de las presiones de saturación en el elemento

Una vez calculadas las temperaturas, se debe determinar las presiones de saturación de vapor a través del elemento constructivo, éstas se pueden obtener directamente de las ecuaciones 5.11 y 5.12.

4. Determinación de las presiones parciales de vapor a través del elemento

Para obtener la caída de presión de un elemento formado por varias capas se utiliza la fórmula:

$$\Delta P_{Vj} = (P_{Vi} - P_{Ve}) \frac{R_{Vj}}{R_{VT}} \quad (5.24)$$

donde:

ΔP_{Vj} : Caída de presión de vapor de agua en la capa j del elemento.

P_{Vi} : Presión de vapor en cara interior del elemento, es igual a la presión de vapor interior.

P_{Ve} : Presión de vapor en cara exterior del elemento, es igual a la presión de vapor exterior.

R_{Vj} : Resistencia a la difusión de vapor de la capa j.

R_{VT} : Resistencia a la difusión de vapor total del elemento.

5. Comparar presiones y determinar riesgo

Finalmente se deben comparar las presiones parciales de vapor obtenidas por medio del punto anterior, con las presiones de saturación de vapor de agua, aquellos puntos en donde la presión parcial supere a la de saturación, serán los que presenten riesgo de que condense agua. Al graficar esto queda de una manera muy fácil de entender ya que si existe riesgo de condensación el perfil de presión de vapor cruzará en algún punto al perfil de presión de saturación, esto corresponde al método gráfico que propone la norma NCh 1980 y es lo que se aprecia en las figuras que siguen.

Nota 1: en el Anexo A se muestra un método para calcular la cantidad de agua condensada

Nota 2: ejemplos de cálculo de condensación superficial e intersticial se muestran en el Anexo B.

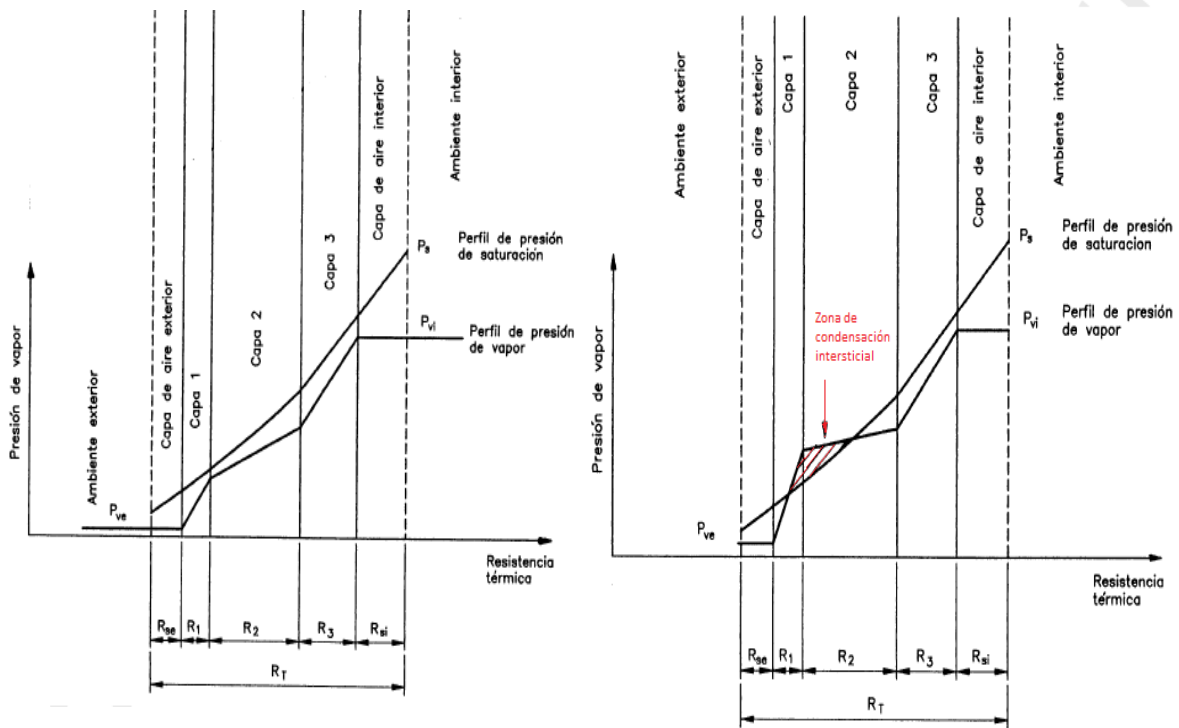


Figura 5.7 Perfil sin riesgo de condensación (izquierda) y con riesgo de condensación (derecha).

5.4 ZONAS CON RIESGOS DE CONDENSACIÓN EN CHILE

No todo Chile está expuesto a que se produzca condensación. Las zonas que pueden eventualmente presentar riesgo de que ocurra este fenómeno son aquellas zonas húmedas y frías a la vez. De acuerdo con la zonificación climática habitacional dispuesta en la NCh 1079 las zonas más propensas son:

- Central litoral.
- Central interior.
- Sur litoral.
- Sur interior.
- Sur extremo.
- Andina.

En la siguiente tabla se detalla la localización que abarcan dichas zonas climáticas.

Tabla 5.6. Zonas más propensas a producción de condensación.

Zona	Localización
Central litoral (CL)	Cordón costero continuación del norte litoral, comprendido desde el límite norte de la comuna de La Ligua hasta el límite norte de la comuna de Cobquecura. Penetra en los valles de los ríos.
Central interior (CI)	Valle central comprendido entre las zonas norte litoral y la precordillera de los Andes por bajo los 1000m. Por el norte desde el límite norte de las comunas de La Ligua y Petorca hasta el límite norte de las comunas de Cobquecura, Quirihue, Ninhue, San Carlos y Ñiquen.
Sur litoral (SL)	Continuación de la zona central litoral desde el límite norte de la comuna de Cobquecura hasta el límite sur de las comunas de Maullín, Calbuco y Puerto Montt. Variable en anchura, penetrando por los valles de los numerosos ríos que la cruzan.
Sur interior (SI)	Continuación de la zona central interior desde el límite norte de las comunas de Cobquecura, Quirihue, Ninhue, San Carlos y Ñiquen, hasta el límite norte de las comunas de Maullín y Puerto Montt. Hacia el este, hasta la cordillera de los Andes por debajo de los 600m aproximadamente.
Sur extremo (SE)	La constituye la región de los canales y archipiélagos desde Chiloé hasta Tierra del Fuego. Contiene una parte continental hacia el este.
Andino (An)	Comprende la faja cordillerana y precordillerana superior a los 3000 m de altitud en el norte (zona altiplánica) que bajando paulatinamente hacia el Sur se pierde al Sur de Puerto Montt. > 900 m de altitud.

Nota: el resto de las zonas climáticas y un mayor detalle se pueden encontrar en la norma NCh 1079.Of2008.

La actual reglamentación térmica (RT) de la OGUC , en su artículo 4.1.10. divide al país en 7 zonas térmicas, cada una de ellas clasificadas por medio del criterio de Grados-Días (GD) de calefacción anual. Los GD se definen como la suma de las diferencias entre la temperatura base de confort interior y la temperatura promedio diaria del exterior, siempre y cuando esta diferencia sea positiva, durante un periodo de tiempo dado (año, en el caso de la RT). Lo anterior dice que este criterio sólo considera el factor temperatura y deja de lado variables como la oscilación térmica, la humedad, radiación solar, intensidad y dirección del viento, altitud, precipitaciones y vegetación predominante, esto puede repercutir en que existan ciudades encasilladas en una misma zona térmica pero que presenten realidades climáticas muy distintas, por ejemplo una ciudad que gane muchos GD en un sólo mes (mes muy frío) y el resto del año tengan temperaturas sobre la temperatura de confort, presentando GD anuales similares a otra ciudad que tenga temperaturas agradables un poco menor a la temperatura de confort, ganando pocos GD pero durante todo el año. La zonificación climática habitacional dispuesta en la norma NCh 1079 considera estos parámetros dejados de lado por la reglamentación térmica y es por esto que se acomoda de mejor manera a las realidades climáticas del país.

Tabla 5.7. Zonas térmicas de RT y su correspondencia con la zonificación climática habitacional NCh 1079.

Zonas térmicas	Grados-día anuales de calefacción base 15°C	Zona climática de la NCh 1079	Región XV Región I	Región II	Región III	Región IV	Región V	R.M.	Región VI	
Zona 1	≤500 m	Norte Litoral	Arica, Iquique	Tocopilla, Antofagasta	Huasco	La Serena, Coquimbo				
		Norte Desértico		María Elena, Pica, Pozo Almonte						
		Norte Valles Transversales			Vallenar, Copiapó					
Zona 2	> 500 m ≤ 750 m	Norte Litoral				Los Vilos				
		Norte Desértico		San Pedro de Atacama, Calama						
		Norte Valles Transversales				Andacollo, Ovalle, Punitaqui, Montepatria, Illapel, Salamanca				
		Central Litoral					Quintero, Valparaíso, Viña del Mar, San Antonio			
		Central Interior					Quillota, San Felipe, Los Andes, Llay Llay, Olmué			
Zona 3	> 750m ≤1000m	Norte Valles Transversales			Alto del Carmen					
		Central Interior					Santiago, Melipilla, Til Til	Rancagua, San Fernando		
		Central Litoral						Pichilemu		

Zonas térmicas	Grados-día anuales de calefacción base 15°C	Zona climática de la NCh 1079	Región XV Región I	R.M.	Región VII	Región VIII	Región IX	Región XIV	Región X	Región XI Región XII
Zona 4	> 1000 m ≤ 1250 m	Central Litoral			Constitución					
		Central Interior			Talca, Linares					
		Sur Litoral				Concepción, Talcahuano, Lebu, Cañete				
		Sur Interior				Chillán, Los Ángeles				
Zona 5	> 1250 m ≤ 1500 m	Andina		San José de Maipo						
		Sur Litoral					Saavedra	Valdivia		
		Sur Interior					Traiguén, Temuco	Paillaco, Río Bueno	Osorno	
Zona 6	> 1500 m ≤ 2000	Sur Litoral					Lonquimay		Puerto Montt	
		Sur Interior							Puerto Varas	
		Sur Extremo							Ancud, Castro, Chaitén	
Zona 7	> 2000 m	Sur Extremo								Coyhaique, Punta Arenas
		Andina	Putre, Colchane							

Fuente: W. Bustamante y col., "Eficiencia energética en vivienda social: un desafío posible".

6 PREVENCIÓN Y SOLUCIONES

6.1 CONSIDERACIONES GENERALES PARA PREVENIR LA HUMEDAD POR CONDENSACIÓN

Por muchas razones ya explicadas con anterioridad es necesario que la envolvente de una vivienda no presente condensación superficial, ni tampoco intersticial. Como recomendaciones generales para evitar estos fenómenos se recomienda:

1. Controlar la humedad relativa del ambiente interior.
 - Tanto la cocina como el baño deben tener ventilación directa al exterior o contar con sistemas de extracción mecánicos que permitan el control y eliminación de vapor que se produce en ellos.
 - Contemplar en el diseño de la vivienda espacios que permitan una posterior instalación de sistemas de ventilación activos tales como extractores y campanas.
 - Contemplar la posibilidad de incorporar sistemas de ventilación pasivos, tales como chimeneas solares o de ventilación convectiva.
 - Sacar de la vivienda todas las actividades que produzcan humedad, por ejemplo lavado, secado de ropa, planchado, entre otros.
 - Si una habitación es ventilada desde otro recinto, el diseñador debe considerar la opción de que el ocupante deje sin ventilación a aquella habitación dependiente.
2. Controlar la temperatura de la envolvente, tanto superficial como al interior del elemento.
 - Controlar la transmitancia térmica de la envolvente teniendo en cuenta las características térmicas de los materiales aislantes dependiendo del lugar donde se encuentren, por ejemplo en puentes térmicos se debe tener especial cuidado con la aislación.
 - Considerar el efecto de la radiación solar sobre los muros que estén expuestos a ella.
 - Diseñar ventanas y puertas con el mejor ajuste posible para evitar pérdidas por.
 - Evitar puentes térmicos, ya que en aquellos materiales que presenten una menor resistencia térmica se producirán primero las condensaciones.
 - Controlar la condensación en cañerías o ductos que transporten agua fría.
 - Colocar barrera de vapor inmediatamente después del revestimiento interior y barrera de humedad después del revestimiento exterior.
3. Evitar el aumento de la humedad relativa interior producto de calefacciones de aparatos de llama abierta.

- En lo posible considerar el espacio para la instalación de al menos un ducto de evacuación de gases de combustión al exterior o una salida de aire, ya que cualquier fuente de calefacción móvil de llama abierta (parafina, GLP, entre otros) producirá aumentos no controlados de humedad porque la construcción no contará con las ventilaciones correctamente dimensionadas para estas fuentes.
- Diseñar ventilaciones cruzadas o convectivas por medio de la correcta ubicación de ventanas, que no afecten el confort interior y que garanticen renovación continua del aire.

Dentro de todas las recomendaciones es importante tener en cuenta la ventilación de la vivienda y la aislación térmica de la misma, estos dos factores pueden por sí solos erradicar el fenómeno de condensación.

6.2 VENTILACIÓN COMO CO-AYUDA PARA PREVENIR LA CONDENSACIÓN

La ventilación adecuada de la vivienda resulta ser fundamental para mantener una calidad de aire interior aceptable además de controlar el nivel de humedad interior, en beneficio de la salud de sus ocupantes. Es necesario tener en cuenta que la ventilación es tanto más efectiva cuanto más seco es el aire de admisión. Teóricamente la ventilación es contraproducente si el aire de admisión viene cargado de humedad.

La ventilación es un factor muy relevante para mantener el confort interior en la vivienda y asegurar un adecuado comportamiento higrotérmico de la envolvente, sin embargo es importante mencionar que la ventilación por sí sola no asegura eliminar los problemas asociados a la condensación, esto simplemente porque en lugares húmedos el aire caliente interior se reemplaza por aire húmedo proveniente del exterior. La ventilación debe ser complementaria de una buena aislación térmica para eliminar por completo el problema de la humedad por condensación.

6.2.1 Ventilación al interior de la vivienda.

La ventilación en una vivienda se puede realizar principalmente por dos medios:

- Ventilación natural, abriendo ventanas y puertas.
- Ventilación forzada, por medio algún sistema mecánico como lo son ventiladores, extractores o intercambiadores de aire.

Para obtener una buena ventilación, se debe disponer de un sistema cruzado, esto es con entrada y salida de aire, en lo posible por la diagonal más larga de la vivienda o los recintos, así el aire fluirá por una mayor cantidad de lugares.

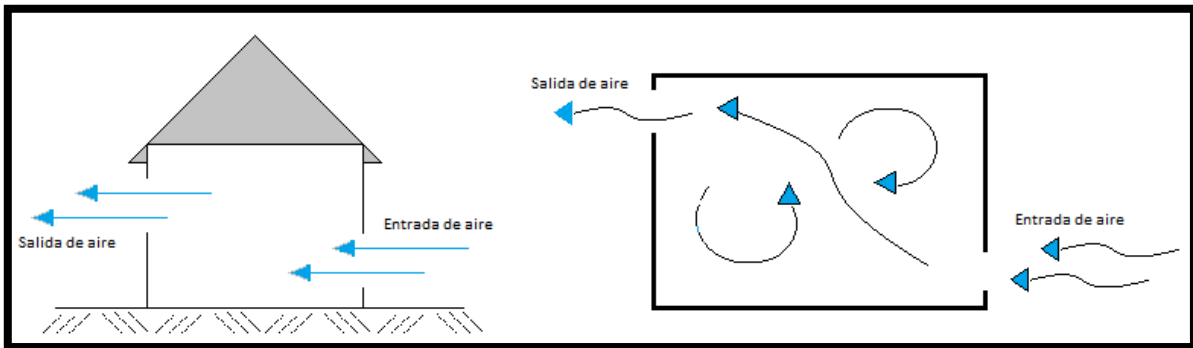


Figura 6.1 Esquema de ventilación cruzada en elevación y planta.

El utilizar ventilación forzada incurre en gastos energéticos, por lo que es ideal realizar un buen diseño de puertas y ventanas, en cuanto a su ubicación y altura dentro del inmueble, para aprovechar la ventilación natural.

Para la componente vertical de la ventilación se deben tener las siguientes consideraciones, con respecto de la altura a la que estén ubicadas las ventanas:

- En general una entrada de aire a nivel bajo y a nivel medio producen una ventilación aceptable independiente de la altura a la que se encuentre la salida de aire.
- Si el aire ingresa por una ventana alta no se generará una buena ventilación de la vivienda independiente de la posición de la salida.

Además los aleros en las casas pueden ayudar a que el flujo de aire que entre sea mayor, sobre todo en aquellos lugares en donde se genere una componente vertical del viento.

6.2.2 Consideraciones generales para ventilación en la vivienda.

- Se deben colocar protecciones en ventanas para el viento cuando el clima del lugar es frío. Estas protecciones deben considerar la dirección del viento predominante en la zona.
- Se debe ubicar el acceso a la vivienda en el lugar de la dirección de los vientos más débiles. La norma NCh 1079.Of2008 indica la dirección de los vientos predominantes en su anexo C, como se muestra en la tabla resumen de esto.

