



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

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE PLACAS DE YESO-CARTÓN DE FABRICACIÓN
CHILENA EN ENSAYOS DE RESISTENCIA AL FUEGO DE ACUERDO CON
NORMATIVA EUROPEA VIGENTE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FELIPE ANDRÉS AVENDAÑO CASTILLO

PROFESOR GUÍA
MARIO JORGE WAGNER MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
MIGUEL ANGEL PÉREZ
MAURICIO REY GONZÁLEZ

SANTIAGO DE CHILE

2020

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL**

POR: FELIPE ANDRÉS AVENDAÑO CASTILLO

FECHA: JUNIO DE 2020

PROFESOR GUIA: MARIO WAGNER MUÑOZ

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE PLACAS DE YESO-CARTÓN DE FABRICACIÓN
CHILENA EN ENSAYOS DE RESISTENCIA AL FUEGO DE ACUERDO CON
NORMATIVA EUROPEA VIGENTE**

El presente trabajo de Título se enmarca en el contexto de la seguridad contra incendios en construcciones de madera. En particular, se enfoca al diseño resistente al fuego de elementos constructivos que cumplen una función de separación (tabiques, cielos o pisos) que son materializados con placas de yeso-cartón. Tiene por objetivo implementar una metodología europea de evaluación de la función aislante de materiales de revestimiento, a placas de yeso-cartón de fabricación chilena. Se realizan ensayos de fuego a escala en el laboratorio de incendios de IDIEM y modelaciones térmicas por elementos finitos en el programa COMSOL. Se obtienen los factores para el cálculo de la resistencia al fuego de soluciones constructivas que aplican a materiales de uso nacional.

Palabras clave: Placas de yeso-cartón; Resistencia al fuego; Método aditivo de componentes mejorado; Estructuras de madera.

*(A mi madre y padre por la
oportunidad; a mis amigos
por hacerla irrepetible*

AGRADECIMIENTOS

En este momento agradezco a todos quienes me han enseñado y apoyado en la vida: a mi familia, a los profesores de mi recorrido como estudiante y mis amigos (Diego, Danilo, Natalia, Enrique, Catalina, Steffi, Javier, Bastián, David, Karina). <3

También doy las gracias a todos aquellos involucrados que prestaron su ayuda en cualquier forma para la elaboración de esta memoria, desde mi profesor guía hasta el personal del laboratorio de incendios de IDIEM.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Evaluación de la función separadora	3
1.3 Método aditivo de componentes mejorado.....	6
1.3.1 Procedimiento para implementar un nuevo material	10
1.4 Comportamiento y diseño de elementos constructivos de madera desprotegidos expuestos al fuego.....	11
1.5 Diseño de elementos constructivos de madera inicialmente protegidos de la exposición al fuego.....	14
1.5.1 Velocidades de carbonización, β	14
1.5.2 Inicio de carbonización, t_{ch}	15
1.5.3 Tiempo de falla de los revestimientos de protección de yeso-cartón, t_f	16
1.6 Objetivo del trabajo	16
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Norma EN 1995.....	17
2.2 Termoquímica del yeso.....	18
2.2.1 Conductividad térmica.....	19
2.2.2 Calor específico	20
2.2.3 Densidad	22
2.3 Propiedades térmicas de la madera y paneles compuestos de madera.....	23
2.4 Propiedades térmicas materiales aislantes	31
2.4.1 Lana Mineral	31
3. MARCO NORMATIVO EUROPEO DE PLACAS DE YESO-CARTÓN	32
3.1 EN 520: <i>Planchas de yeso-cartón- Definiciones, requisitos y métodos de ensayo [25]</i>	32
3.1.1 Clasificación	32
3.1.2 Requisitos de resistencia a la flexión	33
3.1.3 Requerimientos adicionales de placas tipo H.....	33
3.1.4 Requerimientos adicionales de placas tipo F.....	33
3.1.5 Determinación de resistencia a la flexión	34
3.1.6 Determinación de absorción superficial de agua	35
3.1.7 Determinación de absorción total de agua.....	35
3.1.8 Determinación de cohesión del núcleo a altas temperaturas	36

3.1.9 Muestreo	37
4. MARCO NORMATIVO CHILENO DE PLACAS DE YESO-CARTÓN	38
4.1 NCh 146: <i>Planchas o placas de yeso-cartón [26, 27]</i>	38
4.1.1 Clasificación	38
4.1.2 Requisitos de resistencia a la flexión	38
4.1.3 Requerimientos adicionales de placas RH.....	39
4.1.4 Requerimientos adicionales de placas tipo RF.....	39
4.1.5 Determinación de resistencia a flexión	39
4.1.6 Determinación de absorción superficial de agua	40
4.1.7 Determinación de absorción total de agua (inmersión).....	40
4.1.8 Determinación de cohesión del núcleo a altas temperaturas.....	41
4.1.9 Muestreo	42
5. ENSAYOS DE FUEGO A ESCALA	43
5.1 Descripción del equipo experimental	43
5.2 Curva estándar tiempo-temperatura	44
5.2.1 Tolerancia para la temperatura del horno	44
5.3 Descripción de probetas	45
5.3.1 Recomendaciones Ref. [3].....	46
5.4 Descripción de materiales	47
5.4.1 Placas de yeso-cartón Knauf	47
5.4.2 Placas de yeso-cartón Volcan.....	47
5.4.3 Placas de yeso-cartón Romeral.....	47
5.5 Descripción del ensayo	48
5.6 Resultados	49
6. CALIBRACIÓN DE PROPIEDADES TÉRMICAS	52
6.1 Teoría de transferencia de calor	52
6.2 Software de simulación térmica	53
6.3 Construcción del modelo térmico	53
6.3.1 Geometría	53
6.3.2 Discretización.....	54
6.3.3 Condiciones de borde.....	54
6.3.4 Parámetros de entrada: propiedades térmicas de los materiales	55
6.4 Procedimiento de calibración de propiedades térmicas	60
6.5 Propiedades térmicas efectivas.....	61

6.5.1 Knauf RH 15	61
6.5.2 Knauf RF 15	63
6.5.3 Volcan RH 15.....	65
6.5.4 Volcan RF 15.....	67
6.5.5 Romeral RH 15.....	69
6.5.6 Romeral RF 15.....	71
7. DERIVACIÓN VALORES DE DISEÑO.....	73
8. EJEMPLOS DE CÁLCULO.....	80
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES.....	83
BIBLIOGRAFÍA.....	85
ANEXO A: PROPIEDADES TÉRMICAS USADAS	87
Tabla A.1: Conductividad térmica OSB	87
A.2 Calor específico OSB	87
A.3 Densidad OSB	87
A.4 Conductividad térmica manta cerámica	88
A.5 Calor específico manta cerámica.....	88
A.6 Densidad manta cerámica.....	88
APÉNDICE 1: PROPIEDADES TÉRMICAS INICIALES.....	89
1.1 Razón conductividad térmica/conductividad térmica inicial placas yeso-cartón.....	89
1.2 Razón calor específico/ calor específico inicial placas de yeso-cartón.....	89
3.3 Razón densidad/densidad inicial placas de yeso-cartón.....	89

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Las barreras de fuego desempeñan el rol de mantener la integridad de un edificio y limitar la propagación del fuego desde su lugar de origen durante un incendio, garantizando por un determinado periodo de tiempo tanto la capacidad de la estructura de resistir cargas como la función confinante del fuego de muros y cielos, y de esta forma facilitar el salvamento de los ocupantes del edificio. A elevadas temperaturas la mayoría de los materiales de construcción pierden parte de su resistencia, pudiendo concluir además la liberación de humo, gases tóxicos y posibles explosiones en gran cantidad de lesiones, muertes y pérdidas económicas. Por estas razones diseñar estructuras contra el ataque del fuego y evaluar el desempeño de estas barreras cobra relevancia en la práctica de la ingeniería y la industria de la construcción.

Estructuras de muro y cielo construidas como entramados de madera, consisten usualmente de un marco de madera, material aislante entre los elementos transversales y revestimiento (ver **Fig. 1-1**). Los revestimientos con placas de yeso-cartón son ampliamente usados en construcciones ligeras, pues son especialmente adecuados para proporcionar a un bajo costo protección pasiva contra el fuego y aislación térmica. La base de su resistencia al fuego reside en la baja conductividad térmica del yeso y la evaporación del contenido de agua de la placa durante la exposición al fuego, fenómeno que absorbe una cantidad considerable de calor en el proceso, retrasando el aumento de temperatura tras la cara no expuesta al fuego.

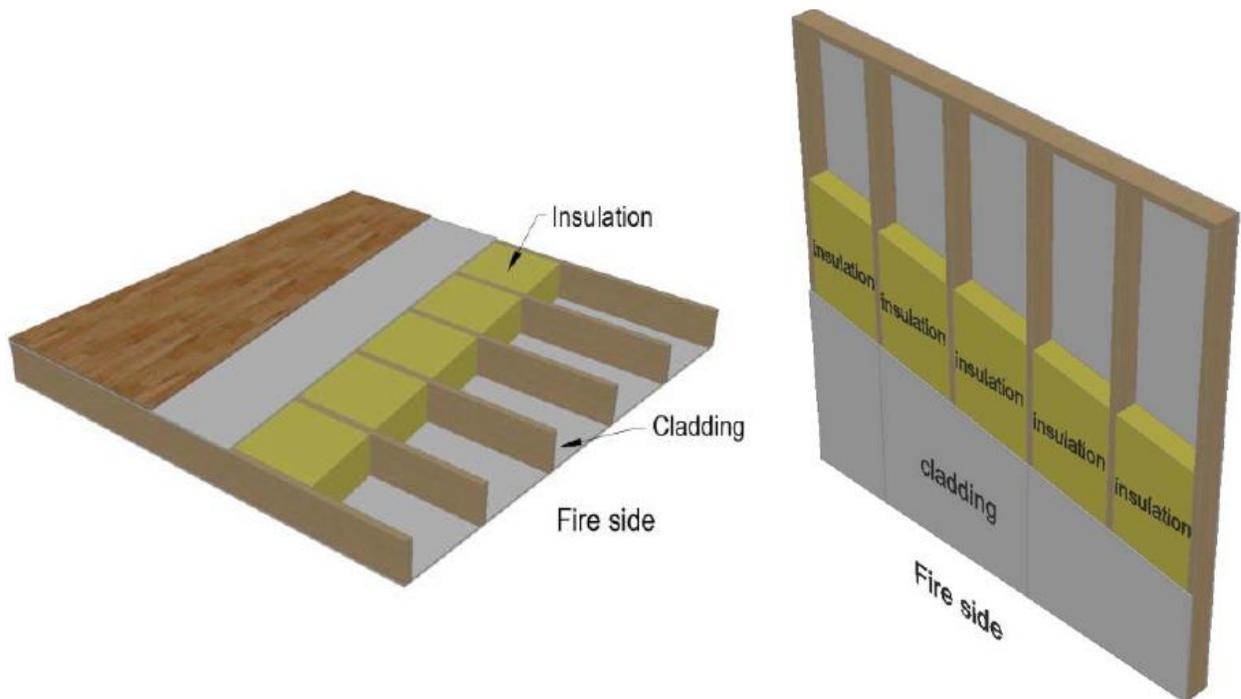


Fig. 1-1. Entramados de madera: techo (izquierda) y muro (derecha). Ref. [1]

Según datos del INE, para 2017 apenas un 15% de las viviendas nuevas en Chile eran construidas usando madera como principal material estructural. Muy distinto a otros países que también tienen vocación forestal, como Canadá, Finlandia, Suecia y Estados Unidos, en que ese porcentaje puede llegar a superar el 90%. En el imaginario chileno, "construir en madera" está asociado a viviendas de bajo presupuesto o provisoras, que se perciben como menos seguras en caso de incendio, frente a las alternativas que recurren al hormigón o la albañilería. La revalorización de la madera está ocurriendo en todo el mundo por ser un material renovable y sustentable, con excelentes propiedades térmicas y una buena relación resistencia-peso, pero la falta de normativa técnica nacional para el diseño contra el fuego de edificios de mediana altura en madera limita el fomento de su uso.

La Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones tiene exigencias mínimas de seguridad contra incendios que todo edificio debe cumplir, entre estas, los requerimientos de *resistencia al fuego* de sus elementos constructivos. Para determinarla, el código de construcción nacional se basa en ensayos de incendio definidos en la norma NCh935/1 of.97, donde esta se define como el tiempo, expresado en minutos, durante el que un sistema de protección puede soportar la exposición a un incendio estándar hasta alcanzar un determinado criterio de falla. Para elementos que desempeñan una *función de separación* (tabiques, entrepisos, etc.), la resistencia al fuego se juzga según criterios de aislación (aumento excesivo de temperatura en la cara no expuesta) y estanquidad (capacidad de un elemento expuesto al fuego por una cara, para no permitir el paso de llamas desde una cara a la otra).

La flexibilidad de la construcción de estructuras confinantes con paneles de yeso-cartón se debe a la facultad de especificar el tipo y el grosor de los revestimientos y la configuración de la estructura para lograr requisitos de rendimiento específicos. Cada configuración requerirá de un ensayo particular para determinar su resistencia al fuego, sin embargo, el resultado de los ensayos depende en gran medida del desempeño de las placas expuestas al fuego. En vez de ensayar una solución constructiva completa se podría determinar la resistencia al fuego de ésta, a partir del conocimiento del desempeño individual de los paneles, que depende principalmente de su capacidad de aislación térmica. Para esto, los métodos de cálculo representan una alternativa de bajo costo y más flexible.

1.2 Evaluación de la función separadora

La resistencia al fuego de un elemento constructivo bajo consideración de su función de separación (t_{aisl}) se define como el tiempo transcurrido desde el inicio a exposición al fuego por una de sus caras hasta que la temperatura en el lado no expuesto alcanza un aumento 140°C en promedio sobre toda la superficie o 180°C en algún punto de esta. Esta limitación evita la ignición de objetos cercanos [2].

El método de análisis de la función de separación de entramados de pared y piso de madera se presenta en la norma EN 1995-1-2 [18] en su anexo E. La resistencia expresada en minutos se obtiene de la suma de las contribuciones aportadas por cada capa constituyente, de acuerdo con su forma de interacción, considerando diferentes trayectorias de transferencia de calor (**Fig. 1-2**):

$$t_{aisl} = \sum_{i=1}^n t_{aisl,i}$$

Estas contribuciones dependen de la capacidad de aislamiento inherente de cada capa ($t_{aisl,0}$), de la posición de la capa dentro de la configuración (k_{pos}) y la influencia de las juntas (k_j). Así, para una capa individual:

$$t_{aisl,i} = t_{aisl,0,i} \cdot k_{pos,i} \cdot k_{j,i}$$

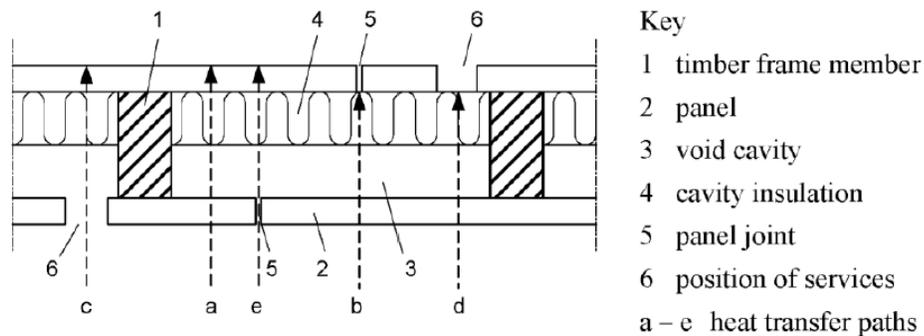


Fig. 1-2. Trayectorias de transferencia de calor a través de un elemento de separación de múltiples capas. Ref. [5]

EN 1995-1-2 proporciona ecuaciones y datos tabulados para el cálculo de los factores del método, limitados a configuraciones de una o dos capas que aplican a revestimientos de paneles de materiales de madera de acuerdo con EN 13986 y placas de yeso-cartón tipo A, F y H según EN 520.

- **Valor básico de aislación, t_{aisl}**

(1) Para una cavidad vacía de profundidad entre 45 y 200 mm, el valor básico de aislamiento debe tomarse como $t_{ins}=5,0$ min.

(2) Para placas de yeso-cartón:

$$t_{aisl,0} = 1,4 \cdot h_p$$

Donde:

$t_{aisl,0}$ [min]: valor básico de aislación;

h_p [mm]: espesor de la placa.

- **Coefficiente de posición, k_{pos}**

(1) Para tabiques con revestimientos de una sola capa, el coeficiente de posición del panel en el lado expuesto debe tomarse de **Tabla 1-1**. Para pisos expuestos al fuego desde abajo, el coeficiente de posición de **Tabla 1-1** debe multiplicarse por 0,8. Para el panel en el lado no expuesto del tabique, el coeficiente de posición debe tomarse de **Tabla 1-2**.

Tabla 1-1. Coeficiente de posición en el lado expuesto para revestimiento de una sola capa. Ref. [18].

Espesor, h_p [mm]	Capa apoyada por	
	Aislación fibra de vidrio o mineral	Vacío
9 a 15	$\min \begin{cases} 0,02 \cdot h_p + 0,54 \\ 1 \end{cases}$	0,8

Tabla 1-2. Coeficiente de posición en el lado no expuesto para revestimiento de una sola capa. Ref. [18].

Espesor, h_p [mm]	Capa precedida por				Vacío
	Fibra de vidrio	Fibra mineral de espesor [mm]			
		49 a 95	145	195	
9 a 15	$0,07 \cdot h_p - 0,17$	1,5	3,9	4,9	0,7

(2) Para una cavidad vacía precedida por un panel de yeso-cartón tipo F, el coeficiente de posición debe tomarse como $k_{pos}=1,5$. Cuando la capa expuesta esté hecha de un material distinto $k_{pos}=1,0$.

(3) Para muros con revestimiento de doble capa, los coeficientes de posición deben tomarse de **Tabla 1-3**.

Tabla 1-3. Coeficientes de posición para revestimiento de una sola capa. Ref. [18].

Construction: Layer number and material		Layer number				
		1	2	3	4	5
1, 2, 4, 5 3	Wood-based panel Void	0,7	0,9	1,0	0,5	0,7
1, 2, 4, 5 3	Gypsum plasterboard type A or H Void	1,0	0,8	1,0	0,8	0,7
1, 5 2, 4 3	Gypsum plasterboard type A or H Wood-based panel Void	1,0	0,8	1,0	0,8	0,7
1, 5 2, 4 3	Wood-based panel Gypsum plasterboard type A or H Void	1,0	0,6	1,0	0,8	0,7
1, 2, 4, 5 3	Wood-based panel Rock fibre batts	0,7	0,6	1,0	1,0	1,5
1, 2, 4, 5 3	Gypsum plasterboard type A or H Rock fibre batts	1,0	0,6	1,0	0,9	1,5
1, 5 2, 4 3	Gypsum plasterboard type A or H Wood-based panel Rock fibre batts	1,0	0,8	1,0	1,0	1,2
1, 5 2, 4 3	Wood-based panel Gypsum plasterboard type A or H Rock fibre batts	1,0	0,6	1,0	1,0	1,5

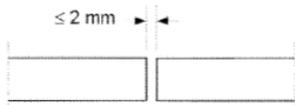
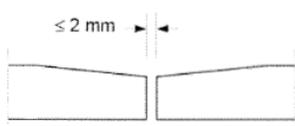
- **Coefficiente de junta, k_j**

(1) EN 1995-1-2 no permite el uso de juntas con ancho superior a 2 mm y establece que el coeficiente de junta debe tomarse como $k_j=1$ para:

- Juntas de paneles fijadas a un listón de al menos el mismo espesor o un elemento estructural;
- Juntas en bloques de aislación.

(2) Para juntas en paneles de yeso cartón que no están apoyadas por listones el coeficiente de junta debe tomarse de la siguiente tabla.

Tabla 1-4. Coeficiente de junta de paneles de yeso cartón. Ref. [18].

	Joint type	Type	k_j	
			Filled joints	Unfilled joints
a		A, H, F	1,0	0,2
b		A, H, F	1,0	0,15

1.3 Método aditivo de componentes mejorado

En colaboración con el EMPA se llevó a cabo en ETH Zúrich, un proyecto de investigación con el objetivo de desarrollar un modelo de diseño mejorado para la verificación de la función de separación de los entramados de paredes y pisos de madera con revestimiento de yeso y paneles de materiales de madera. Un gran número de pruebas de fuego a pequeña escala permitieron el análisis de diferentes parámetros (material, espesor, posición y número de capas de revestimiento) sobre el comportamiento térmico del revestimiento. Sobre la base de un extenso estudio paramétrico de elementos finitos se calcularon los coeficientes del modelo de diseño, el que se verificó mediante pruebas de fuego a escala real [3]. Como resultado final se desarrolló un método de diseño mejorado, capaz de determinar la resistencia al fuego de entramados de madera con un ilimitado número de capas (**Fig. 1-3**) de tableros de yeso-cartón, tableros de madera o combinaciones de estos, que mejora considerablemente el método de diseño del código europeo EN 1995-1-2. El método ha sido propuesto para su siguiente versión [4].

$$t_{aisl} = \sum_{i=1}^{n-1} t_{prot,i} + t_{aisl,n}$$

Donde:

$\sum_{i=1}^{n-1} t_{prot,i}$ [min]: suma de los tiempos de protección (en la dirección del flujo de calor) de las capas que preceden la última capa del arreglo en el lado no expuesto al fuego;

$t_{aisl,n}$ [min]: tiempo de aislación de la última capa de la disposición en el lado no expuesto al fuego.

El tiempo de protección, $t_{prot,i}$, es el tiempo transcurrido hasta que el aumento de temperatura en la cara no expuesta al fuego de la capa considerada es 250°C en promedio en la superficie o 270°C en cualquier punto individual. Estos criterios son aproximaciones para dar cuenta de la falla por degradación térmica del material. Además, se tratan de temperaturas cercanas al inicio de calcinación de la madera (300 °C) [3]. El tiempo de aislación $t_{aisl,i}$ corresponde al tiempo transcurrido hasta que el aumento de temperatura en la cara no expuesta es igual a 140°C en promedio o 180°C en cualquier punto.

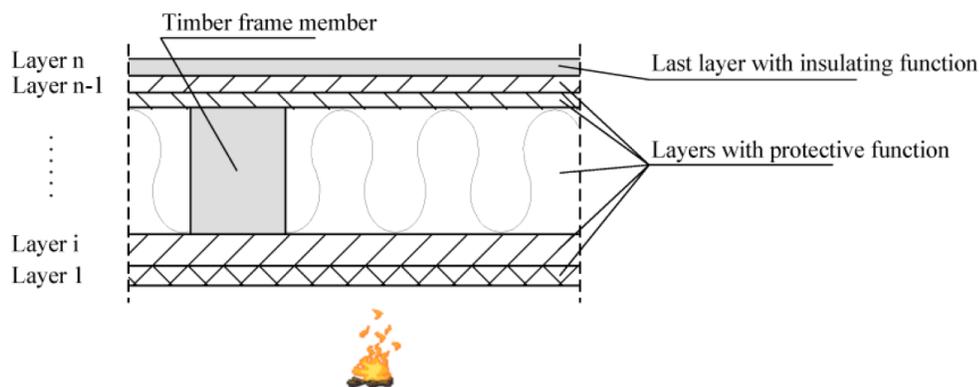


Fig. 1-3. Numeración y función de las capas de un entramado de madera de muro o techo. Ref. [5].

Los tiempos de protección y aislación de las capas de revestimiento se calculan considerando sus valores básicos, los coeficientes de posición y de juntas:

$$t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} \cdot k_{pos,exp,i} \cdot k_{pos,noexp,i} + \Delta t_i) \cdot k_{j,i}$$

$$t_{aisl,n} = (t_{aisl,0,n} \cdot k_{pos,exp,n} + \Delta t_n) \cdot k_{j,n}$$

Donde:

$t_{prot,0,i}$ [min]: valor básico de protección de la capa i ;

$t_{aisl,0,n}$ [min]: valor básico de aislación de la última capa;

$k_{pos,exp,i}$ $k_{pos,exp,n}$ [-]: coeficiente de posición que toma en cuenta la influencia de las capas antecesoras;

$k_{pos,noexp,i}$ [-]: coeficiente de posición que toma en cuenta la influencia de las capas que apoyan la considerada;

Δt_i [min]: tiempos de corrección para capas protegidas por tableros de yeso-cartón tipo F según EN 520 o tableros de yeso de fibra según EN 15283-2;

$k_{j,i}$ [-]: coeficiente de junta de la capa i .

Los coeficientes del método corresponden a la interpretación de los resultados de simulaciones térmicas con elementos finitos basadas en un modelo físico de transferencia de calor a través de estructuras multiestratificadas.

El diseño requiere verificar que la resistencia al fuego del elemento constructivo sea mayor o igual que el periodo de resistencia exigido por la función separadora de este:

$$t_{aisl} \geq t_{req}$$

Ref. [5] da ecuaciones para el cálculo de los factores del método que fueron derivadas utilizando simulaciones numéricas de elementos finitos y verificadas con ensayos de fuego. Para placas de yeso-cartón tipo A, H y F según EN 520 entrega las expresiones mostradas en las siguientes tablas.

Tabla 1-5. Valores básicos de aislación, $t_{aisl,0,n}$ y protección, $t_{prot,0,i}$. Ref. [5].

Material	Basic insulation value $t_{ins,0,n}$ [min]	Basic protection value $t_{prot,0,i}$ [min]
Gypsum plasterboard, gypsum fibre board	$24 \cdot \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,4}$	$30 \cdot \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2}$

Donde:

h_i [mm]: Espesor de la capa considerada.

Tabla 1-6. Coeficiente de posición, $k_{pos,exp}$. Ref. [5].

Material	Position coefficient $k_{pos,exp,i}$ and $k_{pos,exp,n}$	
Cladding (gypsum, timber)	$k_{pos,exp,n}$ for $t_{ins,n}$	
	$1 - 0,6 \cdot \frac{\sum t_{prot,n-1}}{t_{ins,0,n}}$	for $\sum t_{prot,n-1} \leq \frac{t_{ins,0,n}}{2}$
	$0,5 \cdot \sqrt{\frac{t_{ins,0,n}}{\sum t_{prot,n-1}}}$	for $\sum t_{prot,n-1} > \frac{t_{ins,0,n}}{2}$
	$k_{pos,exp,i}$ for $t_{prot,i}$	
	$1 - 0,6 \cdot \frac{\sum t_{prot,i-1}}{t_{prot,0,i}}$	for $\sum t_{prot,i-1} \leq \frac{t_{prot,0,i}}{2}$
	$0,5 \cdot \sqrt{\frac{t_{prot,0,i}}{\sum t_{prot,i-1}}}$	for $\sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{prot,0,i}}{2}$

Tabla 1-7. Coeficiente de posición $k_{pos,noexp,i}$. Ref. [5].

Material of the layer considered	$k_{pos,noexp,i}$ for layers backed by cladding made of gypsum or timber	$k_{pos,noexp,i}$ for layers backed by insulation
Gypsum plasterboard, gypsum fibre board	1,0	$0,5 \cdot h_i^{0,15}$

Donde:

h_i [mm]: Espesor de la capa considerada.

Tabla 1-8. Tiempos de corrección Δt . Ref. [5].

Material	Floor assemblies	Wall assemblies
Cladding (gypsum, timber)	Δt_n for $t_{ins,n}$ [min]	
	$0,06 \cdot t_{prot,n-1} + 1,1 \cdot t_{ins,0,n} - 5,0$	$0,03 \cdot t_{prot,n-1} + 0,9 \cdot t_{ins,0,n} - 2,3$
	for $t_{ins,0,n} < 8 \text{ min}$	for $t_{ins,0,n} < 12 \text{ min}$
	$0,1 \cdot t_{prot,n-1} - 0,035 \cdot t_{ins,0,n} + 1,2$	$0,22 \cdot t_{prot,n-1} - 0,1 \cdot t_{ins,0,n} + 4,7$
	for $t_{ins,0,n} \geq 8 \text{ min}$	for $t_{ins,0,n} \geq 12 \text{ min}$
	Δt_i for $t_{prot,i}$ [min]	
$0,06 \cdot t_{prot,i-1} + 1,1 \cdot t_{prot,0,i} - 5,0$	$0,03 \cdot t_{prot,i-1} + 0,9 \cdot t_{prot,0,i} - 2,3$	
for $t_{prot,0,i} < 8 \text{ min}$	for $t_{prot,0,i} < 12 \text{ min}$	
$0,1 \cdot t_{prot,i-1} - 0,035 \cdot t_{prot,0,i} + 1,2$	$0,22 \cdot t_{prot,i-1} - 0,1 \cdot t_{prot,0,i} + 4,7$	
for $t_{prot,0,i} \geq 8 \text{ min}$	for $t_{prot,0,i} \geq 12 \text{ min}$	

Tabla 1-9. Coeficiente de junta k_j . Ref. [5].

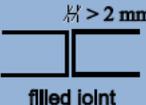
Material	Joint type	$k_{j,n}$ for $t_{ins,n}$	$k_{j,i}$ for $t_{prot,i}$	
			Layer backed by a void cavity	Layer backed by battens or panels or structural members or insulation
Gypsum plasterboard, gypsum fibre board		0,8	0,8	1,0
				
	no joint	1,0	1,0	1,0

Tabla 1-10. Modificación de los coeficientes de posición $k_{pos,exp}$ y $k_{pos,noexp,i}$ por cavidades vacías. Ref. [5].

Material	Layer on the exposed side of the cavity	Layer on the unexposed side of the cavity	
Cladding (gypsum, timber)	$k_{pos,unexp,i}$	$1,6 \times k_{pos,exp,ij}$	$3 \times \Delta t_i$ (or $3 \times \Delta t_n$)

1.3.1 Procedimiento para implementar un nuevo material

El procedimiento para implementar un material al método comprende: (1) el diseño y la ejecución de ensayos de incendio a escala; (2) determinación de las propiedades térmicas modificadas del material necesarias para las simulaciones; (3) simulaciones térmicas en software de elementos finitos (4) desarrollo de ecuaciones de diseño y; (5) verificación por una o más pruebas de fuego a escala real. Por el momento el método es seguro, por ejemplo, proporciona tiempos de resistencia al fuego más cortos que los observados en las pruebas de fuego de las mismas estructuras.

1.4 Comportamiento y diseño de elementos constructivos de madera desprotegidos expuestos al fuego

Al quedar la superficie de una pieza de madera expuesta a la acción del fuego experimenta una pirólisis que genera una carbonización superficial. La sección transversal remanente queda formada por un estrato carbonizado carente de resistencia mecánica y un sector no carbonizado (ver **Fig. 1-4**). La temperatura ante la que el proceso de carbonización comienza a desarrollarse, es característica del material (dependiente de la densidad de la madera, contenido de humedad, temperatura y duración del periodo de calentamiento) ubicándose cerca de los 300°C (ver **Fig. 1-5**) [6]. La degradación térmica dependiente del tiempo de la madera se conoce como la velocidad de carbonización (β), y se define como la relación entre la distancia de la línea de carbonización desde la superficie de la pieza original y el tiempo de duración del fuego [1].

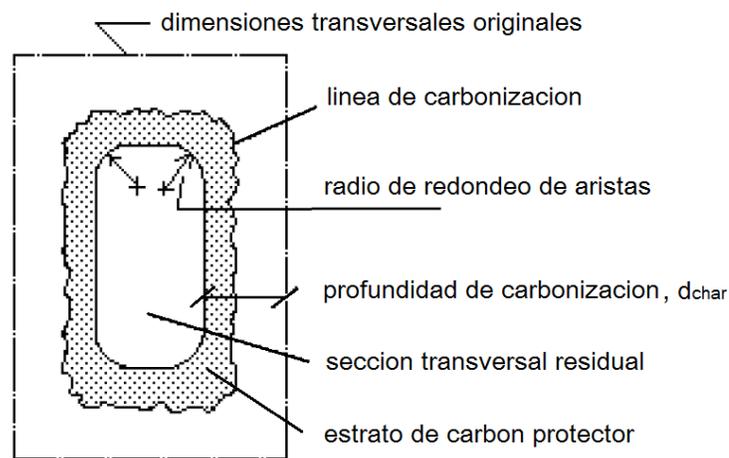


Fig. 1-4. Características de la madera carbonizada. Ref. [6]

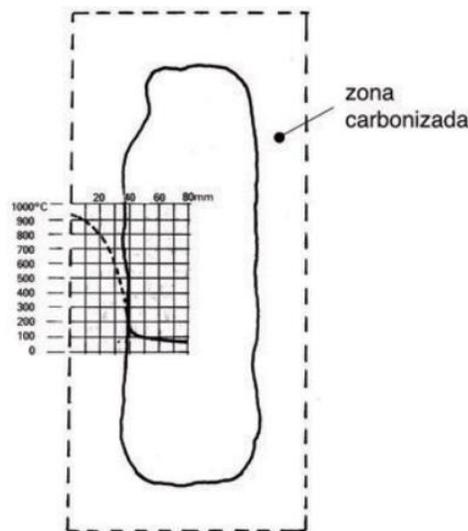


Fig. 1-5. Desarrollo típico de temperatura a través de una pieza de madera en combustión (Ensayo de cámara de combustión). Ref. [6]

En las situaciones de incendios habituales la tasa de penetración de la carbonización hacia el interior de una pieza de madera es relativamente uniforme en el tiempo, principio que rige los métodos numéricos de diseño y verificación al fuego de las estructuras de madera. La eficiente utilización de la madera en construcciones que deben satisfacer exigencias específicas de resistencia al fuego exige conocer, con confiabilidad, el avance de la carbonización en las superficies expuestas a las llamas. Este valor se emplea para calcular las reducciones de las dimensiones que experimenta la sección transversal de una pieza durante el incendio.

