



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

**ANÁLISIS NORMATIVO Y ESTUDIO ESTADÍSTICO DE
ENSAYOS DE RESISTENCIA AL FUEGO DE ELEMENTOS
DIVISORIOS HORIZONTALES Y VERTICALES EN BASE A
MADERA REALIZADOS EN CHILE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIEGO TOMÁS ORTIZ ACEVEDO

PROFESORA GUÍA:
PAULA ARANEDA GUERRA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MARIO WAGNER MUÑOZ
MIGUEL PÉREZ ÁRIAS

SANTIAGO DE CHILE
2018

RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil
en Estructuras, Construcción y Geotecnia
POR: Diego Tomás Ortiz Acevedo
PROFESORA GUÍA: Paula Aranedo Guerra
FECHA: 12/04/2018

**ANÁLISIS NORMATIVO Y ESTUDIO ESTADÍSTICO DE ENSAYOS DE
RESISTENCIA AL FUEGO DE ELEMENTOS DIVISORIOS HORIZONTALES
Y VERTICALES EN BASE A MADERA REALIZADOS EN CHILE**

En la actualidad, el Gobierno de Chile está realizando esfuerzos para generar cambios en los materiales utilizados en la construcción, enfocados en aumentar la utilización de madera como material en las construcciones de uso no industrial. Por lo anterior este trabajo busca aportar a solucionar una de las problemáticas que limitan el uso de la madera. A nivel nacional existen requisitos normativos obligatorios de resistencia al fuego para elementos divisorios presentes en la OGUC, que son abordados principalmente de dos maneras: - Eligiendo elementos del *Listado Oficial de Comportamiento al Fuego de Elementos y Componentes de la Construcción*, MINVU, - Certificando la resistencia al fuego del elemento divisorio en una de las instituciones acreditadas. Lo anterior implica que si se desea utilizar una solución constructiva divisoria con entramado de madera, que no se encuentre en el listado del MINVU, se tenga que incurrir en gastos y tiempos extras, para que el elemento divisorio cuente con el respaldo correspondiente, que permita cumplir con las exigencias de la normativa vigente respecto a la resistencia al fuego.

Este trabajo tiene como objetivo aportar a solucionar la problemática anterior, realizando un estudio a los resultados de la mayor cantidad posible de ensayos de resistencia al fuego realizados en Chile, a estructuras divisorias horizontales y verticales con entramado de madera.

Para esto se realiza una revisión de la normativa nacional de resistencia al fuego, junto con un estudio de los documentos internacionales que permitan la estimación de la resistencia al fuego mediante el cálculo, que sean aplicables a los materiales aislantes de las estructuras divisorias con marco de madera nacionales.

Este trabajo concluye en términos generales dos cosas importantes:- Los materiales aislantes más utilizados (OSB, yeso-cartón, fibrocemento, lana mineral y de vidrio) y las características de los entramados de madera (escuadría 50x75[mm] aprox.), - Que los métodos de cálculo internacionales para estimar la resistencia al fuego, son adaptables a las características de las estructuras nacionales, logrando buenos resultados y manteniendo la seguridad. Esta última conclusión implica la necesidad de realizar estudios experimentales y teóricos, para la correcta adaptación de una metodología de cálculo a nivel nacional, que permita estimar la resistencia al fuego.

A mi madre.

Agradecimientos

Deseo dar mis agradecimientos a todas las personas que dedicaron parte de su tiempo de alguna u otra manera para aportar en este trabajo de memoria, el cual significa para mí la culminación del logro actual más grande de mi vida.

En lo académico quiero agradecer a todos los profesores y compañeros que me han acompañado durante estos años como estudiante. También agradecer el aporte de los profesores de comisión y mi profesora guía, junto un especial agradecimiento a Mauricio Rey por su activa tutela durante todo el proceso.

No quiero dejar de mencionar especialmente a Lorenzo, Francisca y Joaquín, quienes ayudaron en puntos fuera de lo académico, pero sin su aporte habría sido imposible terminar de buena manera este trabajo.

Por su puesto el ultimo agradecimiento, pero más importante, es para toda mi familia, mi padre, mi madre, mi hermana, mi hermano, mis abuelas, mis abuelos, mis tías, mis tíos, los sanguíneos y los que no, los que están y los que ya no.

Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| Capítulo 1. Introducción | 1 |
| 1.1 Objetivos | 4 |
| 1.1.1 Generales | 4 |
| 1.1.2 Específicos | 4 |
| 1.2 Metodología | 4 |
| 1.2.1 Revisión de antecedentes nacionales | 4 |
| 1.2.2 Revisión de antecedentes Internacionales | 5 |
| 1.2.3 Recopilación y Descripción ensayos RF nacionales | 5 |
| 1.2.4 Análisis y estadísticas de los ensayos de resistencia al fuego | 5 |
| 1.2.5 Descripción del desarrollo del método CAM para el cálculo de resistencia al fuego de estructuras divisorias con marcos de madera | 6 |
| 1.2.6 Revisión de una propuesta para la calibración del método | 6 |
| Capítulo 2. Marco Teórico | 7 |
| 2.1 Revisión de normativa chilena | 7 |
| 2.1.1 Requerimientos de resistencia al fuego de la OGUC | 7 |
| 2.1.2 Norma Nch935/1. Prevención de incendio en edificios – Ensaye de resistencia al fuego – Parte 1: Elementos de construcción general | 11 |
| 2.1.3 Descripción Listado Oficial de Comportamiento al Fuego de Elementos y Componentes de la Construcción, MINVU | 12 |
| 2.2 Revisión de metodologías internacionales | 14 |
| 2.2.1 Metodología CAM general | 14 |
| 2.2.2 Design for Code Acceptance 4 – Component Additive Method for Calculating and Demonstrating Assembly Fire Resistance, American Wood Council 2014 | 16 |
| 2.2.3 CAM de EN 1995 1-2 Eurocódigo 5: Design of timber structures, Centro Europeo de Normalización | 18 |
| 2.2.4 CAM Fire safety in timber buildings, Technical Guideline for Europe – SP Technical Research Institute of Sweden - SP Trätekt, 2010 | 19 |
| 2.2.5 Estudios de comportamiento de resistencia al fuego de elementos compuestos con entramados de madera y posterior modelo predictivo | 21 |

| | |
|---|----|
| Capítulo 3. Recopilación y descripción de ensayos | 23 |
| 3.1 Información disponible y generación de base de datos | 23 |
| 3.2 Análisis elementos Listado Oficial de Comportamiento al Fuego de Elementos y Componentes de la Construcción, MINVU 2014 | 23 |
| 3.4 Análisis de Informes de resistencia al fuego de la base de datos generada | 33 |
| Capítulo 4. Análisis mediante cálculo de resistia al fuego a elementos divisorios con entramado de madera de la base de datos | 51 |
| Capítulo 5. Revisión de una propuesta para agregar nuevos materiales al método de adición de componentes | 55 |
| Capítulo 6. Conclusiones | 60 |
| Bibliografía | 64 |
| Anexo | 66 |

Capítulo 1. Introducción

En Chile y el mundo, el interés por el uso de materiales sustentables y de menor impacto ambiental está en alza, llevando el foco de la industria en materiales alternativos, como la madera. En la actualidad, la construcción de viviendas en madera en países como Estados Unidos y Canadá representa más del 80% para edificaciones habitacionales de baja altura, explosión que se debe a las virtudes de la madera no sólo como elemento constructivo y su fácil disposición, sino que también por el menor impacto ecológico que significa su uso, comparado a otros elementos utilizados en construcción como el acero, el hormigón y albañilería, entre otros.

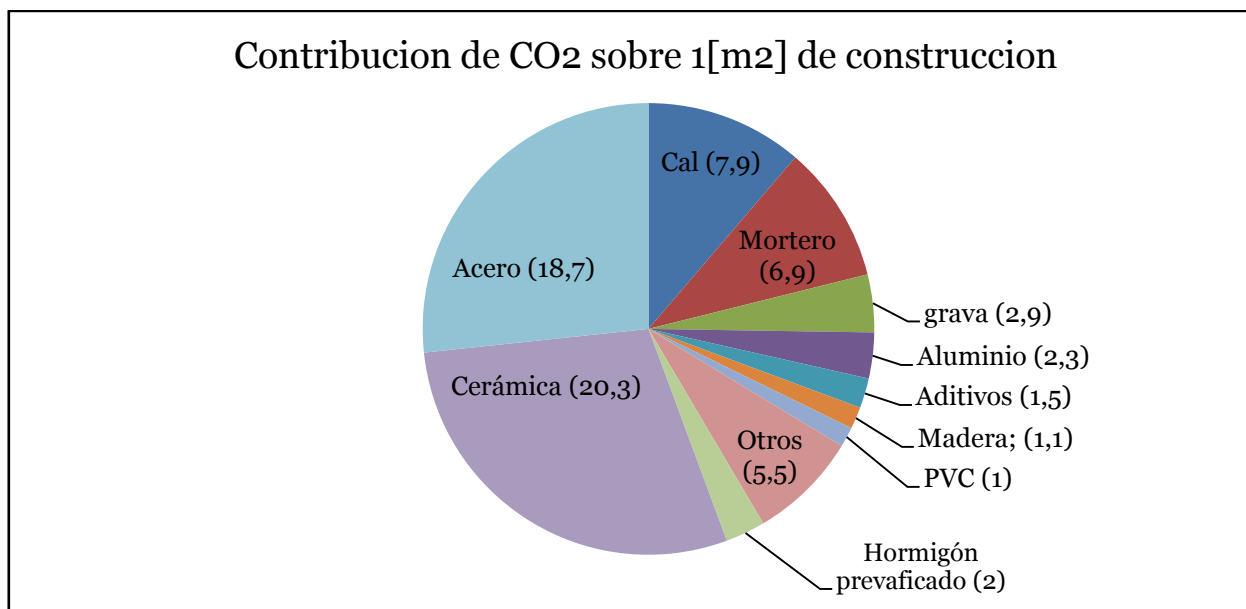


Gráfico 1: Contribución de los materiales necesarios para la construcción de 1 m2 sobre las emisiones de CO2 asociadas a su fabricación. ^[1]

Chile cuenta con una producción importante de madera, pues según las últimas cifras del Instituto Forestal, en el año 2014 se tuvo un total en plantaciones de 2.426.722 hectáreas, compuestas el 59,1% de Pino *Radiata*, 23,6% de Eucalipto *Globulus*, 10,5% de Eucalipto *Nitens* y 6,8% de otras especies. ^[2]

En este contexto, y luego de un diagnóstico realizado por el MINVU sobre el estado de la construcción en madera en Chile, se determinó que la normativa existente contiene vacíos que no permiten un correcto desarrollo de proyectos de edificación con madera. A esto se suma la necesidad de profesionales mejor calificados, idóneos para las exigencias actuales. Todas estas conclusiones fueron expuestas en un estudio realizado por el Centro de Innovación en Madera (CIM UC-Corma) el 2014. ^[3]

El Gobierno de Chile está invirtiendo para impulsar el desarrollo de la construcción en madera, dada la problemática expuesta. Se han formado programas de trabajo liderados por equipos del MINVU y CORFO, como lo es el *Programa Estratégico de*

Especialización Inteligente para la Industria de la Madera de Alto Valor, involucrando instituciones como el Instituto Forestal (INFOR), CIM (Centro UC de Innovación en Madera) e IDIEM (Instituto de Investigaciones y Ensayos de Materiales), además de incorporar investigaciones paralelas provenientes de la Universidad de Concepción y Universidad de Santiago de Chile.

Para revertir el escaso interés que existe por la construcción en madera, es necesario avanzar en la normativa, como la actualización de la norma para diseño sísmo resistente NCh433.Of96, la cual está enfocada en edificaciones de hormigón y acero. Las restricciones que se imponen para desplazamientos máximos hacen inviable el uso de la madera como elemento estructural. Si bien la resistencia estructural para vigas y columnas de madera acerrada y laminada encolada está cubierta por la norma NCh1198.Of2006 de Cálculo Estructural en Madera, las limitaciones de desplazamiento de la NCh433.Of96 impiden un diseño viable de los proyectos de altura.