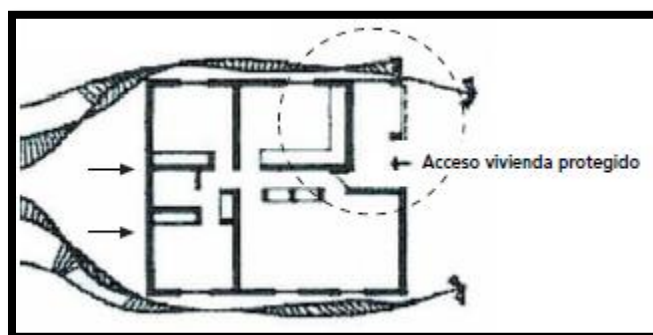


Figura 6.2 Esquema de acceso a vivienda protegido del viento.

Tabla 6.1. Dirección predominante del viento y su velocidad media.

Lugar	Viento		Lugar	Viento	
	Dirección predominante	Velocidad media [m/s]		Dirección predominante	Velocidad media [m/s]
Arica	SW	5,1	Isla Juan Fernández	S	5,1
Iquique	SW	3,1	Curicó	S	3,1
Calama	W	8,7	Chillán	SW	3,6
Antofagasta	S	5,1	Concepción	SW	6,7
Chañaral	W	5,7	Temuco	SW-N	3,6-5,1
Isla de Pascua	E	5,1	Osorno	S	4,6
Copiapó	W	5,1	Puero Montt	N	4,6
Vallenar	W	4,1	Ancud	NW	6,2
La Serena	W	4,1	Puero Aysén	SW	4,6
Quintero	SW	6,7	Coyhaique	W	5,1
Valparaíso	SW	6,2	Balmaceda	W	9,8
Rodelillo	S	5,1	Chile Chico	NW	9,8
Santiago-Pudahuel	S	3,6	Punta Arenas	W	8,2
Santiago-Quinta Normal	SW	2,1	Puerto Williams	W	5,7
Santo Domingo	SW	3,6			

Nota 1: estos datos han sido tomados en algunas estaciones puntuales de los lugares mencionados en la tabla anterior entre los años 1961 a 1990.

Nota 2: la dirección del viento es aquella de donde viene éste.

- Considerar la dirección del viento predominante para la orientación de las pendientes en los techos, de manera que estos no presenten oposición al sentido del flujo de aire.

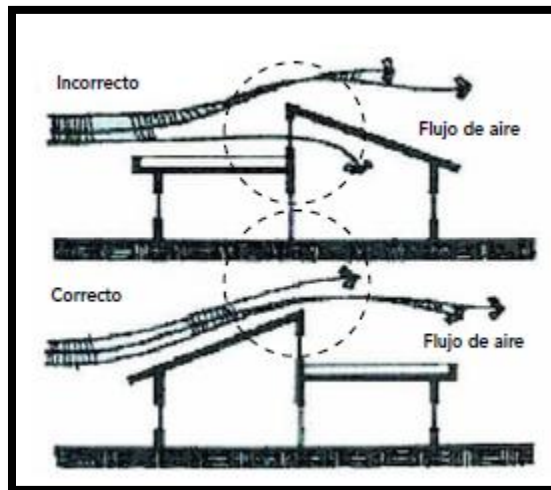


Figura 6.3 Correcta orientación del techo.

- No colocar tabiques interiores en lugares próximos al acceso del viento que evitan la libre circulación de aire por medio de ventilación cruzada

Nota: la ventilación en complejos de techumbre sirve para reacondicionar techos de viviendas que presenten problemas de humedad por condensación al interior de la misma techumbre. En viviendas nuevas si se contempla una correcta instalación de la barrera de vapor y de una barrera de humedad no debiera ser necesario ventilar el techo para prevenir problemas de humedad.

6.2.3 Ventilación en complejos de techumbre.

Considerar una ventilación adecuada en complejos de techumbre es importante para evitar los problemas asociados a la condensación. Esta puede ser por medio de cámaras de aire ubicadas bajo la cubierta o por medio de respiraderos que permitan el ingreso y circulación de aire.

La solución de respiradero, en general se utiliza en techos compuestos por cerchas, mientras que la ventilación por cámara de aire sirve para cualquier solución de techumbre.

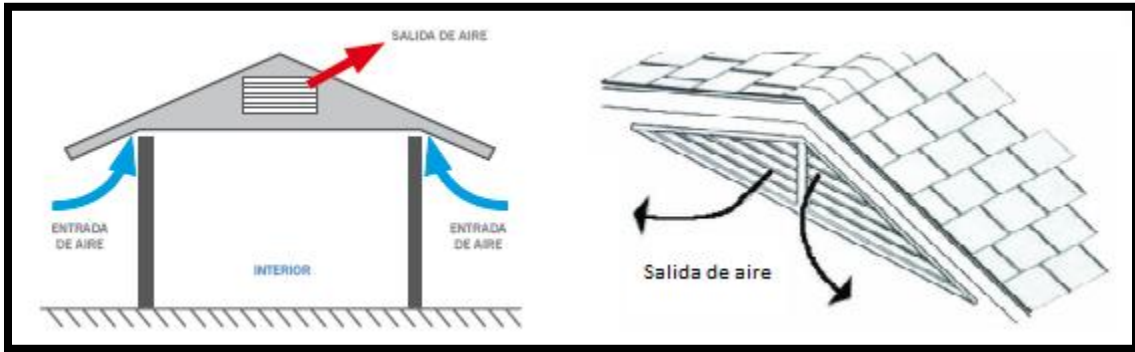


Figura 6.4 Esquema de ventilación por medio de respiradero.

La cámara de aire debe tener un espesor de 5cm como mínimo y funciona introduciendo aire por los aleros y haciéndolo circular hasta la cumbre, además dependiendo de los requerimientos se puede utilizar una solución de una o dos cámaras de aire.

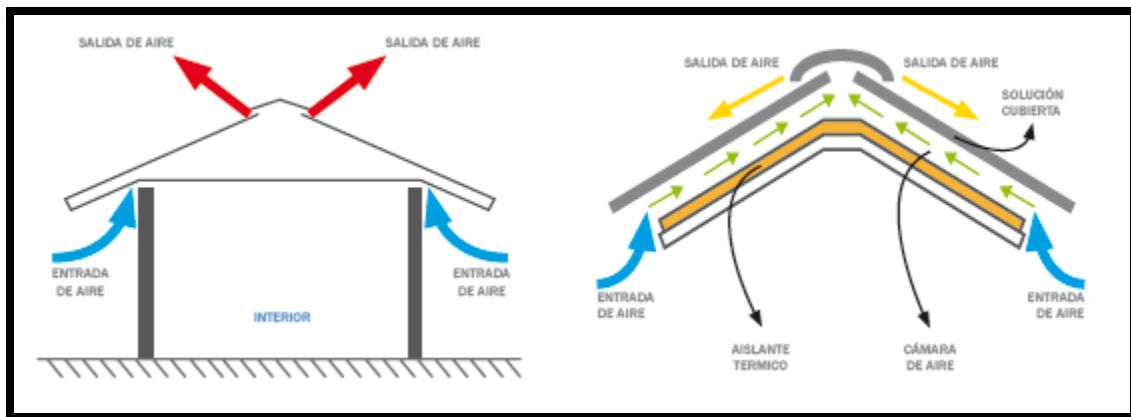


Figura 6.5 Esquema de ventilación por cámara de aire.

Al igual que en muros es de suma importancia tener en consideración la ubicación del aislante térmico al momento de escoger el sistema de ventilación para reacondicionar la techumbre, ello puede influir en no eliminar por completo la formación de condensaciones. En caso de tener un complejo de techumbre fría es totalmente necesario ventilar el desván.

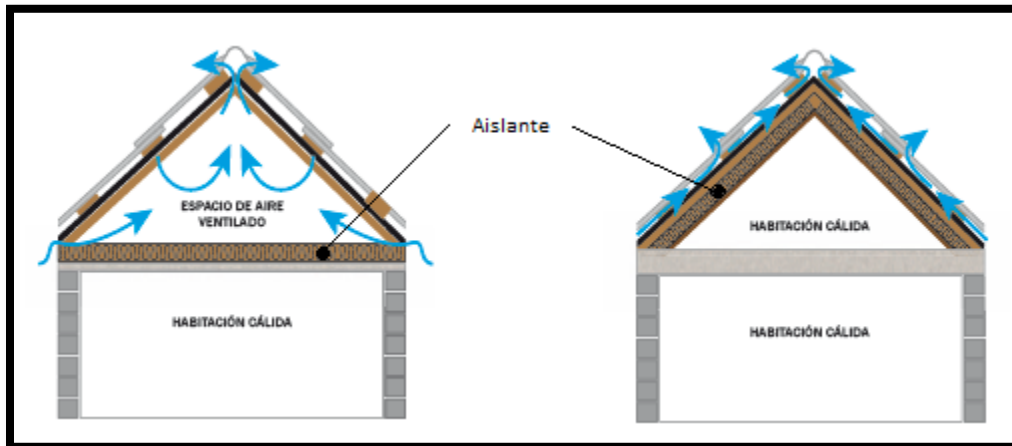


Figura 6.6 Ventilación necesaria para techo frío (izquierda) y techo caliente (derecha).

Además es necesario mencionar que tanto las entradas y salidas deben impedir la entrada de agua, nieve o insectos que puedan obstruir el flujo de aire, para ellos se utilizan rejillas de metal o plástico tal como se muestra en la figura que sigue.

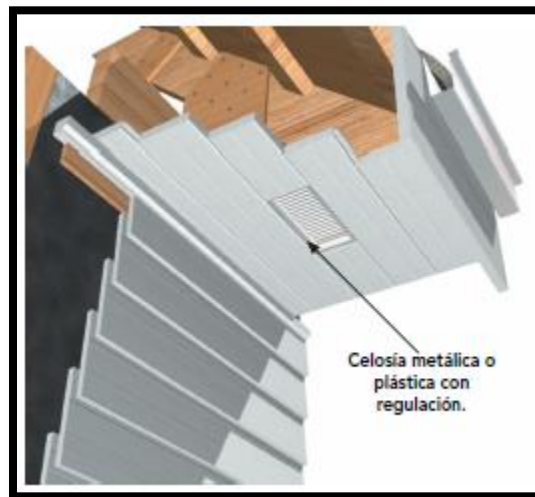


Figura 6.7 Celosía en alero para entrada de aire.

Como regla general conviene considerar aproximadamente 1m² de abertura por cada 14m² de superficie de entretecho.

6.3 AISLACIÓN TÉRMICA.

La ventilación del ambiente interior es una co-ayuda en el sentido de que saca el aire con humedad, pero por otro lado el aire caliente lo reemplaza por aire frío, esto conlleva a un aumento en el uso de energía de calefacción debido a que se necesitará calentar el aire frío de entrada para mantener confort, lo que resulta contraproducente. En invierno por lo general el aire exterior está más húmedo de lo normal, en días de lluvia por ejemplo, habrá una alta humedad exterior, por lo que ventilar sería reemplazar aire húmedo tibio por aire saturado frío.

La solución efectiva es aislar térmicamente la envolvente de las viviendas. Además conviene aislar por el exterior para disminuir aún más el riesgo de que se generen condensaciones intersticiales, esto debido a que el muro estará "caliente" o a una temperatura cercana a la interior, esto ayuda a que no se alcance la temperatura de rocío al interior de éste. Por el contrario si aislamos térmicamente por la cara interior sucederá que el muro estará "frío" y el riesgo de condensación intersticial aumenta.

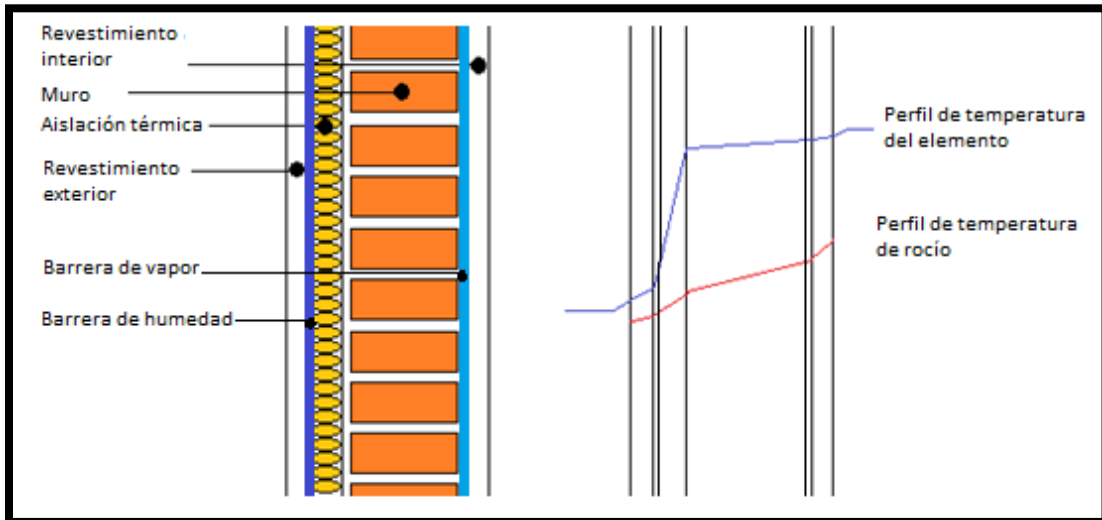


Figura 6.8 Elemento con aislamiento térmico exterior.

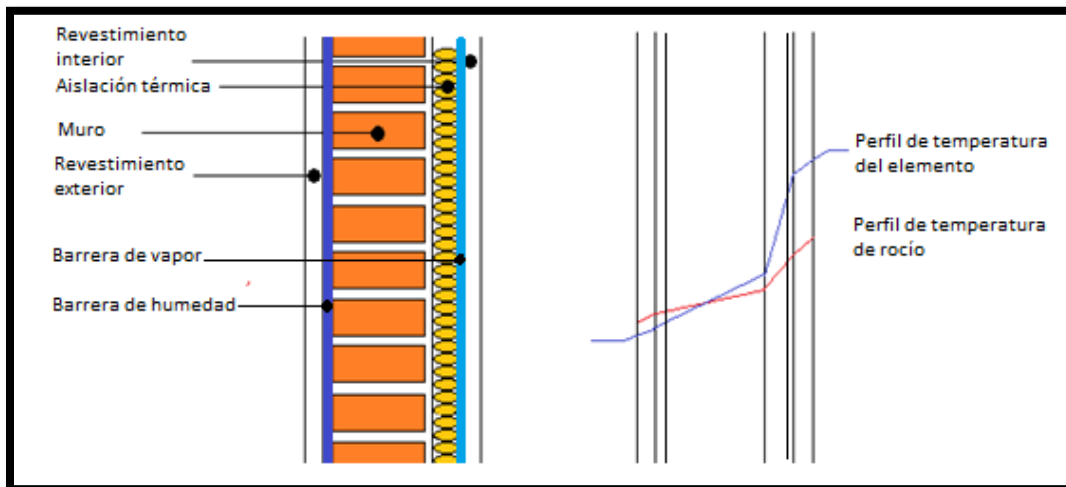


Figura 6.9 Elemento con aislación térmica interior.

Es importante mencionar que los perfiles de temperatura señalados en las figuras anteriores son a modo explicativo, esto no quiere decir que la aislación interior es mala, sólo que si se aísla por la cara interior, el elemento constructivo estará más propenso a que se produzca condensación intersticial, sin embargo si se escoge esta solución, la de aislar por el interior, se debe exigir, con más razón una barrera de vapor por el lado interno de la vivienda para eliminar la posibilidad de condensación intersticial.

Recomendaciones generales :

- Es preferible utilizar aislación térmica por la cara fría del elemento, si es que no hay barrera de vapor.
- Utilizar barrera de vapor por el interior del elemento constructivo para evitar la entrada de vapor de agua.
- Utilizar barrera de humedad por el exterior para prevenir el ingreso de humedades desde el exterior. Esta barrera debe ser permeable al vapor para que se pueda expulsar una eventual humedad intersticial.

Nota: detalles de soluciones constructivas para muros, losas, complejos de techumbre y ventanas, se pueden obtener del Manual de Aplicación de Reglamentación Térmica (MART), sin embargo se debe tener en consideración que las dimensiones allí estipuladas fueron calculadas para una humedad relativa interior de 75%.

6.3.1 Barrera de humedad.

La barrera de humedad es un material que tiene por finalidad cortar el paso del agua líquida hacia el elemento constructivo, esta barrera debe ir por el exterior de los muros para así proteger a la construcción de humedades exteriores como lo son las de lluvia.

La barrera de humedad que se utilice debe ser continua sobre toda la envolvente y se debe traslapar entre 10 a 15 cm en las juntas tanto horizontales como verticales. Para el caso de esquinas exteriores e interiores se recomienda dejar 30 cm de traslapo para asegurar la continuidad de la barrera.

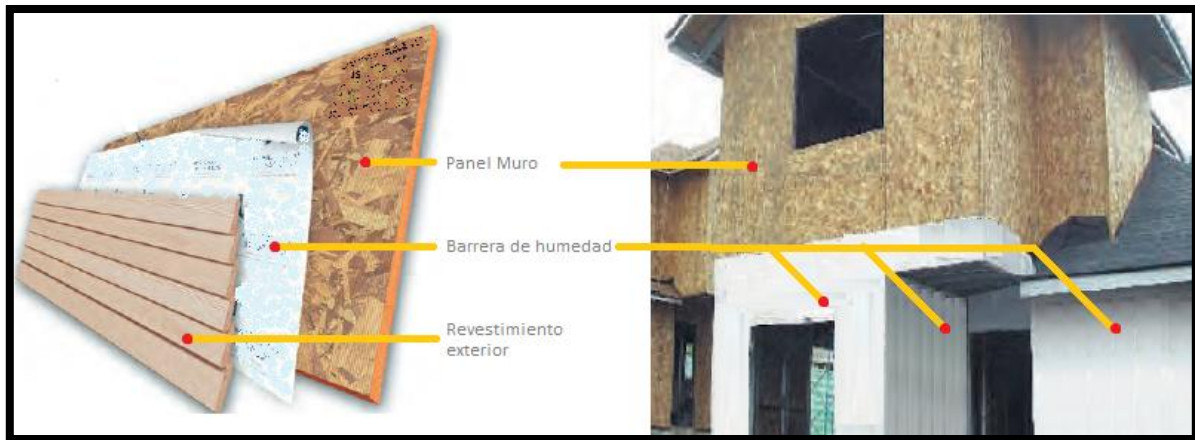


Figura 6.10 Barrera de humedad.