En Chile el estudio más completo que se ha realizado en este ámbito corresponde a la memoria de titulación del Ingeniero Civil Alejandro Ramírez desarrollada en el Laboratorio de Incendios de IDIEM de la Universidad de Chile, donde midió las velocidades de carbonización en cuarterones de madera aserrada de cuatro especies madereras: álamo, pino radiata, roble, coihue y madera laminada de pino radiata). Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla a modo de referencia.

Tabla 1-11. Velocidades de carbonización medidas en IDIEM. Ref. [6]

Especie maderera	Escuadría mm*mm	Contenido de Humedad [%]	Densidad normal [kg/m ³]	Velocidad de carbonización mm/min
álamo	97/97	23	340	1,08
Pino radiata	90/90	18	460	0,87
Roble	154/154	24	695	0,69
Coihue	144/144	20	730	0,71
MLE pino radiata	126/126	17	570	0,83

La norma europea EN 1995-1-2 proporciona reglas para el diseño al fuego de estructuras de madera solicitadas en tracción, compresión y flexión. El diseño estructural está basado en el modelo de König et al. y debe usarse para calcular la resistencia al fuego de estructuras livianas de madera [1]. En el cálculo de elementos bajo la consideración de una resistencia al fuego específica, se determinan secciones de madera de dimensiones suficientes como para que después de transcurrido un determinado lapso desde el inicio del incendio (t_f) la sección transversal remanente resulte capaz de resistir las cargas que la solicitan. En general, para el diseño resistente al fuego de un elemento de madera, la sección transversal original se debe reducir por la profundidad de carbonización (d_{char}) para el cálculo de las propiedades estáticas de la sección remanente.

$$d_{char} = \beta \cdot t_f$$

Un método simplificado asume una sección residual rectangular (ver **Fig. 1-6**) prescindiendo de los efectos del redondeo de aristas e incorporando implícitamente esta condición en un valor incrementado de la velocidad de carbonización. Esta última adquiere así un carácter nominal designándosele β_n . En **Tabla 1-12** se muestran los valores de la velocidad de carbonización nominal especificados en la norma EN 1995-1-2.

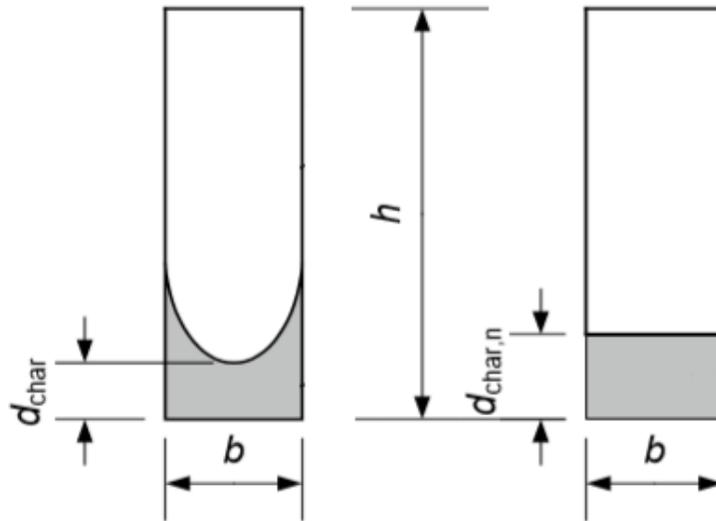


Fig. 1-6. Izquierda: sección residual y capa carbonizada real. Derecha: sección residual equivalente y profundidad de calcinación nominal. Ref. [1]

Tabla 1-12. Velocidades de carbonización efectiva normal a la fibra β_n . Ref. [6]

Material	Densidad característica, ρ_k	β_n [mm/min]
Madera aserrada conífera	$\rho_k \geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,8
MLE de coníferas	$\rho_k \geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,7
Madera aserrada y MLE de latifoliadas	$\rho_k \geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,7
Madera aserrada y MLE de latifoliadas	$\rho_k \geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,55

Una estimación más precisa de la geometría de la sección transversal residual asume como circular la forma de la línea de carbonización en el redondeo de las aristas (ver **Fig. 1-6**) con un radio igual a la profundidad de carbonización ($d_{char,0}$) lo que permite utilizar velocidades de carbonización unidimensional β_0 menos intensas. Normalmente esta consideración tiene una influencia muy limitada en la resistencia y puede por lo tanto ser despreciada [5].

Cuando la madera se somete a temperaturas elevadas, sus propiedades mecánicas experimentan reducciones. En esta norma el efecto de la temperatura media de la sección transversal residual se calcula numéricamente en forma separada para flexión, compresión y tracción (incluyendo el Módulo de Elasticidad) y se integra en forma de factores de reducción para cada propiedad mecánica.

1.5 Diseño de elementos constructivos de madera inicialmente protegidos de la exposición al fuego

Los elementos desprotegidos comienzan a carbonizarse inmediatamente cuando son expuestos al fuego (línea 1 en **Fig. 1-7**). Una forma de retardar efectivamente el inicio del proceso de carbonización consiste incorporar revestimientos en forma de tableros de materiales de madera, colchonetas de material aislante o placas de yeso-cartón. Para elementos protegidos, la carbonización se divide en diferentes fases. La **Fig. 1-7** muestra la variación de la profundidad de carbonización en el tiempo, donde t_{ch} es el tiempo de inicio de carbonización, t_f es el tiempo de falla del revestimiento y t_a es el tiempo cuando la profundidad de carbonización es 25 mm. La velocidad de carbonización difiere significativamente antes y después de la caída del revestimiento protector, por lo tanto, t_f significa una importante característica para el diseño.

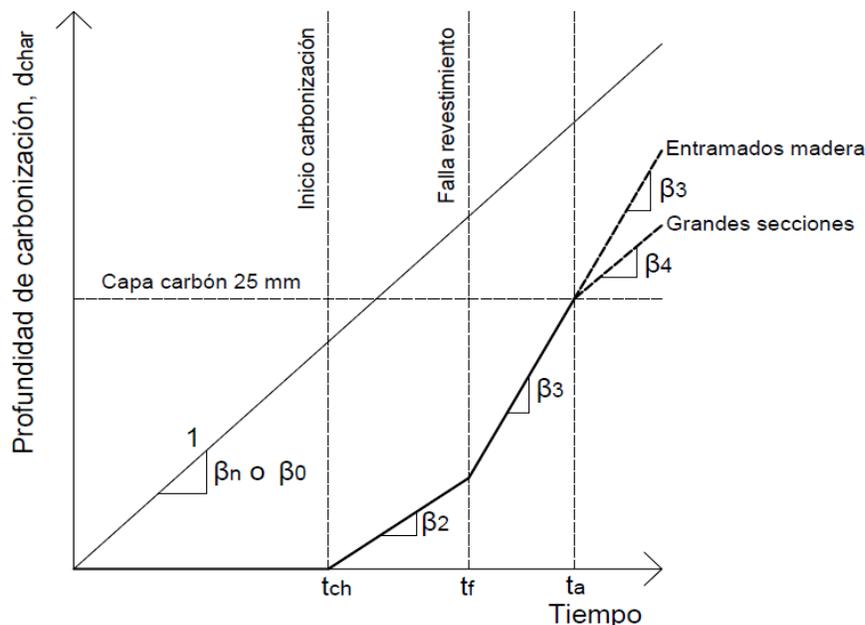


Fig. 1-7. Velocidades de carbonización en superficies inicialmente protegidas.

1.5.1 Velocidades de carbonización, β

EN 1995-1-2 define velocidades de carbonización para las distintas fases del incendio:

- Fase de protección ($t_{ch} \leq t \leq t_f$), β_2

La carbonización puede comenzar antes de la falla de la protección, pero cuando esta permanece en su lugar luego del inicio de carbonización, la carbonización se desarrolla a una tasa reducida en comparación con la velocidad de carbonización de elementos desprotegidos (**Tabla 1-12**). La velocidad de carbonización antes de la falla en tableros de yeso-cartón de fabricación nacional debe evaluarse en base a ensayos.

$$\beta_2 < \beta_n \text{ (o } \beta_0)$$

- Fase de post protección ($t_f \leq t \leq t_a$), β_3

Después de la falla del revestimiento, la carbonización es rápida debido al efecto combinado de las altas temperaturas a la que queda expuesta la superficie de madera y la insuficiente protección por parte de la capa de carbón en formación. EN 1995-1-2 considera para estos efectos ponderar la velocidad de carbonización indicada en **Tabla 1-12** por el factor $k_3 = 2$.

$$\beta_3 = k_3 \cdot \beta_n \text{ (o } k_3 \cdot \beta_0\text{)}$$

- β_4 ($t \geq t_a$)

Para grandes secciones transversales, hay un tiempo de consolidación, t_a , correspondiente al tiempo requerido para la formación de una capa protectora de carbón de espesor 25 mm, condición que permite considerar que la pieza de madera se encuentra suficientemente protegida como para que las velocidades de carbonización disminuyan a los valores de **Tabla 1-12**. Las secciones pequeñas, como las estudiadas en este trabajo, no tienen este tiempo de consolidación por lo que su carbonización continua a una tasa rápida β_3 .

$$\beta_4 = \beta_n \text{ (o } \beta_0\text{)}$$

1.5.2 Inicio de carbonización, t_{ch}

EN 1995-1-2 entrega información sobre la determinación del tiempo de inicio de carbonización detrás de la protección aplicada (tableros de materiales de madera, paneles de madera, aislamiento de lana mineral, tableros de yeso-cartón tipos A, H y F según la norma EN 520) cuya validez en nuestro territorio se debería corroborar. El método aditivo de componentes presentado en **1.3** ofrece soluciones precisas para una gran variedad de materiales donde el tiempo de inicio de carbonización puede ser calculado como:

$$t_{ch} = \sum t_{prot,i}$$

Es decir, la suma de los tiempos de protección de las i capas que protegen al elemento de madera, con $t_{prot,i}$ calculado según la sección **1.3**, tomando en cuenta los coeficientes de posición relevantes.

1.5.3 Tiempo de falla de los revestimientos de protección de yeso-cartón, t_f

La falla del revestimiento se caracteriza por el desprendimiento físico del mismo y puede resultar de la degradación del material del revestimiento, insuficiente longitud de penetración del sujetor en la madera no carbonizada o un insuficiente espaciamiento en la disposición de los sujetores. La longitud requerida del sujetor, $l_{f,req}$ se debe calcular como:

$$l_{f,req} = h_p + d_{char} + l_a$$

Donde:

h_p [mm]: espesor del revestimiento;

d_{char} [mm]: profundidad de calcinación en el elemento de madera;

l_a : longitud mínima de penetración del sujetor en la madera no calcinada. Al menos 10 mm.

EN 1995-1-2 proporciona información limitada para determinar los tiempos de falla de capas protectoras de paneles de madera, tableros de materiales de madera. Sin embargo, no existe una expresión genérica del tiempo de falla para placas de yeso-cartón puesto que no hay una clasificación termo-mecánica de sus propiedades [5].

1.6 Objetivo del trabajo

El mejoramiento de los procesos y el uso racional de los recursos es hoy en día un tema clave en las organizaciones a nivel mundial. La verificación de la resistencia al fuego de las estructuras de madera por medio de ensayos en laboratorio podría ser reemplazada por modelos de cálculo, los que se han tornado cada vez más habituales, representando adicionalmente una alternativa de menor costo y más flexible. Aunque ha habido una importante investigación y desarrollo de modelos a nivel mundial en el campo de la protección contra incendios, es una conclusión general que los avances nacionales se quedan muy atrás. La construcción en madera presenta beneficios a los cuales se debiese dirigir el foco de la edificación sustentable en Chile y es posible, para estos efectos, hacer uso de la experiencia acumulada en otros países.

La motivación de este trabajo de título es implementar el método aditivo de componentes mejorado para evaluar el desempeño de la función confinante de placas de yeso-cartón de fabricación chilena como parte de una solución constructiva resistente al fuego, derivar expresiones para su cálculo y con esto avanzar en el diseño estructural resistente al fuego de estructuras de madera en Chile.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Norma EN 1995

Los *Eurocódigos estructurales* son un conjunto de 10 normas europeas para la ingeniería, redactadas por el *Comité Europeo de Normalización* (CNE) que pretenden unificar criterios y normativas en las materias de diseño, cálculo y dimensionado de estructuras para edificación. Eurocódigo 5 (EN 1995) es la norma que regula el diseño de estructuras de madera (madera sólida, aserrada, cepillada o en forma de poste, madera laminada encolada o productos estructurales a base de madera). Esta subdividido en dos partes: EN 1995-1 General / EN 1995-2 Puentes. A su vez EN 1995-1 consta de dos partes, de las que EN 1995-1-2 se refiere al diseño de métodos pasivos de protección de estructuras de madera para la situación accidental de exposición al fuego, entregando las reglas de diseño para la verificación de funciones estructurales y de compartimentación.

Las exigencias básicas para la compartimentación del fuego de esta norma establecen que: donde se requiera compartimentar el fuego, los elementos confinantes de la envolvente del compartimento del fuego deben ser diseñados y construidos en forma tal que puedan mantener su función confinante durante la exposición relevante al fuego. Cuando resulte relevante esto debe incluir el asegurar que:

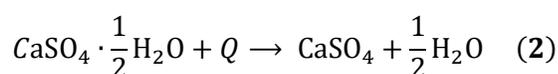
- no se produce la falla de integridad (Criterio E);
- no se produce la falla de aislación (Criterio I);
- se limita la radiación térmica desde la cara no expuesta. [7]

El Criterio de Aislación, I, se asume satisfecho cuando el incremento promedio de temperatura sobre la superficie no expuesta al fuego de la componente constructiva se limita a 140 °C, y el incremento máximo de temperatura en cualquier punto de dicha superficie no excede 180 °C (para una exposición al fuego según la curva estándar temperatura-tiempo), previniéndose de esta forma la inflamación de objetos en el compartimento vecino. Este mismo criterio se establece en NCh935/1.

Una extensa experiencia acumulada en ensayos a escala real de entramados de paredes y pisos ha permitido la definición de algunas reglas relativas al detallado de estas componentes constructivas que han sido incluidas la norma EN 1995-1-2. De esta forma se asume que se cumple con el Criterio E (integridad) cuando se ha cumplido con el Criterio I (aislación) y los tableros permanecen fijos a la estructura de madera en la cara no expuesta al fuego. Además, se puede asumir que cuando se cumple con el Criterio I, no existe riesgo de propagación del fuego debido a la radiación térmica [5].

2.2 Termoquímica del yeso

Desde un punto de vista químico, las placas de yeso-cartón consisten en una matriz cristalina de sulfato de calcio combinada con dos moléculas de agua, conocida como sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Aproximadamente 21% del peso corresponde a agua y en adición, el yeso contiene cerca de 3% de humedad en condiciones ambientales. El contenido de humedad de equilibrio depende de la temperatura ambiente y la humedad relativa del aire [8]. El aumento de temperatura induce en el yeso un proceso de deshidratación en dos reacciones reversibles de descomposición, cercanas en temperatura, donde libera agua y se convierte en anhidrita (CaSO_4). Este proceso se describe por medio de las siguientes reacciones:



Durante la primera reacción, se libera el 75% del agua y con mayor aumento de la temperatura, el 25% restante también se elimina [8]. La temperatura a la que la deshidratación comienza y finaliza depende fuertemente de la tasa de calentamiento y la presión de vapor. Un estudio de la descomposición del yeso usando análisis termogravimétrico (TGA) analizó la influencia de este parámetro en la temperatura de comienzo de la primera deshidratación y la temperatura de término de la segunda. Los resultados se resumen en **Tabla 2-1**. Se observa, en general, que un aumento en la tasa de calentamiento produce un incremento en el rango de temperatura de descomposición.

Tabla 2-1. Valores termogravimétricos para la deshidratación del yeso a diferentes tasas de calentamiento. Ref. [9]

Heating rate/ $^{\circ}\text{C min}^{-1}$	Temperatures of maximum mass loss rate		Onset 1 st event/ $^{\circ}\text{C}$	Endset 2 nd event/ $^{\circ}\text{C}$	Temp. change/ $^{\circ}\text{C}$
	1 st event	2 nd event			
2	131.4	147.6	119.17	153.3	139.21
5	145	162.92	131.8	170.9	153.1
10	159	184.5	144.5	195.8	175.5
20	172.3	201.67	156.7	216.9	190.0
40	190.3	223	174.8	244.32	209.0

Una tercera reacción ocurre a mayores temperaturas cuando la estructura molecular cristalina soluble se reorganiza en un estado insoluble de menor energía.



Esta reacción ocurre a una temperatura de alrededor de 400 $^{\circ}\text{C}$, temperatura que también corresponde a una contracción significativa de los paneles de yeso. La reestructuración molecular podría jugar un papel importante en el establecimiento de condiciones para el agrietamiento de la placa [10].

2.2.1 Conductividad térmica

La conductividad térmica es la propiedad física que mide la capacidad de conducción de calor de los materiales. Es muy sensible a la microestructura del material y está fuertemente influenciada por factores como la composición mineral, grado de cristalinidad, impurezas en la estructura cristalina, tamaño promedio de los granos, orientación y porosidad. La determinación de esta propiedad es por tanto bastante complicada; como resultado, los valores reportados por diferentes estudios varían ampliamente, especialmente a temperaturas sobre 500 °C; sin embargo, siguen una tendencia similar (ver **Fig. 2-1**).

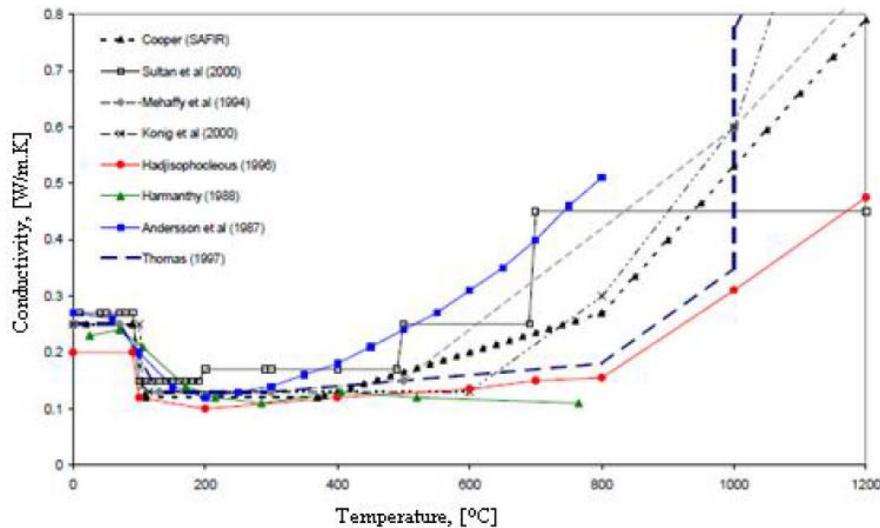


Fig. 2-1. Curvas de conductividad térmica en la literatura. Ref. [11]

Si un material es altamente cristalino en su estructura, como el yeso, su conductividad térmica es relativamente alta a temperatura ambiente, pero disminuye gradualmente al incrementarse la temperatura [12]. Durante el proceso de deshidratación la pérdida de moléculas de agua, las cuales son buenas conductoras térmicas, produce una fuerte disminución en la conductividad térmica en aproximadamente un 50%, aunque comienza a elevarse otra vez con incrementos de temperatura hasta alcanzar su valor inicial cerca de los 750 °C. Esto se debe al cambio de la estructura del yeso deshidratado y la mejora de la transferencia de calor conductivo [13].

El valor de la conductividad térmica cerca de los 400 °C se verá incrementado por la aparición de grietas de contracción en la placa, la que dependerá del tipo de fuego y placa. El agrietamiento puede ser más severo en un fuego con temperaturas iniciales que aumentan rápidamente [1].

La ablación es el proceso por el cual capas finas consecutivas de un material se desprenden a medida que el material se calienta, lo que reduce la integridad del material e incrementa enormemente la transferencia de calor. La ablación ocurre alrededor de los 700 °C para placas estándar y se retrasa hasta los 1000 °C si la placa está reforzada con fibras de vidrio [14].

2.2.2 Calor específico

Fig. 2-2 muestra los resultados de diferentes estudios en la determinación de esta propiedad. Estos indican que hay una gran variación entre los valores reportados en la literatura. Sabiendo que el agua se disocia del yeso en dos fases, es de esperar que el calor específico dependiente de la temperatura experimente dos peaks correspondientes a las dos reacciones de deshidratación del yeso a medida que la humedad se expulsa durante el calentamiento. Esos peaks representan la gran cantidad de energía consumida para disociar y evaporar el contenido de agua.

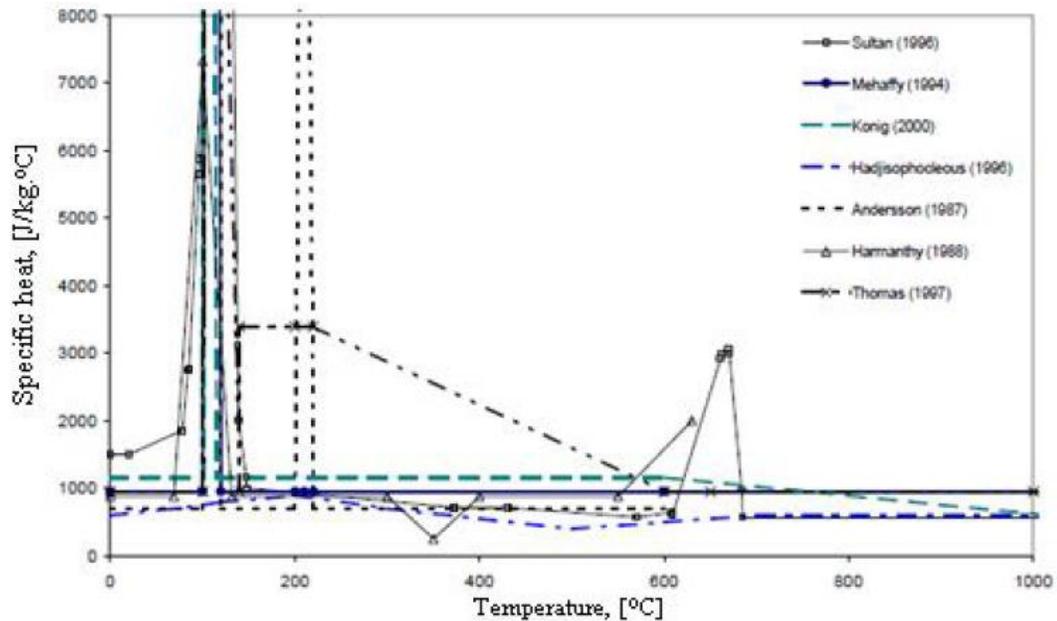


Fig. 2-2. Curvas de calor específico en la literatura. Ref. [11]

El primer peak representa las dos reacciones endotérmicas de deshidratación del yeso, la que tiene diferentes requerimientos de energía, dependiendo de la composición química de las placas. El segundo peak representa la descomposición del carbonato de magnesio. Basado en los resultados del TGA se asume que la reacción ocurre entre 600 y 750 °C. Su influencia en el desarrollo de la temperatura no es tan relevante ya que la reacción química ocurre a temperatura elevada y la entalpía de la reacción es relativamente baja [2]. Mediciones a distintas tasas de calentamiento muestran que en general el efecto del incremento de esta resulta en un desplazamiento de los peaks hacia temperaturas mayores y en una agudización de su forma. Para tasas de calentamiento de 20 °C/min el peak ocurre cerca de los 140 °C. Los resultados también muestran que los valores de los peak son mayores para menores tasas de calentamiento [12].

Para rangos de temperatura fuera de la región de deshidratación (región de los peaks) el calor específico de las placas no varía demasiado y se mantiene casi constante oscilando entre 0,6 y 1,0 kJ/kg·K. Esto se relaciona bien con resultados de distintos análisis termogravimétricos en placas que indican que para temperaturas entre 200 °C y cerca de 550 °C no ocurren reacciones químicas [13].

En la primera reacción de deshidratación el yeso es convertido en sulfato de calcio hemihidratado. Esta reacción comienza cerca de los 100 °C y se completa a unos 120 °C, pero este rango es afectado por la tasa de calentamiento. La energía requerida para esta primera deshidratación es 100 kJ por kilogramo de yeso [8]. El agua liberada requiere entonces más energía para evaporarse basada en el calor latente de evaporación del agua (2,26 MJ/kg). Como puede verse en (1), 75% del agua de cristalización es evaporada y como esta agua es el 21% de la masa entonces $0,75 \times 20,9 = 15,675\%$ de la masa total es agua. Por lo tanto, esta agua es evaporada con un requerimiento energético de $0,15675 \times 2260 = 354 \text{ kJ/kg}$ de yeso [14].

La segunda reacción de deshidratación ocurre alrededor de los 225 °C aunque este valor depende de la tasa de calentamiento. El calor de la segunda reacción es 50 kJ por kg de yeso, excluyendo la energía requerida para evaporar el agua disociada. Como puede verse en (2), 25% del agua de cristalización se vaporiza. Nuevamente como el 21% de la masa es agua, entonces $0,25 \times 0,21 = 5,225\%$ de la masa total es agua. Esta agua es entonces evaporada con un requerimiento energético de $0,05225 \times 2260 = 136 \text{ kJ/kg}$ de yeso [14]. La energía total bajo la curva puede diferir dependiendo de la cantidad total de agua libre y de enlace asumida en la placa.

Se ha informado que una débil reacción exotérmica tiene lugar alrededor de 450 °C atribuida a la transición de anhidrita III (soluble) a anhidrita II (insoluble) [13]. Los materiales que sufren reacciones exotérmicas pueden alcanzar valores negativos para el calor específico. Sin embargo, el incremento de la tasa de calentamiento previene la ocurrencia de valores negativos [12].

Se ha demostrado en [15], que dependiendo del contenido de diferentes impurezas en el yeso (carbonato de calcio CaCO_3 y carbonato de magnesio MgCO_3) una descomposición endotérmica tiene lugar a temperaturas alrededor de 600 y 750 °C. Su influencia en el desarrollo de la temperatura no es tan relevante pues la reacción química ocurre a elevada temperatura y tiene una baja entalpia de reacción [2].

2.2.3 Densidad

Diversos estudios realizan análisis termogravimétricos en el yeso para estudiar la pérdida de masa como función de la temperatura (ver **Fig. 2-3**). Los resultados para tasas de calentamiento de 20 °C/min realizados en [15] muestran un primer decaimiento en la densidad entre 100 °C y 190 °C. Esta disminución corresponde a las dos reacciones de deshidratación consecutivas. Hay un segundo descenso en la curva entre 600 y 800 °C que corresponde a la descomposición de carbonatos de calcio y magnesio.

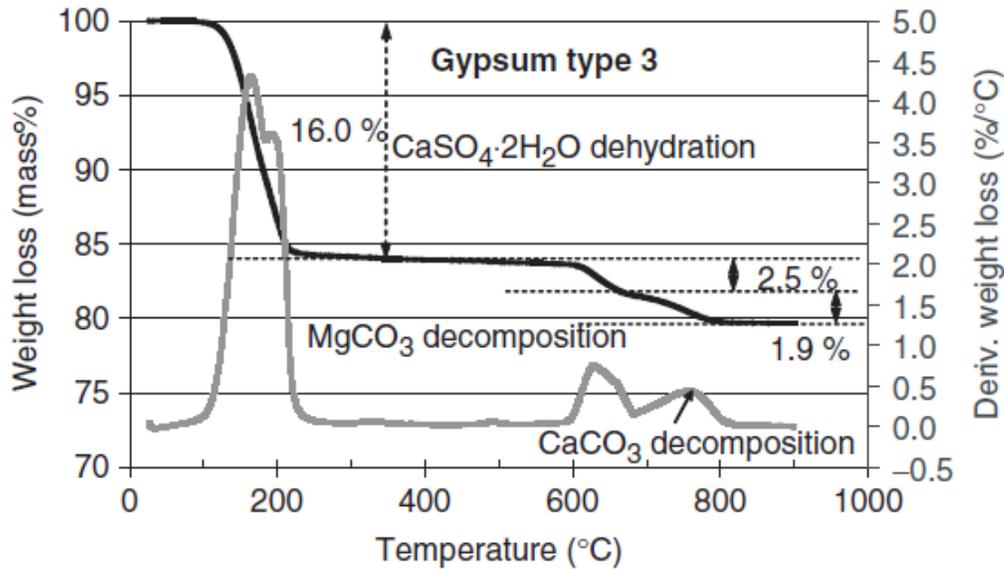


Fig. 2-3. Curva de análisis termogravimétrico del yeso con impurezas de carbonatos de calcio y magnesio. La línea más oscura representa la pérdida de masa. Ref. [15]

La altura del decaimiento es proporcional al porcentaje en peso del correspondiente componente en la composición de la placa.

Un estudio termogravimétrico a una tasa de calentamiento de 20 °C/min llevado a cabo en el Instituto de Ingeniería Geotécnica de ETH de Zúrich, determinó una pérdida de alrededor del 17% de la masa inicial al finalizar la deshidratación del yeso y una segunda pérdida del 5% entre 600 °C y 750 °C [2]. Un incremento en la tasa de calentamiento usualmente cambia la temperatura de la reacción a valores mayores y reduce el intervalo de temperatura en las curvas termogravimétricas [12].

2.3 Propiedades térmicas de la madera y paneles compuestos de madera

Cuando la madera se expone a altas temperaturas, ocurre un proceso de descomposición térmica (pirólisis) acompañado de pérdida de peso y sección transversal útil. En el proceso de pirólisis se distinguen tres etapas: la etapa temprana donde se evapora el contenido de agua, pirólisis principal y carbonización. La mayor pérdida de peso ocurre en la etapa de pirólisis principal.

La degradación térmica de la madera es dependiente de la tasa de calentamiento y la temperatura [16]. La **Fig. 2-4** muestra los resultados de un análisis termogravimétrico (TGA) realizado en madera de pino a distintas tasas de calentamiento. Como se ve en esta figura, las curvas de pérdida de peso son similares a tasas de calentamiento bajas y altas. La mayor influencia se produce en la etapa de pirólisis principal, la cual se observa entre 200 y 350 °C a una tasa de calentamiento de 5 °C/min y entre 200 y 400 °C a una tasa de 50°C/min.

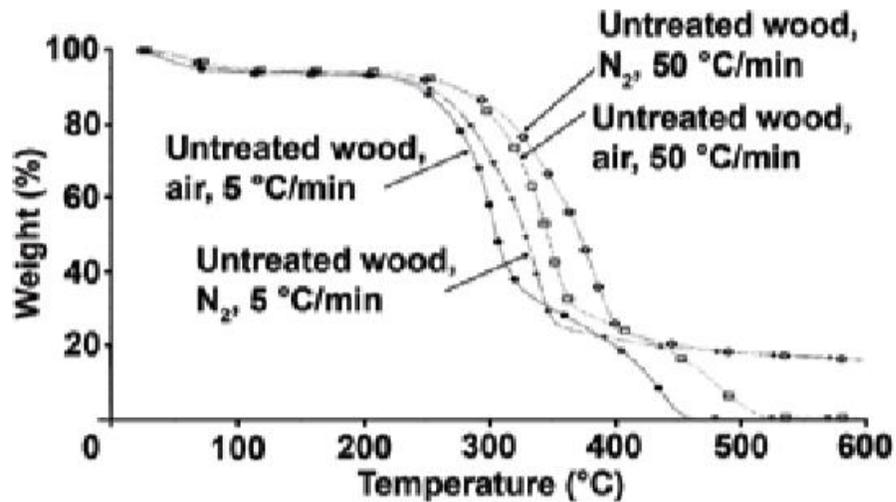


Fig. 2-4. Análisis termogravimétrico (TGA) de madera de pino a 5 °C/min y 50 °C/min. Ref. [17]

La temperatura también afecta las propiedades térmicas de la madera. Para efectos de diseño estructural contra incendios, la norma EN 1995-1-2 en su anexo B proporciona los valores de densidad, conductividad térmica y calor específico de la madera en función de la temperatura (**Figs. 2-5 a 2-7**) para exposición a incendio estándar. Los valores bajo 350°C representan las propiedades de la madera y sobre 350°C representan las propiedades de la capa de carbón.