En cuanto a las estructuras divisorias con entramados de madera, una de las limitantes para impulsar el desarrollo de la construcción con estas es el diseño por resistencia al fuego. A diferencia de países como Estados Unidos o Canadá, Chile no posee una metodología para el cálculo de la resistencia al fuego, con la que se pueda calcular la resistencia de elementos divisorios con entramado de madera. El único documento de apoyo con el que cuentan los profesionales para estructurar es el *Listado Oficial de Comportamiento al Fuego de Elementos y Componentes de la Construcción*, elaborada por el MINVU, documento que contiene un número limitado de soluciones constructivas, más unas pocas indicaciones para hacer un cálculo más bien conservador de la resistencia al fuego para un acotado grupo de elementos. Todos los que no estén considerados en este listado oficial, para ser utilizados con fines constructivos deben tener la correspondiente certificación en alguna de las instituciones oficiales de control técnico de calidad de materiales. Otra alternativa para cumplir los requerimientos de la norma nacional, en cuanto a resistencia al fuego, es que los elementos sean parte de un proyecto con Estudio de Seguridad. Si un elemento está en el caso anterior se permite utilizar certificados extranjeros de resistencia al fuego de instituciones reconocidas, que realicen estudios bajo la normativa ASTM de la Asociación Americana, o la normativa DIN del comité de normas alemán.^[4]

Sin una metodología nacional de cálculo de resistencia al fuego aplicable a elementos divisorios con entramado de madera no se puede calcular o estimar la resistencia al fuego de estos elementos, siendo esta resistencia una exigencia de diseño en la *Ordenanza General de Urbanismo y Construcción* (OGUC). Si un elemento no cuenta con su resistencia al fuego, para ser utilizado es necesario generalmente recurrir a ensayos, lo que significa un costo y tiempo asociado, el cual podría reducirse si se pudiese calcular o estimar su resistencia al fuego. Ésta es una de las limitantes que tienen los arquitectos e ingenieros a la hora de estructurar, ya que considerar estructuras divisorias con entramado de madera les implica costos extra en el diseño. El optar por una opción nacional de cálculo de resistencia al fuego para elementos divisorios con

entramado de madera fomentaría la utilización de estos, ya que reduciría los costos y tiempos asociados al diseño.

Antes de profundizar, es pertinente indicar a qué se hace referencia cuando se habla de resistencia al fuego de estructuras divisorias. Se trata del tiempo que resiste en minutos, considerando los siguientes puntos:

- **Conservación de Resistencia Estructural:** La estructura conserva sus propiedades mecánicas si es capaz de mantenerse estable, al tiempo que las cargas son soportadas dentro de rangos de deformaciones y tensiones aceptables.
- **Aislamiento Térmico:** Se considera que la estructura mantiene su aislamiento térmico si no se supera cierto valor de temperatura en la cara del elemento que no está expuesta al fuego.
- **Estanqueidad:** La estanqueidad se mantiene mientras no exista presencia de gases inflamables y llamas en la cara del elemento que no está expuesta al fuego.^[5]

La normativa vigente para ensayos a resistencia al fuego de elementos en Chile, *Nch935/1 Prevención de Incendios en Edificios - Ensayo de resistencia al fuego - Parte 1: Elementos de construcción general*, tiene requerimientos de resistencia de carga, aislamiento y estanqueidad en muros, tabiques y cielos, además de los criterios y formas para determinar la resistencia al fuego de elementos de variados materiales, en esta parte se excluyen elementos de puertas, ventanas y otros considerados en la norma Nch935/2.

Por lo anterior, se justifica la necesidad de un estudio sobre el comportamiento en los ensayos de resistencia al fuego de las estructuras divisorias con entramado de madera. Se estudian las composiciones y materiales utilizados en Chile, junto a un análisis de las normas de diseño a resistencia al fuego aplicables a las estructuras divisorias con entramado de madera presentes en el mercado nacional. Este trabajo busca contribuir directamente al desarrollo de las futuras normas y códigos chilenos, para el diseño a resistencia al fuego de estructuras divisorias con entramados de madera, estableciendo una descripción y caracterización de las estructuras divisorias utilizadas a nivel nacional, además de hacer un análisis estadístico al comportamiento de éstas en los ensayos de resistencia al fuego.

Este trabajo se enfoca en estudiar de manera estadística los ensayos de resistencia al fuego de elementos divisorios con entramado de madera realizados en Chile, complementando esto con un primer apronte de estudio de factibilidad para posible adopción de una metodología para el cálculo de la resistencia al fuego, ya sea de manera normativa o bien informativa.

Se acota el estudio a la resistencia al fuego de los elementos divisorios horizontales y verticales con entramados de madera de uso nacional. Para esto se hace un resumen de los ensayos según las características relevantes de las estructuras, adjuntando sus resultados, para posteriormente hacer un estudio y análisis estadístico de los datos, con

el fin de hacer una descripción de las estructuras, su uso en el contexto chileno, y el comportamiento de estas a sometidas a la acción del fuego.

1.1 Objetivos

1.1.1 Generales

Establecer las características de las estructuras divisorias horizontales y verticales con entramado de madera utilizadas en Chile, evaluando la factibilidad técnica de adoptar una metodología de cálculo de resistencia al fuego basada en el método CAM.

1.1.2 Específicos

- Estudiar las normas de resistencia al fuego nacionales e internacionales, de manera de establecer similitudes y diferencias entre los criterios que se aplican a las estructuras divisorias horizontales y verticales.
- Realizar una recopilación de las estructuras divisorias nacionales con entramado de madera que cuenten con su resistencia al fuego, evaluando el mayor número posible de ensayos de resistencia al fuego realizados en Chile.
- Estudiar el método de adición de componentes de otros países, que sea aplicable al cálculo de resistencia al fuego de estructuras divisorias con entramado de madera, destacando los distintos puntos que influyen en el cálculo y estableciendo una comparación entre las distintas versiones.
- Aplicar el método de adición de componentes para estimar la resistencia de estructuras divisorias con entramados de madera nacionales, junto con realizar una revisión general a una propuesta de calibración para nuevos materiales a la metodología de cálculo aplicada.

1.2 Metodología

1.2.1 Revisión de antecedentes nacionales

Se describen los requerimientos de la OGUC respecto a la resistencia al fuego de estructuras divisorias verticales y horizontales, enfocándose en lo que aplica a estructuras con entramados de madera.

En consideración de lo anterior, se realiza una descripción de lo que se presenta en el *Listado Oficial de Comportamiento al Fuego de Elementos y Componentes de la Construcción* del MINVU, enfocándose en las opciones de diseño disponible para elementos divisorios con entramado de madera. Se realiza un resumen que incluya la descripción de las características más importantes de éstas estructuras, con el fin de establecer las estadísticas de las características más importantes de las estructuras, determinadas por los puntos considerados en las metodologías de cálculo de resistencia al fuego internacional.

Se estudia la metodología de ensayos expuesta en la Nch935/1 Of.97 *Prevención de incendios en edificios – Ensaye de resistencia al fuego – Parte 1: Elementos de Construcción General*. Con esto se busca establecer si los criterios de los ensayos nacionales son similares a los internacionales.

Del estudio normativo se establecen los límites y coberturas actuales de la normativa nacional en cuanto a la resistencia al fuego de las estructuras divisorias en estudio, dejando en claro cuáles son los alcances de las normas nacionales actuales.

1.2.2 Revisión de antecedentes Internacionales

Se estudia el método CAM (*Component Additive Method*), dado que es un método de cálculo de resistencia al fuego de directa aplicación. Se presentan los puntos más relevantes del método de adición de componentes y se evalúan las siguientes versiones internacionales:

- Eurocódigo 5: Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire desing. CEN 2004.
- Design for Code Acceptante (DCA) 4. American Wood Council, 2010.
- Technical Guideline for Europe - SP Technical Research Institute of Sweden – SP Träteknik

Se muestra cómo estos métodos calculan la resistencia al fuego de las estructuras divisorias, además de cuáles son las características más relevantes de los elementos según estos códigos internaciones. Con esto es posible realizar un análisis a ensayos de resistencia al fuego, enfocándose en las características indicadas para lograr analizar de mejor manera el comportamiento, y falla de éstas, ante el fuego.

1.2.3 Recopilación y Descripción ensayos RF nacionales

Se realiza una recopilación de ensayos de resistencia al fuego realizados en Chile entre los años 1999 y 2017, generando un resumen de estos según sus características más relevantes, estableciendo así una base de ensayos realizados a nivel nacional. En esta base se consideran las descripciones de las características más importantes para el cálculo de la resistencia al fuego presentes en las normas internacionales de este estudio.

El levantamiento de la información de los ensayos de resistencia al fuego se realiza manteniendo en detalle las descripciones de los informes, sin embargo también busca la simplicidad del formato para lograr un posterior análisis de los datos.

Son presentadas las estadísticas de los datos levantados de los ensayos de resistencia al fuego presentes en la base de datos generada, según tipo de estructura, de elementos y de fallas, espesor total, aislación, norma aplicada, resultado obtenido, entre otros.

1.2.4 Análisis y estadísticas de los ensayos de resistencia al fuego.

Se realiza un estudio estadístico y un análisis a los ensayos a resistencia al fuego de la recopilación. Los puntos por estudiar están determinados por las normativas y códigos ya mencionados, por ende, son los parámetros importantes que determinan la resistencia al fuego de estas estructuras.

A continuación, se presentan los puntos en los cuales se enfocará este estudio:

1. Tipo de ensayo
 - a. Con carga
 - b. Sin carga
2. Tipo de elemento
 - a. Divisorio horizontal
 - b. Divisorio Vertical
3. Tipo y características de la solución constructiva
 - a. Con aislación
 - b. Sin aislación
 - c. Elemento(s) en cara expuesta al fuego
 - d. Elementos en cara no expuesta al fuego
 - e. Elementos soportantes
 - f. Elementos no soportantes
 - g. Espesor total
 - h. Escuadrías del entramado
4. Resistencia al fuego de las solución
5. Tipo de falla
6. Características especiales

1.2.5 Descripción del desarrollo del método CAM para el cálculo de resistencia al fuego de estructuras divisorias con marcos de madera.

Se realiza un resumen histórico general sobre cómo se han desarrollado los métodos predictivos de resistencia al fuego para estructuras divisorias en madera, enfocándose en la historia de método de adición de componentes. Con esto se busca mostrar cuales son las bases científicas que respaldan el método y cuáles son las características más importantes de estas.

1.2.6 Revisión de una propuesta para la calibración del método.

Este trabajo termina con la revisión de una proposición de metodología de calibración para integrar nuevos materiales a la metodología CAM de las versiones europeas nombradas en este trabajo. El fin de revisar cuál es la metodología a seguir para la adaptación de este método con nuevos materiales, es establecer los pasos generales que se debiesen seguir para calibrar el método de adición de componentes a los materiales nacionales de las estructuras divisorias con entramado de madera.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Revisión de normativa chilena

2.1.1 Requerimientos de resistencia al fuego de la OGUC

La OGUC en el Título 4 “De la arquitectura”, contiene el Capítulo 3: De las condiciones de seguridad contra incendio, donde se encuentran los requerimientos mínimos que todo edificio debe considerar para la seguridad contra incendio.

Los objetivos fundamentales del Capítulo 3 son:

- Que los ocupantes de un edificio puedan salvarse en caso de incendio.
- Disminuir al mínimo el riesgo de incendios de un edificio.
- Lograr contener la propagación del fuego dentro un edificio, además de la propagación entre edificios.
- Facilitar la extinción de los incendios.

Para cumplir estos objetivos se describen métodos pasivos y activos. Los métodos pasivos hacen referencia a las propiedades de la estructura del edificio y el comportamiento de éstas al fuego, mientras que los métodos activos son mecanismos que se activan posteriores a la detección del fuego.

En el Artículo 4.3.2 se encuentran dos puntos importantes para este trabajo:

- Las normas generales sobre la prevención de incendios en edificios, de estas la más relevante para este trabajo es la NCh 935/1 *Ensaye de resistencia al fuego - Parte 1: Elementos de construcción general*, además en este artículo se nombra el E14-1 *Listado Oficial de Comportamiento al Fuego de Elementos y Componentes de la Construcción* del MINVU, donde se muestran las resistencias asignadas a elementos y estructuras frente al fuego. Ambos documentos se estudian específicamente más adelante.
- Todas las estructuras, elementos y materiales que no estén considerados en el listado oficial y quieran ser utilizados deben ser sometidos a ensayo, para obtener su resistencia al fuego y una certificación de alguna de las instituciones oficiales de control técnico de calidad de materiales. Otra opción para utilizar o elementos es estar dentro de un proyecto con Estudio de Seguridad, en dicho caso pueden utilizar certificados extranjeros de instituciones reconocidas que sean realizados según las normas de la Asociación Americana de Pruebas de Materiales – American Society for Testing and Materials (ASTM), de Laboratorios Aseguradores – Underwriter Laboratories (UL) o del Comité de Normas Alemán – Deutscher Normenausschuss (Normas DIN). En caso de que un elemento no se encuentre en el listado oficial y tampoco cuente con certificación por ensayo, este puede ser certificado por un profesional especialista mediante asimilación a otros elementos certificados. Con esto se justifica la real importancia de los ensayos de resistencia al fuego.

Si un elemento tiene dos o más requerimientos de resistencia según los siguientes extractos o especificaciones del Capítulo 3, el requerimiento de mayor exigencia es el que controla, de esto es importante mencionar que en los artículos se agregan restricciones y requerimientos mínimos para los elementos según sus características o usos.