En techos la barrera de humedad más utilizada y común es el fieltro asfáltico, compuesto por una base de papel kraft impregnada en asfalto. Es conveniente también colocar una barrera de humedad en las fundaciones para no contaminar el hormigón y para proteger a la construcción de la humedad por ascensión capilar desde el suelo.

6.3.2 Barrera de vapor.

Como ya se ha mencionado, las actividades normales de las personas dentro de una vivienda generan vapor de agua. Este vapor al tratar de salir del recinto puede condensar, fenómeno indeseable que se debe tratar de evitar por las causas antes expuestas.

El vapor interior de un recinto saldrá de éste gracias a la presión de vapor de agua que posea el aire húmedo. Por ello es de suma importancia que las barreras de vapor sean continuas, ya que de lo contrario el vapor encontrará aquella discontinuidad y tratará de salir por allí.

Una barrera de vapor es un material que presenta una resistencia a la difusión de vapor de agua comprendida entre 10 y 230 $[MN \text{ s/g}]$. Si esta resistencia a la difusión de vapor es mayor a 230 $[MN \text{ s/g}]$ se le llama cortavapor. En general se utilizan láminas de polietileno

como barreras de vapor, pero existen otras soluciones como por ejemplo recubrimientos protectores.

Tabla 6.2. Resistencia a la difusión de vapor de agua de algunas barreras de vapor.

Material	espesor	Resistencia a la difusión de vapor
	[mm]	[MN s/g]
Hoja de aluminio	0,008	4000
Lámina de polietileno	0,05	103
Lámina de polietileno	0,1	230
Lámina de poliéster	0,025	24
Pintura (esmalte)	-	7,5-40

Fuente: Norma NCh1980.Of88

El polietileno es comercializado en rollos de ancho y largo que permiten cubrir grandes extensiones de muros, esto con el fin de realizar la mínima cantidad de juntas para disminuir la posibilidad de que se filtre vapor de agua. en el caso de tener que realizar una junta, se recomienda traslapar por lo menos 15 cm las capas de polietileno en el caso de muros y 10 cm en el caso de techos. La barrera de vapor debe ser colocada por la cara caliente del elemento, esto corresponde a la cara interior en el caso de invierno, que es cuando la condensación se produce con mayor frecuencia. Una vez instalada la barrera de vapor se coloca el recubrimiento de terminación.

Es importante mencionar que la unión física entre la barrera y el material al que se adose ésta se debe realizar por medio de un pegamento adecuado o algún elemento que permita la correcta unión entre ambos materiales.

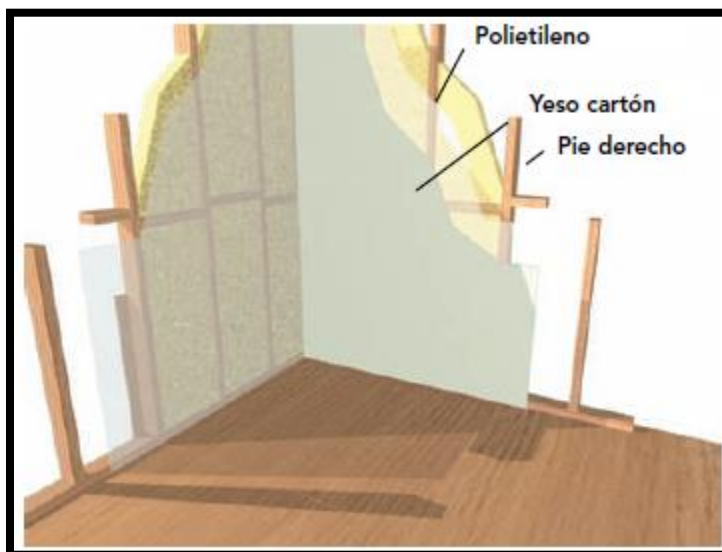


Figura 6.11 Polietileno en muros.

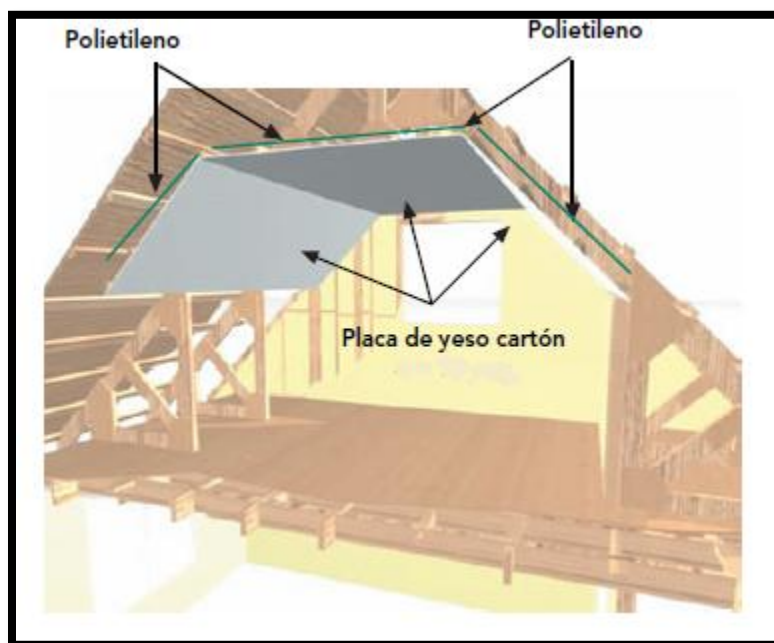


Figura 6.12 Polietileno en techos.

Nota: tanto para las barreras de vapor como para la de humedad, está sujeto a la compatibilidad que tengan con otros materiales de construcción según recomendación del fabricante. Es importante tener esto en cuenta al momento de elegir una barrera adecuada y no tener posteriores problemas.

6.4 SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS

Anteriormente se mencionó que no todos los lugares de Chile presentan riesgo de condensación, por tanto existirán localidades en donde no será necesario aplicar un aislante térmico o barreras de vapor para prevenir la condensación. Por lo anterior se recomienda lo siguiente:

1. Con la solución constructiva a utilizar chequear si existe riesgo de condensación por medio de los métodos descritos en el capítulo IV, esto se recomienda hacer aunque la localidad no se encuentre emplazada en una de las zonas climáticas con riesgo de condensación descritas en la tabla 5.6.
2. Si no existe riesgo de condensación, seguir adelante con el proyecto ya que no habrá problemas de humedad,
3. Si existe riesgo de condensación:
 - En viviendas nuevas: cambiar la solución constructiva y volver al punto 1.
 - En vivienda usada: acondicionar la vivienda a alguna solución similar a las mostradas en los puntos 6.4.1., 6.4.2. y 6.4.3., colocando aislantes térmicos y/o barreras de vapor y humedad según corresponda.

Es importante recordar que la barrera de vapor es un elemento que busca erradicar el problema de la condensación intersticial pero no la superficial, esta última depende en gran medida de la aislación térmica, la ventilación y las condiciones de uso de la vivienda.

Es importante saber dónde se debe colocar la barrera de vapor y humedad en el caso de necesitarlas, las siguientes soluciones constructivas se muestran con el fin de saber la correcta ubicación de las barreras para el caso de aislación térmica exterior o interior.

6.4.1 Techumbres

Hoy en día se pueden encontrar variadas soluciones constructivas para la techumbre, sin embargo las que más se utilizan actualmente en vivienda son aquellos techos estructurados con cerchas o con vigas.

6.4.1.1 Techumbre estructurada con cerchas

Independiente de si la aislación térmica es flexible, rígida (figura 6-a) o con cámara de aire, la posición de la barrera de vapor y la barrera de humedad debe ser la misma. La barrera de humedad se debe colocar entre la cubierta y la estructura secundaria en la que se fija ésta, mientras que la barrera de vapor se debe colocar entre el cielo y el tipo de aislación térmica escogida.

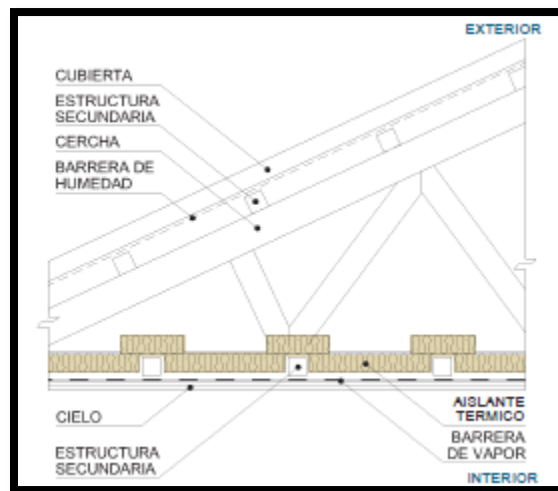


Figura 6.13 Techumbre estructurada con cercha.

Techumbre estructurada con vigas

Dentro de este tipo de techumbres se puede encontrar aquellas soluciones con vigas a la o con vigas ocultas. Para ambos casos la posición de la barrera de vapor y de humedad es la misma. La barrera de humedad se debe colocar entre la cubierta y la estructura secundaria a la que se fija al igual que en la techumbre compuesta por cerchas, mientras

que la barrera de vapor debe colocarse entre el cielo y la aislación térmica, en el caso que las vigas estén a la vista o entre el cielo y el envigado cuando las vigas estén ocultas.

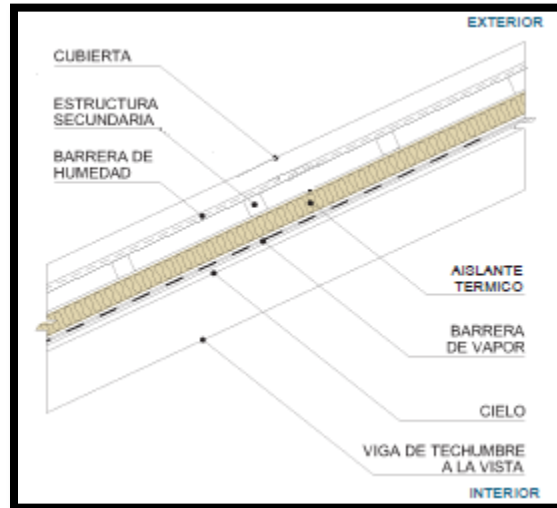


Figura 6.14 Techumbre estructurada con vigas a la vista.

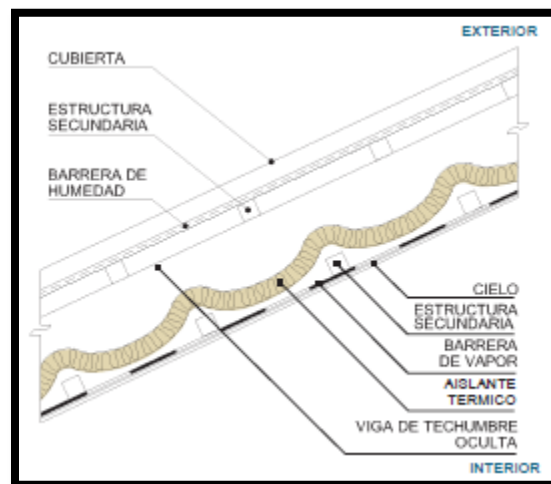


Figura 6.15 Techumbre estructurada con vigas ocultas.

6.4.2 Muros

Si la solución de aislación térmica es por el interior de la vivienda, debe colocarse una barrera de vapor para así evitar el paso de vapor de agua hacia el interior del muro.

La barrera de vapor se debe ubicar entre el aislante térmico y el revestimiento interior, para proteger al aislante. En estricto rigor la barrera de vapor se debe ubicar en la cara en que la presión de vapor de agua sea mayor, esto es por el lado interior de la vivienda.

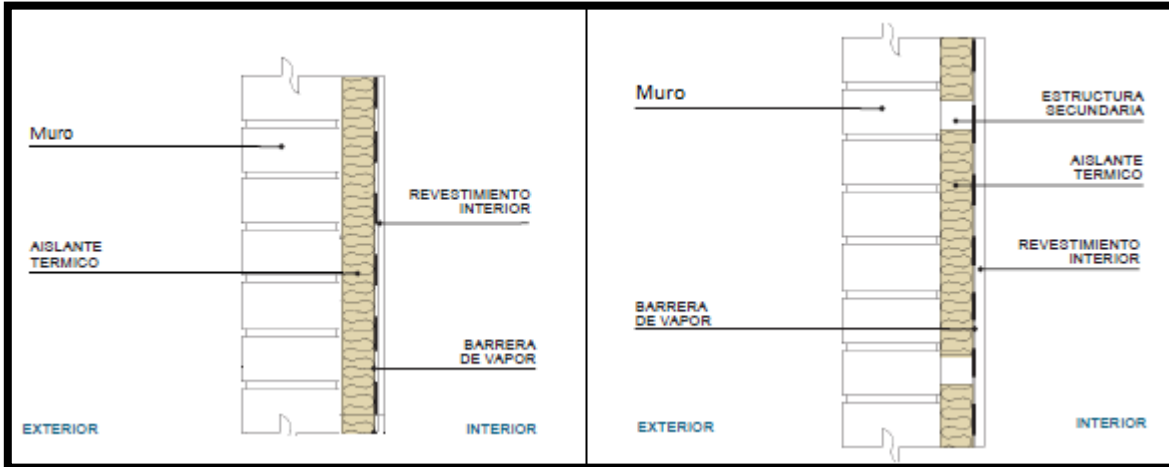


Figura 6.16 Muro con barrera de vapor por el interior.

Si no se utiliza barrera de humedad tipo membrana, es recomendable aplicar una pintura que actúe como barrera de humedad permeable al vapor.

Al utilizar aislación térmica exterior, es recomendable el uso de una barrera de humedad, para proteger el aislante, éste puede aumentar su conductividad térmica de forma significativa y por tanto no cumpliría su función.

La barrera de humedad se debe instalar entre el aislante térmico y la terminación exterior para así impedir que la humedad exterior penetre en el muro.

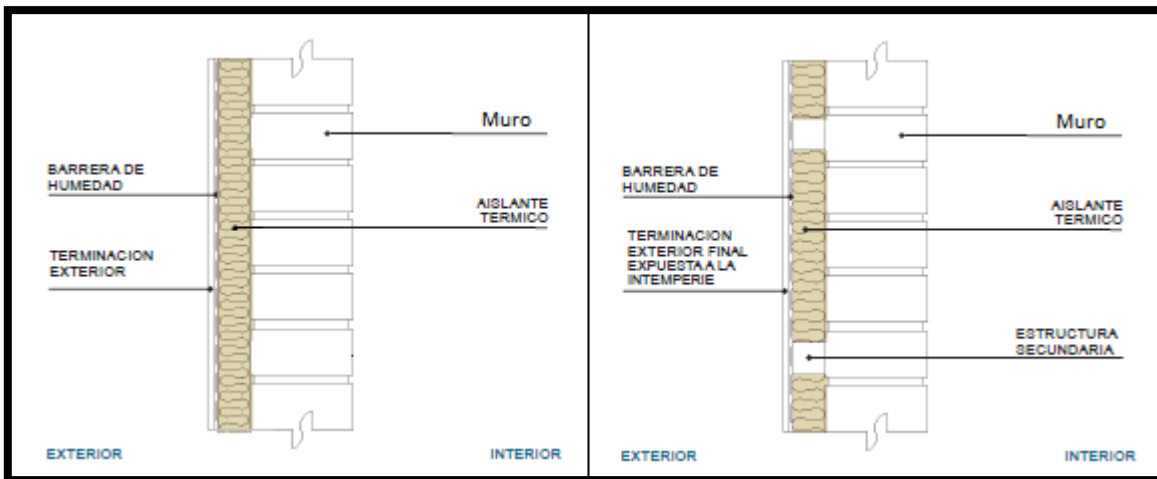


Figura 6.17 Muros con barrera de humedad por el exterior.

Es importante volver a remarcar que la barrera de humedad debe ser permeable al vapor, el no serlo puede desencadenar problemas de humedad intersticial debido a que el vapor de agua viaja desde el punto con mayor presión de vapor al de menor presión. Ver figura 6.18.

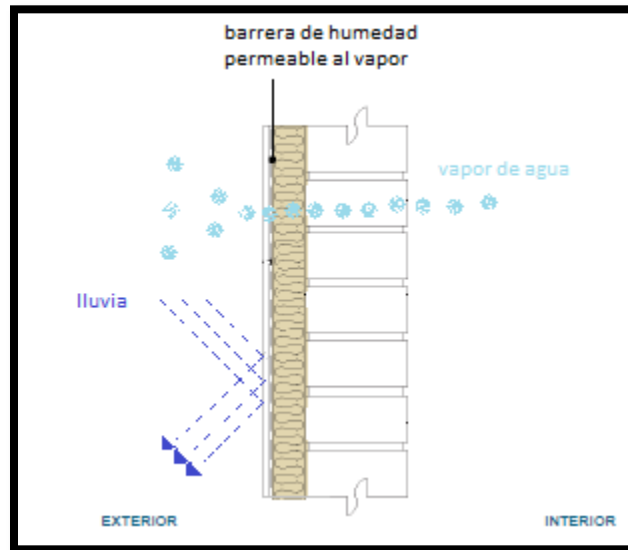


Figura 6.18 Muro con barrera de humedad permeable al vapor.