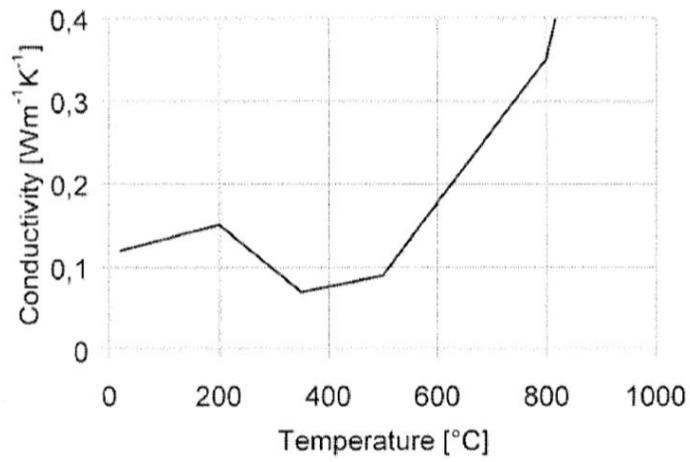


Fig. 2-5. Relación temperatura-conductividad térmica para la madera y la capa de carbón. Ref. [18]

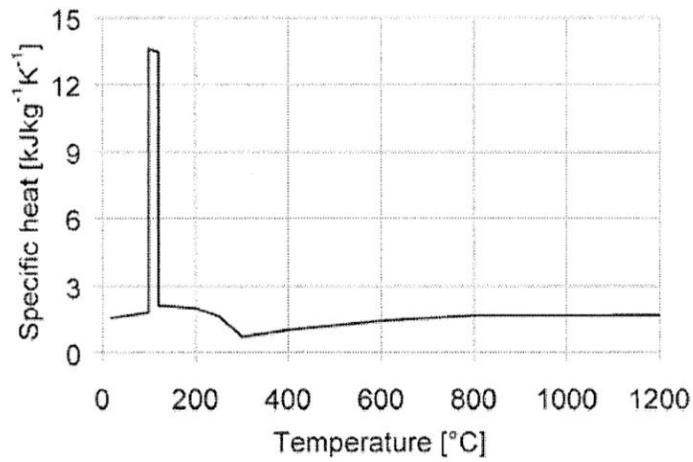


Fig. 2-6. Relación temperatura-calor específico para la madera y el carbón. Ref. [18]

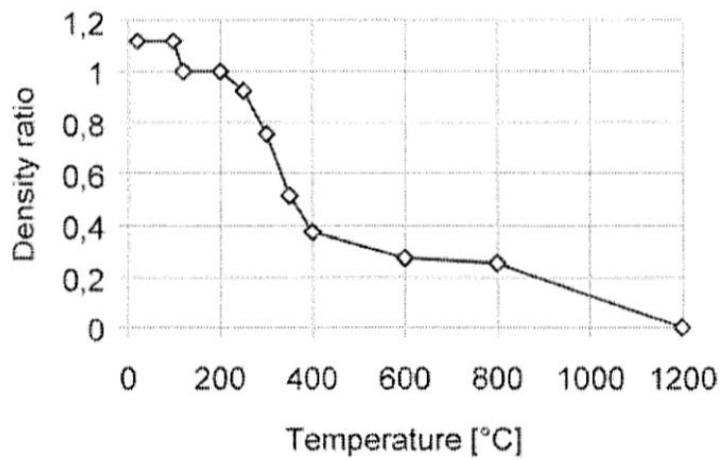


Fig.2-7. Relación temperatura- razón de densidad a densidad seca para madera con 12% de humedad inicial. Ref. [18]

Los materiales compuestos en base a madera abarcan desde tableros de fibra hasta vigas laminadas (**Fig. 2-8**). Son fabricados principalmente de elementos de madera (94% o más de la masa) con un pequeño porcentaje de material adhesivo y aditivos. Los elementos básicos utilizados en su producción comprenden una variedad de tamaños y formas; típicamente incluyen fibras, hebras, partículas o chapas de madera. Las propiedades de estos materiales se pueden modificar cambiando el tamaño y geometría de los elementos o estratificándolos. La **Fig. 2-9** muestra una clasificación de estos materiales.

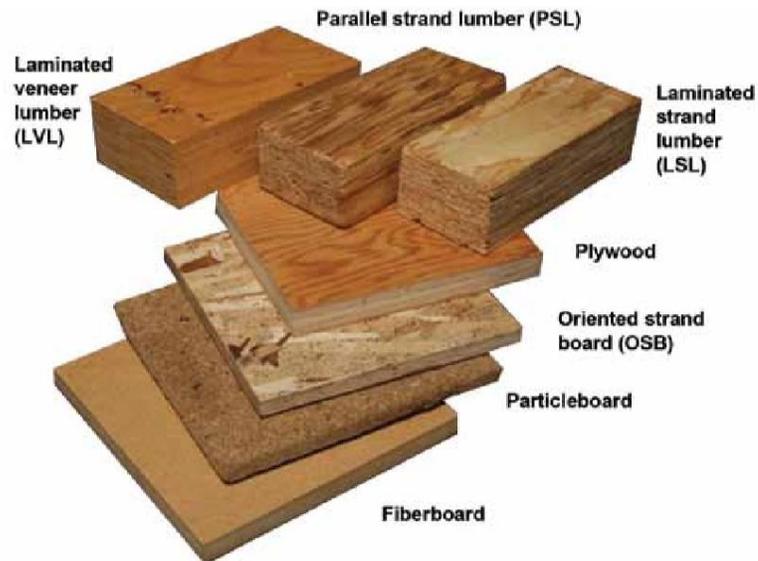


Fig. 2-8. Ejemplos de varios materiales compuestos en base a madera. Ref. [19]

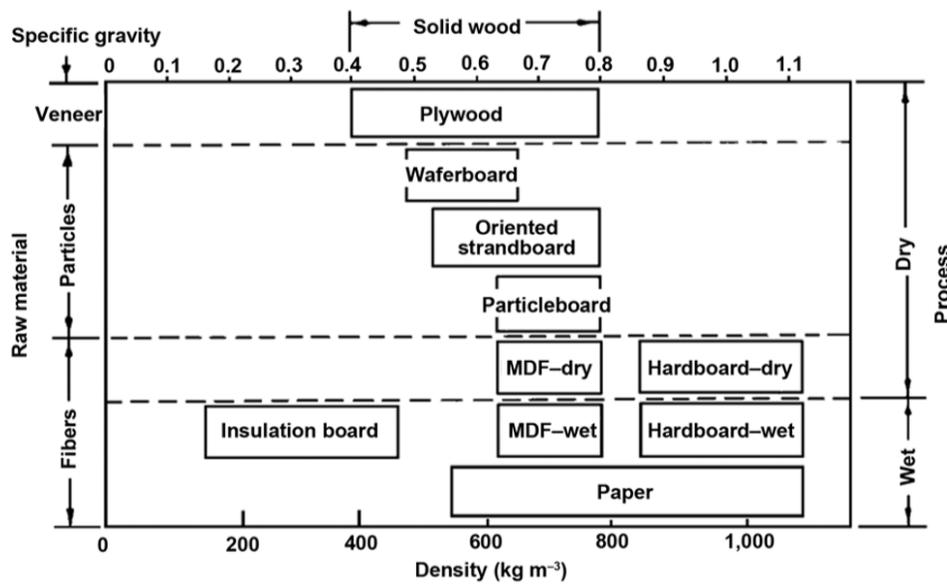


Fig. 2-9. Clasificación de paneles compuestos de madera por tamaño de elemento, densidad y método de procesamiento. Ref. [19]

El tablero OSB (oriented strandboard) es un material formado por capas de virutas de madera de gran tamaño, unidas entre sí con resinas adhesivas, colocadas en direcciones transversales y comprimidas a una presión específica en diversos perfiles de temperatura [20]. Los paneles OSB usualmente están formados por tres capas. Las caras externas tienen virutas más largas alineadas en la dirección larga del panel y la capa central contra alineada con virutas más pequeñas. Tal disposición de capas le da al panel OSB buenas propiedades mecánicas y rigidez para uso estructural.

Los tableros de partículas o aglomerados se obtienen de madera reducida a pequeñas virutas o aserrín, aplicando adhesivo a las partículas y consolidando con presión y calor. El tablero de partículas se hace típicamente en capas. Pero a diferencia del OSB, sus caras generalmente consisten en partículas finas de madera y el núcleo está hecho de material más grueso. El resultado es una superficie más lisa para laminar, pintar o revestir [19]. Son especialmente adecuados para fabricar muebles.

Los tableros de fibra se construyen de maderas que han sido reducidas a sus elementos fibrosos básicos y posteriormente reconstituidos aplicando resina y otros aditivos para formar un material estable y homogéneo. Puesto que la madera es fibrosa por naturaleza, el tablero de fibra explota la resistencia inherente de la madera en mayor medida que el tablero de partículas.

Debido a que la madera es un material higroscópico, absorbe humedad del ambiente. Eventualmente alcanzará un contenido de humedad de equilibrio con ese ambiente. La cantidad de agua tiene un profundo efecto en casi todas las propiedades de la madera, incluidas sus propiedades térmicas [20]. El contenido de humedad de la madera y los productos de madera se define como la masa de agua en el elemento, expresada como una fracción, generalmente un porcentaje, de la masa seca del elemento [21]. Los tableros en base a madera son, en masa, principalmente madera y por lo tanto muestran una respuesta a condiciones atmosféricas similar a esta. La **Tabla 2-2** muestra los contenidos de humedad de equilibrio de tableros compuestos de madera. La tabla sugiere que el contenido de humedad de estos materiales es mayor con niveles más altos de humedad relativa.

Tabla 2-2. Contenido de humedad de equilibrio (%) de tableros compuestos de madera a temperatura ambiente y humedad relativa indicada. Ref. [21].

RH	Constr. ply-wood APA ^a	Constr. ply-wood NIST ^b	OSB APA	OSB NIST	Particle-board (interior) MSU ^c	Particle-board (interior) NIST	Fiber-board sheathing FPL ^d	Fiber-board sheathing NIST	Hardboard FPL ^e	Hardboard siding FPL ^f
10	1.2	2.3	0.8	1.7	3	1.9		2.1-2.3		
20	2.8	3.7	1.0	3.0	5-6	3.1		2.5-3.6		
30	4.6	4.8	2.0	4.1	6.2-7.5	4.1	3.4-6.1	2.9-4.7	2.4-5.3	
40	5.8	5.9	3.6	5.3	7-9.5	5.2		3.4-5.9		5-7
50	7.0	7.2	5.2	6.6	8-10	6.3	4.4-7.7	4.0-7.4	3.2-6.8	
60	8.4	8.7	6.3	8.1	8.5-11	7.7		4.9-9.3		7-10
70	11.1	10.8	8.9	10.1	9.5-12.2	9.8		6.2-12.0		
80	15.3	13.7	13.1	12.9	10.5-14	12.2		8.4-16.6	8.5-11.5	9-13.5
90	19.4	18.5	17.2	17.3	14-16	16.5	9.2-16.5		9.0-14.9	

En Ref. [20] se estudian las propiedades térmicas de paneles OSB versus su contenido de humedad de equilibrio. Se utiliza el método no estacionario EDPS (Extended Dynamic Plane Source) para determinar las propiedades térmicas a diferentes contenidos de humedad en el rango de 0% a 10% de paneles OSB/3 (para estructura de carga en ambiente húmedo) de densidad promedio 537 kg/m³. En **Tabla 2-3** se presentan los valores obtenidos de difusividad térmica (a), conductividad térmica (λ) y calor específico (c) junto con el contenido de humedad (MC). La temperatura ambiente durante las mediciones fue de 21 ± 1 °C.

La relación encontrada entre el contenido de humedad y las propiedades térmicas de los paneles ensayados puede ser descrita por las siguientes formulas:

$$\lambda = 0.0828 + 0.0033 \cdot MC$$

$$c = 1280.4 + 31.3 \cdot MC$$

Se observa que el valor de conducción térmica y calor específico a temperatura 21 ± 1 °C aumenta con el contenido de humedad.

Tabla 2-3. Valores de la dependencia del contenido de humedad en las propiedades termo físicas del OSB. Ref. [OSB].

MC (%)	a (mm ² ·s ⁻¹)	λ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	c (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
0.00	0.120 ± 0.002	0.083 ± 0.001	1287.6 ± 17.9
0.00	0.120 ± 0.003	0.083 ± 0.002	1326.6 ± 28.1
0.00	0.121 ± 0.004	0.086 ± 0.003	1275.8 ± 22.9
0.00	0.121 ± 0.003	0.086 ± 0.003	1282.5 ± 45.9
4.79	0.122 ± 0.004	0.096 ± 0.005	1411.9 ± 41.3
4.87	0.126 ± 0.004	0.096 ± 0.003	1405.9 ± 64.4
4.78	0.116 ± 0.005	0.095 ± 0.003	1446.3 ± 30.3
5.00	0.126 ± 0.003	0.096 ± 0.004	1435.2 ± 57.3
4.85	0.127 ± 0.002	0.101 ± 0.005	1372.9 ± 48.7
4.90	0.121 ± 0.003	0.097 ± 0.003	1376.9 ± 18.9
7.97	0.122 ± 0.002	0.111 ± 0.003	1578.1 ± 25.1
7.83	0.123 ± 0.001	0.107 ± 0.003	1561.4 ± 33.5
7.82	0.121 ± 0.002	0.111 ± 0.006	1565.6 ± 58.6
7.93	0.127 ± 0.002	0.106 ± 0.002	1523.7 ± 16.7
7.81	0.124 ± 0.005	0.110 ± 0.004	1494.4 ± 37.7
7.62	0.119 ± 0.003	0.109 ± 0.005	1536.3 ± 33.5
7.76	0.123 ± 0.004	0.111 ± 0.004	1477.7 ± 12.6
7.89	0.122 ± 0.002	0.111 ± 0.002	1578.1 ± 67.0
10.17	0.124 ± 0.003	0.117 ± 0.004	1615.8 ± 41.9

En Ref. [22] se determinan las propiedades térmicas de tableros de partículas y tableros de fibra de madera de Picea usando el método TPS (Transient Plane Source) en diferentes temperaturas y a diferentes contenidos de humedad. Los materiales ensayados corresponden a tableros de partículas de densidad seca 533 kg/m^3 y tableros de fibra de baja densidad (259 kg/m^3). Los resultados de las mediciones se presentan en las **Tablas 2-4** y **2-5** y de forma gráfica en las **Figs. 2-10** y **2-11**. Se observa que el comportamiento de las propiedades térmicas en función de la temperatura de tableros compuestos de madera es similar a la madera sólida y además, que el mayor contenido de humedad eleva el valor de estas propiedades a temperatura ambiente.

Tabla 2-4. Propiedades térmicas tablero aglomerado seco y LDF seco a diferentes temperaturas. Ref. [22].

Temperature °C	Conductivity (W/mK)	Diffusivity (mm ² /s)	Specific heat (MJ/m ³ K)	Heat capacity (kJ/kgK)
<i>Particleboard</i>				
20	0.164	0.179	0.92	1.66
75	0.186	0.162	1.15	2.07
105	0.191	0.154	1.24	2.25
149	0.184	0.122	1.52	2.74
<i>Low density fibre board</i>				
20	0.088	0.32	0.27	1.05
75	0.105	0.23	0.45	1.74
107	0.105	0.24	0.44	1.71
150	0.103	0.22	0.48	1.85

Tabla 2-5. Propiedades térmicas tablero aglomerado y LDF a 20 °C y diferentes contenidos de humedad. Ref. [22].

Moisture content [%]	Conductivity (W/mK)	Diffusivity (mm ² /s)	Specific heat (MJ/m ³ K)	Heat capacity (kJ/kgK)
<i>Particleboard</i>				
0	0.164	0.179	0.92	1.66
7	0.176	0.172	1.03	1.73
Difference [%]	7	4	11	4
<i>Low density fibre board</i>				
0	0.088	0.32	0.27	1.05
7	0.101	0.29	0.34	1.23
Difference [%]	23	10	21	25

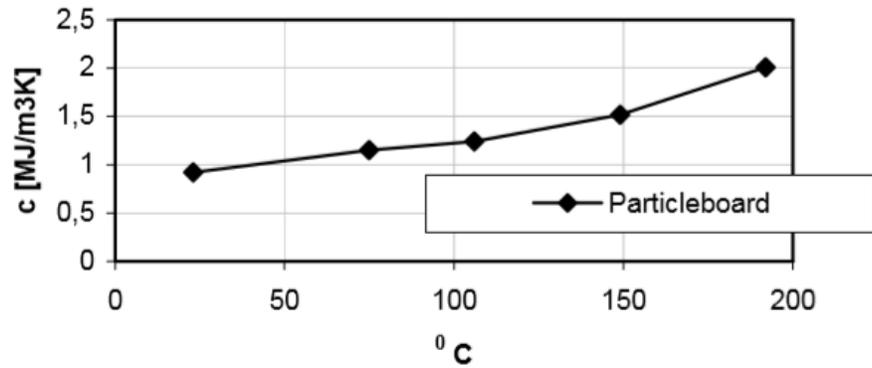
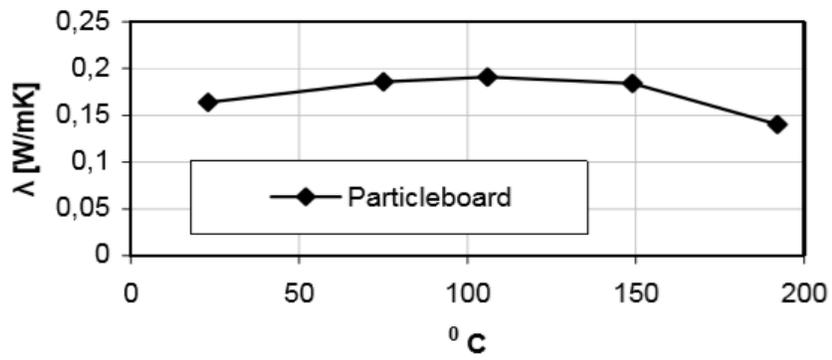


Fig. 2-10. Propiedades térmicas en función de la temperatura de tablero aglomerado. Arriba: conductividad térmica. Abajo: calor específico. Ref. [23]

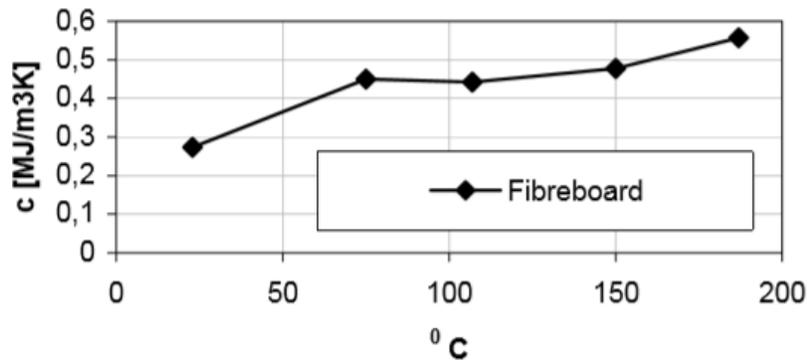
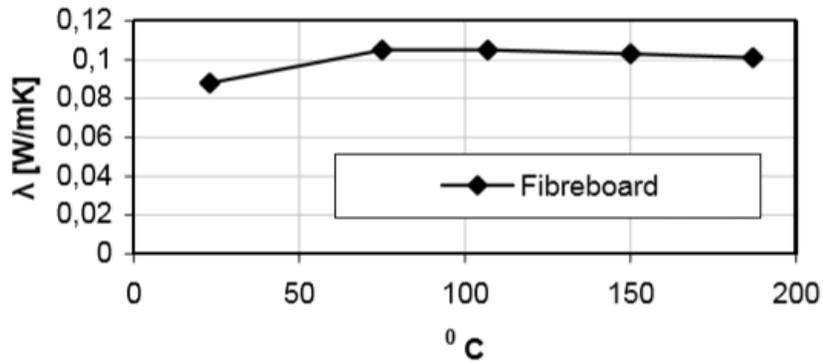


Fig. 2-11. Propiedades térmicas en función de la temperatura de tablero de fibra de baja densidad. Arriba: conductividad térmica. Abajo: calor específico. Ref. [23]

En Ref. [24] se estudia la influencia de la temperatura en la pérdida de masa de paneles de partículas tratados con retardantes de fuego mediante análisis termogravimétrico (TGA). Se ensayan tableros de densidad promedio 700 kg/m³ fabricados con un 7% de resina, a una tasa de calentamiento de 20°C/min. Los resultados se resumen en **Tabla 2-6** y **Fig. 2-12**. Se observa que la degradación térmica de tableros de partículas tratados (curvas D y E en **Fig. 2-12**) y no tratados (curva C) sigue un comportamiento similar al de la madera sólida. La primera pérdida de masa de los tableros no tratados tiene lugar entre 30 y 125°C, la segunda y más pronunciada entre 200 y 390 °C.

Tabla 2-6. Datos termo-analíticos de los tableros de partículas ensayados. Ref. [24].

Name code	Initial sample mass (mg)	Temperature range °C	Temperature peak °C	Mass loss e mass %	Residue sampl (%)
C (control)	10.017	30-124 125-391 392-492	53.3 331 464	5.67 63.14 24.08	4.932
D	10.089	30-158 159-377 378-492	51 321 431.3	6.11 54.61 28.35	8.881
E	10.045	30-144 145-384 385-492 30-132	53.3 312.3 433.7 51	5.47 53.57 27.18 5.54	10.732

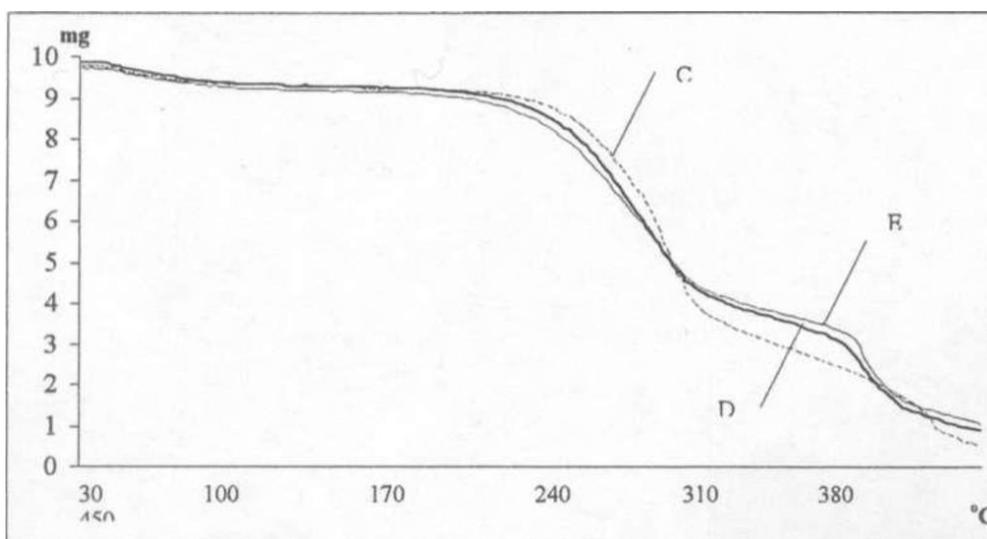


Fig. 2-12. Curvas termo gravimétricas de paneles de partículas tratados (D y E) y no tratados (C). Ref. [24]

2.4 Propiedades térmicas materiales aislantes

2.4.1 Lana Mineral

Las lanas minerales son cualquier material fibroso formado por hilado de minerales fundidos o materiales de roca. Son materiales incombustibles, que no absorben humedad u olores. La norma EN 1995-1-2 divide las lanas minerales en dos tipos. Lana de roca y lana de vidrio [5].

La lana de roca es una lana mineral fabricada principalmente de roca volcánica. Se comercializa en forma de paneles rígidos, semirrígidos, fieltros o mantas en densidades entre 26 a 200 kg/m³. La lana de roca es considerada como la única lana mineral resistente al fuego en EN 1995-1-2. Se supone que protege las estructuras incluso después de la caída del revestimiento protector en el lado expuesto al fuego [1]. La lana de vidrio es un material aislante de bajo peso que consiste en fibras de vidrio entrelazadas. La lana de vidrio tradicional no proporciona protección efectiva contra el fuego cuando falla el revestimiento y el material queda directamente expuesto al fuego. Las siguientes figuras muestran las propiedades térmicas de estos materiales en función de la temperatura.

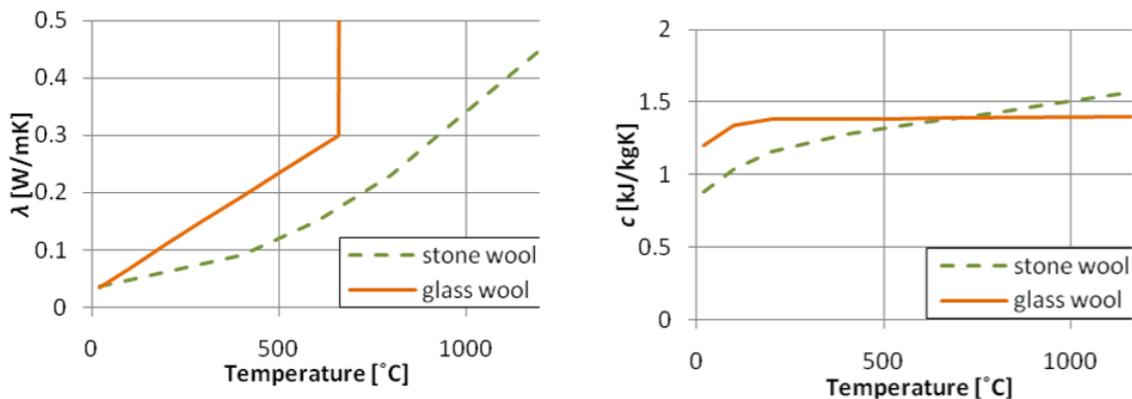


Fig. 2-13. Conductividad térmica (λ) y calor específico (c) de materiales aislantes. Ref. [1]

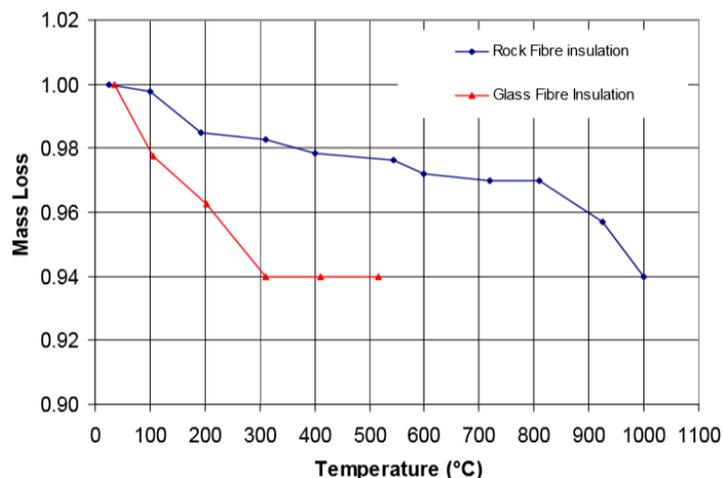


Fig. 2-14. Pérdida de masa con la temperatura de materiales aislantes. Ref. [12]

3. MARCO NORMATIVO EUROPEO DE PLACAS DE YESO-CARTÓN

Las normas europeas (EN) de construcción son documentos que han sido desarrollados por el *Comité Europeo de Normalización (CNE)*. Las normas EN son de cumplimiento voluntario y son documentos de uso común para todos los miembros del CEN: los organismos nacionales de normalización de los 27 países de la Unión Europea, Reino Unido, la República de Macedonia del Norte, Serbia, Turquía, más tres países de la Asociación Europea de Libre Comercio (Islandia, Noruega y Suiza).

3.1 EN 520: *Planchas de yeso-cartón- Definiciones, requisitos y métodos de ensayo [25]*

Esta norma europea especifica las características y rendimiento de las placas de yeso destinadas a uso en construcción. Contempla los requisitos y los métodos de ensayo de referencia para comprobar las siguientes características: dimensiones y tolerancias, comportamiento al fuego, permeabilidad al vapor de agua, propiedades acústicas, resistencia a la flexión y corte, resistencia al impacto, resistencia al agua y resistencia térmica.

3.1.1 Clasificación

Debido al amplio uso de las placas de yeso-cartón, varios tipos han sido desarrollados para satisfacer las necesidades de la industria de la construcción. Los tipos definidos en EN 520 se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3-1. Tipos de placas de yeso-cartón según EN 520.

Tipo	Desempeño definido
A	Placa con una cara a la que se puede aplicar yeso o terminación adecuada
F	Tablero de protección contra incendios con cohesión mejorada del núcleo a altas temperaturas
H	Placa con reducida tasa de absorción de agua
E	Placa especialmente fabricada para ser usada como revestimiento en muros exteriores, no destinada a recibir decoración ni permanecer expuesta a condiciones climáticas permanentemente
P	Tableros que tienen una cara destinada a recibir yeso o combinarse con otros materiales
D	Placa con densidad controlada
R	Placa con mayor resistencia a la flexión en ambos sentidos
I	Placa con dureza superficial

3.1.2 Requisitos de resistencia a la flexión

Las cargas de rotura por flexión de placas de yeso-cartón tipos A, D, E, F, H, I determinada de acuerdo con el método de ensayo descrito en **3.1.5**, no deben ser menores que los valores dados en **Tabla 3-2**. Adicionalmente, ningún ensayo individual deberá estar más del 10% debajo de los valores de dicha tabla.

Tabla 3-2. Carga de rotura por flexión de placas de yeso-cartón tipo A, D, E, F, H, I.

Espesor nominal [mm]	Carga de rotura por flexión [N]	
	Dirección transversal	Dirección longitudinal
9,5	160	400
12,5	210	550
15,0	250	650
<i>t</i>	$16,8 \cdot t$	$43 \cdot t$

3.1.3 Requerimientos adicionales de placas tipo H

La absorción superficial de agua y la absorción total de agua de la placa, determinadas según los métodos de ensayo descritos en **3.1.6** y **3.1.7** respectivamente, no deben ser mayores que los valores mostrados en **Tabla 3-3**.

Tabla 3-3. Requerimientos según categoría de absorción de agua.

Categoría de absorción de agua	Absorción superficial [g]	Absorción total [%]
H1	1,8	≤ 5
H2	2,2	≤ 10
H3	3,0	≤ 25

3.1.4 Requerimientos adicionales de placas tipo F

Cuando una placa tipo F se somete al ensayo de cohesión del núcleo a altas temperaturas descrito en **3.2.8**, ninguna de las 6 muestras se debe romper.

3.1.5 Determinación de resistencia a la flexión

Probetas cortadas de las placas sometidas a una carga que se incrementa a una tasa controlada hasta que ocurra la falla. La resistencia a la flexión de la placa será caracterizada por la carga de rotura.

3.1.5.1 Preparación de las muestras

Cortar dos probetas de dimensiones $[(400 \pm 1,5) \times (300 \pm 1,5)]$ mm, al menos a 100 mm de los bordes de cada placa. Se toma una muestra en dirección longitudinal (L) y otra en dirección transversal (T) (ver **Fig. 3-1**).

Secar las probetas a (40 ± 2) °C hasta que dos pesadas sucesivas con 24 horas de diferencia difieran en menos del 0.1%. Realizar el ensayo dentro de los 10 minutos posteriores a la extracción del horno de secado.

3.1.5.2 Procedimiento

Colocar cada muestra en la máquina de carga, boca abajo en el caso de muestras longitudinales y boca arriba en el caso de muestras transversales sobre dos soportes redondeados a un radio entre 3 mm y 15 mm con los centros separados (350 ± 1) mm.