A continuación se muestran las tablas que determinan la resistencia mínima para los elementos de construcción de edificios

Extracto 1: OGUC 2009: Requerimientos mínimos de resistencia para elementos.

**RESISTENCIA AL FUEGO REQUERIDA PARA
LOS ELEMENTOS DE CONSTRUCCION DE EDIFICIOS**

| ELEMENTOS DE CONSTRUCCION | | | | | | | | | |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| TIPO | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) |
| a | F-180 | F-120 | F-120 | F-120 | F-120 | F- 30 | F- 60 | F-120 | F- 60 |
| b | F-150 | F-120 | F- 90 | F- 90 | F- 90 | F- 15 | F- 30 | F- 90 | F- 60 |
| c | F-120 | F- 90 | F- 60 | F- 60 | F- 60 | - | F- 15 | F- 60 | F- 30 |
| d | F-120 | F- 60 | F- 60 | F- 60 | F- 30 | - | - | F- 30 | F- 15 |

SIMBOLOGIA:

Elementos verticales:

- (1) Muros cortafuego
- (2) Muros zona vertical de seguridad y caja de escalera
- (3) Muros caja ascensores
- (4) Muros divisorios entre unidades (hasta la cubierta)
- (5) Elementos soportantes verticales
- (6) Muros no soportantes y tabiques

Elementos verticales y horizontales:

- (7) Escaleras

Elementos horizontales:

- (8) Elementos soportantes horizontales
- (9) Techumbre incluido cielo falso

Del extracto anterior el “TIPO” es según destino, superficie edificada, densidad de carga combustible y cantidad de pisos. En las siguientes tres tablas se muestra como establecer la categoría correspondiente entre la clasificación “a-b-c-d”.

Extracto 2: OGUC 2009: TABLA 1 “TIPO”, para requerimiento mínimo de resistencia.

TABLA 1

| Destino del edificio | Superficie edificada (M2) | Numero de pisos 1 2 3 4 5 6 7 o más |
|---|--|--|
| Habitacional | Cualquiera | d d c c b a a |
| Hoteles o similares | Sobre 5.000 sobre 1.500 y hasta 5.000 sobre 500 y hasta 1.500 hasta 500 | c b a a a a c b b b a a c c b b a a d c b b a a |
| Oficinas | Sobre 1.500 sobre 500 y hasta 1.500 hasta 500 | c c b b b a c c c b b b d c c b b b |
| Museos | Sobre 1.500 sobre 500 y hasta 1.500 hasta 500 | c c b b b a c c c b b b d c c b b b |
| Salud(clínica, hospitales y laboratorios) | Sobre 1.000 Hasta 1.000 | c b b a a a c c b b a a |
| Salud (Policlínicos) | Sobre 400 Hasta 400 | c c b b b b d c c b b b |
| Restaurantes y fuentes de soda | Sobre 500 Sobre 250 y hasta 500 Hasta 250 | b a a a a a c b b a a a d c c b b a |
| Locales comerciales | Sobre 500 Sobre 200 y hasta 500 Hasta 200 | c b b a a a c c b b a a d c b b b a |
| Bibliotecas | Sobre 1.500 Sobre 500 y hasta 1.500 Sobre 250 y hasta 500 Hasta 250 | b b a a a a b b b a a a c b b b a a d c b b a a |
| Centro de reparación automotor | Cualquiera | d c c b b b |
| Edificios de estacionamiento | Cualquiera | d c c c b b |

Extracto 3: OGUC 2009: TABLA 2 “TIPO”, para requerimiento mínimo de resistencia.

TABLA 2

| DESTINO DEL EDIFICIO | MAXIMO DE OCUPANTES | NUMERO DE PISOS | | | | | |
|------------------------|-------------------------|-----------------|---|---|---|---|---------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 ó más |
| Teatros y espectáculos | Sobre 1.000 | b | a | a | a | a | a |
| | Sobre 500 y hasta 1.000 | b | b | a | a | a | a |
| | Sobre 250 y hasta 500 | c | c | b | b | a | a |
| | Hasta 250 | d | d | c | c | b | a |
| Reuniones | Sobre 1.000 | b | a | a | a | a | a |
| | Sobre 500 y hasta 1.000 | b | b | a | a | a | a |
| | Sobre 250 y hasta 500 | c | c | b | b | a | a |
| | Hasta 250 | d | c | c | b | b | a |
| Docentes | Sobre 500 | b | b | a | a | a | a |
| | Sobre 250 y hasta 500 | c | c | b | b | a | a |
| | Hasta 250 | d | c | c | b | b | a |

Extracto 4: OGUC 2009: TABLA 3 “TIPO”, para requerimiento mínimo de resistencia.

TABLA 3

| DESTINO DEL EDIFICIO | DENSIDAD DE CARGA COMBUSTIBLE (*) | | NUMERO DE PISOS | | | | | |
|---|--|---|-----------------|---|---|---|---|-------|
| | Media (MJ/m ²) según NCh 1916 | Puntual Máxima (MJ/m ²) según NCh 1993 | | | | | | |
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | ó más |
| Combustibles, lubricantes, aceites minerales y naturales. | Sobre 8.000 | Sobre 24.000 | a | a | a | a | a | a |
| | sobre 4.000 y hasta 8.000 | sobre 16.000 y hasta 24.000 | b | a | a | a | a | a |
| | sobre 2.000 y hasta 4.000 | sobre 10.000 y hasta 16.000 | c | b | a | a | a | a |
| | hasta 2.000 | hasta 10.000 | d | c | b | a | a | a |
| Establecimientos Industriales. | Sobre 16.000 | Sobre 32.000 | a | a | a | a | a | a |
| | sobre 8.000 y hasta 16.000 | sobre 24.000 y hasta 32.000 | b | a | a | a | a | a |
| | sobre 4.000 y hasta 8.000 | sobre 16.000 y hasta 24.000 | c | b | a | a | a | a |
| | sobre 2.000 y hasta 4.000 | sobre 10.000 y hasta 16.000 | c | c | b | a | a | a |
| | sobre 1.000 y hasta 2.000 | sobre 6.000 y hasta 10.000 | d | c | c | b | a | a |
| | sobre 500 y hasta 1.000 hasta 500 | sobre 3.500 y hasta 6.000 hasta 3.500 | d | d | c | c | b | b |
| Supermercados y Centros Comerciales. | Sobre 16.000 | Sobre 32.000 | b | a | a | a | a | a |
| | sobre 8.000 y hasta 16.000 | sobre 24.000 y hasta 32.000 | b | b | a | a | a | a |
| | sobre 4.000 y hasta 8.000 | sobre 16.000 y hasta 24.000 | c | b | b | a | a | a |
| | sobre 2.000 y hasta 4.000 | sobre 10.000 y hasta 16.000 | c | c | b | b | a | a |
| | sobre 1.000 y hasta 2.000 hasta 1.000 | sobre 6.000 y hasta 10.000 hasta 6.000 | d | c | c | b | b | b |
| Establecimientos de bodegaje. | Sobre 16.000 | Sobre 32.000 | b | b | a | a | a | a |
| | sobre 8.000 y hasta 16.000 | sobre 24.000 y hasta 32.000 | c | b | b | a | a | a |
| | sobre 4.000 y hasta 8.000 | sobre 16.000 y hasta 24.000 | c | c | b | b | a | a |
| | sobre 2.000 y hasta 4.000 | sobre 10.000 y hasta 16.000 | d | c | c | b | b | b |
| | sobre 1.000 y hasta 2.000 | sobre 6.000 y hasta 10.000 | d | d | c | c | b | b |
| | sobre 500 y hasta 1.000 hasta 500 | sobre 3.500 y hasta 6.000 hasta 3.500 | d | d | d | c | c | c |

1MJ/m² = 238.85 k cal/m²

1 MJ = 0.053 kg madera equivalente de 4.000 k cal/kg

(*) Para clasificar un edificio o sector de él, se aplica la densidad de carga combustible mayor de ambas columnas de la Tabla 3. ¹

2.1.2 Norma NCh935/1. Prevención de incendio en edificios – Ensaye de resistencia al fuego – Parte 1: Elementos de construcción general.

En esta norma se establecen las condiciones de ensayo necesarias para determinar la resistencia al fuego, de los elementos de construcción general. Para elementos vidriados se aplica la norma NCh2209, para puertas y otros elementos de cierre la NCh935/2, ambas fuera del alcance de este trabajo.

En la terminología de esta norma se describe la “resistencia al fuego”, de la misma manera que se describe en la introducción de este trabajo, considerando resistencia mecánica, aislamiento y estanqueidad.

En el punto 5 “Aparatos e implementos necesarios”, se especifican requerimientos para el horno, la posibilidad de usar un sistema de cargas y los requerimientos para mediciones de temperatura. Luego en el punto 6 “Condiciones de temperatura y presión” se especifica cómo es la curva de calor que se utiliza en los ensayos y como se mide esta temperatura, además se explicitan los requerimientos para las mediciones de temperatura y las tolerancias de las variaciones de estas.

En el punto 7 “Características de los elementos de construcción bajo ensayo”, se establecen las dimensiones mínimas para ensayos de elementos, verticales (mínimo 2x2,2[m] y 2[m] para pilares) y horizontales (mínimo 4x3[m] o 3x2[m] en caso de elemento homogéneo). Lo que busca este punto es establecer que los ensayos de resistencia al fuego se realicen en dimensiones idénticas a las reales, ya que si se realizaran ensayos a escala o zonas aisladas de un elemento divisorio se pueden generar errores, por el diferente comportamiento de los elementos a escala frente al fuego y las diferentes resistencias de las distintas zonas de un elemento divisorio.

- **Punto 8 “Procedimiento operatorio”**

Se exigen condiciones de ensayo iguales a las de trabajo, en específico las condiciones de apoyo, carga y humedad, considerando simplemente apoyado cuando no se sepan las condiciones reales para vigas y entrepisos, además, si no existiese carga de trabajo en el elemento real, entonces no sería necesario realizar el ensayo de este con carga.

- **Criterios para elementos divisorios:**

En ensayos de elementos divisorios solo se expone una cara del elemento al fuego, por esto se señala la necesidad de ensayar las estructuras por ambas caras o bien por la menos favorable, para controlar la determinación de la resistencia por ensayo según el peor de los casos. No obstante se pueden ensayar elementos por una sola cara a elección si son para un uso direccionado, como lo son los cierres perimetrales.

Se establecen los criterios de estanqueidad, aislamiento y capacidad de carga en caso de que el elemento real soporte más que el peso propio. La capacidad de carga del elemento divisorio se determina principalmente con criterios de deformación, pero también se considera dentro de un informe de ensayo otros fenómenos importantes tales como

agrietamientos, hendiduras u otras transformaciones del elemento. Para determinar la temperatura promedio y máxima se necesita un mínimo de cinco termocuplas k más termometría por barrido en la cara no expuesta al fuego. Por último la estanqueidad se detecta por diferencias de presión entre la cara no expuesta y el lado expuesto al fuego, lo cual implica una fuga de gases, teniendo como condición de falla si esta fuga genera una llama prolongada o enciende una mota normalizada (mota secada de algodón hidrófilo, de aproximadamente 100x100x20[mm] y con una masa de 3 a 4[gr], posicionada a 2 o 3[cm] de la fuga). Además de lo anterior en este punto se plantean algunas observaciones adicionales, donde se registran incidencias o modificaciones.

- Capacidad de carga: se requiere que el ensayo no falle de tal manera que pueda seguir cumpliendo la función de soporte de cargas de diseño.
- Aislamiento térmico: se requiere que la temperatura promedio no sobrepase por más de 140°C la temperatura inicial, además que la temperatura puntual máxima no supere por más de 180°C la temperatura inicial y no sobrepasar los 220°C en cualquier momento.
- Estanquidad: Se requiere que no se generen grietas en la cara no expuesta al fuego por donde pasen llamas o gases, considerando que falla si la llama o la mota de algodón se mantienen ardiendo por más de 10[s], o si al acercar una llama a la emisión de gas esta continua ardiendo espontáneamente por 20[s].

El tiempo de duración se considera desde el inicio del ensayo hasta la falla por alguno de los criterios anteriores. De acuerdo a la duración en minutos se determina la clasificación de la estructura según la siguiente tabla.