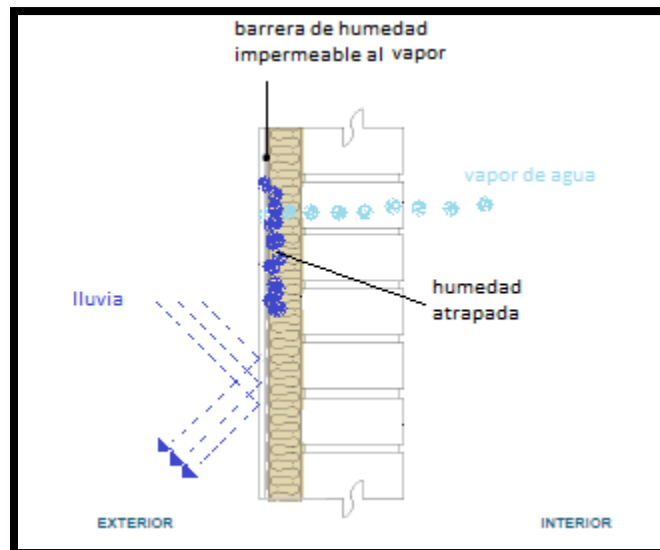


Figura 6.19 Muro con barrera de humedad impermeable al vapor de agua.

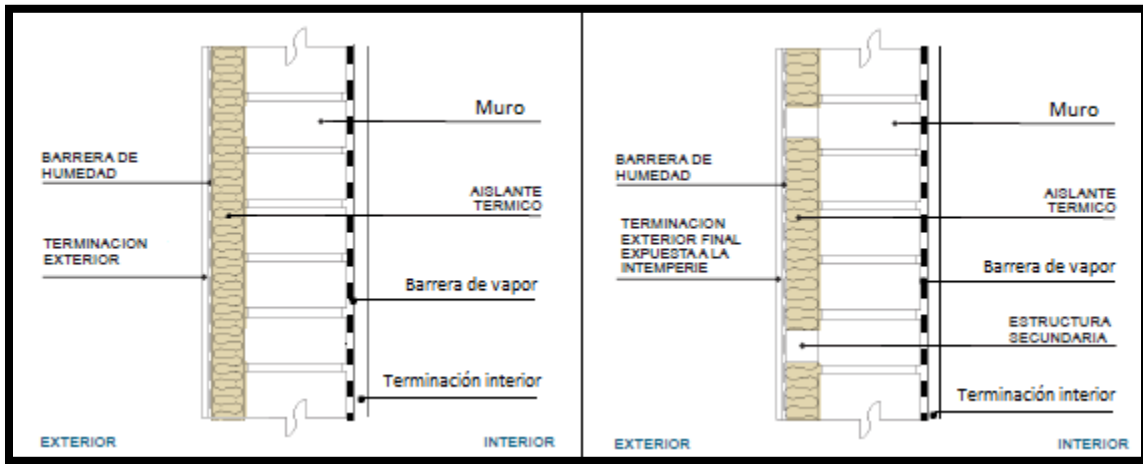


Figura 6.20 Muro con barrera de humedad y barrera de vapor.

6.4.3 Pisos ventilados

Los pisos ventilados son aquellos que no se encuentran en contacto con el terreno. Al igual que en el caso de los muros y techumbres, la barrera de vapor se debe instalar por la cara con mayor presión de vapor o cara “caliente”. Puede que no sea necesario colocar una barrera en toda la casa, sin embargo es más importante en aquellos lugares húmedos como lo son la cocina y el baño.

Tanto en el caso de pisos entramados, que corresponden a aquellos estructurados en base a vigas, como en el caso de pisos con losas de hormigón armado, si fuera necesario la barrera de vapor debe estar ubicada inmediatamente después de la cubierta de piso y antes del aislante térmico.

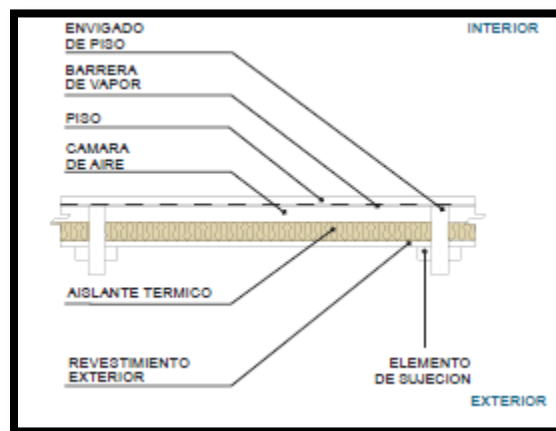


Figura 6.21 Piso con vigas ventilado. Barrera de vapor por el interior y aislante térmico por el exterior.

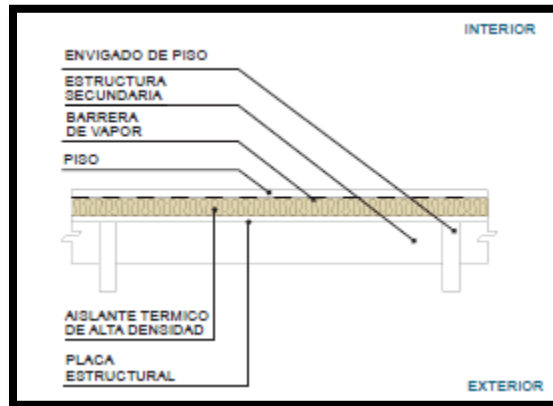


Figura 6.22 Piso con vigas ventilado. Barrera de vapor y aislante térmico por el interior.

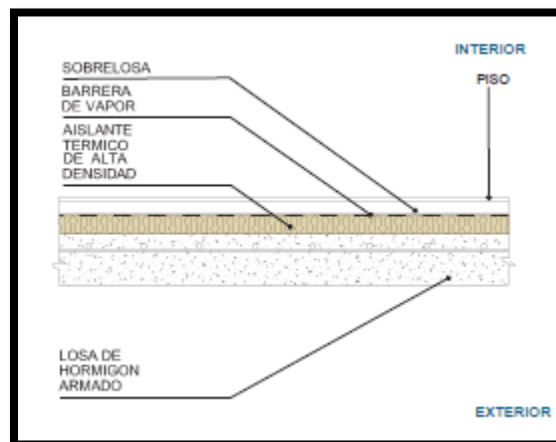


Figura 6.23 Piso con losa ventilado. Barrera de vapor y aislante térmico por el interior.

Los pisos ventilados en general están menos expuestos a la humedad exterior, como lluvia y la humedad del suelo, por lo que no es necesario colocar una barrera de humedad por la cara exterior. En aquellos sectores en donde el piso pueda verse expuesto a la humedad, producto que la lluvia rebota debido a su intensidad, será necesario dejar una distancia mayor al suelo o en casos extremos colocar una barrera de humedad.

Nota: en cualquier otra solución constructiva utilizada, como lo son viviendas modulares o aquellas viviendas estructuradas en base a paneles, el constructor debe demostrar que éstas no presentan problemas de humedad por condensación. Para ello se debe determinar la permeabilidad al vapor de agua de estas soluciones o de los materiales que la componen por medio de los ensayos correspondientes.

6.5 INSTALACIÓN DE LA BARRERA DE VAPOR

Recomendaciones:

- Utilizar un aislantes térmicos que tenga incluida la barrera de vapor en una de sus caras.

En este caso sólo se debe tener especial cuidado en colocar la barrera para el lado interior y con las uniones, para ello se recomienda sellar con alguna cinta adhesiva.

- Unir la barrera de vapor al aislante térmico.

Si el aislante térmico lo permite, adherir la barrera de vapor a éste. Con ello la instalación de la barrera se reduce a instalar bien el aislante térmico. Se deben realizar traslapos de 20 cm y la unión se debe sellar con cinta adhesiva.

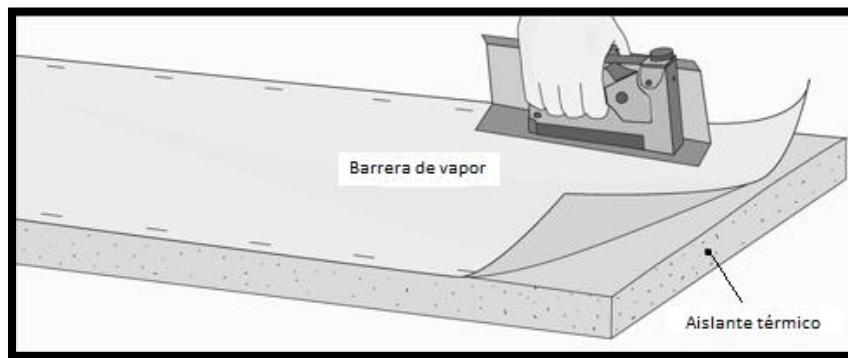


Figura 6.24 Unión de la barrera de vapor al aislante térmico.

- Adosar la barrera de vapor a una superficie o estructura secundaria.

Para ello es necesario limpiar la superficie o la estructura a la que se unirá. La unión puede realizarse con una engrapadora, clavos o pernos con golilla de goma teniendo en cuenta que los traslapos deben ser de 20 cm y se deben sellar con cinta adhesiva recomendada por el fabricante.

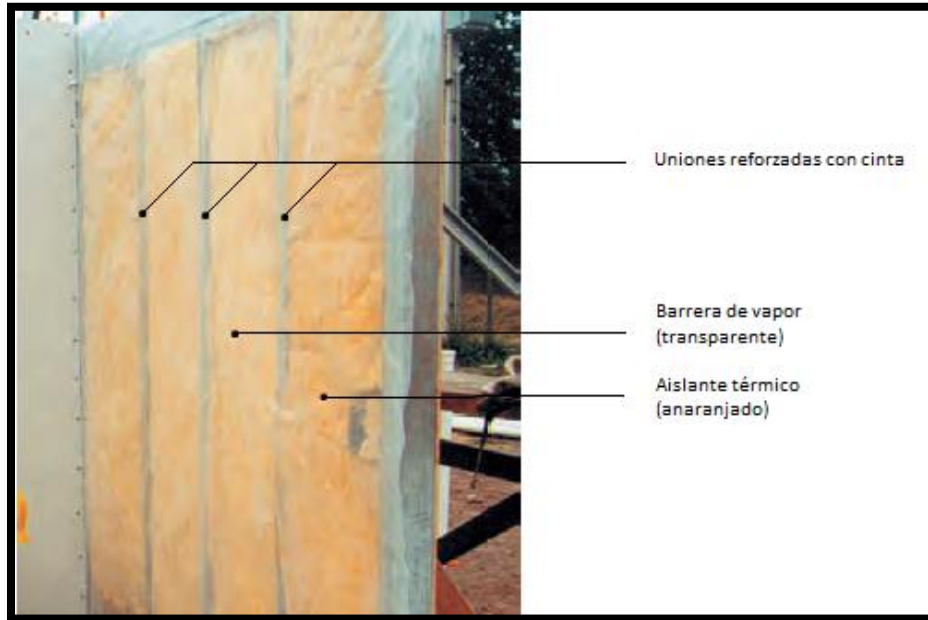


Figura 6.25 Sellado de la barrera de vapor con cinta especial.

Fuente: Aislación térmica y barrera de vapor, Manual Práctico de Construcción LP.

6.6 INSTALACIÓN DE BARRERA DE HUMEDAD

6.6.1 Muros

La barrera de humedad tipo membranas se debe instalar con un traslazo de 10 cm como mínimo, además el pliego superior debe estar sobre el pliego inferior en su junta horizontal para evitar que entre agua.

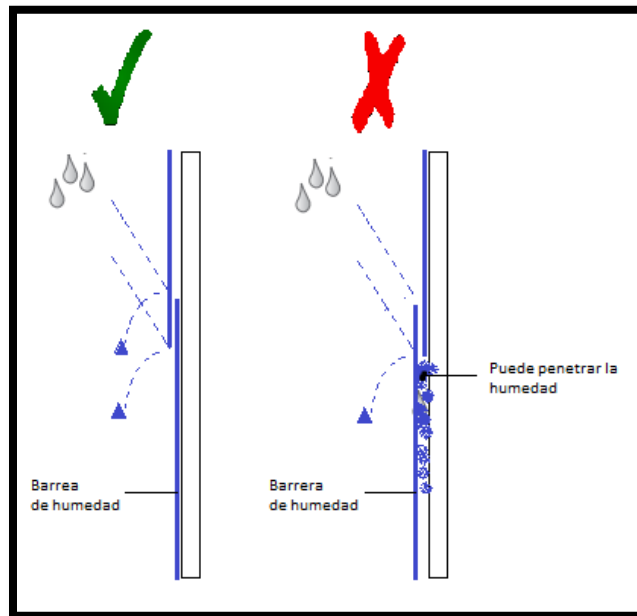


Figura 6.26 Traslazo de la barrera de humedad.

Para fijar la barrera de humedad es recomendable utilizar clavos galvanizados con golilla espaciadas no más 30 cm. Al igual que la barrera de vapor, se recomienda sellar las uniones y traslazos con alguna cinta adhesiva.

Es importante mencionar que la barrera de humedad se debe instalar antes de colocar puertas y ventanas, para ello se debe seguir los siguientes pasos:

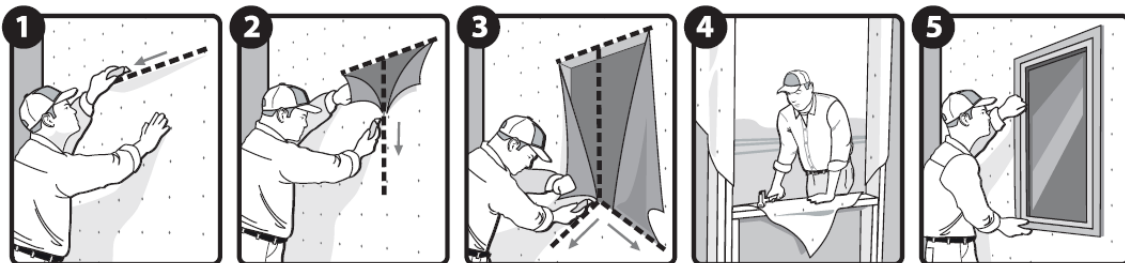


Figura 6.27 Procedimiento de instalación de ventanas y puertas después de aplicada barrera de humedad.

1. Realizar un corte recto horizontal en la parte superior de la abertura de la ventana o puerta.
2. Empezar cortando verticalmente desde el punto central superior haga llegar a 2/3 de la altura de la ventana o puerta (ilustraciones 2 y 3).
3. A partir de este punto, corte en diagonal desde las esquinas inferiores derecha e izquierda, creando una especie de “Y” invertida (ilustración 3). Este corte en “Y” creará tres traslapes de membrana.
4. Tirar cada uno de los traslapes hacia atrás de la abertura de manera firme y fijarlos al marco con clavos, grapas o cinta.
5. Finalmente instalar la ventana y la puerta según las instrucciones del fabricante. El paso final consiste en poner cinta o sellar correctamente todas las costuras y bordes. Los elementos tapajuntas deben también instalarse según las instrucciones recomendadas por el fabricante.

Nota: se puede realizar también un corte en forma de “X” en las aberturas de puertas y ventanas, el procedimiento posterior es el mismo.

Si la barrera de humedad es del tipo pintura, esta se debe aplicar según recomendaciones del fabricante, esto es aplicando las manos necesarias para formar una película plástica que permita el paso del vapor pero no del agua líquida hacia el interior.

Los principales tipos de pintura que funcionan como barrea de humedad son:

- Impermeabilizante incoloro: se aplica después de la pintura.
- Impermeabilizante con color: se aplica antes de la pintura o se puede dejar como color del muro.
- Hidro repelentes: se aplica después de la pintura. Es absorbido completamente por el muro lo que permite que el aspecto natural de la superficie no sea alterado.
- Bloqueadores de humedad: se aplica antes de la pintura. Es una capa densa y pastosa ideal para superficies porosas.

6.6.2 Techos

Al igual que en muros, la barrera de humedad se debe fijar por medio de corchetes o clavos (es preferible utilizar clavos con golillas de goma) a una distancia de no más de 30 cm para posteriormente sellar con cinta adhesiva.

Acá no importa si la barrera se instala vertical u horizontalmente, puede hacerse de ambas maneras, pero se debe tener presente que si se instala horizontalmente, el pliego superior debe ir colocado sobre el inferior al igual que en muros.