Aplicar la carga a una tasa de (250 ± 125) N/min en el centro ± 2 mm del tramo paralelo a los soportes por medio de una pletina con un radio de redondeo entre 3 mm y 15 mm hasta que se produzca la rotura.

Registrar cada valor de carga aproximado a la unidad más cercana y calcular la carga de rotura por flexión como el promedio de los valores longitudinales de la muestra o de los valores transversales.

El tiempo desde la aplicación de la carga hasta la falla de la muestra debe exceder los 20 s.

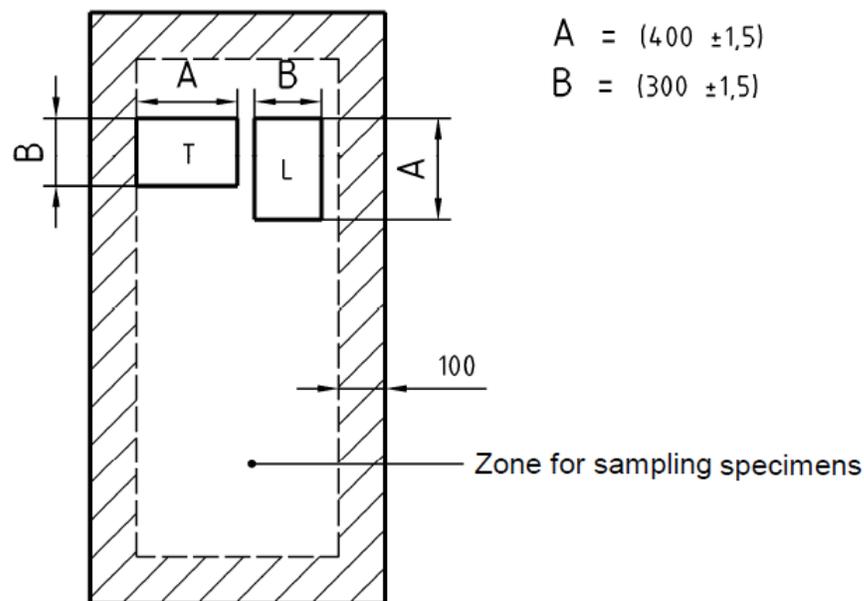


Fig. 3-1. Muestreo de probetas para determinar la carga de rotura por flexión.

3.1.6 Determinación de absorción superficial de agua

La superficie de una probeta acondicionada se expone al agua durante un tiempo fijo y se determina el aumento de masa.

3.1.6.1 Preparación de las muestras

Cortar dos probetas de dimensiones $[(125 \pm 1,5) \times (125 \pm 1,5)]$ mm de cada placa, una para un ensayo en la cara de la placa y otra para el ensayo en el dorso.

Secar las probetas a (23 ± 2) °C y (50 ± 5) % de humedad relativa hasta que dos pesadas sucesivas con 24 horas de diferencia difieran en menos del 0.1%. Acondicionar el aparato de Cobb (según EN 20535) a (23 ± 2) °C.

3.1.6.2 Procedimiento

Determinar la masa de la probeta en balanza con precisión 0,01 g y colocar en el aparato de Cobb (100 cm²). Llenar el anillo del aparato con agua a (23 ± 2) °C hasta que la superficie ensayada quede cubierta por 25 mm de agua.

Dejar la probeta por 2 horas \pm 2 min en el aparato, luego eliminar el agua del anillo y retirar la probeta. Eliminar el exceso de agua de esta con papel absorbente y pesar.

Calcular la diferencia entre la masa seca y la masa mojada de cada probeta. Calcular para la cara y el dorso la diferencia promedio y registrar este valor como la absorción superficial.

3.1.7 Determinación de absorción total de agua

Probetas acondicionadas son sumergidas en agua por un tiempo fijo y se determina el porcentaje de aumento en masa.

3.1.7.1 Preparación de muestras

Cortar una probeta de dimensiones $[(300 \pm 1,5) \times (300 \pm 1,5)]$ mm de cada placa, aproximadamente a media distancia de los bordes longitudinales y al menos a 15 mm de los bordes transversales.

Secar las probetas a (23 ± 2) °C y (50 ± 5) % de humedad relativa hasta que dos pesadas sucesivas con 24 horas de diferencia difieran en menos del 0.1%.

3.1.7.2 Procedimiento

Pesar la probeta acondicionada al 0,1 g más cercano, inmediatamente sumergirla en posición horizontal en un baño de agua a (23 ± 2) °C a una profundidad entre 25 mm a 35 mm sin que toque el fondo del recipiente por 2 horas \pm 2 min.

Retirar del baño, secar el exceso de agua de la superficie y bordes de la muestra y pesar al 0,1 g más cercano.

Calcular el incremento de masa de cada probeta como un porcentaje de la masa inicial. Registrar el aumento porcentual promedio en masa como la absorción de agua de la placa de yeso.

3.1.8 Determinación de cohesión del núcleo a altas temperaturas

Se aplica un momento flector a una probeta que se calienta entre dos llamas de mechero.

3.1.8.1 Preparación de muestras

Cortar dos probetas de dimensiones $[(300 \pm 5) \times (45 \pm 1)]$ mm de cada placa, con el lado largo de la probeta paralelo al lado longitudinal de la placa. Cuando se completa la deflexión la muestra debe ser examinada su rotura.

3.1.8.2 Montaje experimental

La probeta se debe montar entre dos mecheros de propano Meker enfrentados y alineados, con su lado largo horizontal y su lado corto vertical. El borde largo inferior de la probeta y el punto más bajo de las boquillas del mechero deben estar alineados (ver **Fig. 3-2**). El diámetro de la boquilla del mechero debe ser de (20 ± 1) mm con una entrada de gas de diámetro $(0,75 \pm 0,05)$ mm.

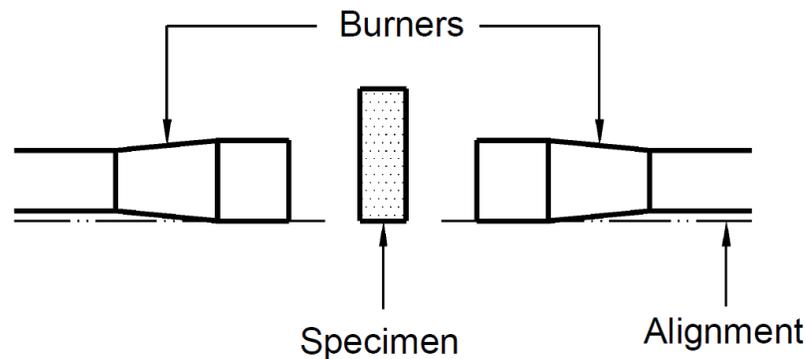


Fig. 3-2. Alineación de muestras con respecto a los quemadores.

Cada boquilla debe estar a (25 ± 1) mm de la probeta. Colocar termocuplas tipo K de diámetro 1,5 mm a (10 ± 1) mm de la boquilla alineadas con su parte superior (ver **Fig. 3-3**)

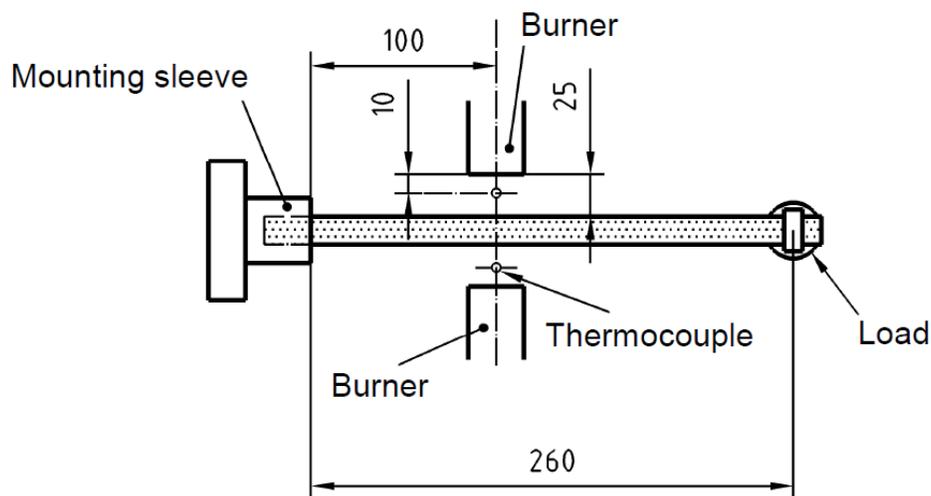


Fig. 3-3. Vista superior del aparato para determinar la cohesión del núcleo.

El punto medio de la boquilla del quemador debe estar a (100 ± 1) mm desde el punto de apoyo de la probeta. La deflexión de la parte de la probeta entre los quemadores y la carga está limitada a (10 ± 1) (ver **Fig. 3-4**).

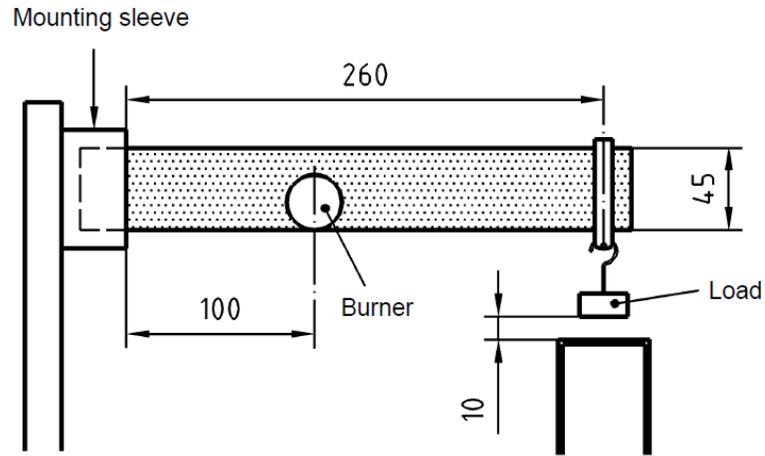


Fig. 3-4. Vista lateral aparato para determinar la cohesión del núcleo.

3.1.8.3 Procedimiento

Colocar la probeta en el soporte asegurándose de que el borde corto esté vertical. Aplicar la carga en el extremo no apoyado. El punto de aplicación de la carga debe ser a (260 ± 1) mm desde el apoyo a (10 ± 1) mm de una plataforma horizontal (ver **Fig. 3-4**). Para planchas de espesor nominal 12,5 mm se suspende una cara de (300 ± 10) g. Para tableros de mayor espesor (t), la carga se incrementa proporcionalmente redondeado a los 50 g más cercanos.

Encender los quemadores ajustando el flujo de gas para obtener una temperatura de (1000 ± 50) °C en cada termocupla.

Cuando la carga alcance la plataforma o después de 15 min, examine la cohesión de la muestra.

3.1.9 Muestreo

Los ensayos descritos en **3.1.5** a **3.1.8** se realizarán en muestras cortadas de las mismas tres placas.

4. MARCO NORMATIVO CHILENO DE PLACAS DE YESO-CARTÓN

El *Instituto Nacional de Normalización* (INN) es el organismo nacional de normalización miembro de la *International Organization for Standardization* (ISO) principal ente normalizador internacional. Su rol es contribuir al desarrollo productivo del país, fomentando la elaboración y uso de normas chilenas. Un total de 170 normas técnicas chilenas (NCh) elaboradas y aprobadas por el INN son cumplimiento obligatorio para la construcción por estar mencionadas en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones y en el Decreto Supremo N.º 10 del MINVU.

4.1 NCh 146: *Planchas o placas de yeso-cartón* [26, 27]

Esta norma establece los requisitos que deben cumplir las planchas de yeso-cartón usadas en las construcciones y establece los métodos de ensayo correspondientes a la comprobación de dichos requisitos. Se basa en la norma internacional ISO 1980 *Gypsum Plasterboard Specification*, no siendo equivalente.

4.1.1 Clasificación

Las planchas o placas de yeso-cartón se clasifican en los siguientes tipos:

Tabla 4-1. Clasificación de placas de yeso-cartón según NCh 146.

Tipo	Desempeño
ST	Plancha o placa estándar de yeso-cartón
RF	Plancha de yeso-cartón con fibras minerales o agregados en el núcleo de yeso, que le proporcionan mayor cohesión a altas temperaturas que el tipo ST de igual espesor
RH	Plancha o placa de yeso-cartón resistente a la humedad, con aditivos en el núcleo de yeso que le proporcionan mayor resistencia al agua que el tipo ST

4.1.2 Requisitos de resistencia a la flexión

Los requisitos de resistencia media a cargas de rotura para las planchas de yeso-cartón, se señalan en **Tabla 4-2**. Los valores individuales inferiores al requisito no deben superar al 10% del total de probetas ensayadas.

Tabla 4-2. Resistencia a la flexión.

Espesor [mm]	Carga [N]	
	Apoyo de probeta respecto a borde longitudinal	
	Paralela cara y dorso	Perpendicular cara y dorso
8	110	280
10	140	370
12,5	180	500
15	220	650
25	380	900

4.1.3 Requerimientos adicionales de placas RH

Para ser clasificada como RH, la placa de yeso-cartón debe cumplir con los requisitos de resistencia al agua tanto por inmersión como por absorción superficial como se señala en **Tabla 4-3**.

Tabla 4-3. Requerimientos según categoría de absorción de agua.

Ensayo	Requisito	Método de ensayo
Absorción superficial máx. [g]	2,0	4.1.6
Inmersión máx. [%]	5,0	4.1.7

4.1.4 Requerimientos adicionales de placas tipo RF

La placa de yeso-cartón puede ser considerada RF si de cinco probetas sometidas al ensayo de cohesión del núcleo a altas temperaturas descrito en **4.1.8**, cuatro probetas se rompen en un tiempo superior a 30 min y ninguna se rompe antes de los 20 min.

4.1.5 Determinación de resistencia a flexión

4.1.5.1 Preparación de las muestras

Cortar cuatro probetas de dimensiones $[(400 \pm 5) \times (300 \pm 5)]$ mm al menos a 100 mm de los bordes de cada plancha. Se toman dos muestras en dirección longitudinal y dos muestras en dirección transversal.

Acondicionar las probetas a una temperatura de (22 ± 5) °C y humedad relativa de $[(65 \pm 10) \%$, durante 12 horas. Mantener en estas condiciones, determinando su masa cada cuatro horas, hasta que entre dos medidas sucesivas se obtenga una diferencia menor o igual a 0,1%.

4.1.5.2 Procedimiento

Colocar las probetas en forma centrada, sobre dos apoyos fijos y paralelos de bordes redondeados con un radio de 3 mm distanciados (350 ± 1) mm entre sus ejes. Aplicar la carga centrada entre los apoyos con un incremento uniforme de (250 ± 50) N/min hasta que se produzca la rotura.

Los valores de carga obtenidos para cada orientación se deben promediar.

4.1.6 Determinación de absorción superficial de agua

4.1.6.1 Preparación de las muestras

Cortar tres probetas de $[(127 \pm 1) \times (127 \pm 1)]$ mm, al menos a 100 mm de los bordes de una plancha.

Acondicionar las probetas a una temperatura de (22 ± 5) °C y humedad relativa de (65 ± 10) %, durante 12 horas. Mantener en estas condiciones, determinando su masa cada cuatro horas, hasta que entre dos medidas sucesivas se obtenga una diferencia menor o igual a 0,1%. Determinar su masa en balanza con precisión 0,1 g.

4.1.6.2 Procedimiento

Colocar la probeta en el aparato de Cobb, previamente acondicionado a (21 ± 1) °C, con la cara a ensayar hacia arriba. Colocar el anillo de Cobb y llenar con agua a $(21 \pm 0,5)$ °C, hasta una altura de $(25,4 \pm 1)$ mm.

Después de dos horas eliminar el agua del anillo y retirar la probeta del aparato. Eliminar el exceso de agua de la probeta con papel secante y pesar la probeta en balanza con resolución 0,1 g.

Calcular el agua absorbida como la diferencia entre la masa seca y mojada. El valor determinado corresponde al promedio de las tres medidas efectuadas.

4.1.7 Determinación de absorción total de agua (inmersión)

4.3.7.1 Preparación de las muestras

Cortar una probeta de $[(300 \pm 1) \times (300 \pm 1)]$ mm, en el centro de cada placa, entre ambos bordes longitudinales y al menos a 150 mm de los bordes transversales, sin dañar el cartón superficial.

Acondicionar las probetas a una temperatura de (22 ± 5) °C y humedad relativa de (65 ± 10) %, durante 12 horas. Mantener en estas condiciones, determinando su masa cada cuatro horas, hasta que entre dos medidas sucesivas se obtenga una diferencia menor o igual a 0,1%. Determinar su masa en balanza con precisión 0,1 g.

4.3.7.2 Procedimiento

Sumergir las probetas en forma horizontal en un baño de agua a $(21 \pm 0,5)$ °C, manteniendo una altura de (25 ± 1) mm de agua sobre la superficie superior de la probeta sin que la superficie inferior descansa en el fondo del contenedor. Mantener la probeta sumergida por dos horas.

Retirar la probeta del baño de agua, eliminar el exceso de agua superficial con papel secante y pesar en balanza con resolución 0,1 g.

Informar el aumento promedio porcentual de agua absorbida.

4.1.8 Determinación de cohesión del núcleo a altas temperaturas

Este ensayo se ha considerado solo para las placas de yeso-cartón de 12,5 mm y 15 mm de espesor.

4.1.8.1 Preparación de las muestras

Cortar de cada placa una probeta de $[(300 \pm 1) \times (50 \pm 1)]$ mm con el lado largo paralelo al borde longitudinal. Perforar dos orificios de 2 mm a 3 mm de diámetro, uno en cada extremo de la probeta (ver **Fig. 4-1**).

Secar las probetas a temperatura de 40 °C hasta que la masa determinada cada 4 h no varíe más de 0,1% entre dos determinaciones sucesivas en balanza con resolución 0,1 g.

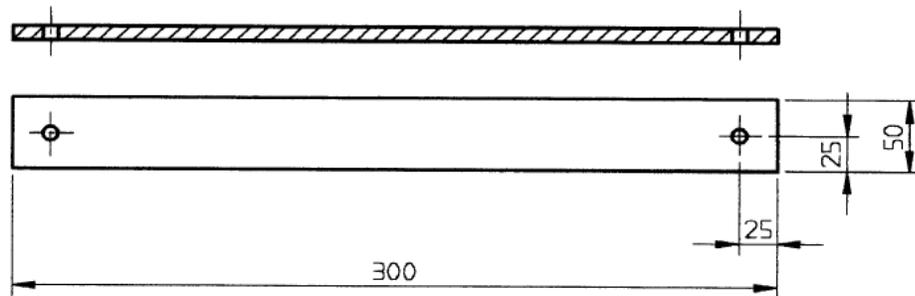


Fig. 4-1. Detalle perforaciones de la probeta para ensayo de cohesión del núcleo a altas temperaturas.

4.1.8.2 Montaje experimental

La probeta se debe montar en un sujetador entre dos mecheros de propano Meker enfrentados, colocados a una distancia de (60 ± 1) mm entre sus extremos de salida de gas, alineados de modo que sus líneas axiales pasen por el centro axial de la probeta (ver **Fig. 4-2**).

Colocar termocuplas tipo K a (15 ± 1) mm del extremo de salida del gas de cada mechero, en la línea axial de ellos.

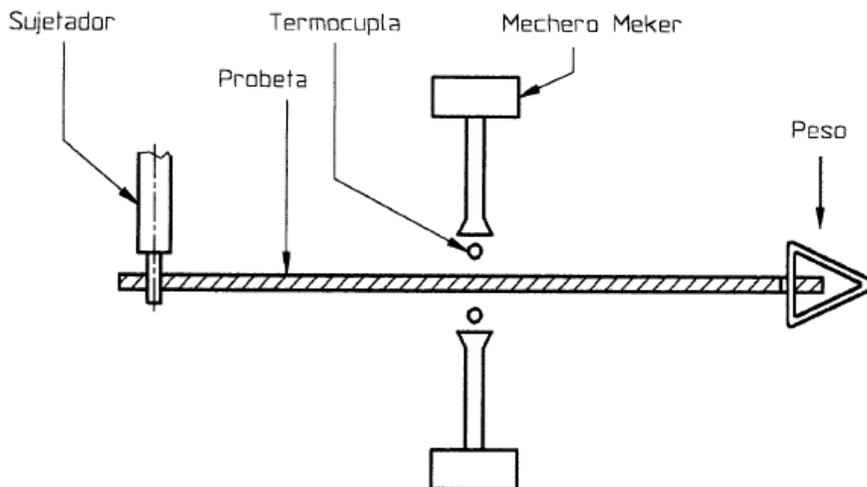


Fig. 4-2. Montaje del aparato para determinar la cohesión del núcleo a altas temperaturas.

4.1.8.3 Procedimiento

Colocar la probeta en el soporte asegurándose de que el borde corto esté vertical. Aplicar la carga de tracción que corresponda al espesor de la placa, indicada en **Tabla 4-4**, por medio de la masa suspendida en el extremo no apoyado.

Encender los mecheros ajustando la salida de gas para obtener una temperatura de (970 ± 40) °C medida en las termocuplas.

Registrar el tiempo transcurrido en minutos, hasta que la probeta se separa en trozos.

Tabla 4-4. Fuerzas aplicadas a las probetas sometidas a ensayo de cohesión del núcleo.

Espesor de la placa [mm]	Carga [N]
12,5	12
15	22

4.1.9 Muestreo

Se considera como lote el conjunto de placas de igual, tipo, espesor y ancho correspondientes a una unidad de producción.

Se seleccionan al azar por el representante de un laboratorio oficial, placas representativas del lote, en una cantidad correspondiente al 0,01%, con un mínimo de tres placas por lote, para ser sometidas a los ensayos de certificación.

5. ENSAYOS DE FUEGO A ESCALA

El objetivo de los ensayos a escala es proporcionar datos experimentales sobre el comportamiento térmico de la placa de yeso-cartón y formar la base para la calibración de sus propiedades térmicas. Se realiza un total de seis ensayos en el laboratorio de incendios de IDIEM en la comuna de Cerrillos. El comportamiento mecánico de la placa (por ejemplo, la caída de la placa) no fue objeto de los ensayos realizados.

5.1 Descripción del equipo experimental

Los ensayos se realizan en el horno de dimensiones reducidas del laboratorio de incendios de IDIEM (ver **Fig. 5-1**). Esta construido de concreto y ladrillos refractarios revestidos por una plancha de acero de 2 mm de espesor siguiendo lo dispuesto por la norma DIN 4102-8. La combustión dentro de la cámara del horno se controla mediante un quemador, encargado de regular la entrada de gas, y una llave de paso que regula el paso de aire. La salida de aire está diseñada para producir una sobrepresión de 12 Pa dentro de la cámara.



Fig. 5-1. Horno a escala en las instalaciones de IDIEM.

El horno tiene un volumen interior de $1,7 \text{ m}^3$ y cuenta con tres ventanas para ensayar probetas, quedando un área de $500 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ expuesta a las temperaturas de la curva estándar presentada en **5.2**. Un instrumento de control N1200 permite seguir la curva tiempo-temperatura.

5.2 Curva estándar tiempo-temperatura

La entrada tiempo-temperatura del horno para los ensayos de resistencia al fuego de elementos de construcción acuerdo con NCh935/1 varía según la siguiente fórmula:

$$T = T_0 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1)$$

Donde:

T [°C]: temperatura del horno en el instante t ;

T_0 [°C]: temperatura inicial del horno;

t [min]: tiempo desde el inicio del ensayo.

La misma curva se define en EN 1991-1-2: *acciones en estructuras expuestas al fuego* para la clasificación o verificación de la resistencia al fuego. Representa un modelo de un incendio completamente desarrollado en un compartimento.

5.2.1 Tolerancia para la temperatura del horno

Las tolerancias de la desviación media de la temperatura del horno serán las siguientes:

- $\pm 15\%$ durante los primeros diez minutos de ensayo;
- $\pm 10\%$ hasta la primera media hora;
- $\pm 5\%$ después de la primera media hora.

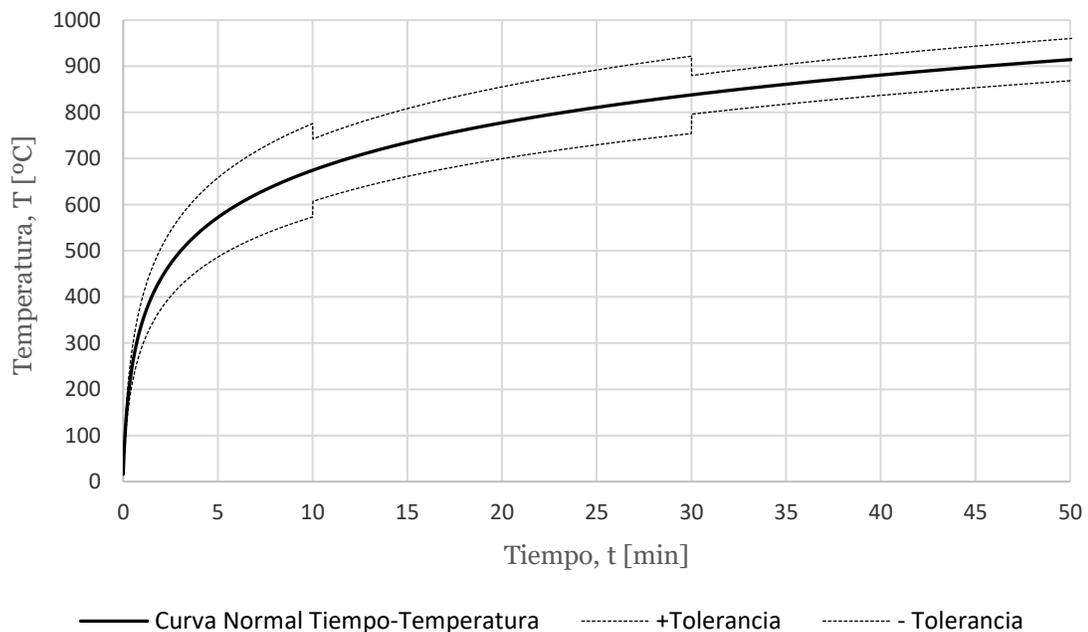


Fig. 5-2. Curva estándar tiempo-temperatura con sus tolerancias.

5.3 Descripción de probetas

Las probetas fueron construidas por personal del laboratorio y almacenadas en condiciones de temperatura y humedad ambientales. Tienen dimensiones 700 mm x 600 mm; consisten en una capa de espesor, tipo y marca según la placa ensayada (superficie expuesta) apoyada en un tablero OSB de 11 mm de espesor (superficie no expuesta). La interfaz de ambos materiales está instrumentada con 8 termocupas tipo K que registran el desarrollo de temperatura en la cara no expuesta de la placa para inspeccionar qué tan razonable es el supuesto de flujo unidimensional de calor asumido en el modelo térmico. Durante el ensayo, la temperatura se registra cada segundo. Para la obtención de la información proveniente de las termocupas se utiliza una tarjeta de adquisición de datos “Measurement Computing TC-32”; para el procesamiento de los datos se utiliza el programa DAQami versión 4.2.1. La **Fig. 5-3** detalla la sección transversal típica de las probetas y la posición de las termocupas (TC).

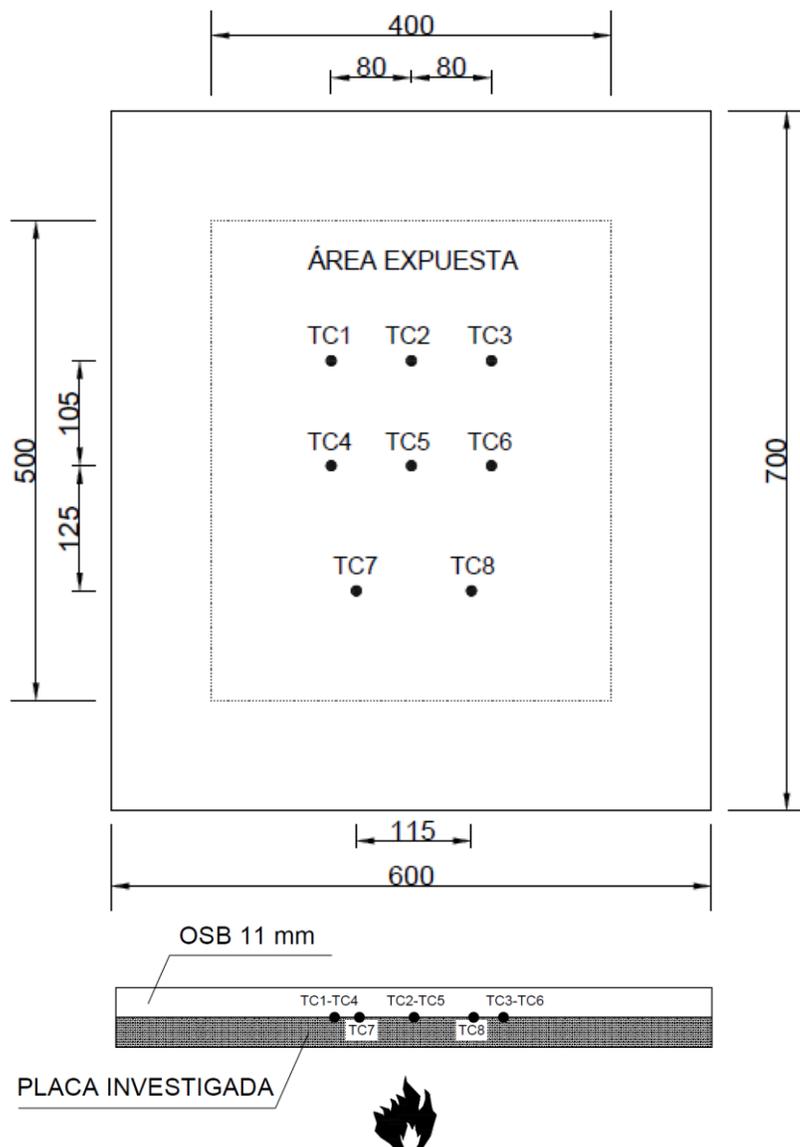


Fig. 5-3. Arriba: dimensiones de la probeta y ubicación de las termocupas. Abajo: sección transversal.

5.3.1 Recomendaciones Ref. [3]

La configuración de probeta para el ensayo de fuego a escala de materiales de revestimiento con la posición de las termocupas (TC) propuesta en Ref. [3] se muestra en la **Fig. 5-4**. Cabe señalar que se recomienda un tablero de partículas de madera de 19 mm de espesor como capa de apoyo de la capa ensayada, sin embargo, el tablero podría reemplazarse por otros tableros a base de madera con propiedades térmicas bien conocidas.