Tabla 1: Clasificación Anexo A, Nch935/1.

| Clase | duración [min] |
|-------|----------------|
| F0 | menor a 15 |
| F15 | menor a 30 |
| F30 | menor a 60 |
| F60 | menor a 90 |
| F90 | menor a 120 |
| F120 | menor a 150 |
| F150 | menor a 180 |
| F180 | menor a 240 |
| F240 | mayor a 240 |

2.1.3 Descripción Listado Oficial de Comportamiento al Fuego de Elementos y Componentes de la Construcción, MINVU.

En Chile al igual que otros países se cuentan con un listado de soluciones constructivas, el que describe las características de los elementos y su categoría en

resistencia al fuego. El documento oficial es el *Listado Oficial de Comportamiento al Fuego de Elementos y componentes de la Construcción* del MINVU. Este tipo de listados se utiliza incluso en países con códigos de cálculo de resistencia al fuego aplicables a estructuras con entramados de madera, ya que los listados son creados en base a resultados experimentales y pueden aceptar todo tipo de configuraciones y materiales, a diferencia de los métodos de cálculo que tienen muchas limitantes, las cuales se estudian más adelante.

A continuación se presenta una descripción de lo expuesto en el Listado Oficial, respecto a la resistencia al fuego de elementos y estructuras en base a madera, además se muestra un resumen de las estructuras divisorias horizontales y verticales con elementos importantes de madera incluidos en el listado, incluyendo una descripción detallada de los elementos relevantes según los códigos de diseño internacionales, además de una descripción utilizada para un análisis estadístico posterior.

- **Elementos Genéricos**

Tabla 2: Paneles macizos de madera en Listado Oficial, MINVU.

| Tipo de elemento | Descripción constitutiva | Espesor [mm] | Resistencia F [min] |
|------------------|--------------------------------------|--------------|---------------------|
| Panel de madera | madera maciza en paneles con uniones | 20 | 15 |
| Panel de madera | madera maciza en paneles con uniones | 45 | 30 |
| Panel de madera | madera maciza en paneles con uniones | 90 | 60 |
| Panel de madera | madera maciza en paneles con uniones | 140 | 90 |
| Panel de madera | madera maciza en paneles con uniones | 190 | 120 |

Tabla 3: Pilares macizos de madera en Listado Oficial, MINVU.

| Tipo de elemento | Descripción constitutiva | Espesor [mm] | Resistencia F [min] |
|------------------|--------------------------------|--------------|---------------------|
| Pilar de madera | pilar de madera macizo aislado | 45 | 15 |
| Pilar de madera | pilar de madera macizo aislado | 90 | 30 |
| Pilar de madera | pilar de madera macizo aislado | 160 | 60 |

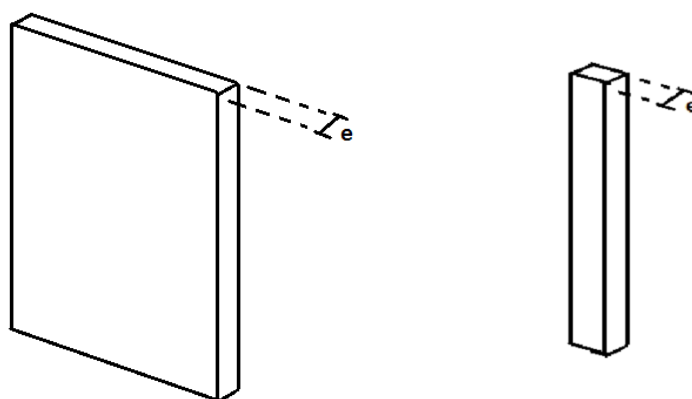


Figura 1: Espesor para placas y pilares de madera.

En la sección A.3 se describe cómo se pueden diseñar estructuras divisorias verticales F-15 utilizando elementos considerados dentro de las estructuras que están en el listado, lo que da opción a que se pueda escoger el tipo de material y elemento. Sin embargo por su limitación de categoría F15 solo puede ser utilizado para viviendas de un piso, tomando en cuenta los requerimientos de la OGUC (Extractos 1, 2 y 3).

2.2 Revisión de metodologías internacionales

2.2.1 Metodología CAM general

Metodología desarrollada por el National Research Council of Canada (NRCC), originada en los años 1960's en base a 135 reportes de ensayos estándar a resistencia la fuego de elementos divisorios verticales, junto con 73 de elementos horizontales, considerando elementos con y sin carga. Esta metodología es adaptada dentro de los códigos de Estados Unidos y Canadá, además de ser nombrada una adaptación de esta como referencia en los anexos del Eurocódigo EN 1995 1-2. Cada una de las diferentes adaptaciones del método de adición de componentes tiene diferentes requerimientos constructivos para la estructura, los cuales tienen como objetivo que los diferentes componentes de la estructura aporten por completo, un ejemplo de esto son las juntas de placa, las cuales si no son bien selladas generan fugas de calor.

El Método de Adición de Componentes es un procedimiento de cálculo que determina la resistencia al fuego, mediante adición de tiempos según los elementos que compongan la estructura. Logra estimar la resistencia de una estructura compuesta por varios elementos con distintas propiedades y formas. Este método tiene como base reglas fundamentales conocidas como las 10 reglas de Harmathy de resistencia al fuego:

- 1- La resistencia al fuego de elementos ensamblados es mayor que la suma de las resistencias de los elementos aislados.
- 2- Agregar capaz a un elemento ensamblado aumenta la resistencia al fuego.
- 3- Las cámaras de aire en elementos ensamblados de varias capas aumentan la resistencia al fuego.
- 4- Mientras más lejos de la zona de fuego este la capa de aire, mejor será su efecto.
- 5- Aumentar el espesor de una capa de aire confinada no aumenta la resistencia del elemento.
- 6- Los materiales de mayor resistencia logran mejor desempeño del elemento si están por la cara del elemento que está expuesta al fuego.
- 7- Las estructuras asimétricas dependen de los flujos de calor.
- 8- La presencia de humedad aumenta la resistencia al fuego del elemento, en comparación a la resistencia de este mismo elemento seco.
- 9- Elementos estructurales se desempeñan mejor al fuego ensamblados que aislados.
- 10- Elementos estructurales pueden ser reemplazados por otros de no menor resistencia al fuego.

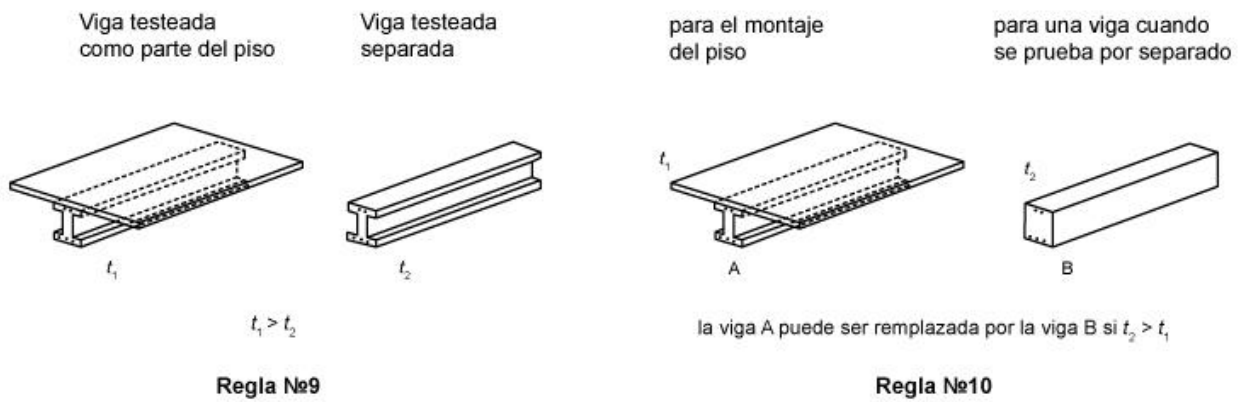
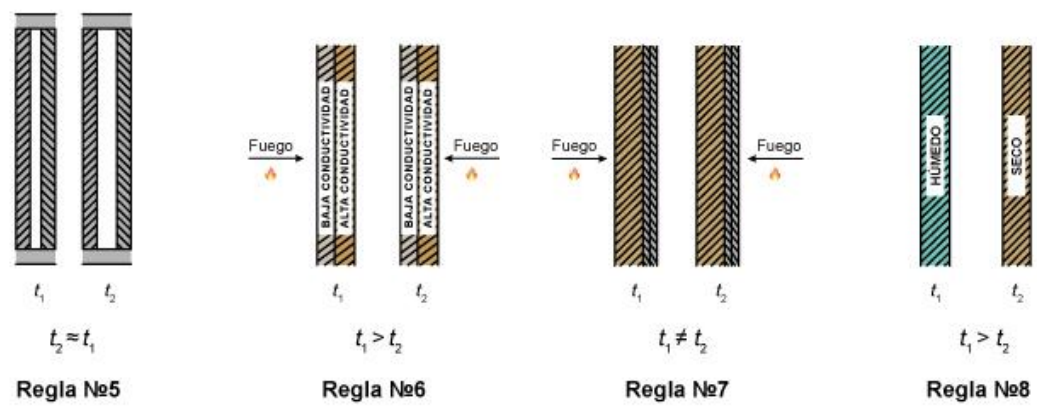
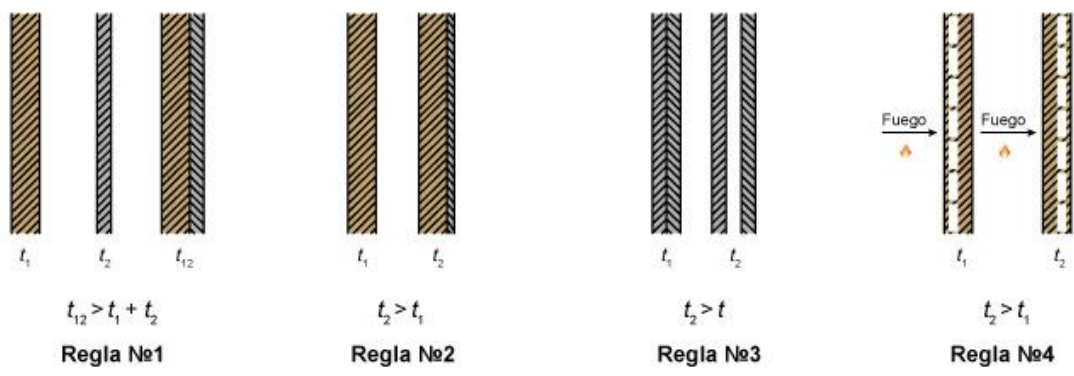


Figura 2: Representación gráfica de las 10 reglas de Harmathy, adaptación de Robert H. White, (2016) Estados Unidos.

El principal punto que determina la resistencia al fuego de una estructura divisoria son las membranas en la cara expuesta al fuego. [6] Otros factores que afectan, como la tasa de carbonización de la estructura de madera y la carga que ésta tenga que soportar también influyen en el tiempo de resistencia al fuego. Para los entramados de madera expuestos al fuego, los estudios muestran que estos pueden resistir por un tiempo limitado y que su resistencia depende del tamaño del perfil, la tasa de carbonización y la sección perdida por el carbonizado. [7] Existen métodos como el “T.T Lie Method”, que han desarrollado simples fórmulas para el cálculo de la resistencia al fuego de largos elementos de madera, como vigas o columnas, tomando en cuenta solo las dimensiones del elemento y una fracción de la carga de diseño.[8]

En el método de adición de componentes, los tiempos de aporte de resistencia al fuego se asignan según el material y sus medidas. Estos tiempos han sido determinados históricamente mediante ensayos, considerando que el elemento depende de que su grado de integridad, además de su temperatura que no debe superar los 181°C puntualmente sobre la temperatura inicial, o los 139°C promedio sobre la inicial. [8] Hoy en día también se utilizan simulaciones mediante software para obtener la resistencia al fuego de elementos simples o compuestos. Un ejemplo de esto es WALL2D, de buena aceptación y validado ensayos de resistencia al fuego; [7] Otros software más modernos utilizan simulaciones mediante elementos finitos, los que requieren mayor capacidad computacional, pero asemejan de mejor manera a la realidad. El único impedimento es la complejidad para calcular, considerando todos los factores, lo que dificulta su desarrollo a gran escala sin utilizar simplificaciones.

Finalmente, los tiempos de los elementos son sumados según lo establezca el CAM aplicado, considerando otros factores como materiales aislantes y el entramado de madera, para así obtener una resistencia total del elemento.

Para elementos divisorios asimétricos se considera la resistencia obtenida por la aplicación del fuego sobre la cara menos resistente, lo que nos lleva a evaluar la combinación de cargas de una forma desfavorable, al igual como ocurre con los elementos estructurales.

2.2.2 Design for Code Acceptance 4 – Component Additive Method for Calculating and Demonstrating Assembly Fire Resistance, American Wood Council 2014.

El documento *Code Acceptance 4* del American Wood Council, describe la metodología CAM como herramienta para el cálculo de la resistencia al fuego de elementos constructivos con entramados de madera, como son techos, cielos, tabiques o muros. El Component Additive Method (CAM), utiliza para calcular el tiempo de resistencia total la suma de las resistencias de los elementos que componen la solución constructiva completa, es decir considera la resistencia de las placas, el marco y aislación entre otros factores.