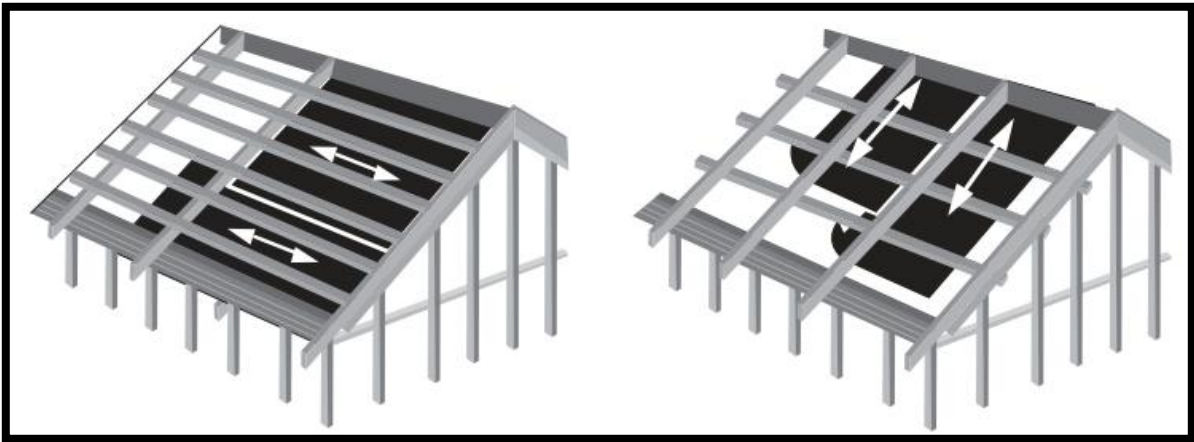


Figura 6.28 Barrera de humedad en techumbres.

El traslapeo recomendado para la barrera de humedad en techos debe ser mínimo de 15 cm.

6.7 APLICACIÓN DE PINTURA ANTI-HONGOS.

Una de las consecuencias de la humedad por condensación es la aparición de hongos. Si estos indeseables microorganismos ya aparecieron se recomienda seguir los siguientes pasos para eliminarlos:

1. Lo primero antes de comenzar un trabajo es tomar los resguardos pertinentes para autocuidarse. Siempre se recomienda utilizar los elementos de protección personales (EPP) básicos, esto es lentes, guantes, mascarilla y todo aquello que sea necesario.
2. Limpiar los hongos:
 - Preparar una solución de media taza de cloro en un litro de agua tibia.
 - Frotar la superficie afectada con un paño o esponja humedecido en la solución hasta que los hongos sean removidos. En caso de ser necesario pasar una escobilla de carpintero.
 - Enjuagar la superficie con agua y dejar secar. En el caso de que los hongos no se puedan eliminar por completo, utilizar alguna solución comercial que por lo general son más fuertes que el cloro.
3. Reparar la superficie:

- Raspar y lijar la superficie para remover los restos de material suelto y pintura que puedan quedar.



- Alisar las superficies afectadas con pasta muro, en especial aquellas zonas que se retiró material.



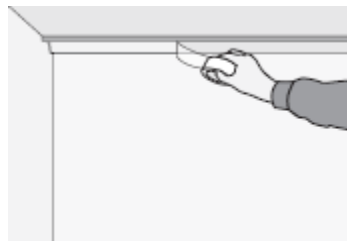
- Transcurridas unas 24 horas volver a lijar aquellas zonas donde se aplicó pasta muro, en lo posible con movimientos circulares y con una lija fina.



- Remover todo el polvo que haya producido el lijado por medio de un paño o una escobilla.

4. Aplicar una pintura anti-hongos:

- Proteger con alguna cinta molduras, marcos o cualquier cosa que no se va a pintar, esto con el fin de hacer más rápido el pintado.



- Aplicar las manos de pintura que indique el fabricante, dejando secar entre una y otra.



Es importante recordar que si no se elimina la fuente de humedad los hongos tarde o temprano volverán a proliferar aunque hayamos aplicado una pintura fungicida.

7 CONCLUSIONES.

7.1 CONCLUSIONES GENERALES.

Una construcción cualquiera está expuesta a cinco tipos de humedades, éstas son humedad de lluvia, humedad accidental, humedad del suelo, humedad de construcción y humedad por condensación, sin embargo en el caso de viviendas la humedad por condensación son las que aparecen con mayor frecuencia y por ende las que mayor cantidad de daños generan. Gran parte del país, salvo algunos sectores de la zona norte, están expuestos a que se generen problemas de humedad por condensación.

La humedad por condensación, tanto superficial como intersticial, se genera bajo la combinación de tres factores:

- Baja temperatura exterior.

En invierno es cuando la temperatura más desciende y es la razón del porque en esta época del año aparece este fenómeno con mayor frecuencia.

- Baja resistencia térmica de los elementos de la envolvente.

Generalmente se puede apreciar condensación en ventanas y elementos metálicos, la razón es que presentan una alta transmitancia térmica (o equivalentemente una baja resistencia térmica), lo mismo ocurre en puentes térmicos.

- Alta humedad relativa interior.

El no ventilar, sobre todo en lugares que generan mucho vapor de agua como lo son el baño y la cocina, el exceso de personas y el realizar actividad física dentro del inmueble, el uso de calefacción húmeda de llama abierta, el lavado, secado y planchado de ropa al interior de la vivienda, el exceso de plantas entre otros, son los principales generadores de vapor de agua dentro de una vivienda y son los responsables de que la humedad relativa interior aumente.

La temperatura exterior es propia de cada clima, por lo tanto es un factor que no se puede controlar, sin embargo al mejorar la resistencia térmica de la envolvente y disminuir la humedad relativa interior si contribuye en gran forma a erradicar la humedad por condensación. La resistencia térmica se puede mejorar agregando suficiente aislación térmica en los elementos de la envolvente (muros, techos o pisos ventilados) y en puentes térmicos, mientras que la humedad relativa del aire al interior de la casa o departamento se puede controlar ventilando apropiadamente o disminuyendo las fuentes de vapor nombradas en el párrafo anterior.

Con este trabajo se puede concluir también, que la humedad por condensación produce variados efectos perniciosos en las viviendas cuando aparece en cantidades indeseables. La humedad produce daños superficiales y estructurales, como aparición de manchas, mohos y hongos, descascaramiento, desprendimientos y decoloraciones en materiales de terminación, como lo son pinturas, estucos y revestimientos en general, además de oxidar y corroer las armaduras y elementos metálicos o causar pudrición en elementos estructurales de madera como vigas o pilares, por tanto el prevenir la condensación

aumentará la vida útil del inmueble. Sin embargo, el principal daño que provoca la humedad por condensación, es que disminuye sustancialmente las propiedades de aislación térmica de los materiales y en particular de los aislantes térmicos, es por lo mismo la importancia de tener bien protegidos contra la humedad todos los elementos de la envolvente y sobre todo proteger al aislante térmico por medio de barreras de vapor y humedad, según corresponda. En conclusión, la humedad al aumentar la conductividad térmica de los materiales, provoca también un aumento en el uso de energía, esto último toma relevancia en el contexto actual de eficiencia energética que vive el mundo.

La humedad, debido a que entrega las condiciones propicias para que aparezcan mohos y estos últimos liberan esporas al aire, provoca daños en la salud de las personas que se exponen a ésta, sobre todo en aquellas personas que presentan un sistema inmunológico débil (bebés, embarazadas, ancianos, etc.) y en aquellas que presentan enfermedades respiratorias crónicas. Es común que la humedad produzca enfermedades broncopulmonares que desencadenan en enfermedades más críticas y por lo mismo es importante erradicar el problema de la humedad por condensación.

Es importante mencionar que la ventilación por sí sola no es siempre una solución al problema de la condensación, esto se justifica en días de lluvia, ya que al ventilar se cambia aire saturado, producto de las fuentes generadoras de vapor internas de la casa, por aire frío saturado producto de la lluvia, lo que resulta contraproducente. La ventilación es tanto más efectiva mientras más seco es el aire. En este punto sería importante contar con una norma sobre ventilación que considerara en el diseño la implementación y dimensionamiento de sistemas de ventilación.

Finalmente se puede concluir que la normativa vigente sobre el tema de humedad en Chile es deficiente y no considera las condiciones reales de humedad a las que se encuentran sometidos los materiales, es así como las exigencias de la OGUC no se cumplirían debido a que los valores de conductividad térmica estipulados en la norma NCh 853 son en estado seco, lo que generalmente no es así en la realidad.

7.2 CONCLUSIONES CONDENSACIÓN SUPERFICIAL

Este tipo de condensación, se produce cuando la temperatura superficial de un elemento es menor a la temperatura de rocío que define la temperatura interior del aire en conjunto con la humedad relativa interior. Mientras más alto es el punto de rocío, mayor será la probabilidad de que condense humedad en las superficies de la envolvente.

Existen elementos en que no es posible erradicar la condensación superficial tales como ventanas o elementos metálicos, en estos casos se deben tomar medidas tales como escoger marcos de materiales que no se alteren en presencia de humedad (marcos de PVC o aluminio por ejemplo) o dotarlos con un sistema que evacue el agua condensada.

En aquellos lugares que se genera gran cantidad de vapor de agua en forma ocasional, como el baño y la cocina, es recomendable revestir por el interior (cara caliente) con algún material que sea estanco para que el agua escurra y posteriormente, cuando la humedad relativa baje, se evapore.

Es importante también excluir los puentes térmicos y todas aquellas zonas precariamente aisladas térmicamente para que no se genere condensación superficial, además de disminuir la humedad relativa del aire controlando las fuentes de producción de vapor y ventilando cuando se pueda.

Como conclusión principal, se puede decir que para eliminar el riesgo de condensación superficial se debe aumentar la aislación térmica para que las superficies interiores de la vivienda estén siempre por sobre la temperatura de rocío, esta es la solución más efectiva para erradicar este indeseado fenómeno.

7.3 CONCLUSIONES CONDENSACIÓN INTERSTICIAL

Este tipo de humedad es muy perjudicial debido a que aparece en los intersticios de los elementos de la envolvente y por ende sus efectos no se pueden ver directamente. La condensación intersticial es la responsable de disminuir la conductividad térmica y la principal forma de combatirla es por medio de barreras de vapor y humedad.

La principal conclusión es que es importante saber el tipo de aislación térmica que se utilizará (interior o exterior) para saber qué tipo de barreras incorporar a la solución constructiva de la envolvente y así erradicar el problema de la condensación intersticial. Si se utiliza aislación térmica por el interior de la vivienda, es de suma importancia colocar una barrera de vapor antes de la aislación (cara caliente de la vivienda) para no permitir el paso del vapor de agua desde el interior de la vivienda hacia el exterior y así eliminar el riesgo de que se produzca condensación. Si se utiliza una aislación térmica exterior es vital colocar una barrera de humedad por el exterior de la solución de muro para que no penetre humedad desde el exterior, sin embargo se debe tener presente que la barrera de humedad que se utilice debe ser permeable al paso del vapor de agua para que el muro pueda respirar en caso de que quede humedad atrapada al interior del mismo.

7.4 PROYECTOS FUTUROS

Como ya se ha mencionado en reiteradas ocasiones, uno de los principales efectos perniciosos que produce la humedad en la vivienda, y en particular en los materiales, es el aumento de la conductividad térmica. En esta materia no hay mucha investigación y sería bueno contar con mayor información sobre el tema, realizando experiencias como la hecha por Rodrigo Erazo y Gabriel Rodríguez (referencia bibliográfica 11) para así conocer el comportamiento de los materiales de construcción nacionales frente a condiciones de humedad.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AIPEX, Soluciones de aislamiento térmico con poliestireno extruido (XPS) para una edificación sostenible, Barcelona.
2. Burgos, Daniela. Análisis y propuestas de soluciones técnicas de aislación térmica exterior en el mercado chileno, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile. Santiago, agosto 2008.
3. Bienestar Habitacional, Guía de Diseño para un Hábitat Residencial Sustentable. 1ª edición, agosto 2004.
4. Cadiergues, Roger. Aislamiento y protección de las construcciones, Barcelona. Editorial Gustavo Gili, 1959.
5. Coscollano Rodríguez, José. Tratamiento de las Humedades en los Edificios. 2ª edición España. Editorial Paraninfo Thomson, 2005.
6. Croiset, Maurice. Humedad y temperatura en los edificios, Barcelona. Editores técnicos asociados, 1970.
7. Eichler, Friedrich. Patología de la construcción: detalles constructivos. 2ª edición Barcelona, Editorial Blume, 1973.
8. Erazo, Rodrigo. Variación de la conductividad térmica con la humedad en materiales de construcción, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile. Santiago, octubre 2007.
9. García, Fernando. Estudio teórico experimental de humedad por condensación en edificios, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile. Santiago, 1981.
10. Caro, Catalina. Humedad en viviendas: Riesgo de condensación. Revista Bit 75, noviembre 2010.
11. Instituto de la Construcción, Manual de Aplicación Reglamentación Térmica. Santiago, noviembre 2006.
12. Instituto Nacional de Normalización. Norma chilena oficial NCh 852.EOf71, Acondicionamiento ambiental-Materiales de construcción-Determinación de la permeabilidad al vapor de agua.

13. Instituto Nacional de Normalización. Norma chilena oficial NCh 853.Of91, Acondicionamiento térmico-Envolvente térmica de edificios-Cálculo de resistencias térmicas y transmitancias térmicas.
14. Instituto Nacional de Normalización. Norma chilena oficial NCh 1079.Of2008, Arquitectura y construcción-Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico.
15. Instituto Nacional de Normalización. Norma chilena oficial NCh 1971.Of86, Aislación térmica-Cálculo de temperaturas en elementos de construcción.
16. Instituto Nacional de Normalización. Norma chilena NCh 1973.Of87, Acondicionamiento térmico-Aislación térmica-Cálculo del aislamiento térmico para disminuir o eliminar el riesgo de condensación superficial.
17. Instituto Nacional de Normalización. Norma chilena oficial NCh 1973.Of2008, Características higrotérmicas de los elementos y componentes de edificación-Temperatura superficial interior para evitar la humedad superficial crítica y la condensación intersticial-Métodos de cálculo.
18. Instituto Nacional de Normalización. Norma chilena oficial NCh 1980.Of87, Acondicionamiento térmico-Aislación térmica-Determinación de la ocurrencia de condensaciones intersticiales.
19. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. Artículo 4.1.10. Chile, abril 2011.
20. Neila, F. Javier & Bedoya, César. Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental. Editorial Munilla-Lería, Madrid, España, diciembre 1997.
21. Neufert, Ernst. Manual del Styropor. Adaptación de la 2º edición alemana. Ed. Herder S.A.. Barcelona.
22. Ulsamer Puiggarí, Federico. Las humedades en la construcción. 12º edición Barcelona. Ediciones ceac, 1969.
23. Rodríguez Jaque, Gabriel. Aislamiento térmico: Humedad en elementos envolventes. Revista Bit 57, noviembre 2007.
24. Rodríguez Jaque, Gabriel & Erazo, Rodrigo. Aislamiento térmico: Humedad en elementos envolventes II. Revista Bit 58, enero 2008.

25. Rodríguez Jaque, Gabriel. Aislamiento térmico: Humedad en materiales. Revista Bit 60, mayo 2008.
26. Rodríguez Jaque, Gabriel. Contaminación atmosférica intradomiciliaria: Viviendo con el enemigo. Revista Bit 67, julio 2009.
27. Rodríguez Jaque, Gabriel. El clima y la construcción habitacional. Revista Bit 63, noviembre 2008.
28. Rodríguez Jaque, Gabriel. Zonificación climático-habitacional para Chile. Revista del IDIEM. Vol. N°3, diciembre 1973.
29. Rougeron, C. Aislamiento acústico y térmico en la construcción. Editorial Técnicos Asociados S.A. Barcelona, 1977.

9 GLOSARIO

A

Ataguía: elementos utilizados para dar cauce a flujos de agua.

Ánodo: extremo negativo de un electrodo o material polarizado.

A.I.P.E.X.: Asociación Interamericana de Poliestireno Expandido.

B

Barrera de vapor: lámina o capa que presenta una resistencia a la difusión del vapor de agua comprendida entre 10 y 230 MN s/g.

Barrera de humedad: material que tiene por finalidad cortar el paso del agua hacia el interior de la vivienda.

C

Capilares: conductos microscópicos por donde un líquido puede subir

Condensación: paso del estado gaseoso de un elemento al estado líquido.

Capilaridad: propiedad de los líquidos que permite la capacidad de subir.

Capa freática: primera capa de agua subterránea.

Confort térmico: condición en donde las personas se sienten en equilibrio térmico con su entorno.

Chimenea solar: sistema de ventilación que utiliza la convección del aire calentado por energía solar pasiva.

Cortavapor: lámina o capa que presenta una resistencia a la difusión del vapor de agua mayor que 230 MN s/g.

Cátodo: extremo positivo de un electrodo o material polarizado.

D

Dren: zanja o tubo filtrante rellena de grava para recibir aguas.

Dirección del viento: dirección desde donde viene el viento.

E

Envolvente térmica: conjunto de elementos constructivos que separan el ambiente interior del ambiente exterior de una vivienda o edificio.

Eflorescencia: manchas superficiales, generalmente blanquecinas, producidas por la cristalización de sales solubles.

Electrolito: sustancia que contiene iones libres y que actúa como medio conductor de la electricidad.

Estuco: mortero que se aplica a una superficie base para mejorar la terminación. Puede estar compuesto de capa de adherencia y capa de terminación.

F

Fungicida: producto químico que mata los hongos.

Fusión: paso del estado sólido de un elemento al estado líquido.

G

Grados-días: suma de las diferencias entre la temperatura base de confort interior y la temperatura promedio diaria del exterior, siempre y cuando esta diferencia sea positiva, durante un periodo de tiempo dado.

Galvanizado: capa recubrimiento de zinc que tiene como fin evitar la oxidación.

H

Hidrófugo: producto o elemento que evita el paso de la humedad o filtraciones.

Higrómetro: instrumento que permite determinar la humedad atmosférica.

Humedad absoluta: es la cantidad de vapor de agua de un cierto ambiente, se expresa en gramos por metro cúbico de aire seco.

Humedad relativa: es la cantidad de vapor de agua de un cierto ambiente, se expresa en porcentaje de la humedad de saturación.