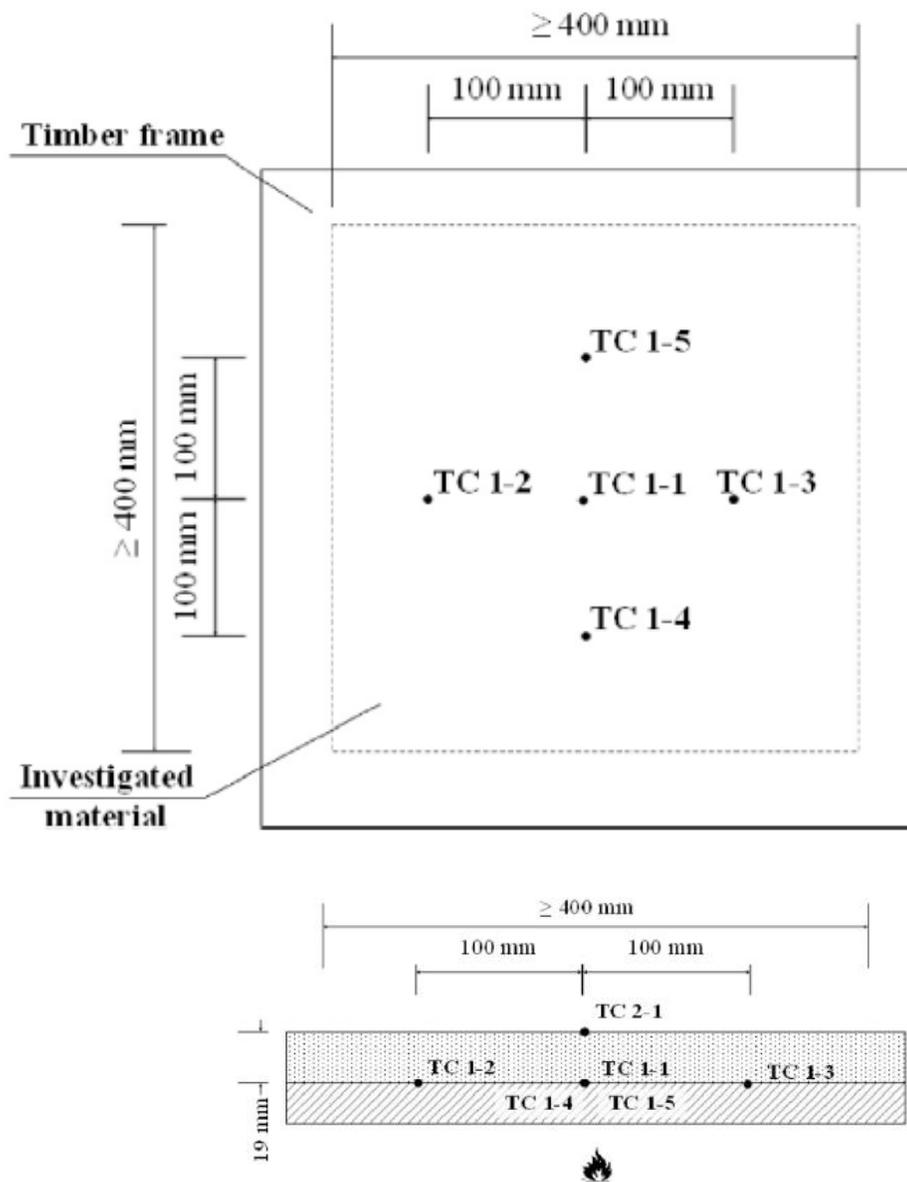


Fig. 5-4. Arriba: dimensiones de la probeta y ubicación de las termocupas sugerida en Ref. [3]. Abajo: sección transversal.

5.4 Descripción de materiales

Un total de seis placas de yeso-cartón de tres marcas comercialmente disponibles – Knauf, Volcan y Romeral – fueron ensayadas en el horno a escala del laboratorio de incendios de IDIEM. Las placas ensayadas se apoyan sobre un tablero OSB de 11.1 mm de espesor, de la marca Louisiana Pacific.

Tabla 5-1. Especificaciones placas ensayadas.

Probeta	Marca	Tipo	Espesor, e [mm]
P2	Volcan	RF	15
P4	Romeral	RH	15
P5	Romeral	RF	15
P6	Knauf	RH	15
P7	Volcan	RH	15
P8	Knauf	RF	15

5.4.1 Placas de yeso-cartón Knauf

Las placas de yeso-cartón Knauf cumplen con las exigencias de las normas chilenas NCh 146/1 y NCh 146/2. La placa Knauf RH está compuesta de alma de yeso, aditivos especiales y fibra de vidrio, revestida por láminas de papel. La placa Knauf RF está compuesta de alma de yeso y fibra de vidrio (0,2% de su peso), revestida por láminas de papel.

5.4.2 Placas de yeso-cartón Volcan

Las placas de yeso-cartón Volcan cumplen con la norma NCh 146. La placa Volcanita RH está compuesta de núcleo de yeso y aditivos especiales, revestida en ambas caras por cartón de alta resistencia. La placa Volcanita RF está compuesta de núcleo de yeso, aditivos especiales y fibra de vidrio, revestida en ambas caras por cartón.

5.4.3 Placas de yeso-cartón Romeral

La placa Gyplac RH tiene núcleo de yeso y aditivos siliconados. La placa Gyplac RF de alta densidad en su núcleo contiene fibra de vidrio. Se informan las siguientes características técnicas de la placa de yeso-cartón del sistema Gyplac:

Tabla 5-2. Características técnicas placas Romeral.

Resistencia a flexión longitudinal (Norma EN 520:2004)	7 [N/mm ²]
Resistencia a flexión transversal (Norma EN 520:2004)	3 [N/mm ²]
Resistencia al fuego – Eurt class (Norma EN 13501-1: 2007)	A2, S1, d0
Resistencia a la humedad; absorción total de agua (Norma EN 520:2004)	< 3%
Resistencia a la humedad; absorción superficial de agua (Norma EN 520: 2004)	< 100 [g/cm ²]

5.5 Descripción del ensayo

Se coloca la probeta instrumentada en una de las ventanas del horno con la cara del material investigado hacia el interior del horno. Se rellenan los espacios entre la probeta y la ventana con manta refractante para prevenir fugas de calor y se produzca flujo unidireccional de calor. Las ventanas restantes se mantienen selladas durante la ejecución del ensayo.

Se prende el horno y se inicia el programa del controlador ajustando el paso de gas a un 80%. Cuando se enciende la llama, se disminuye el paso de gas hasta un 35% y se pasa a control automático, siendo el controlador quien sigue el cumplimiento de la curva tiempo-temperatura.

La probeta se calienta normalmente hasta que las termocupas registren temperaturas de 300 °C.

Durante el ensayo se registra cada cinco minutos la temperatura puntual más alta de la cara no expuesta y su temperatura promedio mediante una cámara termográfica Flir modelo E5. Al mismo tiempo, se toman fotografías de la cara para llevar registro de la aparición de grietas, fisuras, aberturas o calcinación (ver **Fig. 5-5**).

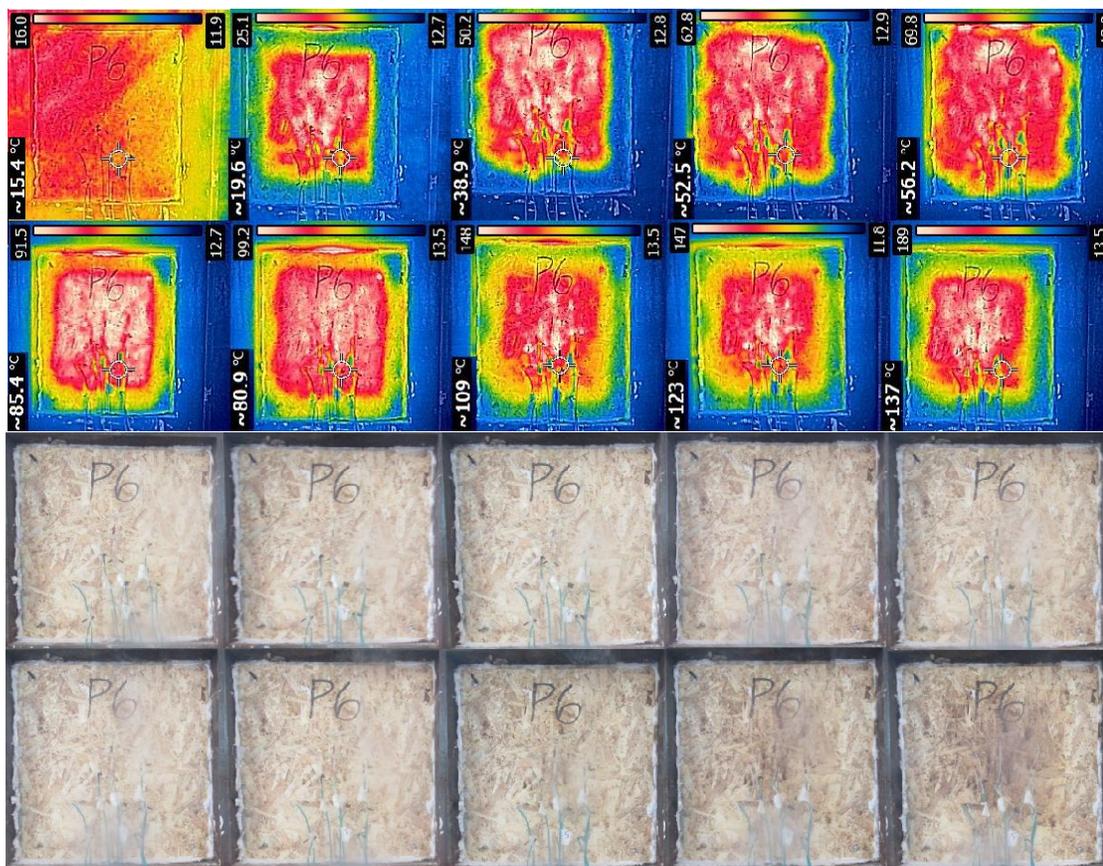


Fig. 5-5. Arriba: registro termográfico del desarrollo de temperatura en lado no expuesto. Abajo: registro fotográfico cara no expuesta.

5.6 Resultados

Las **Figs. 5-6 a 5-11** muestran los registros de las termocuplas durante los ensayos. Se observa una tendencia similar en el desarrollo de temperatura del lado no expuesto de las placas, caracterizado por un plateau de aproximadamente 15 minutos de duración. Se advierte una dispersión en los registros de las termocuplas luego de 20 minutos iniciado los ensayos.

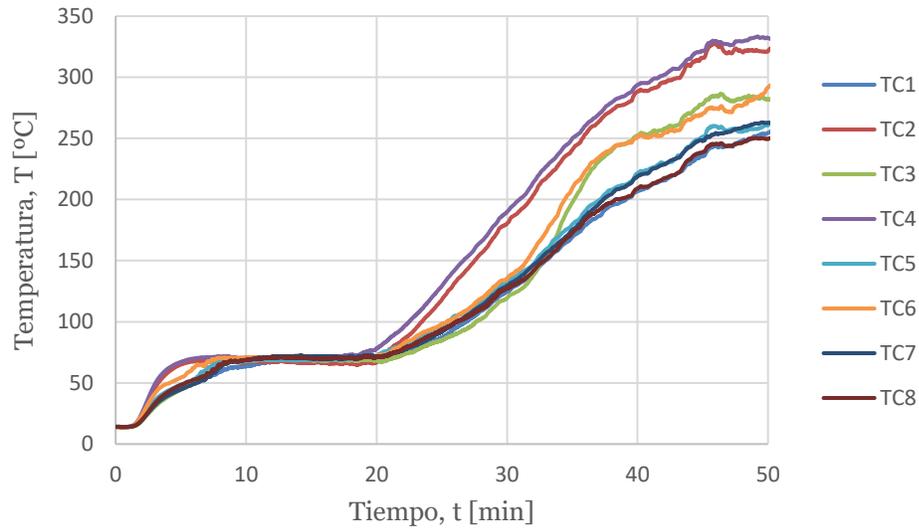


Fig. 5-6. Desarrollo de temperatura en el lado no expuesto de la placa Knauf RH de 15 mm.

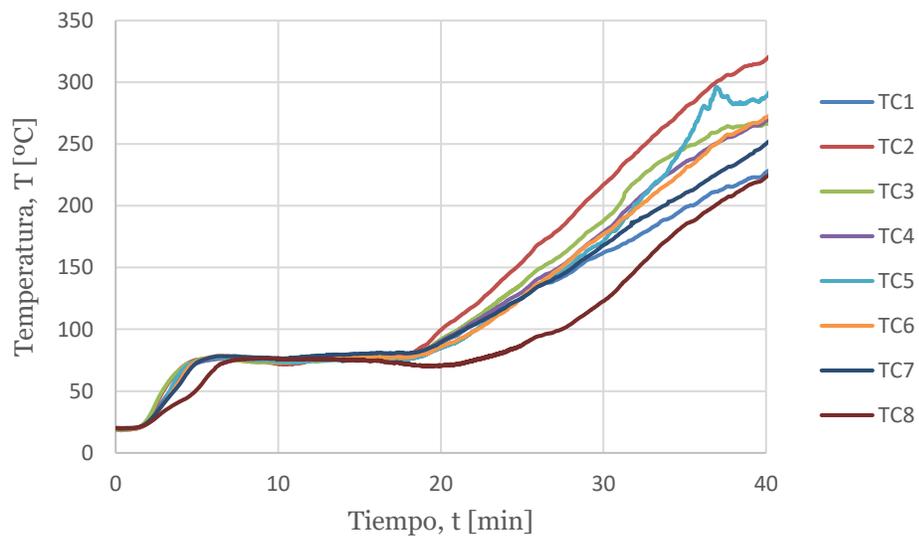


Fig. 5-7. Desarrollo de temperatura en el lado no expuesto de la placa Knauf RF de 15 mm.

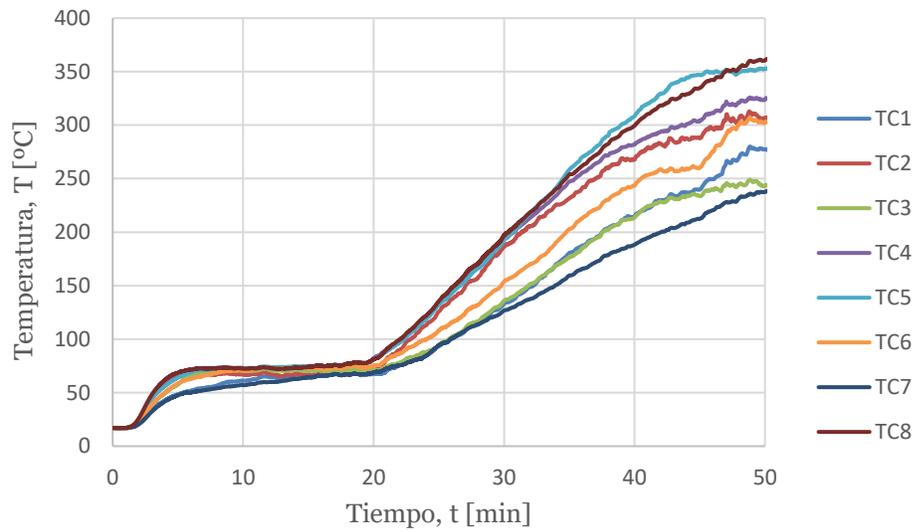


Fig. 5-8. Desarrollo de temperatura en el lado no expuesto de la placa Volcan RH de 15 mm.

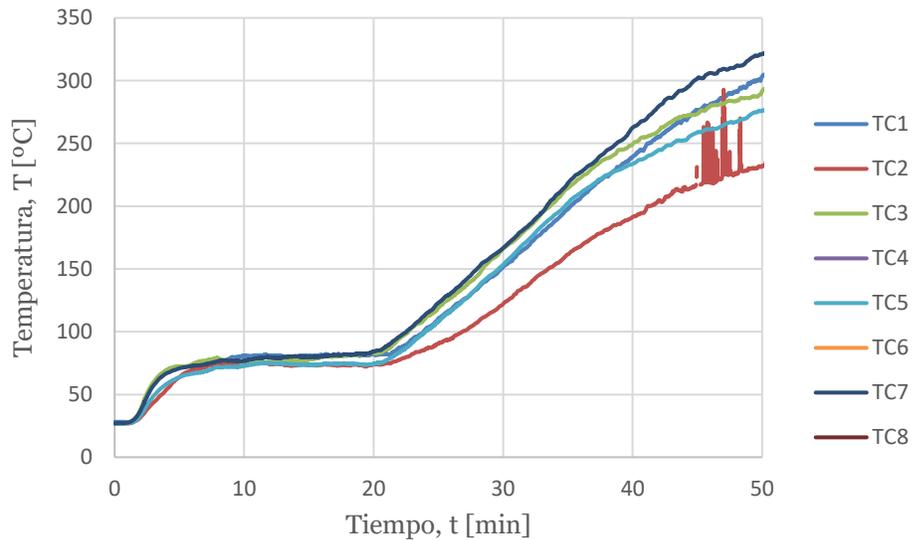


Fig. 5-9. Desarrollo de temperatura en el lado no expuesto de la placa Volcan RF de 15 mm.

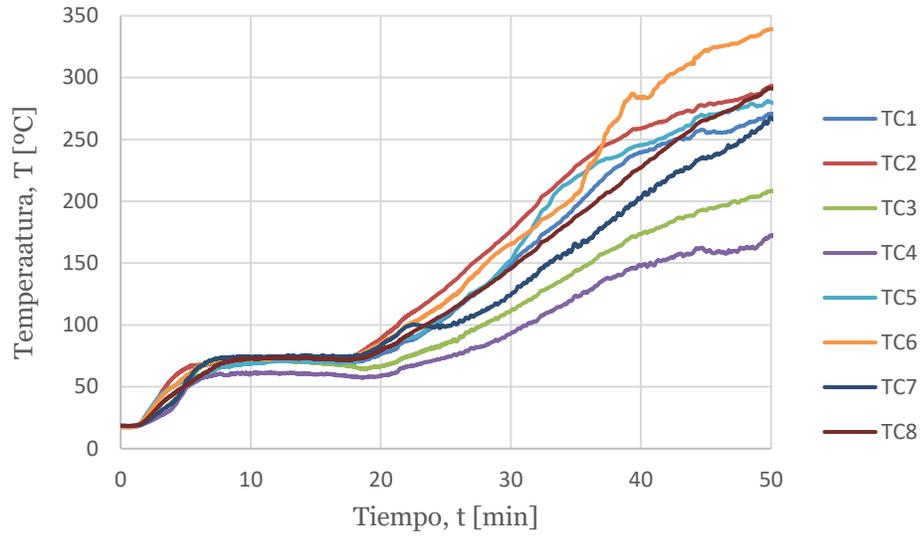


Fig. 5-10. Desarrollo de temperatura en el lado no expuesto de la placa Romeral RH de 15 mm.

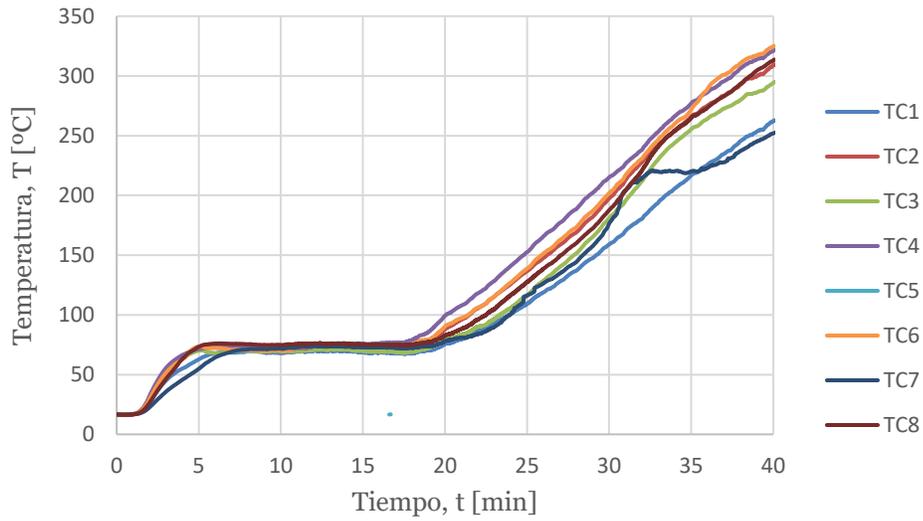


Fig. 5-11. Desarrollo de temperatura en el lado no expuesto de la placa Romeral RF de 15 mm.

6. CALIBRACIÓN DE PROPIEDADES TÉRMICAS

6.1 Teoría de transferencia de calor

La transferencia de calor a través de placas de yeso en ensayos de fuego es una combinación de los tres modos:

- Del horno (fuego) a la superficie expuesta de la placa la transferencia de calor es por convección y radiación, siendo esta última dominante;
- A través del yeso el calor se transmite por conducción, aunque por tratarse de un material poroso también habrá transferencia de calor por convección y radiación en los poros, sin embargo, este fenómeno no es considerado en el modelo de elementos finitos;
- Desde la superficie no expuesta al entorno la transferencia de calor es por convección y radiación, dominando la convección a bajas temperaturas.

La ecuación que gobierna la conducción térmica en dominios sólidos corresponde a la forma diferencial de la ley de Fourier. Para conducción unidireccional de calor (caso de las placas en ensayo de fuego) la ecuación de Fourier viene dada por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right) = c(T) \rho(T) \frac{\partial T(x, t)}{\partial t}$$

Donde:

T [°C]: temperatura;

t [s]: tiempo;

x [m]: coordenada en la dirección de la transferencia de calor;

$k(T)$ [W/(m·°C)]: conductividad térmica;

$c(T)$ [J/(kg·°C)]: calor específico;

$\rho(T)$ [kg/m³]: densidad.

El flujo de calor convectivo relacionado con la diferencia de temperatura de la superficie y el fluido que la rodea se expresa por la Ley de enfriamiento de Newton:

$$k(T) \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = h(T) \cdot (T_{\infty} - T_s)$$

Donde:

h [W/(m²·°C)]: coeficiente de convección;

T_{∞} [°C]: temperatura del fluido;

T_s [°C]: Temperatura de la superficie.

El flujo térmico radiativo que emite una superficie real viene dado por la Ley de Stefan-Boltzmann:

$$k(T) \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\infty}^4 - T_s^4)$$

Donde:

ε [-]: emisividad efectiva;

σ ($= 5,67 \times 10^{-8} [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^4)]$): constante de Stefan-Boltzmann.

6.2 Software de simulación térmica

Dentro de este trabajo se utiliza el software de análisis y resolución por elementos finitos COMSOL Multiphysics versión 5.3a. Se emplea la interfaz *Transferencia de Calor en Sólidos* para modelar el ensayo descrito en la sección anterior y predecir el desarrollo de temperaturas en el tiempo. Dentro del sólido, el programa modela la transferencia de calor por conducción donde el material queda descrito por sus propiedades térmicas dependientes de la temperatura (conductividad térmica, calor específico y densidad). En sus límites la transferencia de calor se modela por convección y radiación, lo que se toma en cuenta especificando apropiados coeficientes de convección (h) y emisividad (ε) respectivamente. El programa permite definir la entrada tiempo-temperatura del modelo, la cual corresponde a la curva presentada en la sección **5.2**.

6.3 Construcción del modelo térmico

6.3.1 Geometría

La probeta ensayada se modela como dos sólidos de dimensiones 400 x 500 x 11.1 mm (tablero OSB) y 400 x 500 x e mm (placa yeso-cartón) con e , el espesor de la placa (ver **Fig. 6-1**).

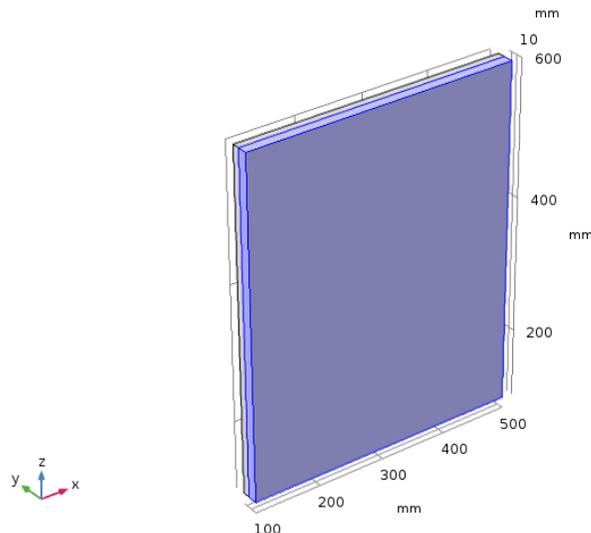


Fig. 6-1. Modelo de elementos finitos para el análisis térmico de placas de yeso-cartón. En azul el sólido que representa al yeso (lado expuesto a la curva t - T).

6.3.2 Discretización

Los resultados del análisis térmico realizado con mallado grueso y fino se presentan en la **Fig.6-2**, estos muestran que hay muy poca diferencia entre la predicción del desarrollo de temperatura cuando se aplica una malla de elementos finitos “finos” o “gruesos” al modelo. Aunque se observa desviación entre los 3 y 15 minutos, esto no tiene efecto en las temperaturas más allá de 160 °C, región donde se define la falla de la placa. Puesto que el tiempo de cálculo es menor para un mallado “grueso”, se utiliza esta discretización para realizar las simulaciones térmicas.

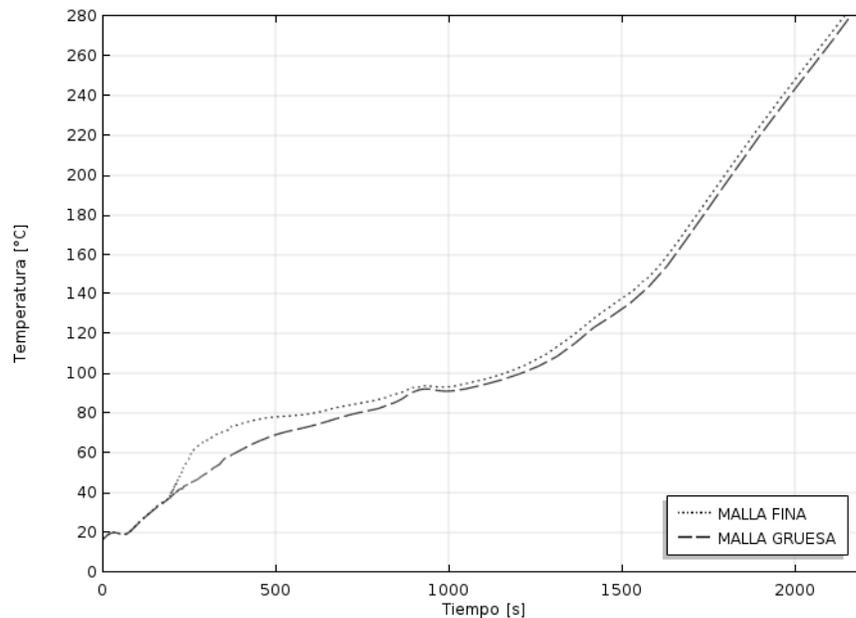


Fig. 6-2. Comparación predicciones de temperatura con mallado de elementos finitos “grueso” y “fino”.

6.3.3 Condiciones de borde

La transferencia de calor a través de las superficies de la probeta se modela usando valores constantes de emisividad y coeficiente de convección.

Se utilizan los valores definidos en la norma EN 1991-1-2. Para miembros expuestos a la curva estándar tiempo-temperatura, establece un coeficiente de convección $h=25 [W/m^2]$ para la superficie expuesta y $h=9 [W/m^2]$ para la superficie no expuesta, que incluye el efecto de la transferencia de calor por radiación. Para superficies de placas de yeso sugiere un coeficiente de emisividad $\varepsilon=0,8$. Sin embargo, teniendo en cuenta que la emisividad de superficies no metálicas decrece con la temperatura, y que además depende del estado de degradación de la superficie [30], se utiliza un coeficiente de emisividad efectiva $\varepsilon=0,6$ para representar la emisividad de la superficie expuesta de la placa durante el ensayo.

6.3.4 Parámetros de entrada: propiedades térmicas de los materiales

Para el análisis térmico, COMSOL requiere las propiedades que describen la transferencia de calor por conducción en el material en función de la temperatura; estas propiedades corresponden a la conductividad térmica, λ [W/(°C·m)], calor específico, c [J/(°C·kg)] y densidad, ρ [kg/m³] del material definido. Los valores se ingresan al modelo en forma de tablas en archivos de texto (Ver **Fig. 6-3**).

Se definen seis materiales denominados como la marca, tipo y espesor de placa ensayada: *Knauf RH 15*, *Knauf RF 15*, *Volcan RH 15*, *Volcan RF 15*, *Romeral RH 15* y *Romeral RF 15*. Las propiedades térmicas en función de la temperatura propuestas para estos materiales se basan en la literatura revisada en la sección 2.2 (ver **Apéndice 1**). Estas propiedades son posteriormente calibradas para ajustar las curvas ensayadas y simuladas en COMSOL. En **Fig. 6-4** se muestra de forma gráfica las propiedades térmicas iniciales de las placas de yeso-cartón.

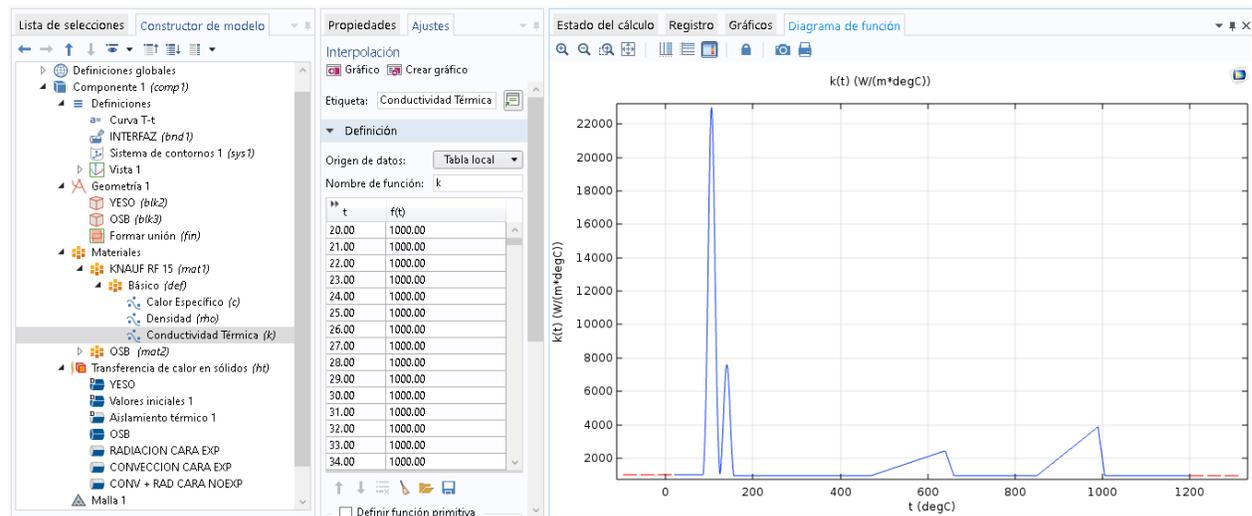


Fig. 6-3. Ventana principal de COMSOL. Se muestra la ventana de propiedades térmicas abierta.

Se definen además dos materiales necesarios para realizar la calibración y posteriores simulaciones térmicas: *OSB* y *Manta cerámica*. Las propiedades térmicas usadas en este trabajo corresponden a adaptaciones de valores encontrados en la literatura, expuestos en las secciones 2.3 y 2.4 (ver **Anexo A**). Las **Figs. 6-5** y **6-6** muestran de forma gráfica las propiedades térmicas del OSB y manta cerámica respectivamente.

Se considera como valor a temperatura ambiente de las propiedades térmicas aquellos indicados por los proveedores en catálogos de los materiales (ver **Tabla 6-1**). Las propiedades no informadas son tomadas de EN 12524 [28]; estos valores se muestran en **Tabla 6-2**.

Tabla 6-1. Propiedades térmicas informadas de los materiales.

Material	Densidad, ρ_0 [kg/m³]	Conductividad Térmica, λ_0 [W/(°C·m)]
Knauf RH 15	734	0,21 [28]
Knauf RF 15	800	0,21 [28]
Volcan RH 15	800	0,26
Volcan RF 15	900	0,26
Romeral RH 15	718	0,3
Romeral RF	794	0,3
OSB LP	680	0,13
Manta Fiberfrax	96	0,04

Tabla 6-2. Propiedades térmicas de los materiales en Ref. [28].