A continuación se muestran las tablas aplicadas en el documento con los tiempos asignados según el material y su espesor. Estas son expuestas en el punto 722.6 del documento norteamericano *International Building Code*. Con estos tiempos sumados se calcula de manera directa la resistencia total de una estructura compuesta.

Tabla 4: Tiempo asignado a membranas protectoras para Design for Code Acceptance 4

| Descripción de la placa protectora | Tiempo [min] |
|---|---------------------|
| 9,5[mm] terciado con terminación fenólica | 5 |
| 12[mm] terciado con terminación fenólica | 10 |
| 15[mm] terciado con terminación fenólica | 15 |
| 9,5[mm] yeso cartón | 10 |
| 13[mm] yeso cartón | 15 |
| 16[mm] yeso cartón | 30 |
| 13[mm] yeso cartón RF | 25 |
| 16[mm] yeso cartón RF | 40 |
| Doble 9,5 [mm] yeso cartón | 25 |
| Placa de 13[mm] más 9,5[mm] yeso cartón | 35 |
| Doble 13 [mm] yeso cartón | 40 |

Tabla 5: Tiempo asignado a entramados de madera para Design for Code Acceptance 4

| Descripción del perfil de madera | Tiempo [min] |
|--|---------------------|
| Muros con perfiles de madera distanciados a 406[mm] desde el centro | 20 |
| Pisos y cielos con perfiles de madera distanciados 406[mm] desde el centro | 10 |

Hay que considerar que estos tiempos no son tiempos definitivos, es necesario comprobar los requerimientos necesarios por la norma norteamericana para aplicar el método. Uno de los requisitos relevantes es el distanciamiento máximo que pueden tener los perfiles de madera, distancia máxima que depende del tamaño del perfil, además del tipo y grado estructural de madera utilizada, como lo expone el *International Building Code* del 2015 .

En el caso de la aislación se pueden agregar 15[min] al total de la resistencia utilizando lana mineral o fibra de vidrio de no menos de 32[kg/m³], también es posible utilizar lana de roca o fibra de escoria con una densidad no menor a 53[kg/m³]. Otra opción es la aislación de celulosa, la cual debe tener una densidad no menor a 42[kg/m³].

Es necesario considerar un máximo de una hora en el tiempo total de resistencia calculada, además de calcular considerando la dirección más desfavorable en elementos divisorios. Junto con lo anterior es necesario para la aplicación del método que en la cara exterior no expuesta al fuego incorpore alguno de los materiales mencionados en la tabla 4.

Con lo descrito anteriormente se puede plantear la resistencia al fuego de un elemento divisorio (1) como:

$$RF [min] = \sum_{k=0}^n t_k \leq 60[min] \quad (1)$$

t_k = tiempo de resistencia agregado por cada capa, marco y aislación.

2.2.3 CAM de EN 1995 1-2 Eurocódigo 5: Design of timber structures, Centro Europeo de Normalización.

La metodología CAM también está presente en el anexo Eurocódigo 5 Parte 2. Esta metodología no se presenta como norma, sino más bien como un método simplificado para el análisis de la aislación, incorporado bajo forma de anexo. La norma de cálculo de resistencia al fuego presente en éste profundiza más en la evaluación de otros aspectos del elemento, en comparación a la metodología CAM presentada anteriormente de la DCA. La mayor diferencia es que el código europeo determina la resistencia al fuego utilizando todas las capas del elemento, además de considerar en los alcances los elementos divisorios con entramados expuestos al fuego.

Se consideran tres criterios para determinar si se cumple o no la resistencia al fuego en un elemento divisorio: resistencia, integridad y aislación. El anexo considera los distintos trayectos de transferencia de calor para determinar los límites de temperatura en la cara no expuesta. Considera al igual que otros códigos y normas, un aumento sobre la temperatura inicial máximo de 140°K promedio o 180°K puntual, además de tomar en cuenta un límite de 300°C como máximo en la cara no expuesta, considerando este último valor como la temperatura inicial de carbonización.

En el código también se exige que siga cumpliendo las funciones mecánicas para las cuales fue diseñado, debiendo cumplir con aislar gases inflamables o llamas en la cara no expuesta al fuego. La metodología CAM aplicada al diseño de resistencia mecánica requiere aplicar los conceptos de carbonización en el entramado de madera de la estructura divisoria, análisis que no está en el alcance de este trabajo.

El método de adición de componentes presente en el anexo de la norma Eurocódigo 5, considera tres aspectos para asignar resistencia a una capa dentro de un elemento compuesto: resistencia básica de la capa, coeficiente de posición de la capa, coeficiente de junta de la capa.

$$Capa_i [\text{min}] = t_{i,0} * k_p(i) * k_j(i) \quad (2)$$

$t_{i,0} [\text{min}] = \text{tiempo basico de resistencia de la capa}$

$k_p(i) = \text{coeficiente de posición}$

$k_j(i) = \text{coeficiente de junta o unión}$

Con lo planteado en (2) se establece el valor de la aislación como la suma del aporte de todas las capas, expresado como:

$$\text{RF} [\text{min}] = \sum_{k=0}^n Capa_i [\text{min}] \quad (3)$$

El valor de los coeficientes de posición y junta a utilizar depende de los diferentes trayectos que se puede considerar para la transferencia de calor, lo que se explica en el anexo por medio del siguiente diagrama.

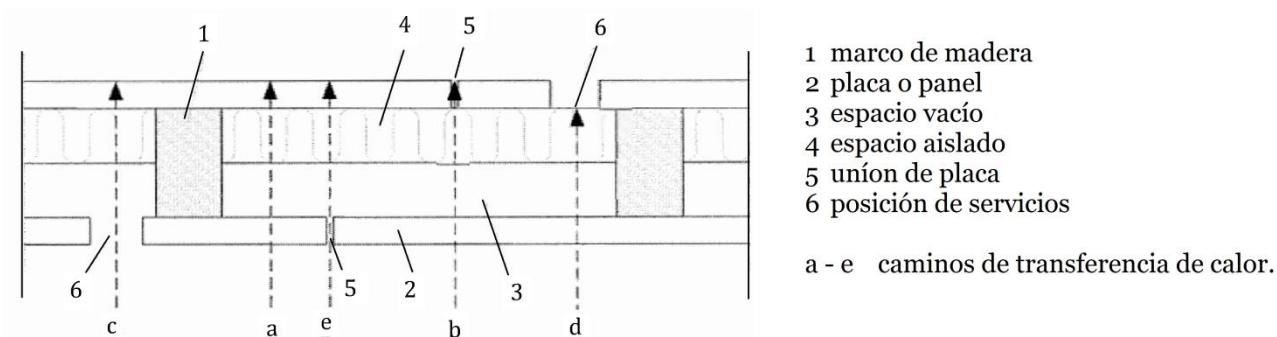


Figura 3: representación gráfica de caminos de transferencia de calor, presente en Eurocódigo 5.

La gráfica anterior utiliza distintos incrementos de temperatura en la cara no expuesta, los que se indican en la siguiente tabla.

Tabla 6: aumentos de temperatura máximos según el camino de transferencia de calor.

| | Aumento de la temperatura en la cara no expuesta [K°] | Camino de transferencia de calor según la Figura 3 |
|----------------------|---|--|
| Construcción general | 140 | a |
| Uniones | 180 | b |
| Servicios | 180 | c, d |

Las expresiones de los valores básicos de aislación se enuncian en el punto E.2.2 del anexo y dependen de los materiales utilizados, su densidad y sus medidas.

Las fórmulas para los coeficientes de posición están presentes en el punto E.2.3 del anexo y dependen de los materiales previos según la trayectoria de calor del fuego.

Las fórmulas para los coeficientes de juntas están en el punto E.2.4 del anexo del código europeo, éstas dependen de la forma o tipo de la junta constructiva, y del elemento o vacío que la respalde la junta.

En el anexo E del código además se enuncian consideraciones como el no utilizar el efecto de las juntas en caso de que estas estén respaldadas por un refuerzo o elemento estructural.

Cabe señalar finalmente que este método al igual que el de la versión americana tiene limita los estos cálculos a 60[min].

2.2.4 CAM Fire safety in timber buildings, Technical Guideline for Europe - SP Technical Research Institute of Sweden - SP Trätekt, 2010.

Es una guía técnica que busca proveer de conocimiento científico y cubrir el uso de los códigos estándar de diseño de resistencia al fuego, de productos y estructuras de madera en edificaciones. En el capítulo 5 de esta guía se hace una revisión a los métodos europeos y canadienses de cálculo de resistencia al fuego de elementos divisorios con entramados de madera. Se presenta una metodología mejorada llamada “Improved design method for separating function of timber constructions”, basada en el método de

adición de componentes del Eurocódigo, pero calibrada con un trabajo experimental y de modelación computacional más extenso.

Se establecen criterios importantes iguales a los presentes en el Eurocódigo, con el fin de limitar los flujos de calor y garantizar la resistencia mecánica, la integridad y la aislación. El criterio de aislación requiere que la temperatura promedio en la cara no expuesta de un elemento no sobrepase los 140°[K], en relación a la temperatura inicial, y que la temperatura puntual no sobrepase los 180°[K] la temperatura inicial, por otro lado el criterio de integridad se basa en que no se produzcan llamas o gases calientes en la cara no expuesta al fuego del elemento, además de que no se produzcan grietas de tamaño considerable o que se expulsen gases inflamables, siendo esto similar a lo que se expone en grados °[C] en la norma NCh935/1 of.97.

A continuación se muestra como calcula el método de adición de componentes según esta guía, que a diferencia de la metodología CAM de la DCA, considera todas las capas aislantes.

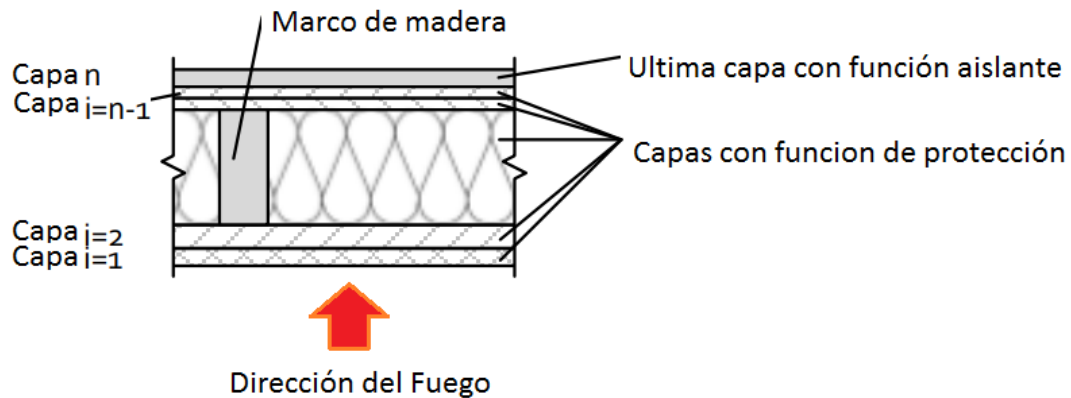


Figura 4: Número y función de las capas en un elemento con estructura de madera.

$$Tiempo_{ais} = \sum_{i=1}^{n-1} Tiempo_{prot,i} + Tiempo_{ais,n} \quad (4)$$

$Tiempo_{ais}$ = tiempo de aislación total de la estructura ensamblada [min]

$Tiempo_{prot,i}$ = tiempos de protección de la paca i , en dirección del flujo de calor

$Tiempo_{ais,n}$ = tiempo de aislación de la ultima capa en el lado no expuesto

Los tiempos de protección y aislación se calculan de manera similar a lo presentado en (2), pero considera dos grandes cambios, un coeficiente de posición que depende de las capas posteriores al elemento, según la dirección del flujo de calor y una ponderación de tiempo por la existencia de placas protectoras de yeso-cartón RF. Las siguientes formulas describen los tiempos de aislación y protección considerando modificaciones.

$$Tiempo_{prot,i} = (t_{i,0} * k_{p,exp}(i) * k_{p,no\ exp}(i) + \Delta t_i) * k_j(i) \quad (5)$$

$$Tiempo_{ais,n} = (t_{i,0} * k_{p,exp}(n) + \Delta t_n) * k_j(n) \quad (6)$$

$t_{i,0}$ [min] = tiempo básico de resistencia de la capa

$k_{p,exp}$ = coeficiente de posición por capas en lado expuesto

$k_{p,no\ exp}(i)$ = coeficiente de posición por capas en lado no expuesto

k_j = coeficiente de unión o junta

Δt = tiempo de corrección por placas

El método de adición de componentes mejorado está calibrado según simulaciones de elementos finitos, generando nuevas fórmulas y valores para los coeficientes, reemplazando las fórmulas y coeficiente presentes en el anexo del código EN 1995-1-2. Otro de los factores que modifica los coeficientes es la consideración de una temperatura inicial para el carbonizado de 270°C.