I

Intersticio: espacio que media entre dos elementos o entre dos partes del mismo elemento de la envolvente.

M

Meteorización: erosión, descomposición o fragmentación de los materiales producto del aumento del volumen del agua al congelarse.

O

O.G.U.C.: Ordenanza General de Urbanismo y Construcción.

Obra gruesa: parte de una edificación que abarca desde los cimientos hasta la techumbre, incluida la totalidad de su estructura y muros divisorios, sin incluir las instalaciones, las terminaciones y cierres de vanos.

P

Psicrómetro: instrumento que se utiliza para medir la humedad atmosférica y que consta de dos termómetros, uno de los cuales tiene la bola en contacto con agua.

Punto de rocío: temperatura a la cual el vapor de agua condensa.

Punto triple: punto a una temperatura y presión dada en el cual coexiste en equilibrio el estado sólido, líquido y gaseoso de un elemento.

Proceso endotérmico: reacción o proceso químico que absorbe cierta cantidad de energía para llevarse a cabo.

Proceso exotérmico: reacción o proceso químico libera cierta cantidad de energía para llevarse a cabo.

R

Revoque: capa de cal, cemento y arena u otros materiales similares con que se cubre un paramento.

S

Sublimación: paso del estado sólido de un elemento al estado gaseoso.

Sublimación inversa: paso del estado gaseoso de un elemento al estado sólido.

Solidificación: paso del estado líquido de un elemento al estado sólido.

T

Tabique: elemento vertical de separación no estructural.

V

Vaporización: paso del estado líquido de un elemento al estado gaseoso, esta puede ser por medio de evaporación o ebullición.

Z

Zonas térmicas: división del país hecha por la reglamentación térmica en la que se clasifican zonas según la cantidad de grados-días anuales.

Zonas climáticas: división del país hecha por la norma NCh1079 en la que se clasifican zonas considerando factores tales como temperatura, humedad, radiación solar, velocidad del viento, altitud, precipitaciones, entre otras.

ANEXOS

ANEXO A: CÁLCULO DE LA CONDENSACIÓN INTERSTICIAL

El método que se verá a continuación permite determinar la cantidad anual máxima de humedad acumulada debido al fenómeno de la condensación intersticial, para ello el método supone que la humedad de construcción ha desaparecido por completo.

Para realizar el cálculo se debe dividir el elemento en capas, cada una de ellas homogénea, y definir las características de cada material, estas son:

- Conductividad térmica (λ).
- Resistencia térmica (R).
- Factor de resistencia a la difusión de vapor de agua (μ).
- Espesor de aire equivalente (s_d).

El espesor de aire equivalente frente a la difusión de vapor de agua se define como el espesor de una capa de aire inmóvil, que presenta la misma resistencia térmica al vapor de agua que el espesor del material considerado.

$$s_d = \mu \cdot e \quad (\text{A.1})$$

Si al calcular la resistencia térmica de las capas resulta alguna con $R > 0,25 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$, como en aislantes térmicos por ejemplo, ésta se debe subdividir en un número de capas en que todas posean la misma resistencia térmica y cada una de ellas no supere el valor antes mencionado, en el cálculo estas capas subdivididas se consideran como diferentes.

En aquellos materiales que presenten un factor de resistencia a la difusión de vapor infinito, deberá considerarse un valor de $\mu = 100.000$ para efectos de cálculo.

Lo primero es determinar las resistencias térmicas de cada capa y la resistencia térmica acumulada partiendo desde el exterior, lo mismo se debe hacer con el espesor de aire equivalente a la difusión de vapor de agua.

$$R'_n = R_{se} + \sum_{j=1}^n R_j \quad (\text{A.2})$$

$$s'_{d,n} = \sum_{j=1}^n s_{d,j} \quad (\text{A.3})$$

Calcular la temperatura en cada interfase entre capas por medio de la ecuación 4.23 y luego calcular la presión de saturación con cada una de estas temperaturas, con esto se toma un mes de prueba (para comenzar el cálculo) y se grafica las curvas de presión y presión de saturación a través del elemento, considerando como espesor de cada capa, el espesor de aire equivalente.

Al graficar la presión de saturación de cada punto, sólo se deben unir por medio de líneas rectas las presiones de saturación obtenidas para cada temperatura. La presión exterior con la presión interior se unen por medio de una recta si es que no existe condensación acumulada, para el mes de prueba se asume que no existe condensación acumulada.

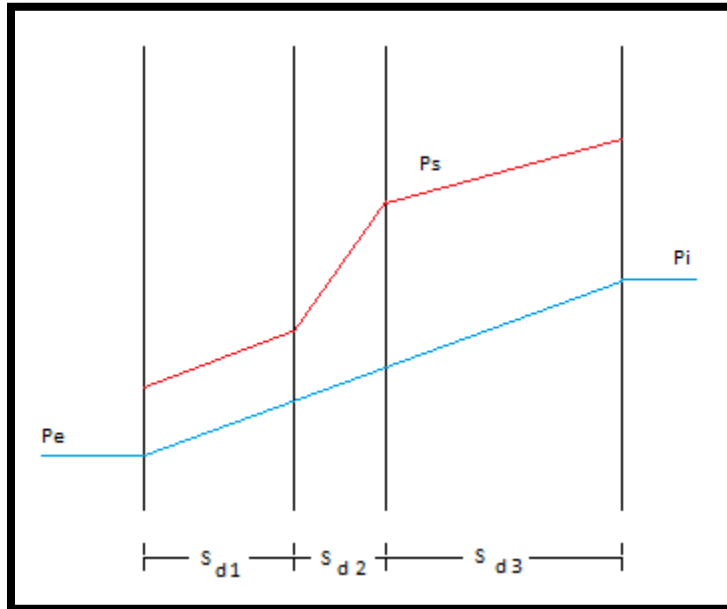


Figura A.1 Difusión de vapor de agua en un elemento multi-capa sin condensación intersticial.

El flujo de vapor a través del elemento se calcula como:

$$g = \delta_0 \frac{p_i - p_e}{s'_{d,T}} \quad (\text{A.4})$$

Donde:

δ_0 : Permeabilidad al vapor de agua del aire en relación a la presión parcial de vapor

$$\delta_0 = 2 \cdot 10^{-10} \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$$

$s'_{d,T}$: Suma total de espesores equivalentes de aire.

Para que se produzca condensación la línea de presión parcial de vapor debe superar a la de presión de saturación, si esto no ocurre en el mes de prueba, se debe repetir el cálculo hasta encontrar un mes con condensación intersticial, en dicho caso éste será el mes de partida para el cálculo, si no existe condensación en ningún mes entonces el elemento no sufre problemas de condensación.

En el caso de que en el mes de prueba exista condensación, se debe repetir el mismo cálculo para todos los meses hasta encontrar un mes en donde no exista condensación intersticial, en dicho caso el mes de partida será el siguiente a éste mes y si en todos los meses existe condensación, se puede partir desde cualquier mes con el cálculo.

Si en alguna de las interfases la presión de vapor supera a la presión crítica, se debe redibujar la curva de presión de vapor por medio de líneas tangentes en los puntos de

condensación, esto se debe hacer sin superar la presión de saturación (figura 4-j). Estos puntos tangentes representan las superficies de condensación.

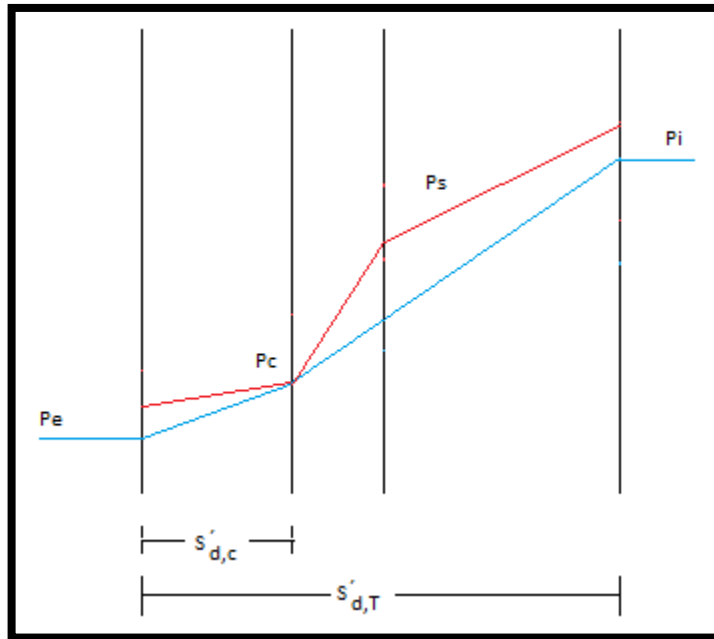


Figura A.2 Difusión de vapor de agua en con condensación intersticial en un plano interfase.

La **tasa de condensación** es la cantidad de vapor transportado hacia la interfase de condensación menos la cantidad de vapor transportada desde la interfase de condensación.

$$g_c = \delta_0 \left(\frac{p_i - p_c}{s'_{d,T} - s'_{d,c}} - \frac{p_c - p_e}{s'_{d,c}} \right) \quad (A.5)$$

En el caso de tener condensación en más interfases, se debe llevar el registro de cada uno de esos planos, calculando la tasa de condensación para cada uno de ellos, en la siguiente figura se muestra el caso de dos planos de interfase con condensación.

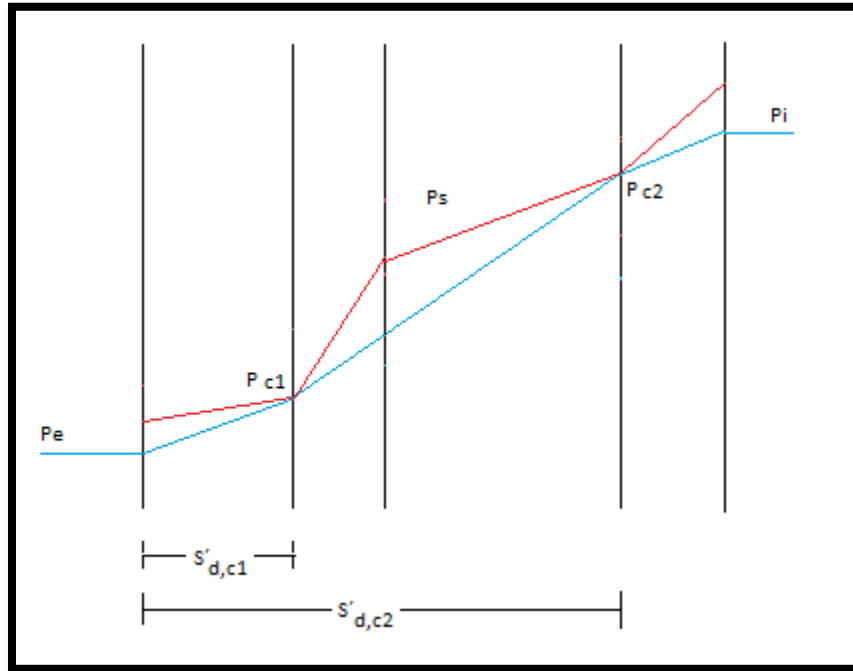


Figura A.3 Difusión de vapor de agua con condensación intersticial en dos planos interfase.

$$g_{c1} = \delta_0 \left(\frac{p_{c2} - p_{c1}}{s'_{d,c2} - s'_{d,c1}} - \frac{p_{c1} - p_e}{s'_{d,c1}} \right) \quad (A.6)$$

$$g_{c2} = \delta_0 \left(\frac{p_i - p_{c2}}{s'_{d,T} - s'_{d,c2}} - \frac{p_{c2} - p_{c1}}{s'_{d,c2} - s'_{d,c1}} \right) \quad (A.7)$$

La norma NCh1973 además considera la tasa de evaporación para obtener la cantidad de humedad residual dentro de un elemento constructivo, esto es la humedad acumulada por condensación en meses fríos menos la humedad que se evaporó en los meses cálidos.

Las tasas de condensación y evaporación se definen de la misma manera, sólo que por convención la evaporación se considera como condensación negativa.

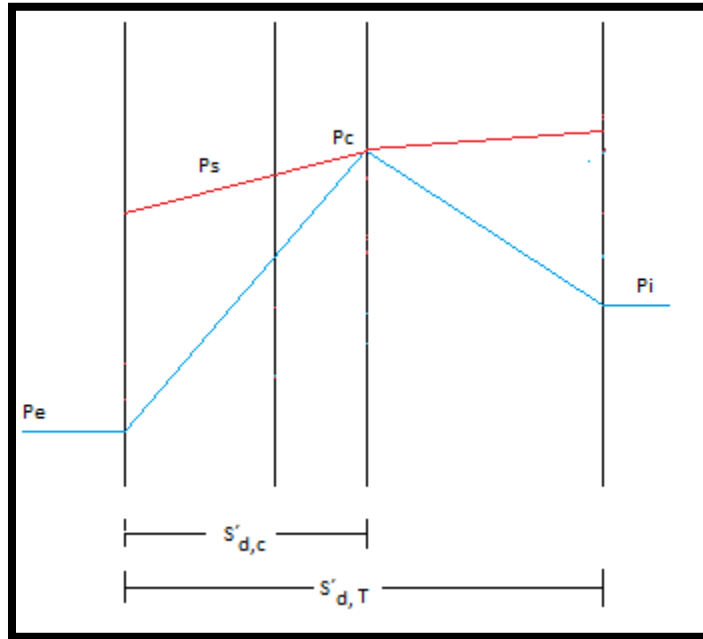


Figura A.4 Evaporación desde una interfase del elemento.

$$g_{ev} = \delta_0 \left(\frac{p_i - p_c}{s'_{d,T} - s'_{d,c}} - \frac{p_c - p_e}{s'_{d,c}} \right) \quad (A.8)$$

En el caso de tener evaporación en más de una interfase, la tasa de evaporación será la misma que la de condensación. Si se tiene condensación y evaporación al mismo tiempo se deben calcular las tasas de condensación y evaporación correspondientes para cada interfase.

Para evaluar los elementos de construcción frente a la humedad por condensación intersticial se deben registrar los resultados de todos los meses del año, con ello se determinará alguno de los tres casos siguientes:

- No existirá condensación intersticial en ninguna interfase durante ningún mes del año.
- Se produce condensación intersticial durante los meses fríos pero se evapora por completo en los meses de calor: en este caso se debe indicar la cantidad máxima de condensación acumulada y el mes en que ocurre esto,
- Se produce condensación intersticial pero no logra evaporarse por completo en verano: se debe indicar que el elemento falla en la evaluación, indicar además la cantidad máxima de humedad en cada interfase donde ocurra condensación y la humedad residual al cabo de 12 meses.

ANEXO B: EJEMPLOS DE CÁLCULO

Ejemplo 1:

- a. Determinar si existe riesgo de condensación superficial en un muro de hormigón armado (normal) de 15 cm de espesor, si la temperatura exterior es de 1°C y la interior de 21°C con una humedad relativa interior del 60%.

Lo primero es determinar la transmitancia térmica del muro de hormigón. De la tabla 3-a se tiene el coeficiente de conductividad térmica del hormigón:

$$\lambda = 1,63 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$$

$$R_{Hormigón} = \frac{0,15m}{1,63 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} = 0,09 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$$

$$R_T = R_{Si} + R_{Hormigón} + R_{Se} = 0,13 + 0,09 + 0,04 = 0,26 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$$

$$U = \frac{1}{R_T} = 3,82 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$\theta_{Si} = 21 - 3,82 \cdot 0,13(21 - 1) = 11,1^\circ C$$

Del ábaco psicrométrico (ver gráfico 2-a) obtenemos el punto de rocío. Para 21°C y humedad relativa del 60% se tiene que el punto de rocío se produce a los 12,5°C aproximadamente.

Como $\theta_{Si} = 11,1^\circ C < \theta_{Rocío} = 12,5^\circ C$, existirá riesgo de condensación sobre el muro de hormigón.

- b. Determinar el espesor de aislante, lana mineral de 20 kg/m³, para eliminar el riesgo de condensación intersticial.

La temperatura de rocío es de 12,5°C, por lo tanto se debe cumplir que:

$$\theta_{Si} > 12,5^\circ C$$

Pero tenemos que la temperatura superficial interior está dada por:

$$\theta_{Si} = \theta_i - U \cdot R_{Si}(\theta_i - \theta_e)$$

Con lo anterior se tiene que:

$$21 - U \cdot 0,13(21 - 1) > 12,5$$

$$21 - U \cdot 0,13(21 - 1) > 12,5$$

$$8,5 > 2,6 \cdot U$$

$$U < 3,27 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Ahora se obtiene una expresión para la resistencia térmica total:

$$\begin{aligned} R_T &= R_{Si} + R_{Hormigón} + R_{Lana} + R_{Se} = 0,13 + 0,09 + \frac{e_{Lana}}{0,069} + 0,04 \\ &= 0,26 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} + \frac{e_{Lana}}{0,069 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} \end{aligned}$$

Además se tiene que:

$$U = \frac{1}{R_T}$$

Por lo tanto:

$$\frac{1}{0,26 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} + \frac{e_{Lana}}{0,069 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}}} < 3,27 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$\frac{1}{3,27 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}} < 0,26 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} + \frac{e_{Lana}}{0,069 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}}$$

$$0,306 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} < 0,26 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} + \frac{e_{Lana}}{0,069 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}}$$

$$0,046 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} < \frac{e_{Lana}}{0,069 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}}$$

$$0,046 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} \cdot 0,069 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} < e_{Lana}$$

$$e > 0,00317m = 0,317cm$$

Por lo tanto el muro necesita menos de 1cm de lana mineral para eliminar el riesgo de condensación superficial.