Material	Densidad, ρ_0 [kg/m³]	Calor Específico, c_0 [J/(°C·kg)]
Placa yeso-cartón	700 – 900	1000
OSB	650	1700
Lana mineral	10 – 200	1030

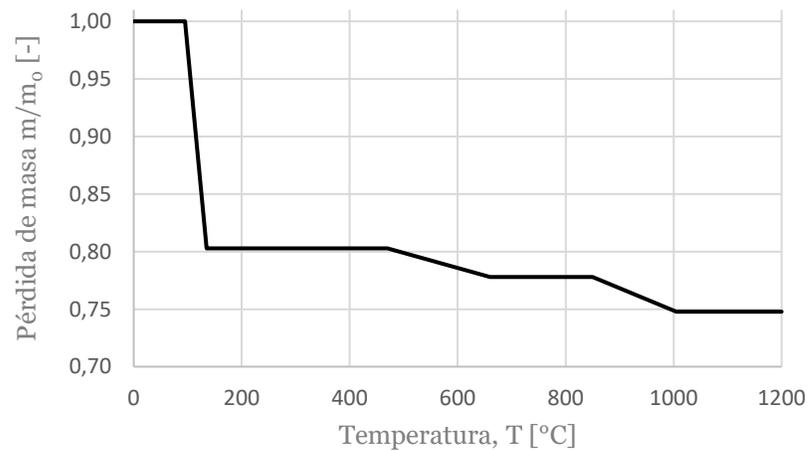
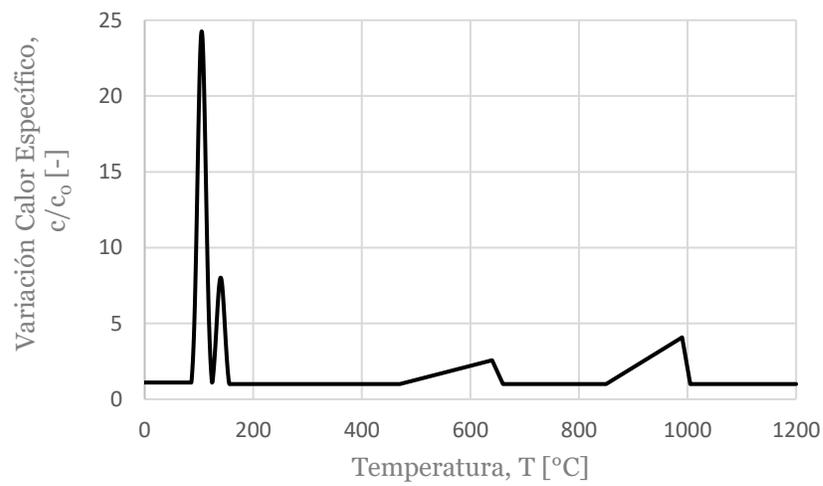
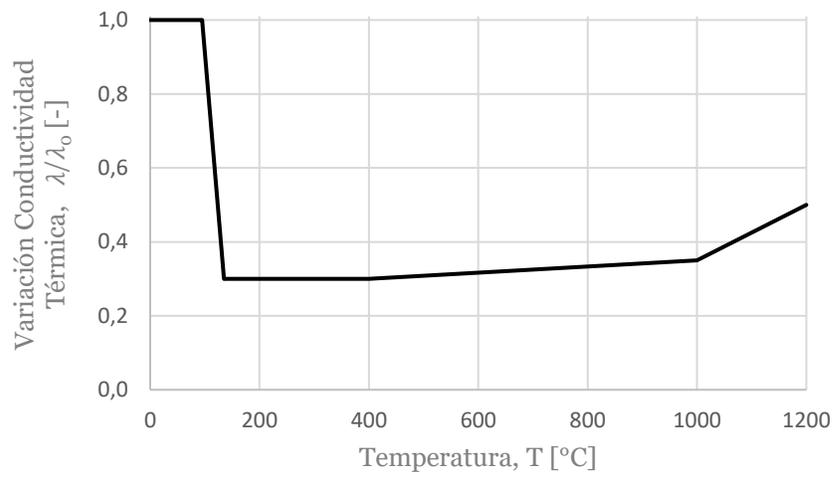


Fig. 6-4. Propiedades térmicas iniciales propuestas para placas de yeso-cartón.

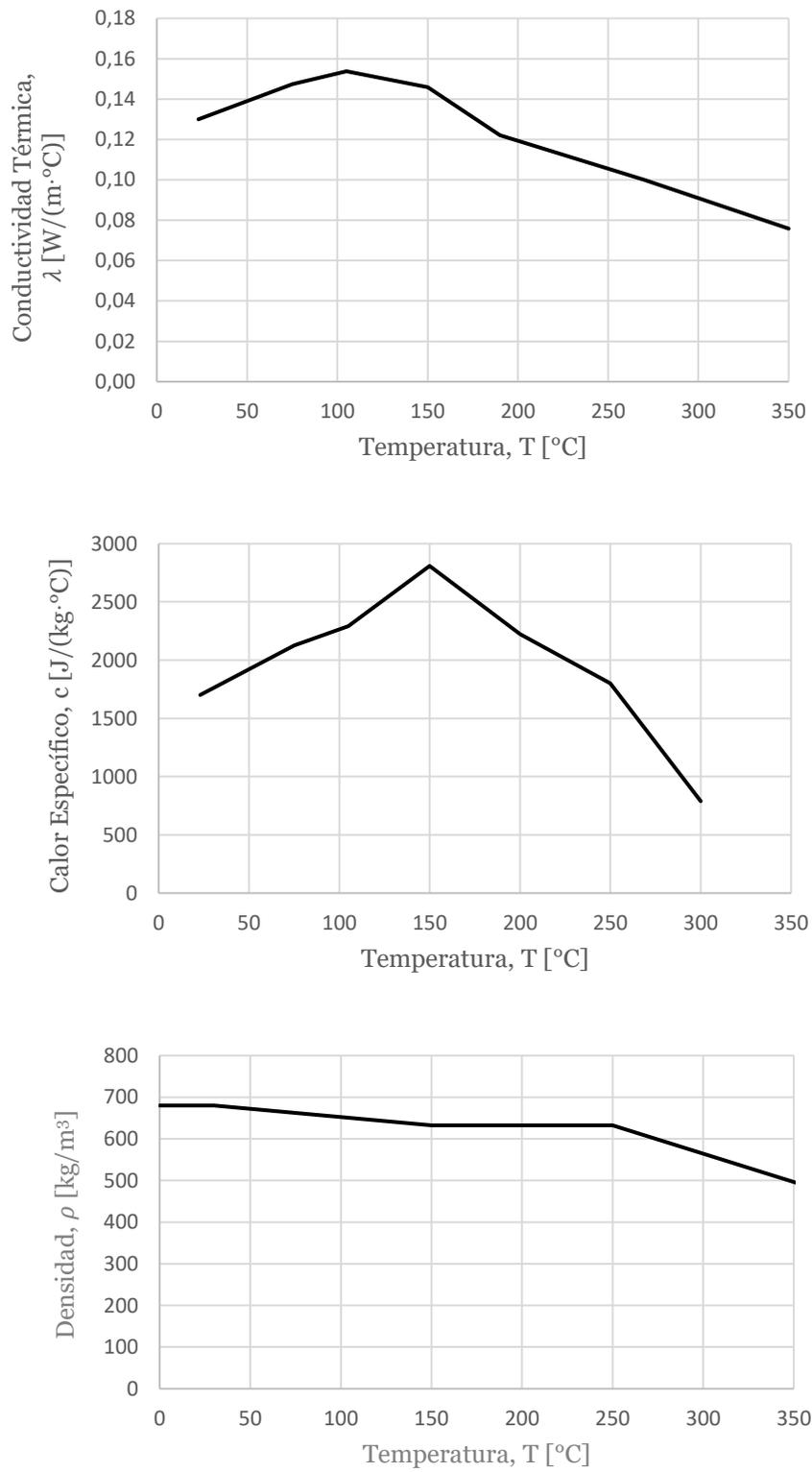


Fig. 6-5. Propiedades térmicas OSB usadas en calibración y simulaciones.

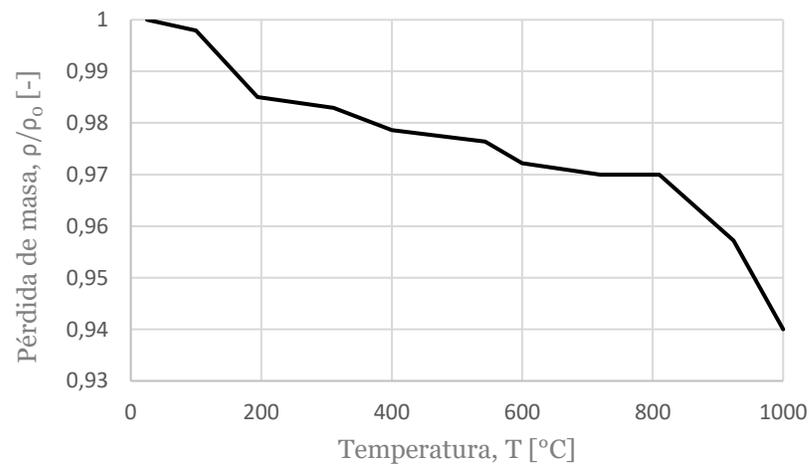
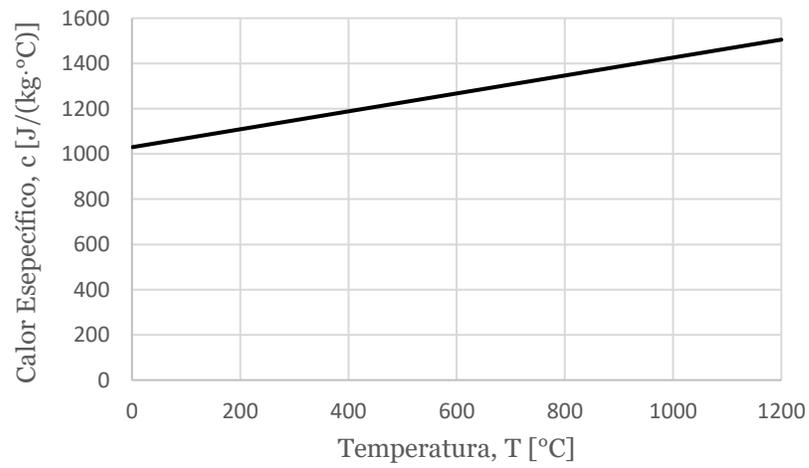
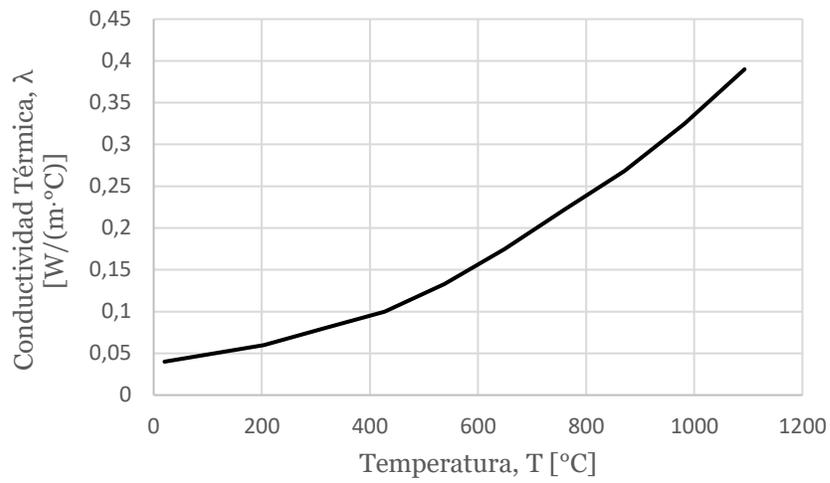


Fig. 6-6. Propiedades térmicas manta cerámica usadas en simulaciones.

6.4 Procedimiento de calibración de propiedades térmicas

COMSOL realiza algunas suposiciones simplificadoras para el análisis térmico, por lo que, para algunos materiales el cálculo es una aproximación. Por ejemplo, en las simulaciones el calor es transferido en el material solo por conducción, tampoco considera efectos como el transporte de masa y el agrietamiento. Para describir mejor el comportamiento real de las placas de yeso-cartón durante la exposición a la curva estándar tiempo-temperatura (ver sección 5.2), las propiedades térmicas necesitan ser modificadas. Las lecturas de las termocupas de los ensayos a escala (Figs. 5-6 a 5-11) son la referencia para la calibración las propiedades térmicas de cada placa.

En el contexto de seguridad contra incendios de estructuras de madera, lo más importante es el ajuste de las temperaturas características de 160 °C y 270 °C. Se recomienda que los resultados de las simulaciones a esas temperaturas no difieran más de unos pocos minutos [3].

Para calibrar las propiedades térmicas de cada placa, se utiliza el registro de la termocupla que primero alcanza las temperaturas características en el ensayo respectivo como referencia para ajustar la curva simulada en COMSOL. Esta curva corresponde al desarrollo de temperatura promedio en la cara no expuesta. El ajuste de la curva simulada se realiza por medio de inspección visual, variando los parámetros de entrada del modelo: $\lambda(T)$, $c(T)$, $\rho(T)$. Por ejemplo, para la placa Knauf RH se toma el registro de la termocupla 4 (TC4 en Fig. 5-6) y se modifican las propiedades térmicas de la Fig. 6-4 hasta que la curva simulada se ajuste a la ensayada (ver Fig. 6-7).

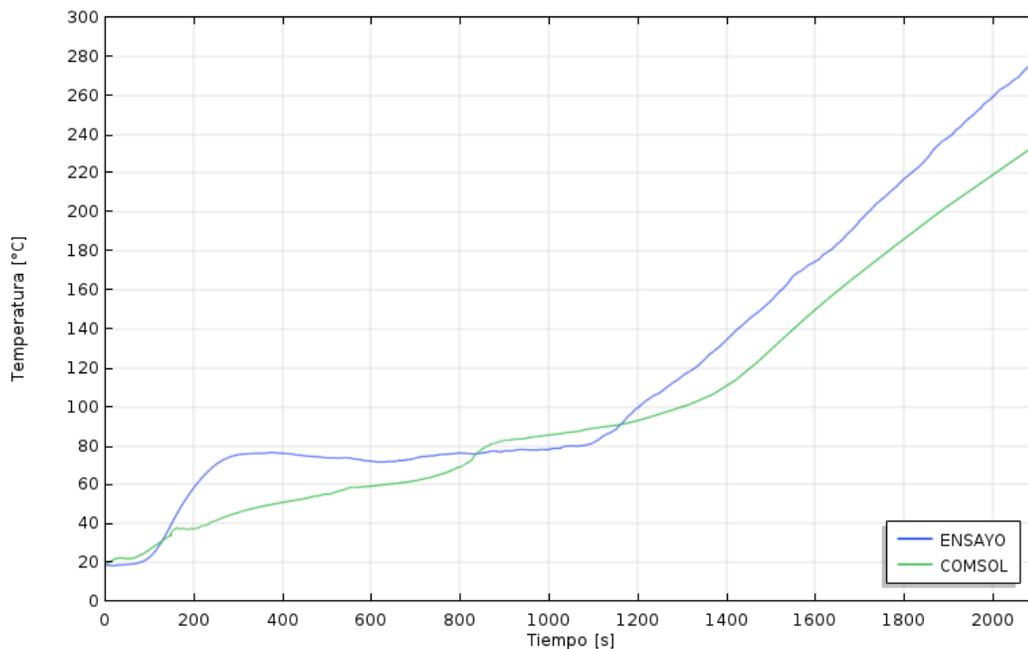
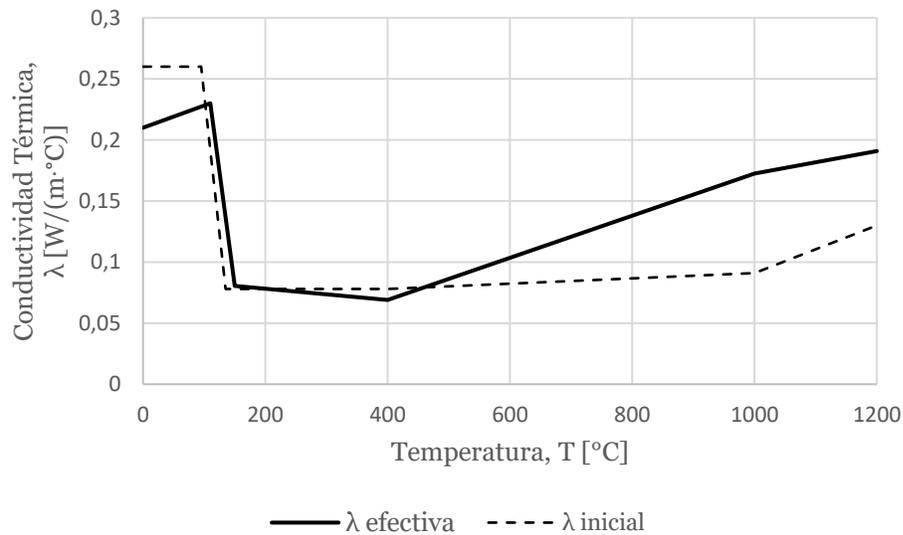
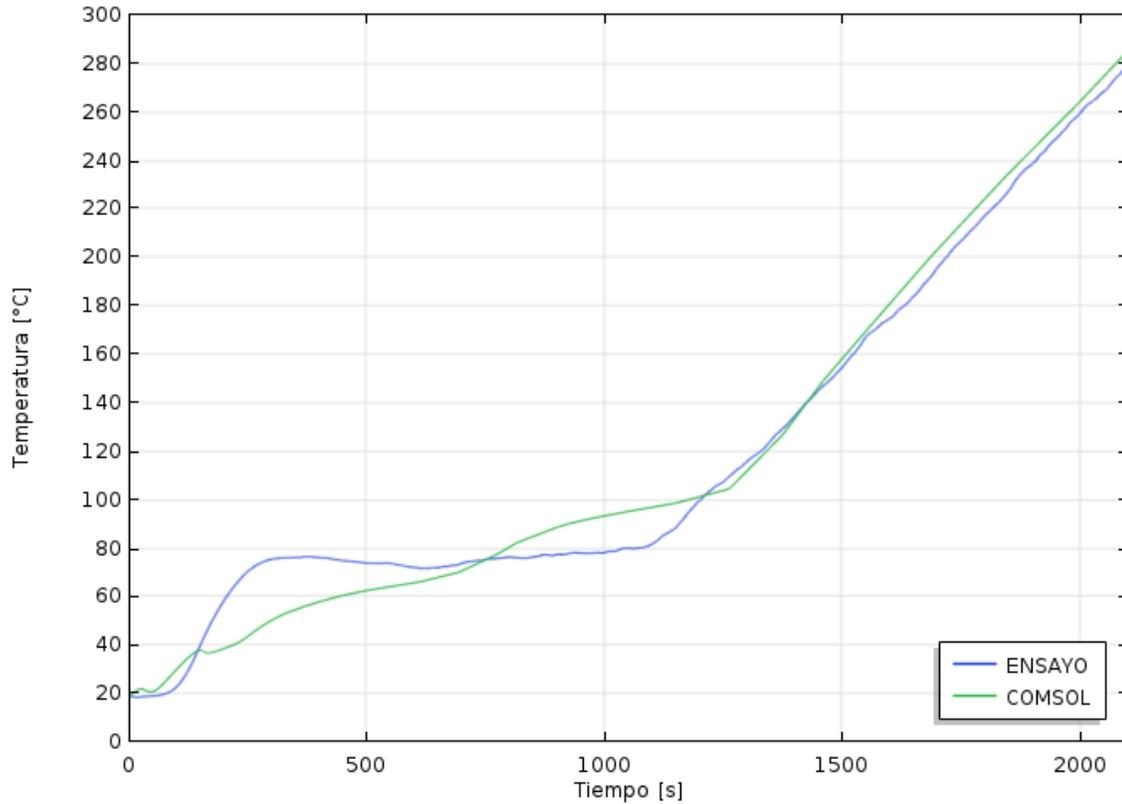


Fig. 6-7. Comparación curva ensayada y simulada placa Knauf RH. En verde, desarrollo de temperatura obtenido con propiedades térmicas iniciales.

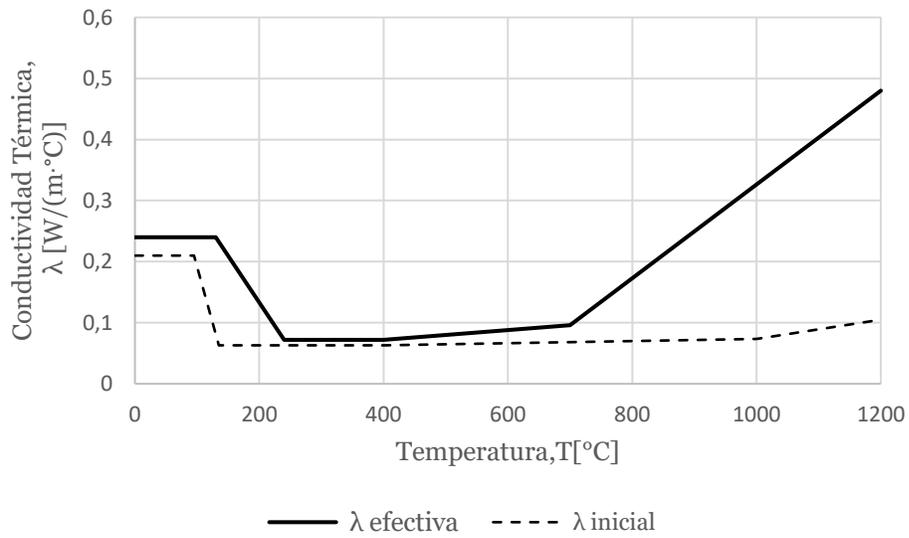
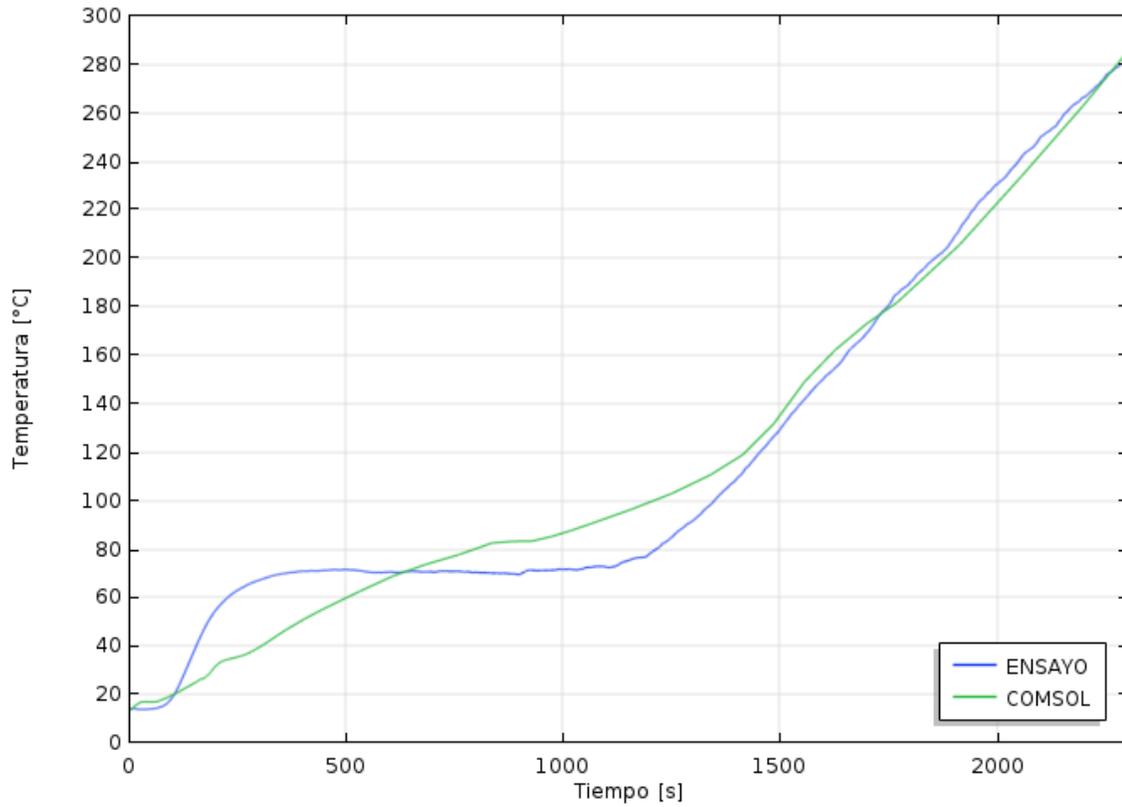
6.5 Propiedades térmicas efectivas

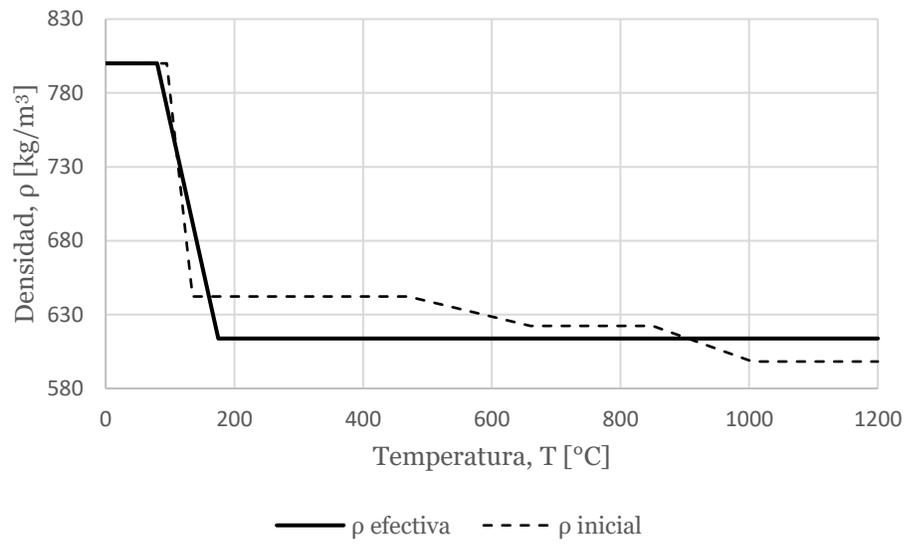
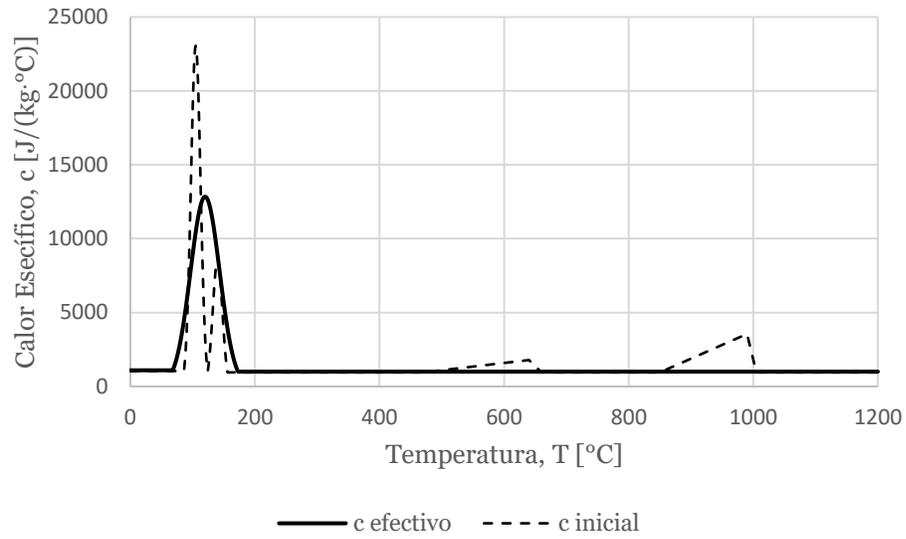
Las siguientes figuras muestran las propiedades térmicas que ajustan la curva simulada al registro de desarrollo de temperatura de los ensayos de fuego para cada placa.

6.5.1 Knauf RH 15

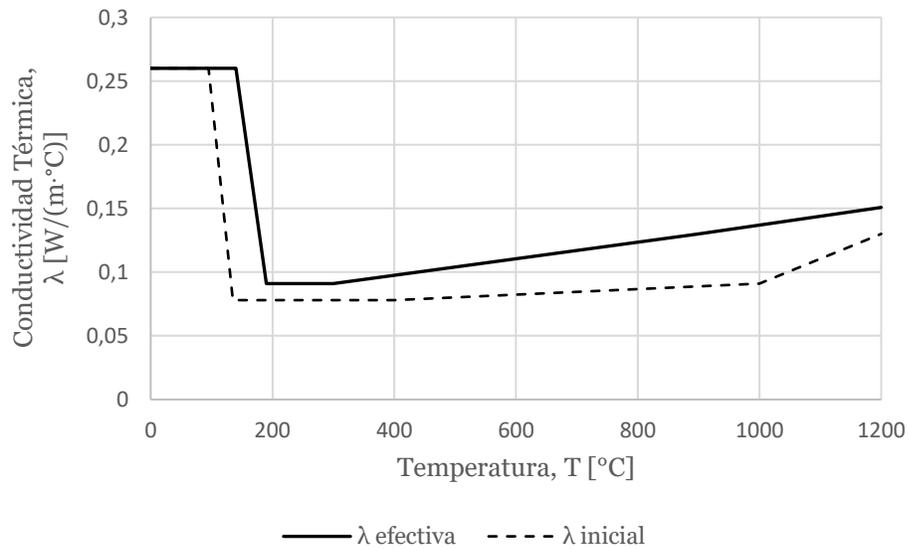
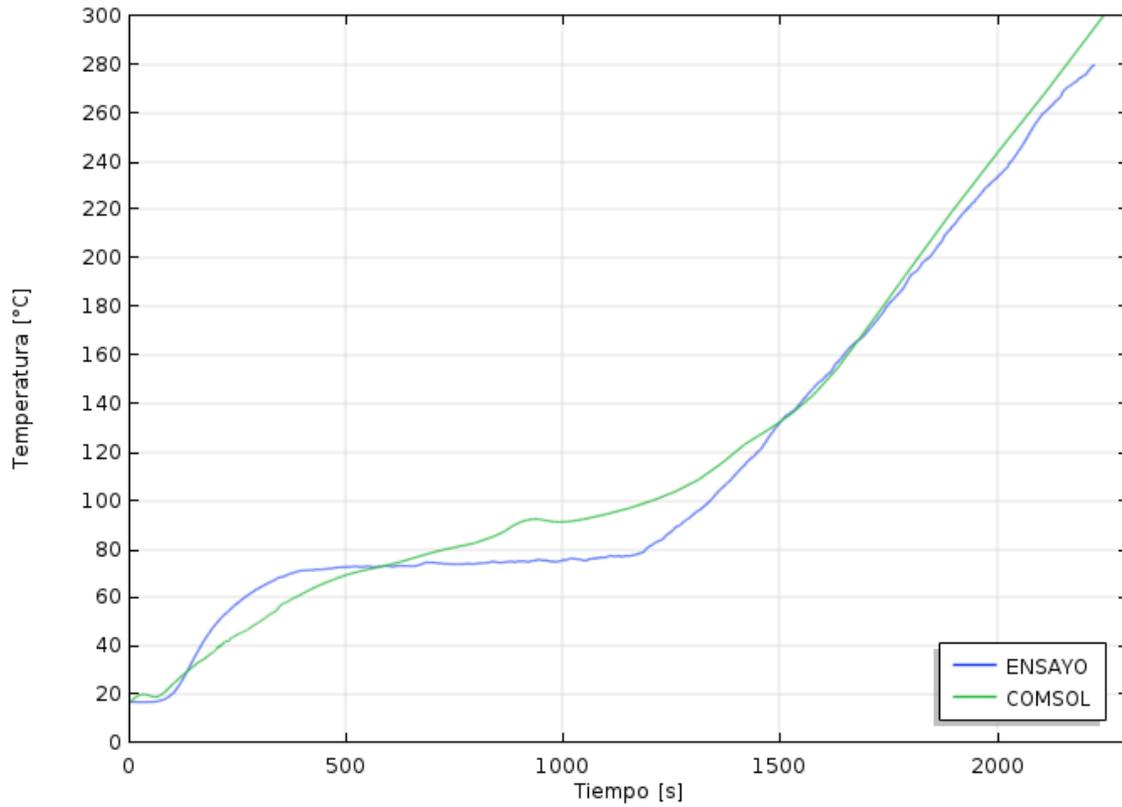