El método de adición de componentes analizado en esta parte del trabajo, además de considerar nuevos coeficientes contiene nuevas definiciones, cubriendo de manera más específica las variedades de soluciones constructivas.

Las fórmulas y valores para los diferentes coeficientes están resumidas en tablas en la parte final del capítulo 5 de esta guía técnica del Instituto Sueco de Investigación Técnica. Se consideran los mismos requerimientos de detalle que se exigen en el EN 1995-1-2, con el objetivo de evitar la falla prematura.

En los anexos de este trabajo de memoria se presentan las tablas con las fórmulas que determinan los diferentes coeficientes para el cálculo de resistencia al fuego de cada capa, según el método de adición de componentes sueco. Se privilegian estos ya que el método sueco se elaboró con posterioridad al Eurocódigo 5. Cabe destacar que los coeficientes de la guía técnica sueca aplican también al método de adición de componentes presente en el Eurocódigo 5, haciendo posible una comparación de los resultados del cálculo de resistencia al fuego según los distintos coeficientes.

2.2.5 Estudios de comportamiento de resistencia al fuego de elementos compuestos con entramados de madera y posterior modelo predictivo

El Institute for Research in Construction de Canadá (NRC-IRC), ha estudiado por muchos años el comportamiento de resistencia al fuego de las estructuras con madera. Ya en el año 1960 con Harmathy se realizó un ensayo a una separación de madera sólida sin carga, para posteriormente avanzar en programas como el realizado en los 90s, que permitió determinar nuevas calificaciones de resistencia para elementos divisorios con entramados de madera.^[9] Los avances trajeron consigo la necesidad de mantener actualizada la información de los productos, como en la normativa canadiense con la modificación de 1991, que removió las limitaciones de las densidades de las placas de yeso-cartón, densidad que al ser modificada genera cambios en el desempeño de los productos. Esto generó que todos los ensamblajes genéricos presentes en la norma de 1995 de la NBCC que no fueran respaldados por información contemporánea fueran eliminados.^[10]

En cuanto a la aislación, los autores de estudios han señalado que la lana mineral instalada estrechamente aumenta la resistencia, no así la fibra de vidrio o celulosa que no afecta la capacidad para el caso de muros sin carga. Para el caso de muros sin carga con doble placa de yeso-cartón los reportes también señalaron que los perfiles de madera mostraron mejor resistencia que los perfiles de metal. ^[9]

Luego de estos programas y estudios de diversos autores, la NRC desarrolló la metodología CAM considerando más de 200 ensayos bajo las normas CAN/ULC-S101 y ASTM E119, normas que solo requieren termocuplas al interior del horno y en la cara no expuesta, por lo cual solo se estima visualmente el tiempo que la membrana expuesta permanece en su lugar. Luego de la caída de la capa expuesta existe un corto periodo de tiempo antes de la falla estructural del marco debido a la exposición directa de éste a las llamas, siendo el tiempo entre el desprendimiento de la placa expuesta y el fallo estructural el tiempo de resistencia de los entramados. ^[10]

El Swedish Institute for Wood Technology Research también ha realizado diversos estudios sobre el comportamiento de ensamblados con entramado de madera, con el objetivo de desarrollar modelos razonables de predicción del comportamiento de la resistencia al fuego. Uno de los autores destacados es König, quien realizó estudios a escala real y reducida, los que permitieron determinar que las placas de yeso-cartón contribuyen al comportamiento del carbonizado de los entramados de madera, sin aportar a la resistencia estructural de estos perfiles. König también demostró una buena relación entre las propiedades obtenidas para los materiales en ensayos de pequeña escala en comparación a los de escala real. ^[9]

Si bien la base de datos experimental utilizada por la NRC no contiene todas las combinaciones posibles para la corroboración del CAM diseñado, existe la suficiente información para analizar varios aspectos. Sin embargo hay algunos aspectos filosóficos a clarificar, como lo son si se considera que una placa aporta hasta que se desprende o hasta que la placa supera cierta temperatura, o bien una combinación de las dos. Otro punto a considerar es el hecho de que cuando se ensayan elementos con carga, debido a la deflexión, la placa expuesta se desprende antes en comparación al caso de placas no expuestas. Dado que el método de adición de componentes considera un tiempo para cada material y espesor, es necesario estar del lado conservador y tomar el tiempo que resiste la placa en un elemento con carga. Por otro lado, está la opción de tener dos valores para el método que describan la resistencia de las placas en elementos con y sin carga. ^[10]

Capítulo 3 Recopilación y descripción de ensayos

3.1 Información disponible y generación de base de datos.

La información pública disponible sobre ensayos realizados de resistencia al fuego realizados en Chile, a elementos divisorios horizontales y verticales con entramados de madera, es el *Listado Oficial de Comportamiento al Fuego de Elementos y Componentes de la Construcción* del MINVU. La información expuesta sobre los ensayos en este documento no es completa, sino más bien un resumen parcial, donde se omite información importante, como el tiempo en minutos en el que falla el elemento ensayado o el tipo de falla que este presentó, además de información relevante de la descripción constitutiva del elemento.

La segunda parte de la información disponible son los ensayos de resistencia al fuego realizados por los laboratorios nacionales a elementos divisorios horizontales y verticales con entramado de madera, ensayos realizados en su mayoría en IDIEM. Esta última información construye nuestra base de datos, ya que cuenta con informes de resistencia al fuego más detallados, con lo que se realizará un análisis estadístico sobre los resultados obtenidos.

Dentro de la base de datos disponible fue necesario encontrar los elementos divisorios con entramados de madera, dentro de un universo de ensayos de resistencia al fuego de todo tipo. Esto llevó a hacer un trabajo de levantamiento de información importante, para analizar la mayor cantidad de elementos divisorios posibles.

En el siguiente punto se analizarán los elementos divisorios según los resultados obtenidos en los ensayos y sus características constitutivas. De esta manera se evalúan las configuraciones de los elementos divisorios y los materiales utilizados a nivel nacional. Este análisis se basará en las características que más afecten la resistencia al fuego de un elemento divisorio: medidas de las secciones de entramado y distanciamiento entre estas, características del material y espesor de las placas, material y espesor de la aislación, carga, tiempo y tipo de falla. ^[11]

3.2 Análisis elementos Listado Oficial de Comportamiento al Fuego de Elementos y Componentes de la Construcción, MINVU 2014.

En el listado encontramos 130 elementos divisorios horizontales y verticales con entramados de madera, de los cuales 13 corresponden a ensayos realizados en el DICTUC (principalmente elementos divisorios horizontales), mientras que los otros 157 ensayos corresponden a elementos testeados por los laboratorios de IDIEM.

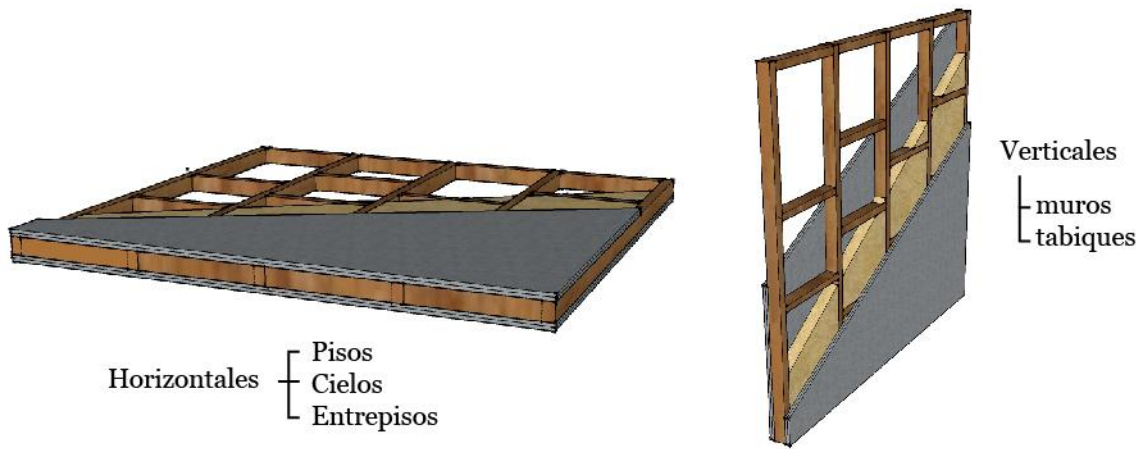


Figura 5: Elementos divisorios con entramado de madera según orientación.

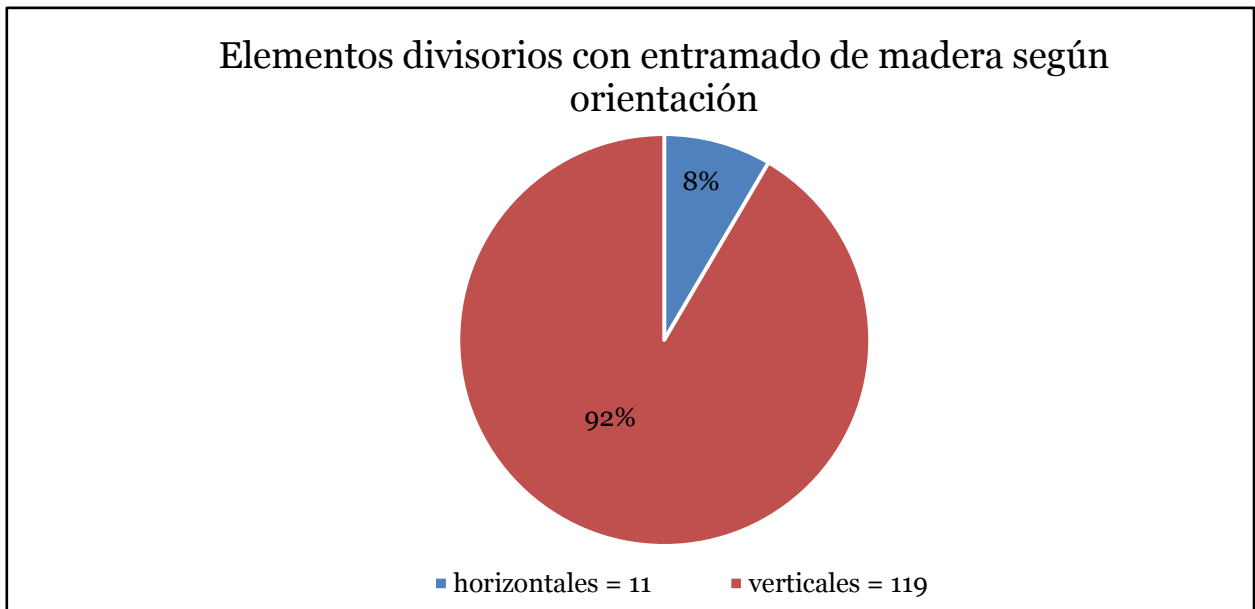


Gráfico 2 Elementos con entramado de madera según orientación, presentes en el Listado Oficial del MINVU 2014.

Como podemos ver en la gráfica expuesta, las opciones de elementos divisorios horizontales con entramados de madera son mucho menores a las opciones de elementos verticales.

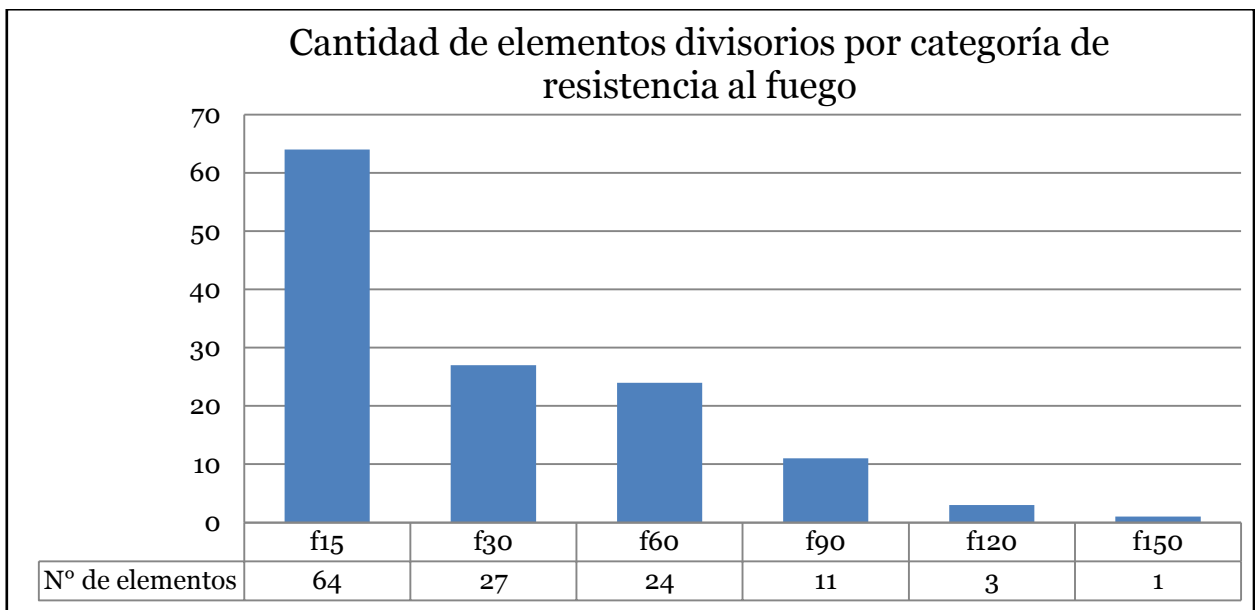


Gráfico 3 Elementos con entramado de madera según categoría F, presentes en el Listado Oficial del MINVU 2014.