Nota: este ejemplo es a modo ilustrativo y tiene por objetivo mostrar el método de cálculo para determinar espesores de aislantes necesarios para erradicar el problema de la condensación superficial y no considera compatibilidad entre materiales ni tampoco la utilización de otros materiales necesarios para cubrir al aislante.

Ejemplo 2:

Considerar las siguientes condiciones para la envolvente de una vivienda de baja ocupación y determinar el factor de temperatura exigido:

Tabla A.1. Temperatura interior, exterior y humedad exterior, ejemplo 2.

Mes	θ_i [°C]	θ_e [°C]	φ_e
Enero	20	13,1	0,59
Febrero	20	12,1	0,53
Marzo	20	11,5	0,63
Abril	20	8,7	0,55
Mayo	20	6,7	0,52
Junio	20	7,5	0,66
Julio	20	4,1	0,64
Agosto	20	5,2	0,62
Septiembre	20	6,5	0,67
Octubre	20	8,7	0,6
Noviembre	20	10,6	0,6
Diciembre	20	10,3	0,53

Nota: estos datos corresponden a la ciudad de Santiago y fueron tomados por la Estación de Investigaciones Ecológicas y Mediterráneas (EDIEM) de la Pontificia Universidad Católica de Chile en el año 2003.

A modo explicativo sólo se mostrarán los cálculos para el mes de julio.

Como las condiciones ambientales de humedad y temperatura están definidas, lo primero será determinar la presión de saturación exterior. La temperatura exterior en el mes de julio es mayor a 0°C, por lo tanto se utiliza la fórmula 4.11:

$$p_{sat,julio}(\theta = 4,1^{\circ}C) = 610,5 \cdot \exp^{\frac{17,269 \cdot 4,1}{237,3 + 4,1}} = 818,6 Pa$$

La presión de vapor exterior se obtiene de la ecuación 4.7:

$$p_{e,julio} = \varphi_{julio} \cdot p_{sat,julio} = 0,64 \cdot 818,6 = 523,9 Pa$$

Ahora corresponde determinar la diferencia de presión de vapor, obtenida por medio del gráfico 4-a, para luego sumarla a la presión exterior y obtener la presión interior:

$$\Delta p_{julio} = 708,3 Pa$$

$$p_{i,julio} = p_{e,julio} + \Delta p_{julio} = 523,9 + 708,3 = 1232,2 Pa$$

La humedad relativa máxima aceptable es del 100% por tanto la presión interior de saturación será igual a la presión interior de vapor, con esto se puede calcular la temperatura superficial interior mínima aceptable.

$$\theta_{si,min} = \frac{237,3 \cdot \ln\left(\frac{1232,2}{610,5}\right)}{17,269 - \ln\left(\frac{1232,2}{610,5}\right)} = 10,1^{\circ}\text{C}$$

Con todo esto se puede calcular el factor de temperatura para el mes de enero:

$$f_{Rsi,julio} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} = \frac{10,1 - 4,1}{20 - 4,1} = 0,375$$

Así se repite el cálculo para todos los meses, obteniendo la siguiente tabla.

Tabla A.2. Resumen de cálculos, ejemplo 2.

Mes	θ_i [°C]	θ_e [°C]	φ_e	P_{sat_e} [Pa]	P_e [Pa]	Δp [Pa]	p_i [Pa]	$p_{SATi}(\theta_i)$ [Pa]	$\theta_{si,min}$ [°C]	f_{Rsi}
Enero	20	13,1	0,59	1506,8	889,0	307,4	1196,4	1196,4	9,6	N/A
Febrero	20	12,1	0,53	1411,1	747,9	351,9	1099,8	1099,8	8,4	N/A
Marzo	20	11,5	0,63	1356,3	854,4	378,7	1233,1	1233,1	10,1	N/A
Abril	20	8,7	0,55	1124,4	618,4	503,4	1121,8	1121,8	8,7	N/A
Mayo	20	6,7	0,52	980,9	510,1	592,5	1102,6	1102,6	8,4	0,129
Junio	20	7,5	0,66	1036,2	683,9	556,9	1240,8	1240,8	10,2	0,213
Julio	20	4,1	0,64	818,6	523,9	708,3	1232,2	1232,2	10,1	0,375
Agosto	20	5,2	0,62	884,1	548,1	659,3	1207,5	1207,5	9,8	0,308
Septiembre	20	6,5	0,67	967,5	648,2	601,4	1249,6	1249,6	10,3	0,279
Octubre	20	8,7	0,6	1124,4	674,6	503,4	1178,1	1178,1	9,4	0,061
Noviembre	20	10,6	0,6	1277,5	766,5	418,8	1185,3	1185,3	9,5	N/A
Diciembre	20	10,3	0,53	1252,2	663,7	432,1	1095,8	1095,8	8,3	N/A

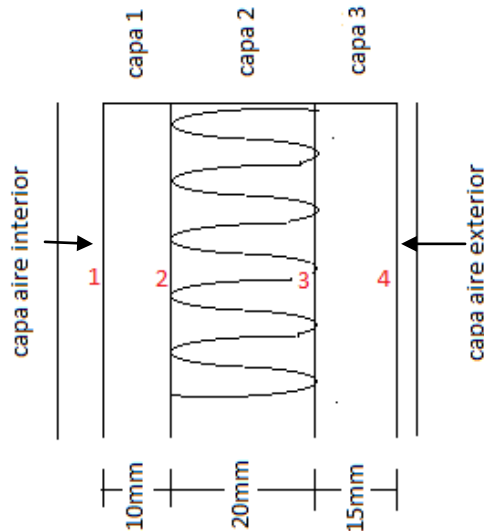
El factor de resistencia superficial de temperatura exigido es el mayor de todo el año.

$$f_{Rsi,max} = 0,375$$

En el ejemplo corresponde al mes de julio, mes más frío del año, por lo tanto para el diseño se debe exigir un factor mayor o igual a éste.

Ejemplo 3:

Determinar las temperaturas superficiales en los puntos 1, 2, 3 y 4 del muro que se muestra a continuación, formado por tres capas con las características descritas abajo. La temperatura dentro del recinto es de $\theta_i = 19^\circ\text{C}$ y en el exterior es de $\theta_e = 3^\circ\text{C}$.



$$\lambda_{capa1} = 0,3 \frac{W}{m^\circ C}$$

$$\lambda_{capa2} = 0,04 \frac{W}{m^\circ C}$$

$$\lambda_{capa3} = 0,2 \frac{W}{m^\circ C}$$

Figura A.5 Ejemplo de cálculo de riesgo de condensación intersticial.

Ya que la temperatura es mayor al interior de la vivienda se comenzará por allí calculando las resistencias térmicas se tiene:

$$R_{capa1} = \frac{0,01m}{0,3 \frac{W}{m^\circ C}} = 0,033 \frac{m^2 \cdot C}{W}$$

$$R_{capa2} = \frac{0,02m}{0,04 \frac{W}{m^\circ C}} = 0,5 \frac{m^2 \cdot C}{W}$$

$$R_{capa3} = \frac{0,015m}{0,2 \frac{W}{m^\circ C}} = 0,075 \frac{m^2 \cdot C}{W}$$

$$R_T = R_{si} + \sum R + R_{se} = 0,13 + 0,033 + 0,5 + 0,075 + 0,04 = 0,778 \frac{m^2 \cdot C}{W}$$

Aplicando ahora la fórmula del método analítico:

Punto 1

$$\Delta\theta_1 = (\theta_i - \theta_e) \frac{R_{si}}{R_T} = (19 - 3) \frac{0,12}{0,778} = 2,67^\circ C$$

$$\theta_1 = 19 - 2,67 = 16,33^\circ C$$

Punto 2

$$\Delta\theta_2 = (\theta_i - \theta_e) \frac{R_{capa1}}{R_T} = (19 - 3) \frac{0,033}{0,778} = 0,69^\circ C$$

$$\theta_2 = 16,33 - 0,69 = 15,65^\circ C$$

Punto 3

$$\Delta\theta_3 = (\theta_i - \theta_e) \frac{R_{capa2}}{R_T} = (19 - 3) \frac{0,5}{0,778} = 10,28^\circ C$$

$$\theta_3 = 15,65 - 10,28 = 5,36^\circ C$$

Punto 4

$$\Delta\theta_4 = (\theta_i - \theta_e) \frac{R_{capa3}}{R_T} = (19 - 3) \frac{0,075}{0,778} = 1,54^\circ C$$

$$\theta_4 = 5,36 - 1,54 = 3,82^\circ C$$

El método gráfico permite obtener valores bastante aproximados al método analítico, para ello debemos ubicar la resistencia térmica acumulada correspondiente a cada capa del muro tal como se muestra a continuación:

Tabla A.3. Resistencias térmicas para el ejemplo 3.

descripción	$R \left[\frac{m^2 \cdot C}{W} \right]$	R acum $\left[\frac{m^2 \cdot C}{W} \right]$
capa de aire interior	0,130	0,130
capa 1	0,033	0,163
capa 2	0,500	0,663
capa 3	0,075	0,738
capa de aire exterior	0,040	0,778

Lo siguiente es asociar la temperatura interior, en este caso $19^\circ C$, a la resistencia térmica 0 y luego asociar la temperatura exterior, en el ejemplo $3^\circ C$, a la suma de todas las resistencias térmicas R_T , finalmente se traza una recta entre ambos puntos y se obtienen las temperaturas en los puntos de interés, tal como se muestra en el gráfico que sigue.

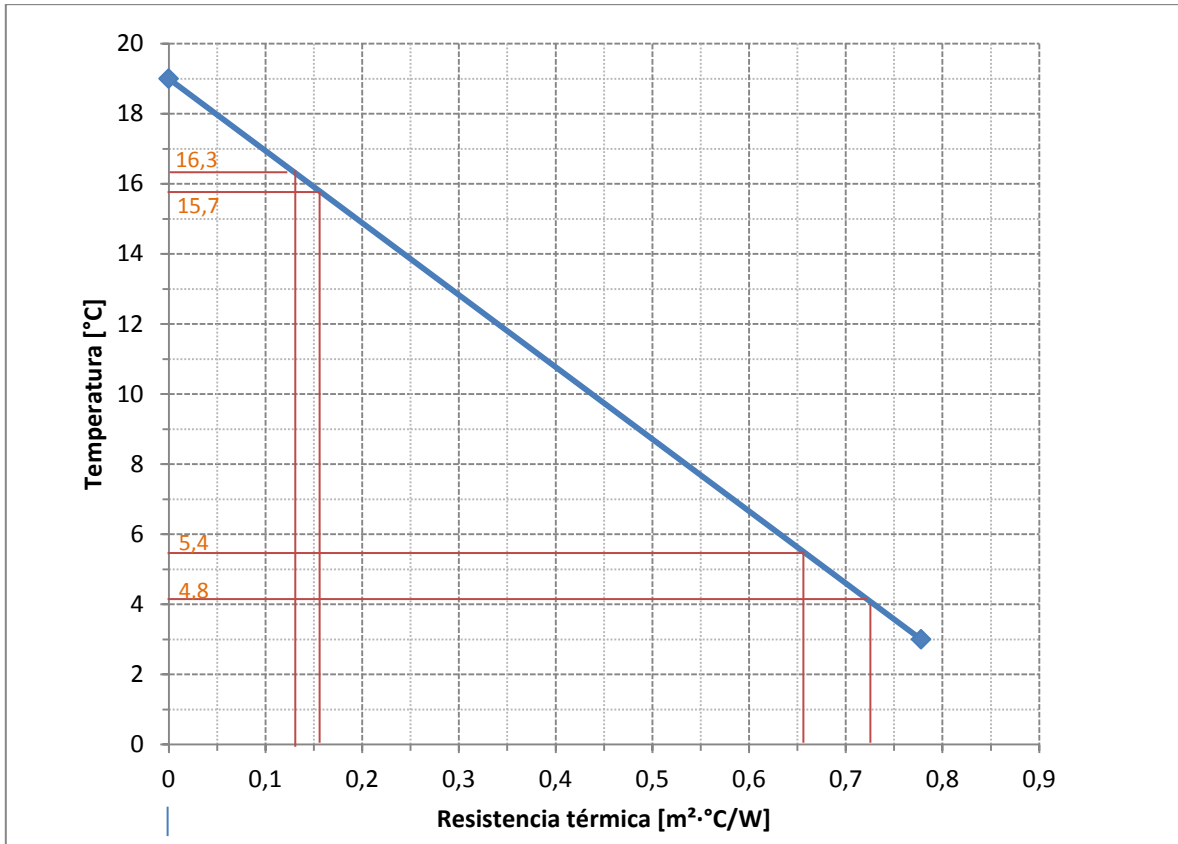


Figura A.6 Determinación de temperaturas por medio del método gráfico.

Comentario: para los efectos prácticos, se comprueba que el método gráfico es suficientemente preciso.

Ejemplo 4:

Considerando las siguientes resistividades al vapor de agua en el ejemplo utilizado para el cálculo de temperaturas a través del elemento, determinar si existe riesgo de condensación intersticial en algún punto, si al interior del recinto existe una humedad relativa HR=75%.

$$r_{Vcapa1} = 50 \frac{MN \cdot s}{g \cdot m}$$

$$r_{Vcapa2} = 10 \frac{MN \cdot s}{g \cdot m}$$

$$r_{Vcapa3} = 60 \frac{MN \cdot s}{g \cdot m}$$

Como las temperaturas a través del elemento ya fueron calculadas, ahora corresponde determinar las presiones de saturación de vapor de agua con esas temperaturas:

$$\theta_i = 19^\circ C \Rightarrow P_{VSATi} = 2197,6 Pa$$

$$\theta_1 = 16,53^\circ C \Rightarrow P_{VSAT1} = 1881,5 Pa$$

$$\theta_2 = 15,85^\circ C \Rightarrow P_{VSAT2} = 1801,8 Pa$$

$$\theta_3 = 5,56^\circ C \Rightarrow P_{VSAT3} = 908 Pa$$

$$\theta_4 = 4,02^\circ C \Rightarrow P_{VSAT4} = 815,2 Pa$$

$$\theta_e = 3^\circ C \Rightarrow P_{VSATe} = 758,5 Pa$$

Corresponde entonces determinar las presiones de vapor parciales a través del elemento, para ello se calcularán primero las resistencias a la difusión de vapor de agua.

$$R_{Vcapa1} = r_{Vcapa1} \cdot e_{capa1} = 50 \frac{MN \cdot s}{g \cdot m} \cdot 0,01m = 0,5 \frac{MN \cdot s}{g}$$

$$R_{Vcapa2} = r_{Vcapa2} \cdot e_{capa2} = 10 \frac{MN \cdot s}{g \cdot m} \cdot 0,02m = 0,2 \frac{MN \cdot s}{g}$$

$$R_{Vcapa3} = r_{Vcapa3} \cdot e_{capa3} = 60 \frac{MN \cdot s}{g \cdot m} \cdot 0,015m = 0,9 \frac{MN \cdot s}{g}$$

$$R_{VT} = 0,5 + 0,2 + 0,9 = 1,6 \frac{MN \cdot s}{g}$$

Como al interior se tiene una humedad relativa del 75% y fuera un 85%, las presiones parciales de vapor interior y exterior serán respectivamente:

$$P_{Vi} = \varphi \cdot P_{VSATi} = 0,75 \cdot 2197,6 Pa = 1648,2 Pa$$

$$P_{Ve} = \varphi \cdot P_{VSATe} = 0,85 \cdot 758,5 \text{ Pa} = 644,7 \text{ Pa}$$

La presión de vapor parcial en las caras expuestas del elemento es la misma que la del ambiente, por lo tanto se tiene que:

$$P_{V1} = P_{Vi} = 1648,2 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{V1} = (P_{Vi} - P_{Ve}) \cdot \frac{R_{V1}}{R_{VT}} = (1648,2 - 644,7) \cdot \frac{0,5}{1,6} = 313,6 \text{ Pa}$$

$$P_{V2} = P_{V1} - \Delta P_{V1} = 1648,2 - 313,6 = 1334,6 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{V2} = (P_{Vi} - P_{Ve}) \cdot \frac{R_{V2}}{R_{VT}} = (1648,2 - 644,7) \cdot \frac{0,2}{1,6} = 125,4 \text{ Pa}$$

$$P_{V3} = P_{V2} - \Delta P_{V2} = 1334,6 - 125,4 = 1209,2 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_{V3} = (P_{Vi} - P_{Ve}) \cdot \frac{R_{V3}}{R_{VT}} = (1648,2 - 644,7) \cdot \frac{0,9}{1,6} = 564,4 \text{ Pa}$$

$$P_{V4} = P_{V3} - \Delta P_{V3} = 1209,2 - 564,4 = 644,7 \text{ Pa (calza con lo determinado más arriba)}$$

En resumen se tiene:

Tabla A.4. Resumen de cálculos, ejemplo 4.

punto	$R_{acum} \left[\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} \right]$	$P_{VSAT} [Pa]$	$P_V [Pa]$
0	0	2197,6	1648,2
1	0,13	1881,5	1648,2
2	0,163	1801,8	1334,6
3	0,663	908	1209,2
4	0,738	815,2	644,7
5	0,778	758,5	644,7

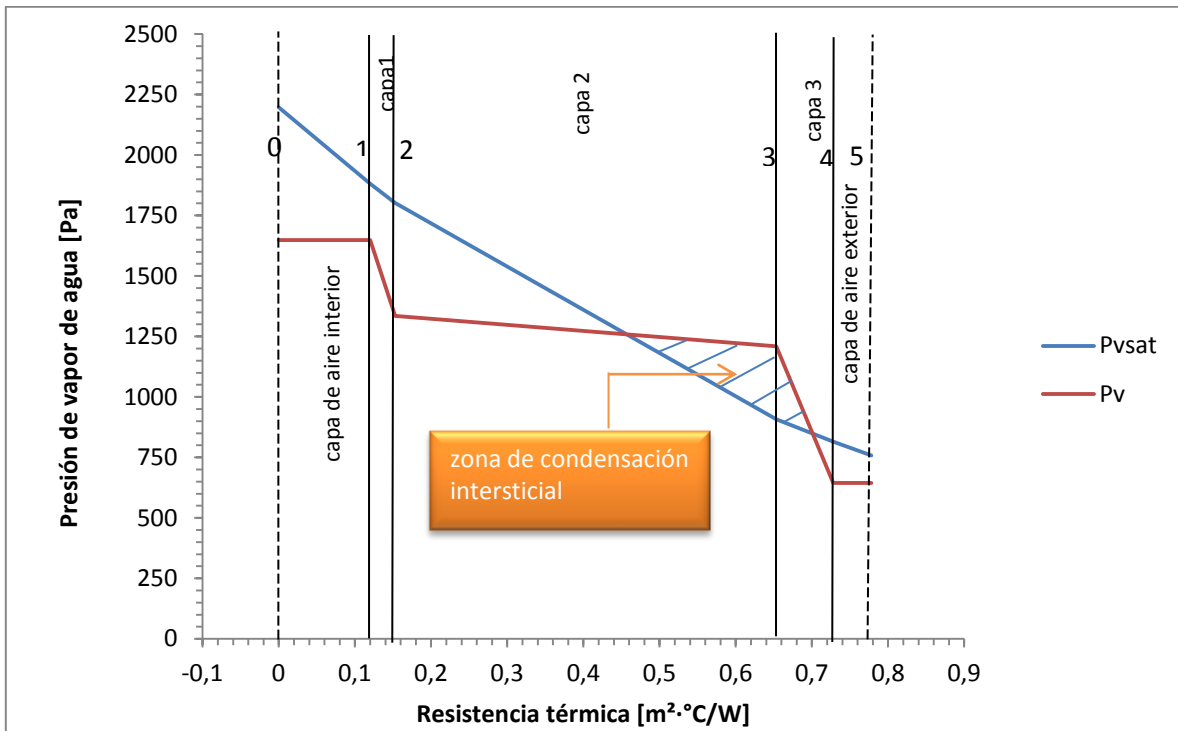


Figura A.7 Perfil de presiones del ejemplo.