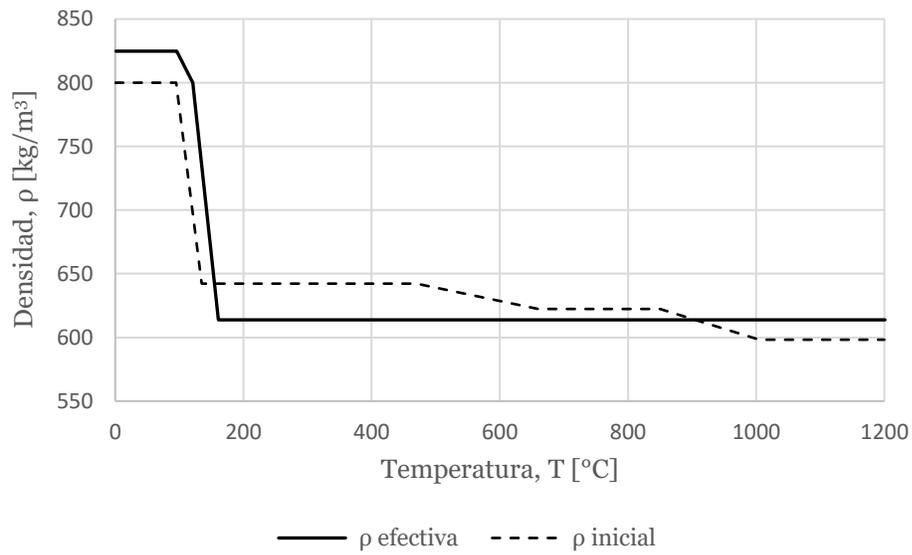
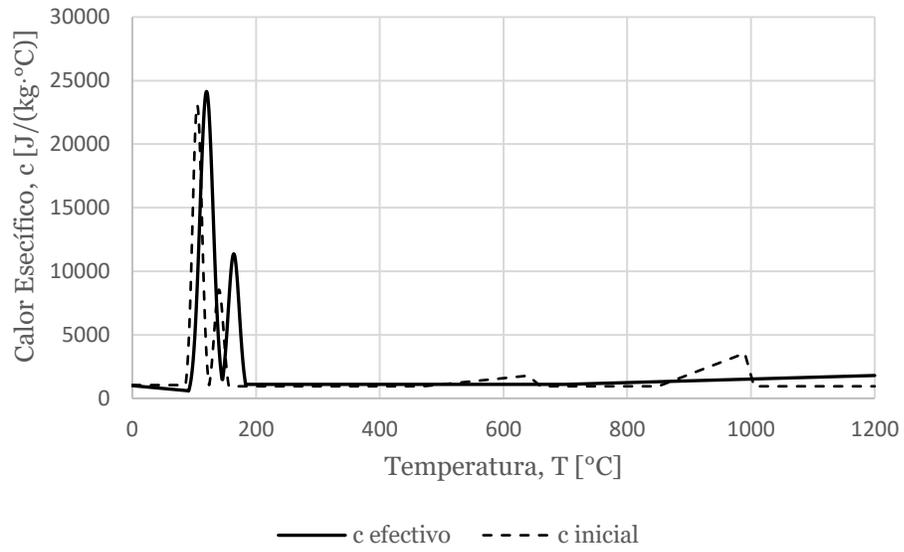
6.5.2 Knauf RF 15



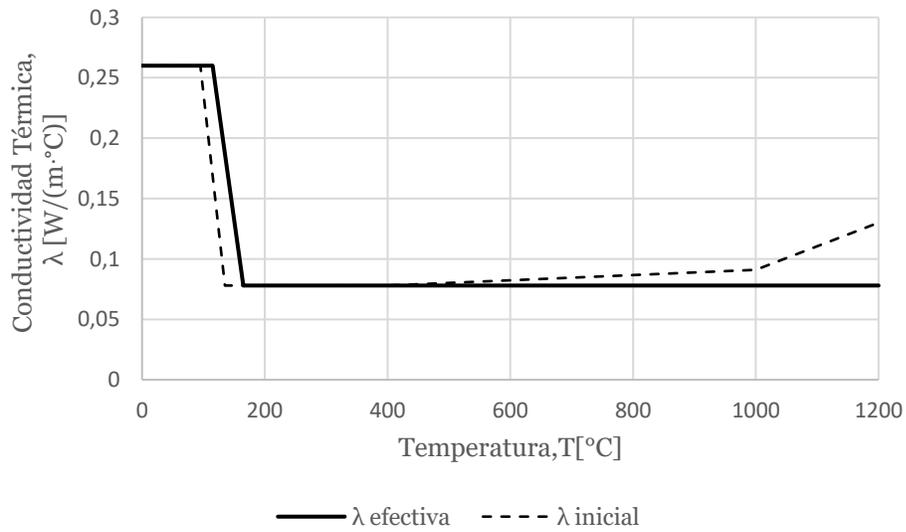
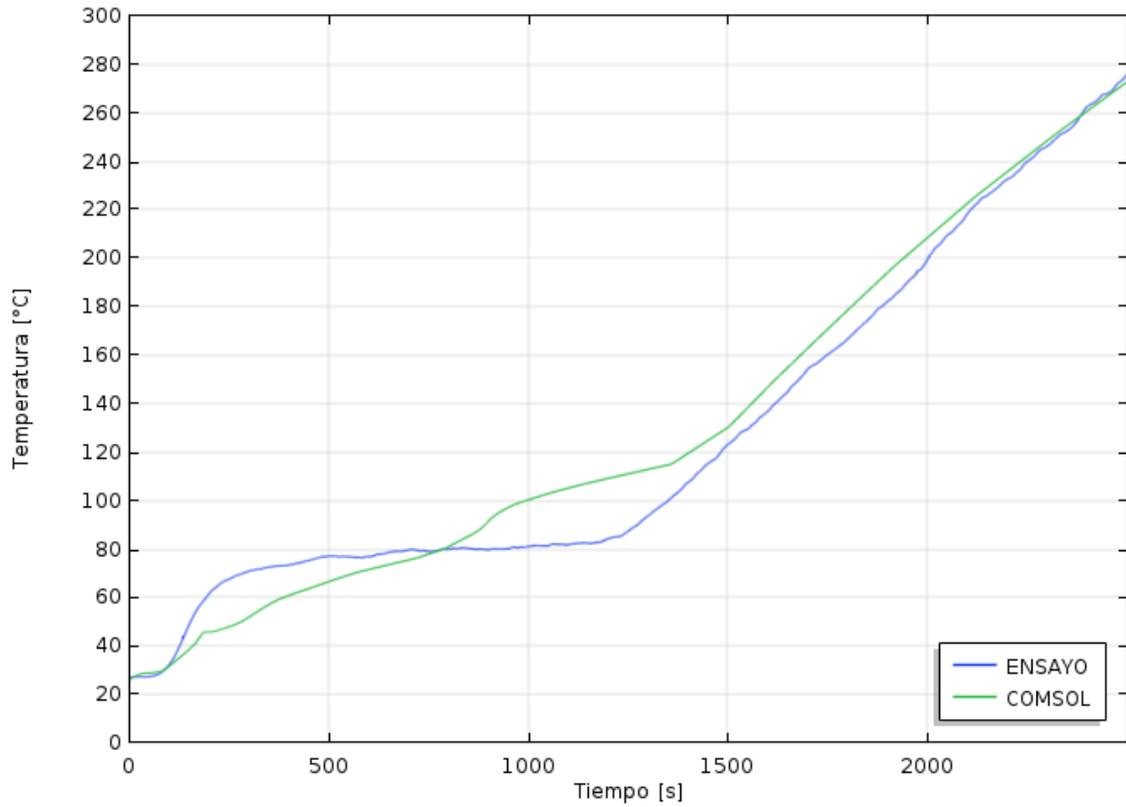


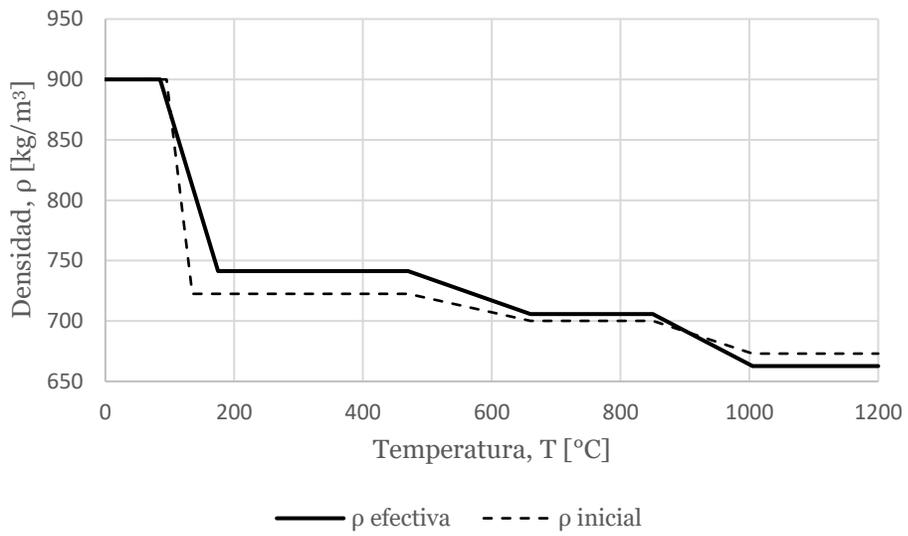
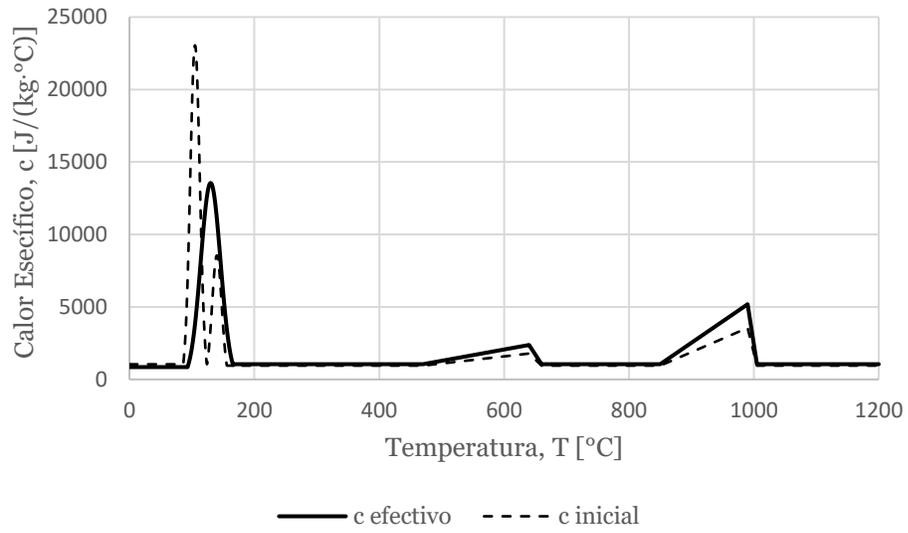
6.5.3 Volcan RH 15



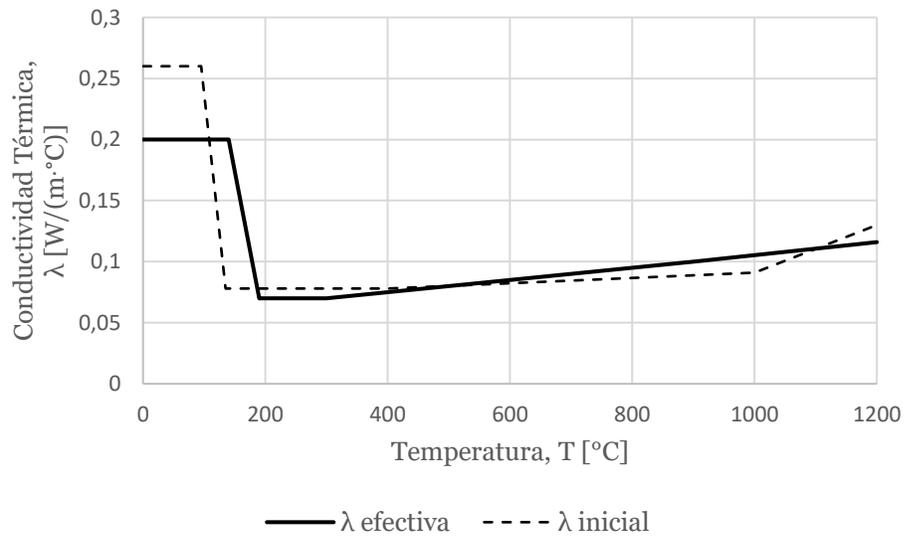
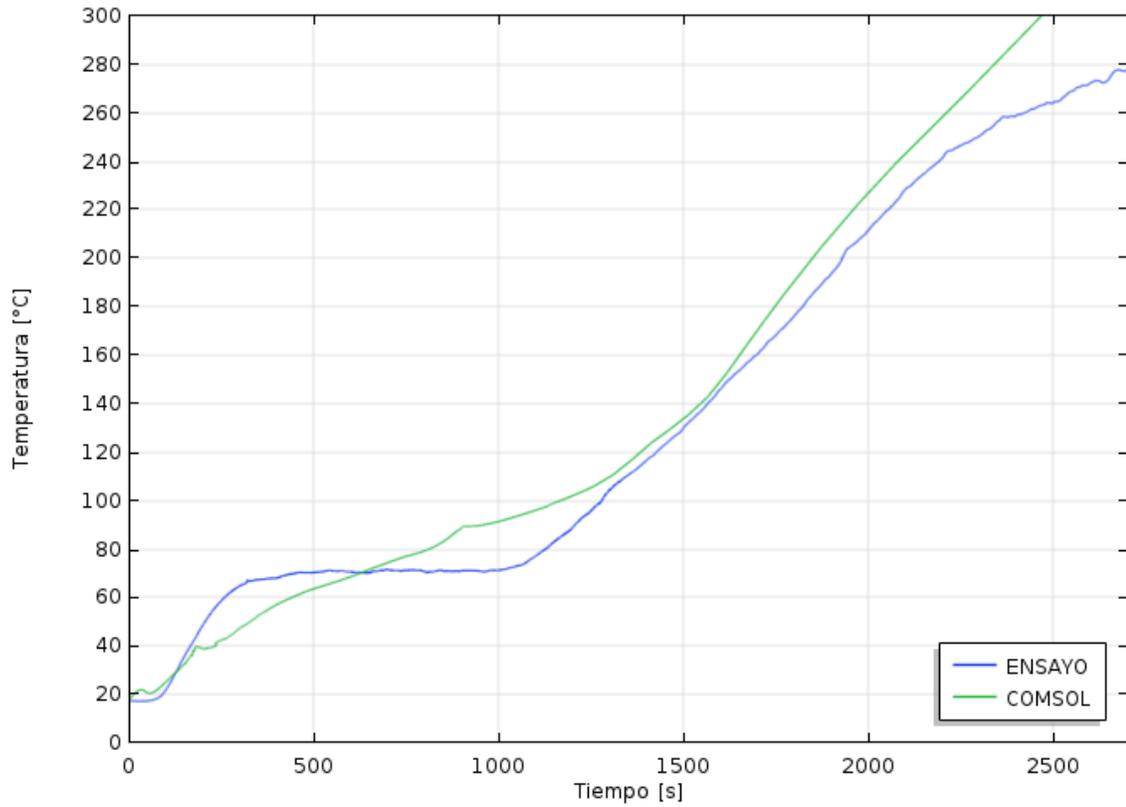


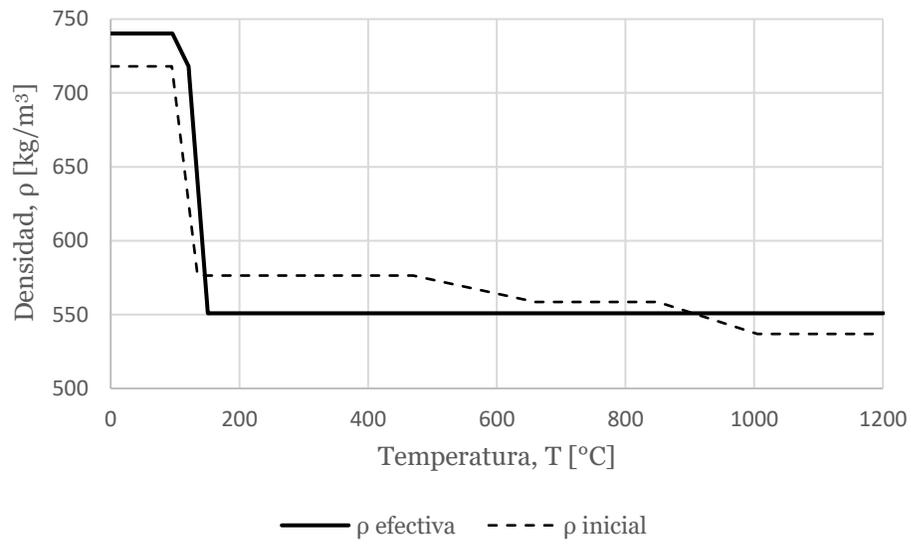
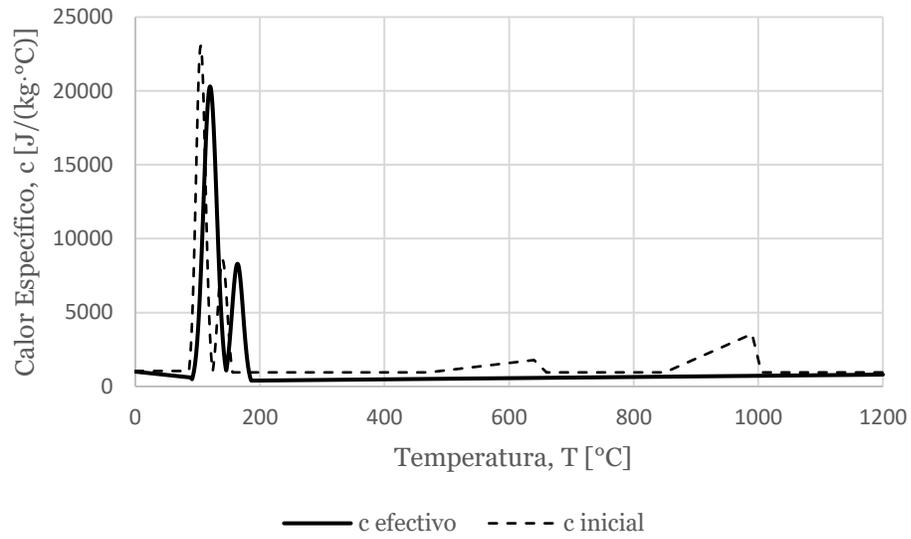
6.5.4 Volcan RF 15



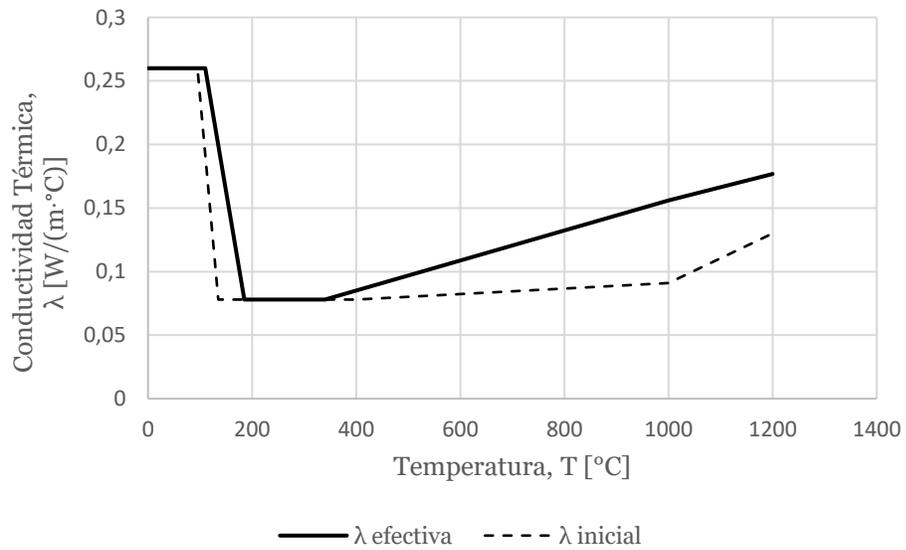
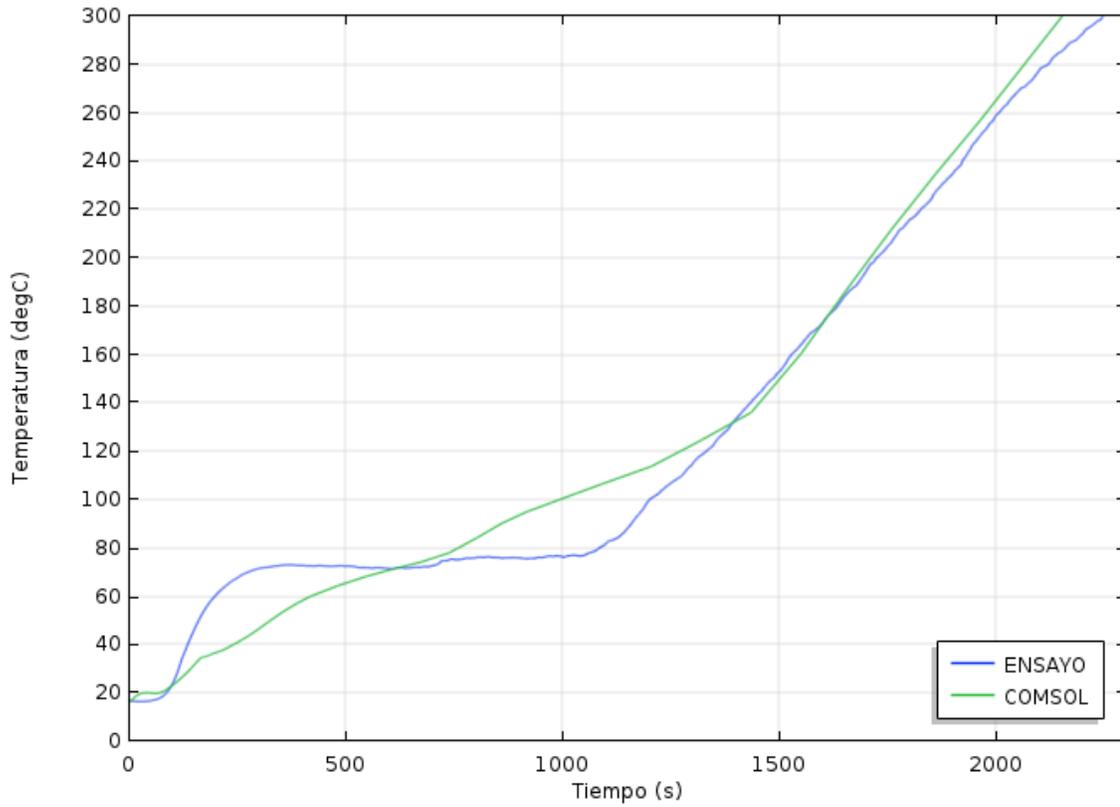


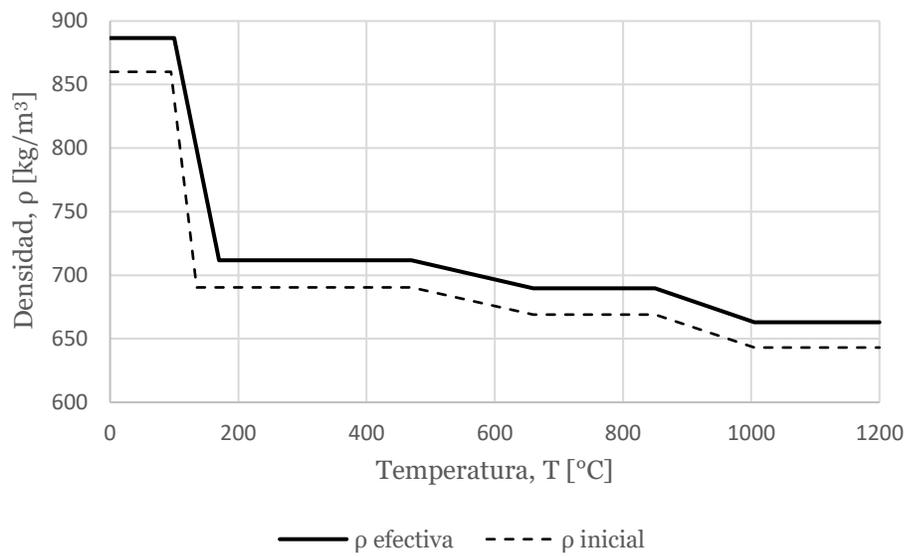
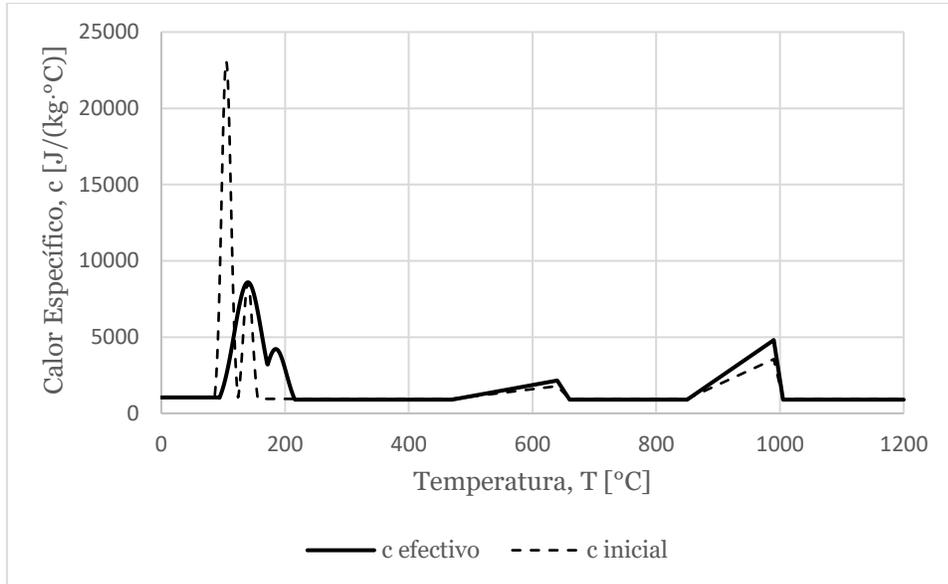
6.5.5 Romeral RH 15





6.5.6 Romeral RF 15





7. DERIVACIÓN VALORES DE DISEÑO

Como se muestra en la sección 1.3, para agregar un material al método aditivo de componentes mejorado hay varios coeficientes que deben especificarse. Estos factores derivan de simulaciones térmicas llevadas a cabo con las propiedades térmicas calibradas presentadas en la sección 6.5. A continuación, se explican las configuraciones simuladas en COMSOL para el desarrollo de los coeficientes.

El tiempo básico de aislación ($t_{aisl,0}$) corresponde a la resistencia al fuego de una capa individual sin influencia de los materiales adyacentes, es decir, según EN 1995-1-2 el tiempo durante el cual, al quedar dicha capa expuesta a un incendio estándar, el incremento promedio de temperatura sobre la totalidad de la superficie no expuesta se limita a 140°C. La configuración simulada se muestra en la siguiente figura:



Fig. 7-1. Configuración simulada para derivar valor básico de aislación. Ref. [3]

El tiempo básico de protección ($t_{prot,0}$) se define como el tiempo desde el inicio de la exposición al incendio estándar hasta que el aumento de temperatura promedio de la superficie no expuesta del material alcanza 250°C. La configuración simulada para su determinación se muestra a continuación.

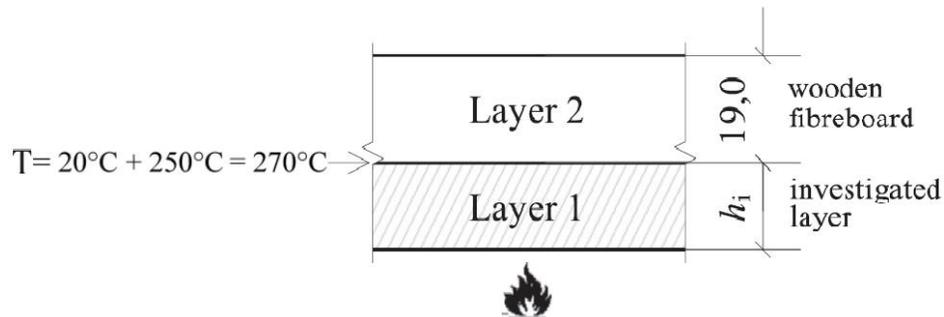


Fig. 7-2. Configuración simulada para derivar valor básico de protección. Ref. [3]

En este trabajo, el material que apoya la capa investigada está representado por OSB de propiedades térmicas en función de la temperatura dadas en **Tablas A.1 a A.3** (ver **Anexo A**).

Los coeficientes de posición consideran la influencia de las capas que preceden ($k_{pos,exp}$) y apoyan ($k_{pos,noexp}$) la capa considerada (en la dirección del flujo de calor) en su desarrollo de temperatura. Se asume que la influencia de las juntas es despreciable y que la falla por protección del revestimiento ocurre a una temperatura de 270 °C.

El coeficiente de posición $k_{pos,exp,n}$ cuando la última capa en el lado no expuesto es investigada, deriva de la configuración mostrada en **Fig. 7-3**. El efecto depende de la suma de los tiempos de protección de las capas precedentes; para cuantificarlo las simulaciones se ejecutan con capas protectoras de espesor 10 a 50 mm con incrementos de 10 mm.

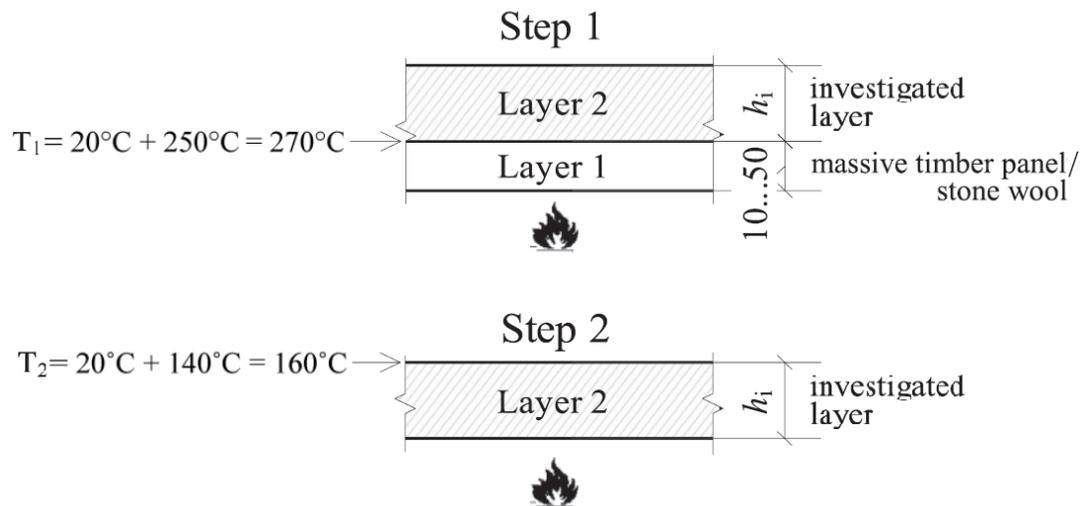


Fig. 7-3. Configuración simulada para derivar coeficiente de posición $k_{pos,exp,n}$. Ref. [3].

Se ejecuta la simulación de dos capas; cuando la temperatura tras la capa protectora alcanza 270 °C (t_1) se asume su falla; la simulación continúa sin esta capa hasta que la temperatura en el lado no expuesto de la capa investigada alcanza 160 °C (t_2). El coeficiente de posición se calcula según la siguiente ecuación:

$$k_{pos,exp,n} = \frac{t_2 - t_1}{t_{aisl,0,2}}$$

Donde:

$t_{aisl,0,2}$ [min]: valor básico de aislación de la capa 2 (capa investigada).

En este trabajo, el material que protege la capa investigada está representado por manta cerámica de propiedades térmicas en función de la temperatura dadas en **Tablas A.4 a A.6** (ver **Anexo A**).

El coeficiente de posición $k_{pos,exp,i}$ se deriva de la simulación de la configuración mostrada en la **Fig.7-4**. Para estudiar el efecto del tiempo que la capa investigada queda protegida, las simulaciones se ejecutan con capas protectoras de espesor 10 a 50 mm con incrementos de 10 mm. Inicialmente la configuración se simula hasta que la temperatura tras la capa protectora alcanza 270 °C (t_1); luego la simulación continúa sin esta capa hasta que la temperatura tras la capa investigada alcanza 270 °C (t_2). El coeficiente de posición se calcula de la siguiente formula:

$$k_{pos,exp,n} = \frac{t_2 - t_1}{t_{prot,0,2}}$$

Donde:

$t_{aisl,0,2}$ [min]: valor básico de aislación de la capa 2 (capa investigada).

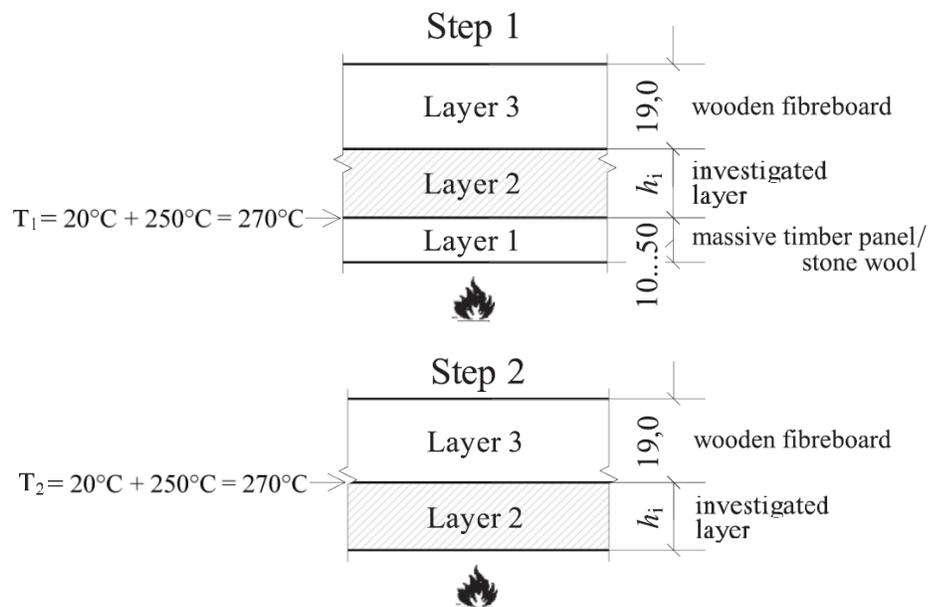


Fig. 7-4. Configuración simulada para derivar coeficiente de posición $k_{pos,exp,i}$. Ref. [3]

En este trabajo, los materiales que protegen y apoyan la capa investigada están generalizados y representados por manta cerámica y OSB respectivamente. Sus propiedades térmicas se muestran en **Anexo A**.