En la gráfica anterior se aprecia como la mayoría de los elementos con entramado de madera se encuentran en la categoría F90 o menor, encontrándose la mayoría de éstos en la categoría F15. Si se necesitara un elemento de resistencia F120 o F150 con entramado de madera las posibilidades a elegir serían bastante reducidas, por lo que si alguna de estas 4 soluciones no cumple con las especificaciones necesarias, solo quedaría diseñar nuevas soluciones y ensayar éstas para saber si se cumple con los criterios superiores buscados.

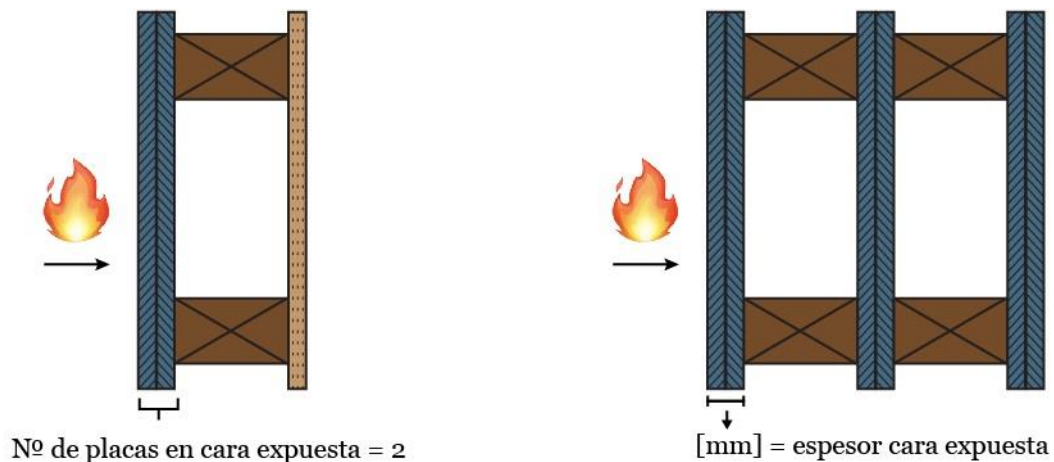


Figura 6: Explicación gráfica de número de placas en cara expuesta y espesor de cara expuesta.

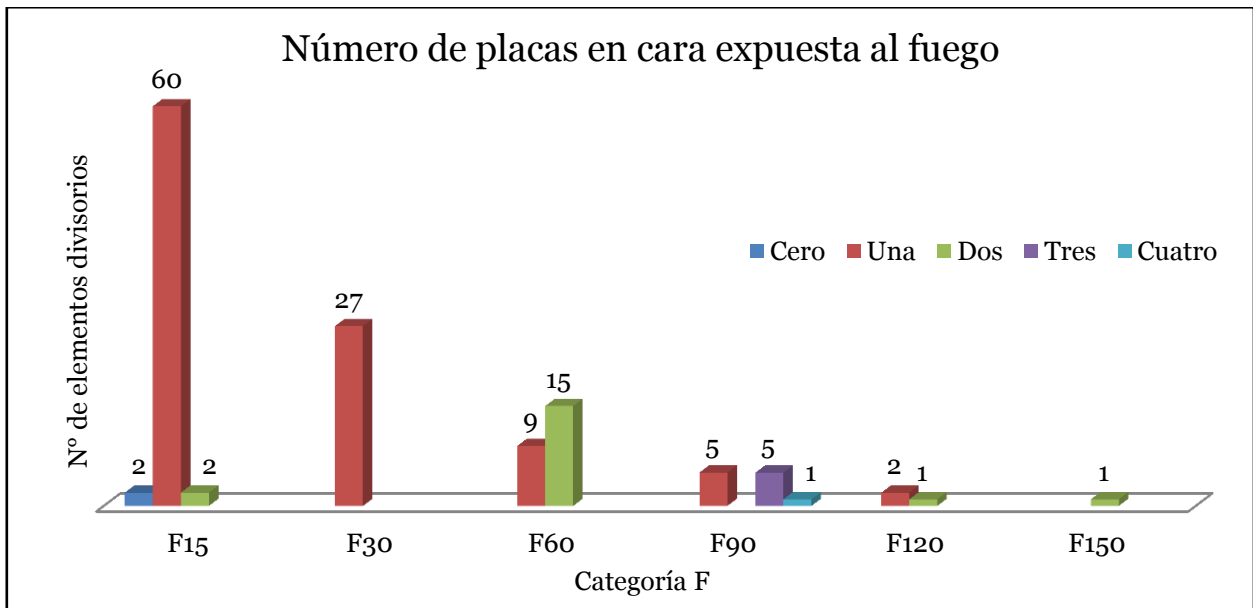


Gráfico 4: Numero placas en cara expuesta del elemento divisorio según categoría F del elemento, para elementos presentes en el Listado Oficial del MINVU 2014.

La gráfica anterior muestra cómo es necesario un mayor número de placas en la cara expuesta al fuego para obtener una mayor resistencia, lo que se refleja en la tendencia de usar dos y tres placas en la cara expuesta en las categorías F60 y F90, lo que hace sentido con la metodología CAM, la que considera la suma de las resistencias de las placas que cubren la cara expuesta al fuego como el mayor aporte. Teniendo lo anterior en cuenta, es aún más clara la dependencia de la resistencia del elemento con respecto al espesor total de la capa expuesta al fuego, lo cual se aprecia en el Gráfico 5.

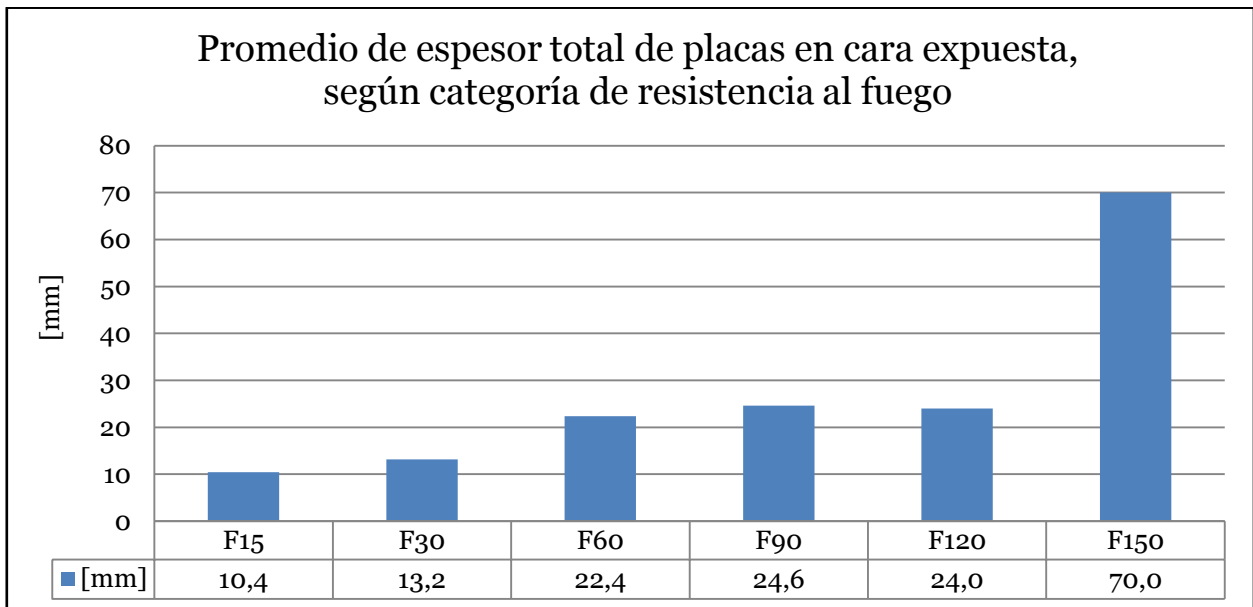


Gráfico 5 Promedio de espesor total de placas en cara expuesta al fuego en milímetros según categoría de resistencia al fuego, de los elementos divisorios con entramado de madera presentes en el Listado Oficial del MINVU 2014.

En el gráfico anterior se establece una tendencia de relación entre el aumento de resistencia con el aumento de espesor, siendo esto lo lógico según lo descrito en el análisis normativo, donde se mostró que la resistencia de una placa aumenta, si se aumenta el espesor de ésta. También es importante destacar que en el Gráfico 5 se considera un número muy acotado de soluciones de categoría F120 y superior, por lo cual los promedios de estas categorías no son representativos.

A continuación se presentan gráficos de dispersión para cada una de las categorías de resistencia al fuego nacional. En estos gráficos se muestra más en detalle el espesor total en milímetros de placas en la cara expuesta de los elementos divisorios. Cabe señalar que el Gráfico 5 anterior muestra los valores promedios obtenidos de los espesores de los siguientes gráficos de dispersión.

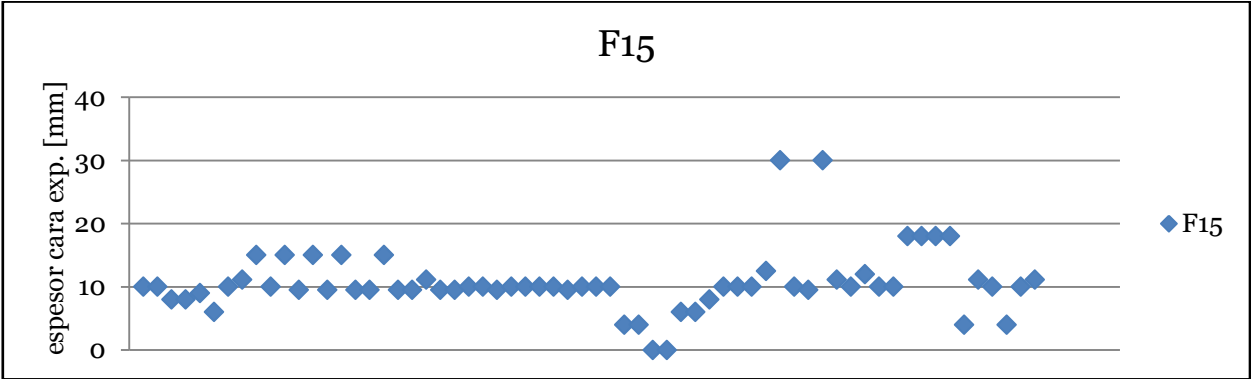


Gráfico 6: Espesor total de placas en la cara expuesta en milímetros, de elementos divisorios F15 con entramado de madera, presentes en el Listado Oficial del MINVU 2014.

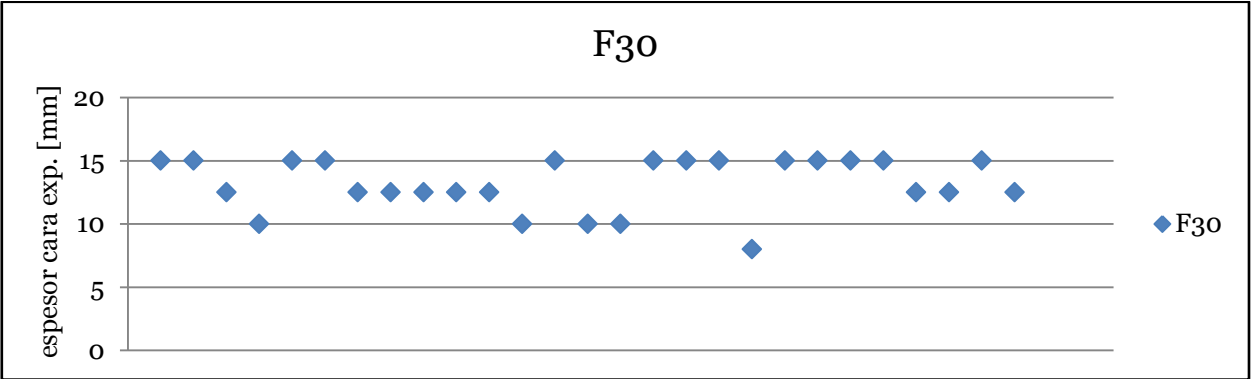


Gráfico 7: Espesor total de placas en la cara expuesta en milímetros, de elementos divisorios F30 con entramado de madera, presentes en el Listado Oficial del MINVU 2014.