Ejemplo 5:

Se tiene una casa con problemas de condensación en el muro de albañilería mostrado en la figura. El espesor total del muro es 20 cm, 14 cm el ladrillo, 4cm de lana mineral y 2 cm de revestimiento de yeso-cartón. La humedad relativa al interior de la vivienda es de 75% y en el exterior de 85%. Considerar una temperatura interior de confort (20°C) y una temperatura exterior de 0°C.

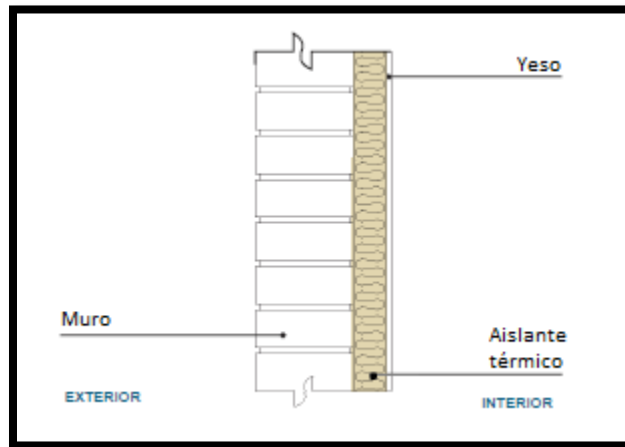


Figura A.8 Muro ejemplo 5.

Ladrillo hecho a máquina:

$$\lambda = 0,46 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$r_V = 30 \frac{MN \cdot s}{g \cdot m}$$

Lana mineral:

$$\lambda = 0,04 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$r_V = 10 \frac{MN \cdot s}{g \cdot m}$$

Yeso:

$$\lambda = 0,35 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$r_V = 60 \frac{MN \cdot s}{g \cdot m}$$

Lo primero es verificar si la humedad del muro es producto de condensación. Utilizando los métodos descritos en el capítulo IV se comprueba que exista riesgo de condensación.

Condensación superficial

Por simplicidad para los cálculos se considerará el muro como si sólo estuviera conformado por una capa de ladrillos y otra de yeso, en estricto rigor se debiera calcular la conductividad térmica de la capa de ladrillo con el mortero de cemento en conjunto.

$$R_{yeso} = \frac{0,02m}{0,35 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} = 0,057 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$$

$$R_{lana} = \frac{0,04m}{0,04 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} = 1,0 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$$

$$R_{ladrillo} = \frac{0,14m}{0,46 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}} = 0,304 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$$

$$R_T = R_{Si} + R_{yeso} + R_{lana} + R_{ladrillo} + R_{Se} = 1,53 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$$

$$U = \frac{1}{R_T} = 0,65 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Este valor de U nos dice que estaríamos cumpliendo la exigencia para todas las zonas térmicas de 1 a 6 la actual reglamentación.

$$\theta_{Si} = 20 - 0,65 \cdot 0,13(20 - 0) = 18,3^\circ C$$

Del ábaco psicrométrico (ver gráfico 3-e) obtenemos el punto de rocío. Para 20°C y a una humedad relativa del 75% se tiene que el punto de rocío se produce a los 15°C aproximadamente.

Como $\theta_{Si} = 18,3^\circ C > \theta_{Rocío} = 15^\circ C$, no existe riesgo de condensación sobre el muro de albañilería.

Condensación intersticial

1. Obtener la temperatura en las superficies de cada capa.

$$\theta_{Si} = 18,3^\circ C \quad , \text{superficie interior.}$$

$$\theta_1 = \theta_{Si} - (20 - 0) \cdot \frac{0,057}{1,53} = 17,6^\circ C \quad , \text{superficie entre yeso y aislante.}$$

$$\theta_2 = \theta_1 - (20 - 0) \cdot \frac{1,0}{1,53} = 4,5^\circ C \quad , \text{superficie entre aislante y muro.}$$

$$\theta_3 = \theta_2 - (20 - 0) \cdot \frac{0,304}{1,53} = 0,5^\circ C \quad , \text{superficie exterior.}$$

2. Obtener las presiones de saturación para las temperaturas anteriores.

$$p_{sat}(\theta_{Si}) = 610,5 \cdot \exp^{\frac{17,269 \cdot \theta_{Si}}{237,3 + \theta_{Si}}} = 2100 Pa$$

$$p_{sat}(\theta_1) = 610,5 \cdot \exp^{\frac{17,269 \cdot \theta_1}{237,3 + \theta_1}} = 2010 Pa$$

$$p_{sat}(\theta_2) = 610,5 \cdot \exp^{\frac{17,269 \cdot \theta_2}{237,3 + \theta_2}} = 841 Pa$$

$$p_{sat}(\theta_3) = 610,5 \cdot \exp^{\frac{17,269 \cdot \theta_3}{237,3 + \theta_3}} = 633 \text{ Pa}$$

3. Obtener las presiones parciales de vapor.

Resistencia a la difusión de vapor de agua:

$$R_{V\text{yeso}} = r_{V\text{yeso}} \cdot e_{\text{yeso}} = 60 \cdot 0,02 = 1,2 \frac{\text{MN} \cdot \text{s}}{\text{g}}$$

$$R_{V\text{lana}} = r_{V\text{lana}} \cdot e_{\text{lana}} = 10 \cdot 0,04 = 0,4 \frac{\text{MN} \cdot \text{s}}{\text{g}}$$

$$R_{V\text{ladrillo}} = r_{V\text{ladrillo}} \cdot e_{\text{ladrillo}} = 30 \cdot 0,14 = 4,2 \frac{\text{MN} \cdot \text{s}}{\text{g}}$$

$$R_{VT} = 1,2 + 0,4 + 4,2 = 5,8 \frac{\text{MN} \cdot \text{s}}{\text{g}}$$

Ahora podemos determinar las presiones parciales de vapor:

$$P_{Vi} = 0,75 \cdot 2100 = 1575$$

$$P_{Ve} = 0,85 \cdot 633 = 538 \text{ Pa}$$

$$P_{V1} = 1575 - (1575 - 538) \cdot \frac{1,2}{5,8} = 1360 \text{ Pa}$$

$$P_{V2} = 1360 - (1575 - 538) \cdot \frac{0,4}{5,8} = 1289 \text{ Pa}$$

$$P_{V3} = 1289 - (1575 - 538) \cdot \frac{4,2}{5,8} = 538 \text{ Pa}$$

En resumen se tiene lo siguiente:

Tabla A.5. Resumen de cálculos, ejemplo 5.

superficie	Psat [Pa]	Pv [Pa]	Obsevación
interior	2102	1577	No condensa
entre yeso y aislante	2010	1363	No condensa
entre aislante y muro	841	1292	Condensa
exterior	633	542	No condensa

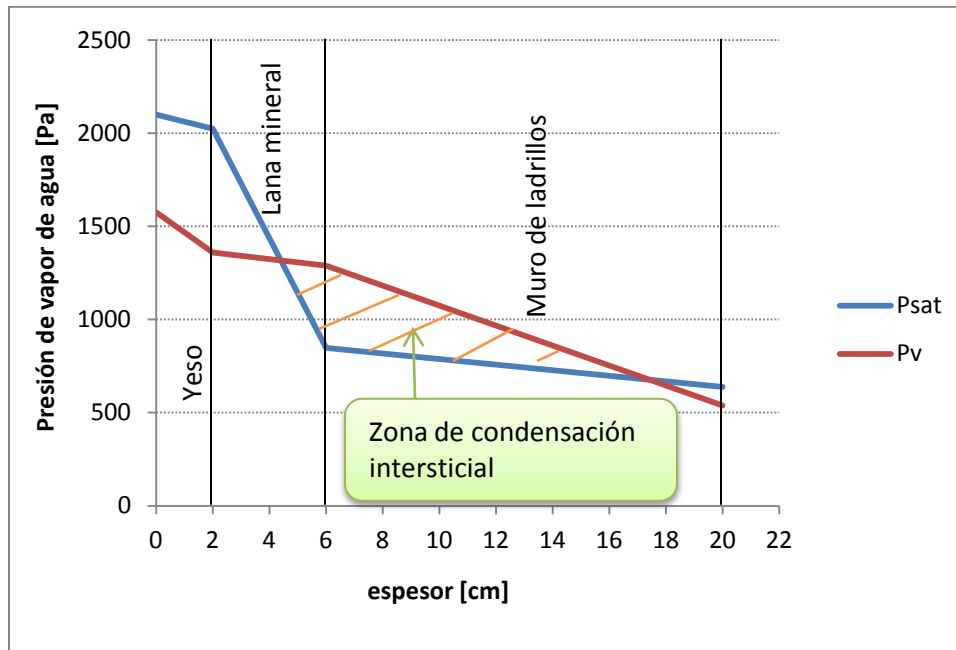


Figura A.9 Perfil de presiones, ejemplo 5.

Como se produce condensación intersticial tendremos que buscar alguna solución, en este caso al ser un muro con aislamiento térmico interior, la solución más factible y económica es retirar el yeso-cartón, colocar una barrera de vapor y revestir nuevamente con la plancha de yeso-cartón.

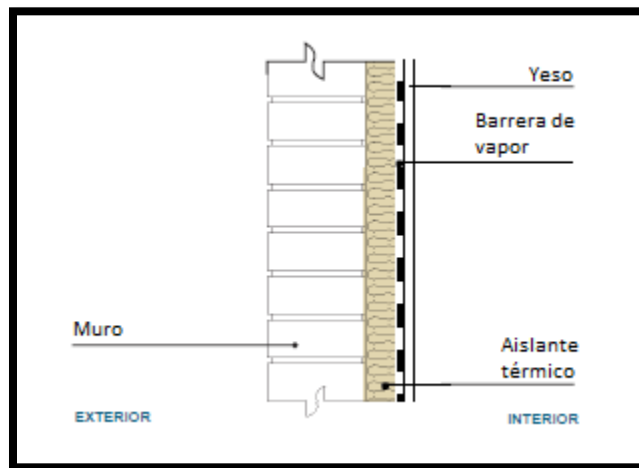


Figura A.10 Solución muro, ejemplo 5.

Con esta solución sencilla se erradicará el problema de condensación intersticial. En general colocar una barrera de humedad por el lado interior de la vivienda es un método sencillo y económico (en el caso de no tener que agregar otro material como yeso-cartón por ejemplo) de prevenir la humedad por condensación intersticial, eliminar este problema por medio de aislamiento térmico adicional por lo general saldrá más costoso.

ANEXO C: CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE MATERIALES

Tabla A.6. Conductividad térmica de materiales.

Material	densidad [kg/m ³]	λ [W/(m·K)]
Agua líquida a 0°C	1.000	0,59
Agua líquida a 94°C	1.000	0,69
Aire quieto a 0°C	0,0012	0,024
Aire quieto a 100°C	-	0,031
Adobe	1.100 - 1.800	0,9
Aluminio	2.700	210
Arcilla	2.100	0,93
Arcilla expandida	300	0,09
	450	0,11
Arena	1.500	0,58
Aserrín de madera	190	0,06
Asfaltos	1.700	0,7
Azulejos	-	1,05
Baldosas cerámicas	-	1,75
Betún	1.050	0,16
Bronce	8.500	64
Cascote de ladrillo	1.300	0,41
Capotillo de arroz	117	0,06
Cebada	470	0,07
Cobre	8.930	380
Escorias	800	0,25
	1.000	0,29
	1.200	0,34
	1.400	0,41
Enlucido de yeso	800	0,35
	1.000	0,44
	1.200	0,56
Enlucido de yeso con perlita	570	0,18
Fibro-cemento	920	0,22
	1.000	0,23
	1.135	0,23
Fundición y acero	7.850	58
Grava rodada o de machaqueo	1.700	0,81

Hormigón armado normal	2.400	1,63
Hormigón con áridos ligeros	1.000	0,33
	1.400	0,55
Hormigón celular con áridos cilíceos	600	0,34
	1.000	0,67
	1.400	1,09
Hormigón celular sin áridos	305	0,09
Hormigón en masa con grava normal:		
con áridos ligeros	1.600	0,73
con áridos ordinarios sin vibrar	2.000	1,16
con áridos ordinarios, vibrados	2.400	1,63
Hormigón en masa con arcilla expandida	500	0,12
	1.500	0,55
Hormigón con cenizas	1.000	0,41
Hormigón con escoria de alto horno	600	0,17
	800	0,22
	1.000	0,3
Hormigón normal con áridos silíceos	600	0,34
	800	0,49
	1.000	0,67
Hormigón de viruta de madera	450-650	0,26
Hormigón de fibras de madera	300-400	0,12
	400-500	0,14
	500-600	0,16
Hormigón liviano a base de cascarilla de arroz	570	0,128
	780	0,186
	850	0,209
	1.200	0,326
Hormigón liviano a base de poliestireno expandido	260	0,088
	320	0,105
	430	0,134
	640	0,214
	840	0,269
	1.100	0,387
Ladrillo macizo hecho a máquina	1.000	0,46
	1.200	0,52
	1.400	0,6
	1.800	0,79

	2.000	1
Ladrillo hecho a mano	-	0,5
Láminas bituminosas	1.100	0,19
Lana de amianto	100	0,061
	200	0,063
	400	0,12
Lana mineral, colchoneta libre	40	0,042
	50	0,041
	70	0,038
	90	0,037
	110	0,04
	120	0,042
Lana mineral granulada	20	0,069
	30	0,06
	40	0,055
	60	0,048
	80	0,044
	100	0,041
	120	0,042
	140	0,042
Linóleo	1.200	0,19
Maderas:		
Álamo	380	0,091
Alerce	560	0,134
Coigüe	670	0,145
Lingue	640	0,136
Pino insigne	410	0,104
Raulí	580	0,121
Roble	800	0,157
Maderas, tableros aglomerados de partículas	400	0,095
	420	0,094
	460	0,098
	560	0,102
	600	0,103
	620	0,105
	650	0,106
Maderas, tableros de fibra	850	0,23
	930	0,26

	1.030	0,28
Mármol	2.500 - 2.850	2,0 - 3,5
Moquetas, alfombras	1.000	0,05
Morteros de cal y bastardos	1.600	0,87
Mortero de cemento	2.000	1,4
Papel	1.000	0,13
Perlita expandida	90	0,05
Plancha de corcho	100	0,04
	200	0,047
	300	0,058
	400	0,066
	500	0,074
Plomo	11.300	35
Poliestireno expandido	25	0,0272
	30	0,0262
	40	0,025
	45	0,0245
	60	0,0254
	70	0,0274
Productos minerales en polvo		
Kieselgur, polvo mineral	200	0,08
	400	0,12
	600	0,16
	800	0,21
	1.000	0,27
	1.200	0,34
	1.400	0,4
Rocas compactadas	2.500 - 3.000	3,5
Rocas porosas	1.700 - 2.500	2,33
Vermiculita en partículas	99	0,047
Vermiculita expandida	100	0,07
Vidrio plano	2.500	1,2
Yeso-cartón	650	0,24
	700	0,26
	870	0,31

Fuente: NCh 853.