El coeficiente de posición $k_{pos,noexp,i}$ deriva de la simulación de la configuración presentada en **Fig. 7-5**. La capa investigada está apoyada por manta cerámica de propiedades térmicas dadas en **Tablas A.4 a A.6** (ver **Anexo A**). El tiempo requerido para un aumento de temperatura de 270 °C se registra como $t_{prot,1}$. El coeficiente se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$k_{pos,noexp,i} = \frac{t_{prot,1}}{t_{prot,0,1}}$$

Donde:

$t_{prot,0,1}$ [min]: valor básico de protección de la capa 1 (capa investigada).

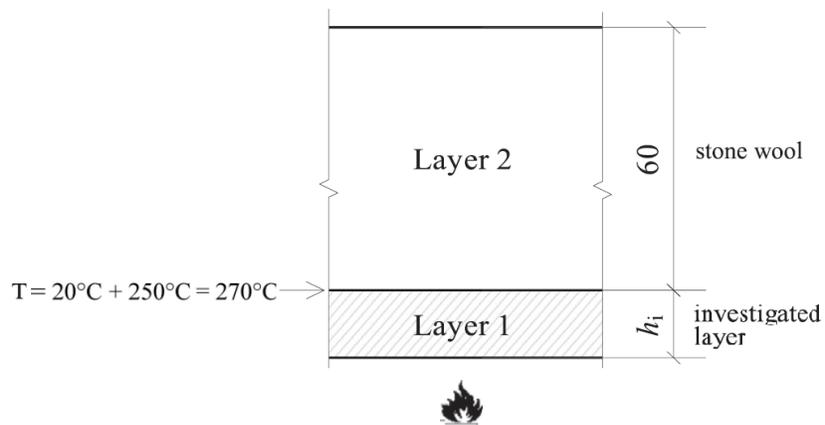


Fig. 7-5. Configuración simulada para derivar coeficiente de posición $k_{pos,noexp,i}$. Ref. [3]

El tiempo de corrección toma en cuenta el desempeño real de materiales usados como revestimientos mejorados contra el fuego (yeso-cartón tipo F según EN 520), que continúan en su lugar más tiempo luego de alcanzar la temperatura de 270 °C (criterio para tiempo de protección). Para dar cuenta de la mayor protección se agrega el tiempo de corrección a la capa precedida por paneles protectores mejorados.

El tiempo de corrección de la última capa Δt_n y para las restantes Δt_i se deriva de la simulación de la configuración mostrada en **Fig. 7-6**. Es necesario conocer a priori el tiempo (o temperatura) de falla del revestimiento investigado para su cálculo.

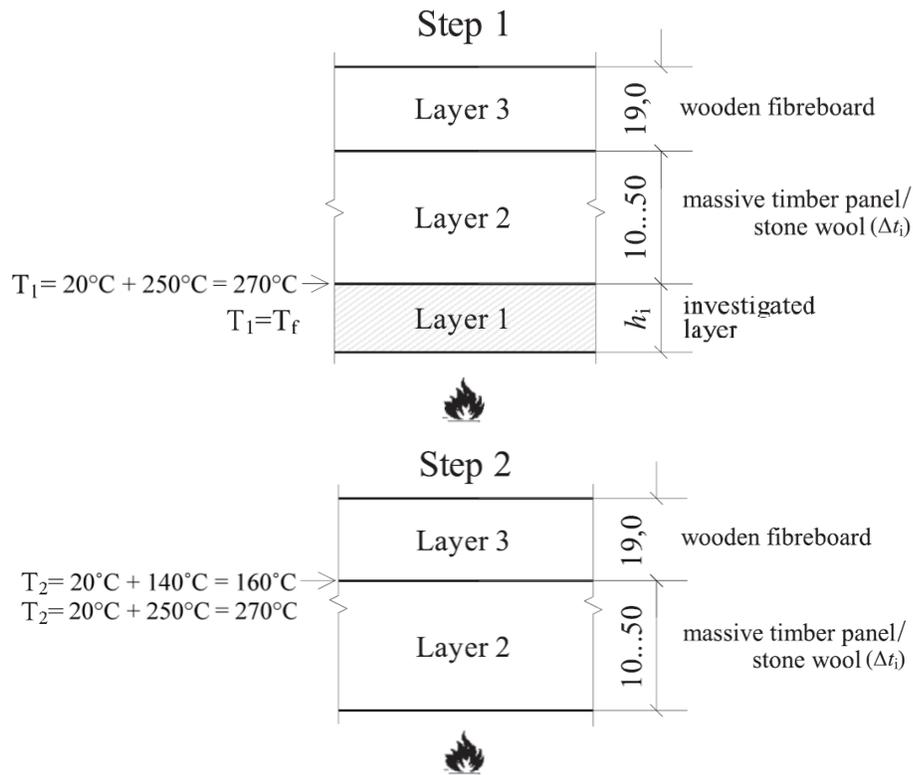


Fig. 7-6. Configuración simulada para determinar tiempo de corrección. Ref. [3]

Primero la simulación se ejecuta hasta que la temperatura tras la capa investigada alcance $T_1=270$ °C y la capa es removida. Se continua la simulación hasta que la temperatura tras la capa sucesora alcance $T_2=160$ °C para Δt_n o $T_2=270$ °C para Δt_i . Los tiempos se registran como $t_{270,160}$ o $t_{270,270}$. Una segunda simulación con la misma configuración inicial se ejecuta hasta que la temperatura alcance la temperatura de falla $T_1=T_f$ y la capa es removida. La simulación continua hasta que tras la casa sucesora se alcance la temperatura $T_2=160$ °C para Δt_n o $T_2=270$ °C para Δt_i . Los tiempos son registrados como $t_{Tf,160}$ o $t_{Tf,270}$. Los tiempos de corrección se calculan según la ecuación:

$$\Delta t_i = t_{Tf,160} - t_{270,160}$$

$$\Delta t_i = t_{Tf,270} - t_{270,270}$$

El coeficiente de junta considera el tipo de junta y su influencia en el tiempo de aislación o protección de esta capa. El coeficiente de junta debe determinarse por ensayos de fuego, comparando configuraciones de ensayo con y sin juntas mediante las siguientes fórmulas:

$$k_{j,n} = \frac{t_{aisl,junta,n}}{t_{aisl,n}}$$

$$k_{j,i} = \frac{t_{prot,junta,i}}{t_{prot,i}}$$

Donde:

$t_{aisl,junta,n}$ [min]: tiempo de aislación de la última capa con juntas;

$t_{prot,junta,i}$ [min]: tiempo de protección de la capa i con juntas.

Siguiendo el programa de simulaciones térmicas detallado anteriormente, se obtienen los siguientes coeficientes del método aditivo de componentes para las placas ensayadas. No se entrega una expresión generalizada para los coeficientes $k_{pos,exp}$ debido a la dispersión de los resultados (ver Fig. 7-7).

Tabla 7-1. Valores básicos de aislación y protección de las placas ensayadas.

Placa	$t_{aisl,0}$ [min]	$t_{prot,0}$ [min]
Knauf RH 15	19	34
Knauf RF 15	20	37
Volcan RH 15	21	35
Volcan RF 15	22	44
Romeral RH 15	20	36
Romeral RF 15	21	37

Tabla 7-2. Valores de los coeficientes de posición.

Placa	$k_{pos,exp,n}$ [-]	$k_{pos,exp,i}$ [-]	$k_{pos,noexp,i}$ [-]
Knauf RH 15	$2 \cdot 10^{-4} \cdot \sum t_{prot,n-1}^2 - 0,018 \cdot \sum t_{prot,n-1} + 1$	$10^{-4} \cdot \sum t_{prot,i-1}^2 - 0,019 \cdot \sum t_{prot,i-1} + 1$	0,67
Knauf RF 15	$9 \cdot 10^{-4} \cdot \sum t_{prot,n-1}^2 - 0,015 \cdot \sum t_{prot,n-1} + 1$	$10^{-4} \cdot \sum t_{prot,i-1}^2 - 0,018 \cdot \sum t_{prot,i-1} + 1$	0,68
Volcan RH 15	$7 \cdot 10^{-5} \cdot \sum t_{prot,n-1}^2 - 0,012 \cdot \sum t_{prot,n-1} + 1$	$6 \cdot 10^{-5} \cdot \sum t_{prot,i-1}^2 - 0,013 \cdot \sum t_{prot,i-1} + 1$	0,75
Volcan RF 15	$8 \cdot 10^{-5} \cdot \sum t_{prot,n-1}^2 - 0,014 \cdot \sum t_{prot,n-1} + 1$	$10^{-4} \cdot \sum t_{prot,i-1}^2 - 0,014 \cdot \sum t_{prot,i-1} + 1$	0,60
Romeral RH 15	$3 \cdot 10^{-5} \cdot \sum t_{prot,n-1}^2 - 0,010 \cdot \sum t_{prot,n-1} + 1$	$8 \cdot 10^{-5} \cdot \sum t_{prot,i-1}^2 - 0,012 \cdot \sum t_{prot,i-1} + 1$	0,65
Romeral RF 15	$10^{-4} \cdot \sum t_{prot,i-1}^2 - 0,017 \cdot \sum t_{prot,i-1} + 1$	$6 \cdot 10^{-5} \cdot \sum t_{prot,i-1}^2 - 0,012 \cdot \sum t_{prot,i-1} + 1$	0,64

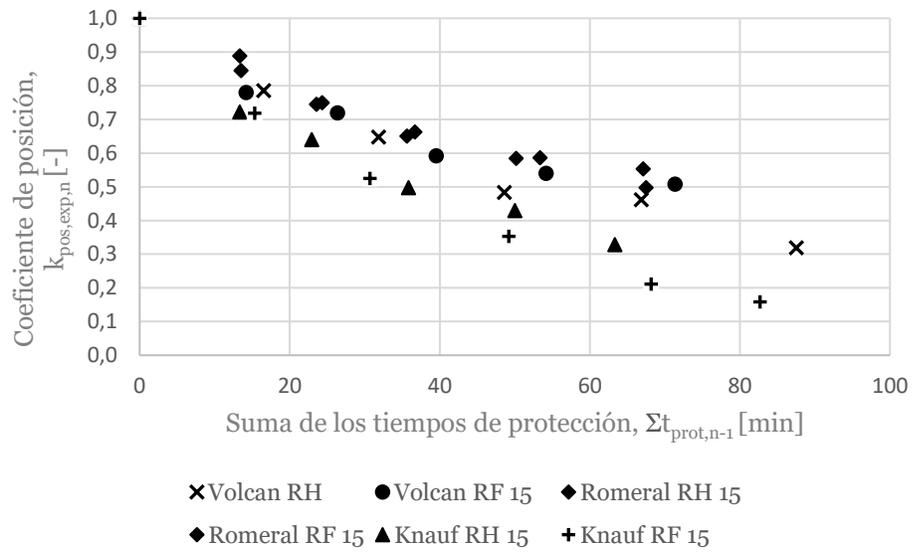
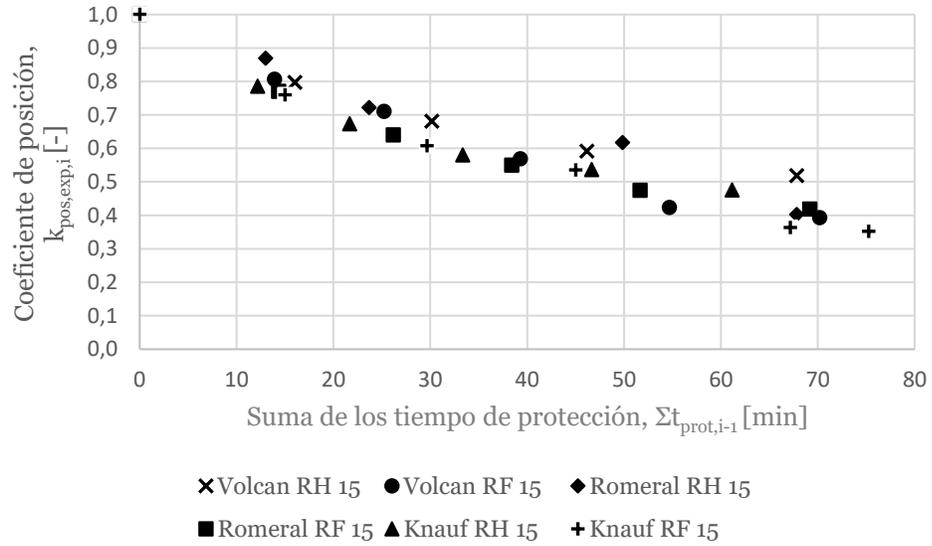


Fig. 7-7. Valores de los coeficientes de posición de las simulaciones con manta cerámica como capa precedente.

8. EJEMPLOS DE CÁLCULO

En esta sección se calcula la resistencia al fuego de un muro de madera consiste en montantes de madera y revestimiento hecho de placas de yeso-cartón tipo RH (**Fig. 7-8**) mediante el método de diseño de EN 1995-1-2 y por el método aditivo de componentes mejorado con factores según Ref. [5] y los determinados en este trabajo. Para estos ejemplos solo se analiza solo la trayectoria de transferencia de calor 2. Los resultados deben ser comparados con ensayos a escala real.

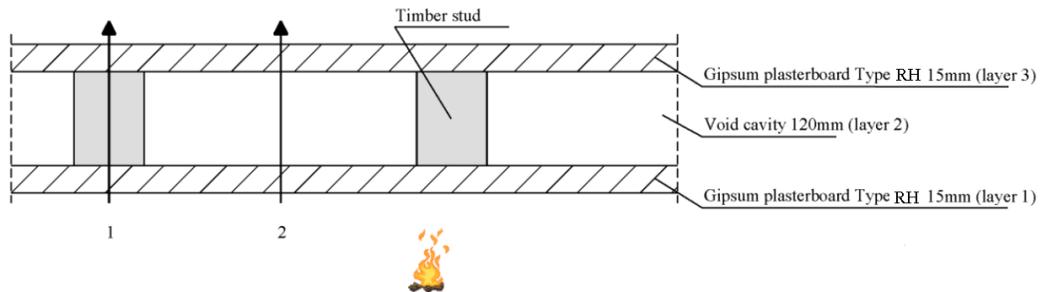


Fig. 7-8. Sección transversal muro madera. Ref. [5]

- **Método diseño EN 1995-1-2**

$$t_{aisl} = \sum_{i=1}^n t_{aisl,i}$$

$$t_{aisl,i} = t_{aisl,0,i} \cdot k_{pos,i} \cdot k_{j,i}$$

(1) Tiempo de aislación capa 1 (yeso cartón tipo RH espesor 15 mm):

$$t_{aisl,0,1} = 1,4 \cdot h_p = 1,4 \cdot 15 = 21 [min];$$

$$k_{pos,1} = 0,8 \text{ (Tabla 1-1)}.$$

(2) Tiempo de aislación capa 2 (cavidad vacía de 120 mm):

$$t_{aisl,0,2} = 5,0 [min];$$

$$k_{pos,2} = 1,0.$$

(3) Tiempo de aislación capa 3 (yeso-cartón tipo RH espesor 15 mm):

$$t_{aisl,0,1} = 1,4 \cdot h_p = 1,4 \cdot 15 = 21 [min];$$

$$k_{pos,3} = 0,7 \text{ (Tabla 1-2);}$$

$$k_{j,1,2,3} = 1,0 \text{ (placa de yeso sin juntas en Tabla 1-4)}.$$

(4) Tiempo de aislación (resistencia al fuego) del muro:

$$t_{aisl} = t_{ails,1} + t_{ails,2} + t_{ails,3} = 21 \cdot 0,8 \cdot 1,0 + 5,0 \cdot 1,0 + 21 \cdot 0,7 \cdot 1,0 = 36,5 [min].$$

- **Método aditivo de componentes mejorado con factores de Ref. [5]**

$$t_{aisl} = \sum_{i=1}^{n-1} t_{prot,i} + t_{aisl,n}$$

$$t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} \cdot k_{pos,exp,i} \cdot k_{pos,noexp,i} + \Delta t_i) \cdot k_{j,i}$$

$$t_{aisl,n} = (t_{aisl,0,n} \cdot k_{pos,exp,n} + \Delta t_n) \cdot k_{j,n}$$

(1) Tiempo de protección capa 1 (yeso cartón tipo RH espesor 15 mm):

$$t_{prot,0,1} = 30 \cdot \left(\frac{h_1}{15}\right)^{1,2} = 30 \cdot \left(\frac{15}{15}\right)^{1,2} = 30 \text{ [min]} \text{ (Tabla 1-5);}$$

$$k_{pos,exp,1} = 1,0 \text{ (sin capa anterior);}$$

$$k_{pos,noexp,1} = 0,5 \cdot h_1^{0,15} = 0,5 \cdot 15^{0,15} = 0,75 \text{ (Tabla 1-7)}$$

$$\Delta t_1 = 0 \text{ (placa tipo RH)}$$

$$k_{j,1} = 1,0 \text{ (placa de yeso sin juntas en Tabla 1-9)}$$

$$t_{prot,1} = (t_{prot,0,1} \cdot k_{pos,exp,1} \cdot k_{pos,noexp,1} + \Delta t) \cdot k_{j,1} = (30,0 \cdot 1,0 \cdot 0,75 + 0) \cdot 1,0 \\ = 22,5 \text{ [min]}.$$

(2) Tiempo de aislación capa 3 (yeso cartón tipo RH espesor 15 mm):

$$t_{aisl,0,3} = 24 \cdot \left(\frac{h_3}{15}\right)^{1,4} = 24 \cdot \left(\frac{15}{15}\right)^{1,4} = 24 \text{ [min]} \text{ (Tabla 1-5)}$$

$$\sum_{i=1}^2 t_{prot,i} = 22,5 + 0 > \frac{t_{aisl,0,3}}{2} = \frac{24}{2} \rightarrow k_{pos,exp,3} = 1,6 \cdot 0,5 \cdot \sqrt{\frac{t_{aisl,0,3}}{\sum_{i=1}^2 t_{prot,i}}} = 1,6 \cdot 0,5 \cdot \sqrt{\frac{24}{22,5}}$$

$$= 0,83 \text{ (Tabla 1-6 y Tabla 1-10);}$$

$$\Delta t_3 = 0 \text{ (placa tipo RH);}$$

$$k_{j,3} = 1,0 \text{ (placa de yeso sin juntas en Tabla 1-9);}$$

$$t_{aisl,3} = (t_{aisl,0,3} \cdot k_{pos,exp,3} + \Delta t_3) \cdot k_{j,3} = (24,0 \cdot 0,83 + 0) \cdot 1,0 = 19,9 \text{ [min]}.$$

(3) Tiempo de aislación (Resistencia al fuego) del muro;

$$t_{aisl} = t_{prot,1} + t_{prot,2} + t_{aisl,3} = 22,5 + 0 + 19,9 = 42 \text{ [min]}.$$

- **Método aditivo de componentes mejorado con factores de este trabajo**

$$t_{aisl} = \sum_{i=1}^{n-1} t_{prot,i} + t_{aisl,n}$$

$$t_{prot,i} = (t_{prot,0,i} \cdot k_{pos,exp,i} \cdot k_{pos,noexp,i} + \Delta t_i) \cdot k_{j,i}$$

$$t_{aisl,n} = (t_{aisl,0,n} \cdot k_{pos,exp,n} + \Delta t_n) \cdot k_{j,n}$$

(1) Tiempo de protección capa 1 (placa Knauf RH espesor 15 mm)

$$t_{prot,0,1} = 34 \text{ [min]} \text{ (Tabla 7-1);}$$

$$k_{pos,exp,1} = 1,0 \text{ (sin capa anterior);}$$

$$k_{pos,noexp,1} = 0,67 \text{ (Tabla 7-2)}$$

$$\Delta t_1 = 0 \text{ (placa tipo RH)}$$

$$k_{j,1} = 1,0 \text{ (placa de yeso sin juntas);}$$

$$t_{prot,1} = (t_{prot,0,1} \cdot k_{pos,exp,1} \cdot k_{pos,noexp,1} + \Delta t) \cdot k_{j,1} = (34,0 \cdot 1,0 \cdot 0,67 + 0) \cdot 1,0 \\ = 22,8 \text{ [min]}.$$

(2) Tiempo de aislación capa 3 (yeso cartón tipo RH espesor 15 mm):

$$t_{aisl,0,3} = 19 \text{ [min]} \text{ (Tabla 7-1);}$$

$$k_{pos,exp,3} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot \sum t_{prot,n-1}^2 - 0,0179 \cdot \sum t_{prot,n-1} + 1 \\ = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 22,8^2 - 0,0179 \cdot 22,8 + 1 \\ = 0,70 \text{ (Tabla 7-2);}$$

$$\Delta t_3 = 0 \text{ (placa tipo RH);}$$

$$k_{j,3} = 1,0 \text{ (placa de yeso sin juntas);}$$

$$t_{aisl,3} = (t_{aisl,0,3} \cdot k_{pos,exp,3} + \Delta t_3) \cdot k_{j,3} = (19,0 \cdot 0,70 + 0) \cdot 1,0 = 13,3 \text{ [min]}.$$

(3) Tiempo de aislación (Resistencia al fuego) del muro;

$$t_{aisl} = t_{prot,1} + t_{prot,2} + t_{aisl,3} = 22,8 + 0 + 13,3 = 36,1 \text{ [min]}.$$

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

Como se plantea en la sección introductoria, el diseño resistente al fuego de estructuras de madera ha sido ampliamente estudiado en Europa e incluido en su normativa de construcción. En el caso de Chile, la normativa referente a prevención de incendios en edificios se basa en ensayos de laboratorio y carece de métodos analíticos de evaluación de las exigencias de resistencia al fuego. Las placas de yeso-cartón como material que forma parte de un gran número de soluciones constructivas, tiene una función importante en el confinamiento de las llamas durante un incendio, por lo tanto, resulta necesaria nueva información sobre su desempeño en tales casos. Los resultados de este trabajo profundizan el conocimiento nacional en este campo y tienen valor práctico como propuesta para implementar en el país el método aditivo de componentes como procedimiento de diseño resistente al fuego de estructuras de madera, sin embargo, debido al contexto sanitario actual que afecta al país y al mundo, queda pendiente la verificación por ensayos a escala real de la resistencia al fuego predicha con estos.

Se proporcionan valores de diseño para seis placas de yeso-cartón comercialmente disponibles en el país. El efecto del espesor de las placas en su capacidad aislante no pudo ser estudiado en este trabajo pues solo se ensayaron placas de espesor 15 mm. Para derivar ecuaciones de diseño generalizadas son necesarios los datos experimentales de al menos 3 placas tipo RH, 3 placas tipo RF de distinto espesor, y de 6 placas de clasificación estándar. Los resultados muestran que, en cuanto a los tiempos de aislación y protección (ver **Tabla 7-1**), no existe mayor diferencia entre las distintas marcas ensayadas y que las placas de clasificación RF exhiben valores ligeramente mayores a las placas tipo RH. En promedio se tiene que $t_{ails,0} = 20 [min]$ y $t_{prot,0} = 36 [min]$. En investigaciones europeas se informa que para placas de yeso-cartón de 15 mm $t_{ails,0} = 24 [min]$ y $t_{prot,0} = 30 [min]$ (ver **Tabla 1-5**). Se presume que la mayor función protectora de las placas nacionales se debe a su composición, sin embargo, cuando se compara la resistencia al fuego predicha con factores europeos y nacionales se obtiene un valor más conservador con los últimos. Este hecho puede permitir adoptar los valores de la normativa europea para el diseño resistente al fuego en territorio nacional mientras se desarrolla información propia.

Un cálculo más preciso de la resistencia al fuego de una solución constructiva requiere mayor investigación. Se menciona que las placas de clasificación F tienen un desempeño mejorado en caso de incendio, permaneciendo fijas en su lugar por más tiempo que placas tipo H o A. Este hecho mejora la resistencia al fuego de un elemento constructivo y no ha sido mensurado en materiales nacionales tipo RF. Tampoco se ha cuantificado el efecto desfavorable de las juntas de construcción o de las cavidades vacías en la resistencia al fuego. Lo anterior deja paso a futuras investigaciones para robustecer el trabajo aquí realizado.

El desarrollo de este trabajo permite concluir que la resistencia al fuego de placas de yeso-cartón (u otros materiales de revestimiento) bajo consideración de su función aislante puede estudiarse mediante modelación por elementos finitos en algún software de aplicaciones ingenieriles. Las simulaciones computacionales parecen ser una herramienta subutilizada, a pesar de ser un método de cálculo menos costoso y mucho más versátil. La fiabilidad de los resultados de las simulaciones térmicas depende en gran medida de los parámetros térmicos que describen a los materiales. Como se menciona en secciones anteriores muchos factores influyen en la variación de las propiedades térmicas con la temperatura y en muchos casos no bien documentados en la literatura. El trabajo aquí realizado trata por este motivo ser conservador en su desarrollo, apuntando más por la seguridad que por la precisión de los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Structural Fire Design of Timber Frame Assemblies Insulated by Glass Wool and Covered With GypsumPlasterboards. A. Just, 2010.
- [2] NCh 935/1:1997. Prevención de Incendios en Edificios-Ensayos de Resistencia al Fuego-Parte 1: Elementos de Construcción en General.
- [3] Experimental and Numerical Analysis of Gypsum Plasteboards in Fire. A. Frangi, V. Schleifer and M. Fontana. Institute os Structural Engineering, ETH Zurich, 2010.
- [4] Procedure For Implementing New Materials to the Component Additive Method. K. N. Mager, A. Just, J. Schmid, N. Whrther, M. Klippel, D. Brandon, A. Frangi. 2017.
- [5] Fire Safety in Timber Buidings. Technical Guideline for Europe. Excerpt of chapters 5-7 on Structural Fire Design.
- [6] Comportamiento al Fuego de Elementos Constructivos de Madera. M.Wagner. Universidad de Chile Departamento de Ingeniería Civil.
- [7] EN 1995-1-2, Eurocode 5. Design of timber structures, Part 1-2: General –Structural fire design. CEN, Bruselas 2004.
- [8] Thermal and Mechanical Properties of Gypsum Boards and Their Influences on Fire Resistance of Gypsum Board Based Systems. University of Manchester, 2011.
- [9] Use of Thermogravimetric Analysis Technique for the Characterization of Construction Materials. The Gypsum Case. M. V. Borrachero, J. Payá, M. Bonilla ang J. Monzó. 2008.
- [10] Heat and Mass Transfer Through Gypsum Partitions Subjected to Fire Exposure. S. Kukuck. 2009.
- [11] Gypsum Board Thermal Properties Exposed to High Temperature and Fire Condition. Azree Othuman Mydin.
- [12] Thermal Properties of Wood, Gypsum and Insulation at Elevated Temperatures. Bénichou, N.; Sultan, M. A.; MacCallum, C.; Hum, J.K. 2001.
- [13] Thermal Conductivity of Gypsum Plasterboards Beyond Dehydration and Its Correlation With the Pore Structure.Ghazi Wakili K., Koebel M., Kaufmann J., Derulyn H., Hofer M., Glaetli, and Modregger P. 2012.
- [14] Thermal Properties of Gypsum Plasterboard at High Temperatures. Geoff Thomas. 2002.
- [15] Four Types of Gypsum Plaster Boards and Their Thermophysical Properties Under Fire Condition. K. Ghazi Wakili and E. Hugi. 2008.
- [16] Experimental and Numerical Method for Determining Wood Char-Layer at High Temperatures Due to Anaerobic Heating. E.M.M. Fonseca & L.M.S. Barreira. 2011.
- [17] Chemical Yields From Low-Temperature Pyrolysis of CCA-Treated Wood. Qirong Fu, Dimitris S. Argyropolous, Lucian A. Lucia, David C. Tilotta, Stan T. Lebow. 2014.
- [18] CEN, EN 1995-1-2:2004. Eurocode 5: Design of Timber Structures- Part 1-2: General- Structural Fire Desig, 2004.
- [19] Wood-Based Composite Materials. Panel Products, Glued-Laminated Timber, Structural Composite Lumber, and Wood-Nonwood Composite Materials.Nicile M. Stark, Zhiyong Cai, Charles Carll.

- [20] Thermophysical Properties of OSB Boards Versus Equilibrium Moisture Content. R. Igaz, L'ubos K. Ivan R. Milanda G. and Martin K. 2017.
- [21] Moisture-Related Properties of Wood and the Effects of Moisture on Wood and Wood Products. Charles Carll and Alex C. Wiedenhoft. 2009.
- [22] Determination of Thermal Properties of Wood and Wood Based Products by Using Transient Plane Source. Bijan -ZARRABI, Lars BOSTROM.2004.
- [23] Measurement of Thermal Properties at Elevated Temperatures. Robert Janson. SP Swedish National Testing and Research Institute.
- [24] Thermogravimetric Analysis of Fire Retardant Treated Particleboards. P. S. Karastergiou and J.L. Philippou. 2000.
- [25] CEN, EN 520:2004 Gypsum Plasterboards – Definitions, Requirements and Test Methods, 2004.
- [26] NCh 146/1 Of. 2000. Planchas o Placas de Yeso-Cartón – Parte 1: Requisitos.
- [27] NCh 146/2. Of. 2000. Planchas o Placas de Yeso-Cartón – Parte 2: Métodos de Ensayo.
- [28] EN 12524, Building materials and Products – Hygrothermal Properties - Tabulated Design Values and Procedures for Determining Declared and Design Thermal Values.
- [29] EN 1991-1-2, Eurocode 1: Actions on Structures - Part1-2: General Actions – Actions on Structures Exposed to Fire, CEN, 2002.
- [30] Rules of Thumb for Mechanical Engineers. J. Edwards Pope. 1996.

ANEXO A: PROPIEDADES TÉRMICAS USADAS

Tabla A.1: Conductividad térmica OSB

[°C]	[W/(m·°C)]
23	0,130
75	0,147
105	0,154
150	0,146
190	0,122
270	0,100
350	0,076

A.2 Calor específico OSB

[°C]	[J/(kg·°C)]
23	1700
75	2125
105	2291
150	2809
200	2222
250	1800
300	789

A.3 Densidad OSB

[°C]	[kg/m ³]
23	680
30	680
150	632,4
250	632,4
400	428,4

A.4 Conductividad térmica manta cerámica

[°C]	[W/(m·°C)]
20	0,04
204	0,06
316	0,08
427	0,100
538	0,133
649	0,175
760	0,222
871	0,268
982	0,325
1093	0,390

A.5 Calor específico manta cerámica

[°C]	[J/(kg·°C)]
20	1037
204	1110
316	1155
427	1199
538	1243
649	1287

A.6 Densidad manta cerámica

[°C]	[kg/m ³]
25	96
100	95,8
194	94,56
311	94,36
400	93,95
543	93,73
600	93,33
720	93,12
810	93,12
924	91,89
1000	90,24

APÉNDICE 1: PROPIEDADES TÉRMICAS INICIALES

1.1 Razón conductividad térmica/conductividad térmica inicial placas yeso-cartón

[°C]	[-]
20	1,00
95	1,00
135	0,50
400	0,50
1000	0,70
1200	0,90

1.2 Razón calor específico/ calor específico inicial placas de yeso-cartón

[°C]	[J/(kg·°C)]
20	1,09
85	1,09
105	23,10
124	1,00
140	8,60
156	1,00
470	1,00
640	1,84
660	1,00
850	1,00
990	3,60
1005	1,00
1200	1,00

3.3 Razón densidad/densidad inicial placas de yeso-cartón

[°C]	[kg/m ³]
20	1,03
95	1,03
135	0,80
470	0,8
660	0,78
850	0,78
1005	0,75
1200	0,75