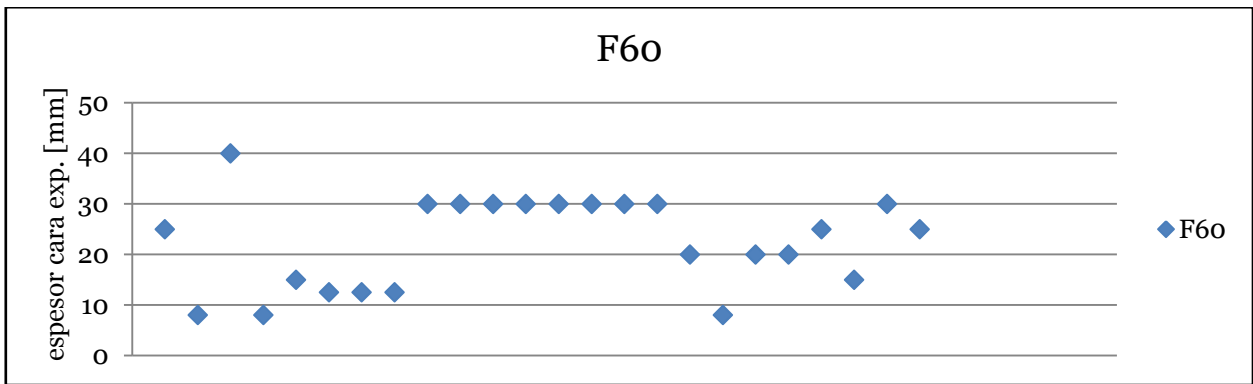


Gráfico 8: Espesor total de placas en la cara expuesta en milímetros, de elementos divisorios F60 con entramado de madera, presentes en el Listado Oficial del MINVU 2014.

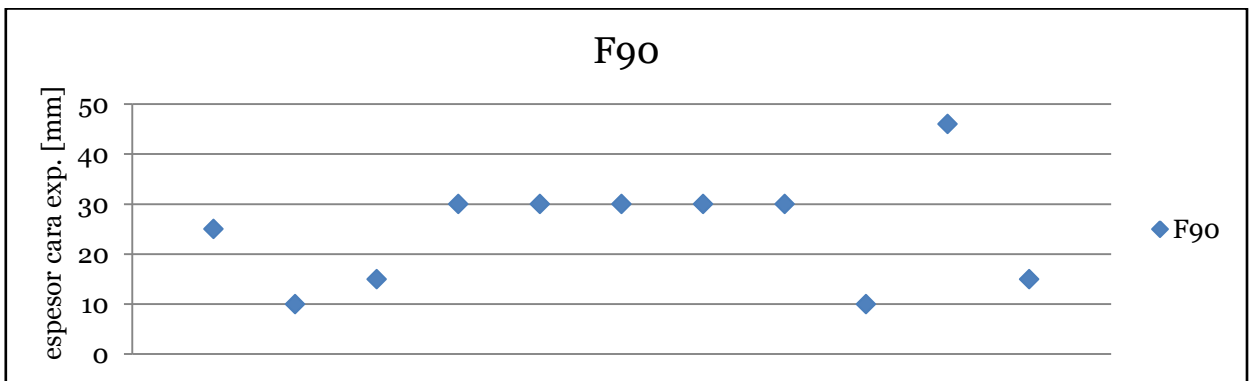


Gráfico 9: Espesor total de placas en la cara expuesta en milímetros, de elementos divisorios F90 con entramado de madera, presentes en el Listado Oficial del MINVU 2014.

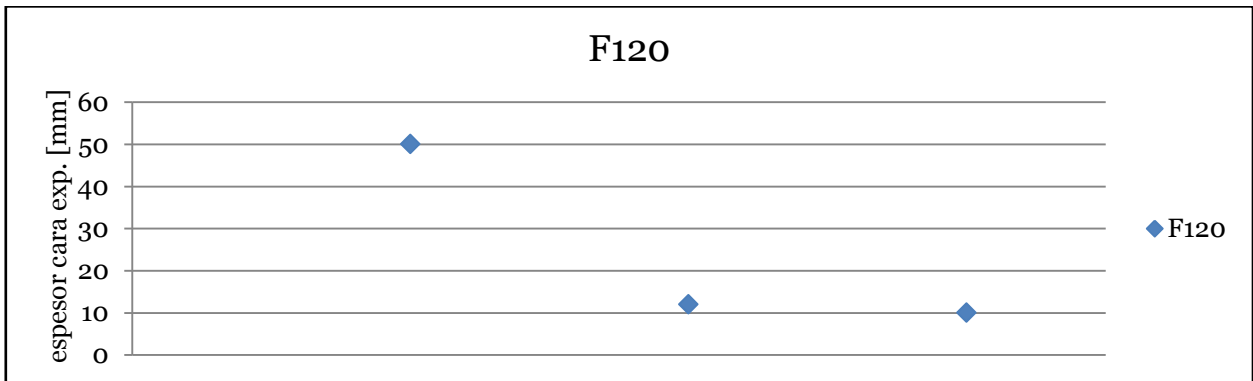


Gráfico 10: Espesor total de placas en la cara expuesta en milímetros, de elementos divisorios F120 con entramado de madera, presentes en el Listado Oficial del MINVU 2014.

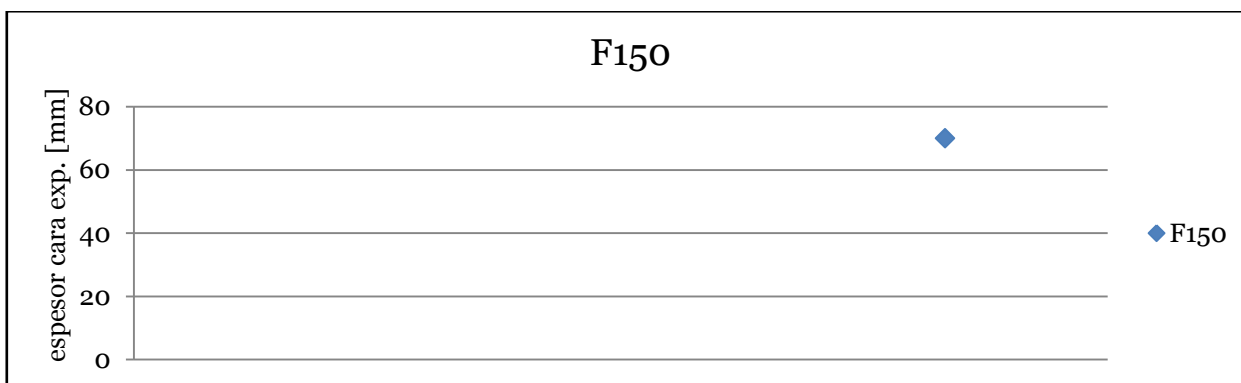


Gráfico 11: Espesor total de placas en la cara expuesta en milímetros, de elementos divisorios F150 con entramado de madera, presentes en el Listado Oficial del MINVU 2014.

En los gráficos enumerados desde el 6 al 11 se ve en detalle el espesor en la cara expuesta de los elementos de cada categoría. En las categorías F120 y F150 se aprecia reducido número de elementos divisorios con entramado de madera destacado anteriormente. En las categorías de resistencia al fuego inferiores, que cuentan con un mayor número de elementos divisorios, se puede apreciar como el espesor en la cara expuesta se repite varias veces en una categoría, haciendo alusión a que esto se debe a que la composición de las estructuras es similar pero varían las marcas de los productos.

Con el espesor y las categorías ya revisadas nos queda evaluar qué materiales son utilizados en estos elementos divisorios, ya que como se mostró en la descripción del Método de Adición de Componentes, es calibrado para ciertos materiales en específico y no para un amplio abanico de opciones.

El siguiente gráfico muestra los materiales utilizados en las placas de las estructuras divisorias horizontales y verticales con entramados de madera nacionales presentes en el listado del MINVU. Si lo que busca es impulsar la construcción en madera en Chile, mediante el desarrollo de una metodología de cálculo para estructuras divisorias con entramado de madera, es importante que esta metodología abarque el mayor número posible de configuraciones utilizadas, por lo cual los materiales utilizados en las placas son un punto muy relevante de este estudio.

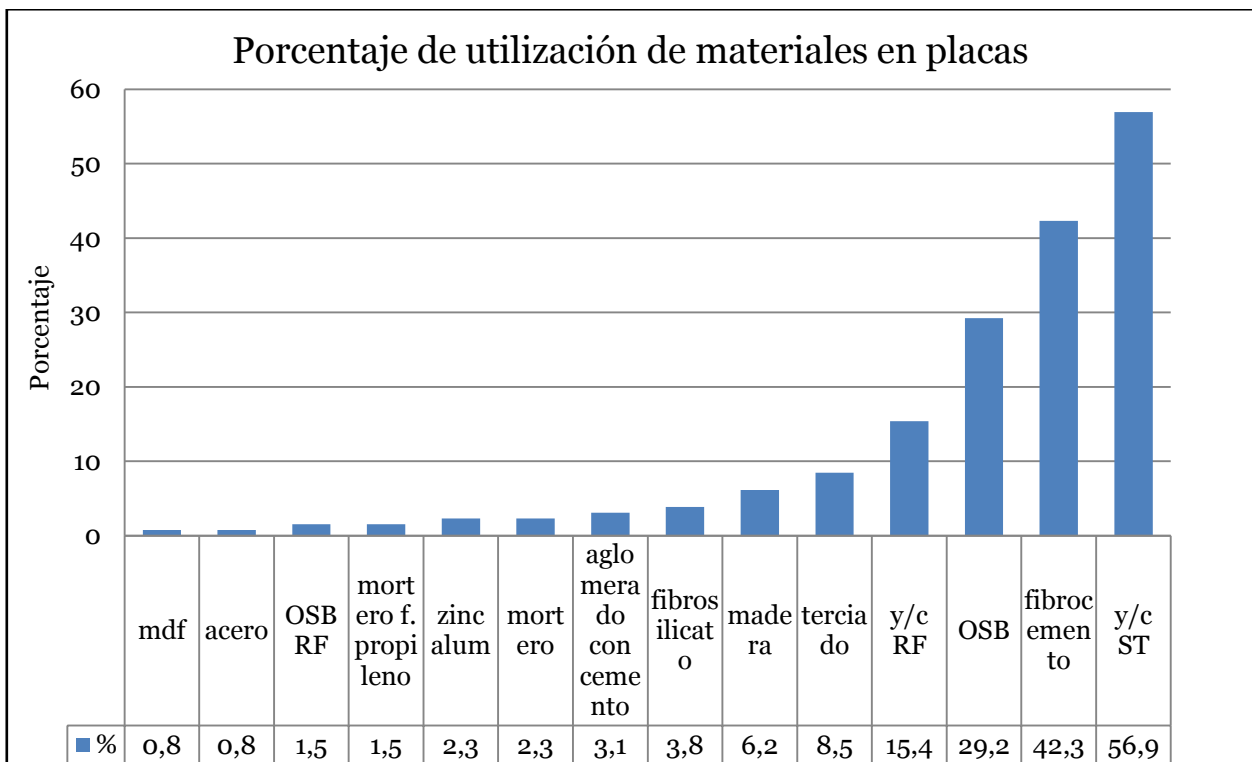


Gráfico 12: Porcentaje de utilización de materiales como placa, en elementos divisorios con entramados de madera, presentes en el Listado Oficial del MINVU 2014.

En el Gráfico 12 se muestra una clara dominancia del yeso-cartón, el que está presente en más de un 70% de los elementos divisorios con entramado de madera si se considera el tipo ST y RF. La dominancia de las placas de yeso-cartón es seguida por las placas de madera, dentro de las cuales se considera MDF, OSB, OSB RF, madera y terciado, ocupando éste tipo de placas más de un 45% de los elementos. No muy lejos de las placas de madera está el porcentaje de utilización de las placas de fibrocemento, las cuales están presentes en más de un 40% elementos divisorios con entramado de madera, del Listado Oficial del MINVU.

Por último se muestran las estadísticas del distanciamiento de los perfiles principales de madera, que componen el entramado del elemento divisorio sobre el cual van fijadas las placas aislantes y la aislación, en caso de ser utilizada. Se le llama perfil principal al encargado de resistir la carga del elemento, es decir, los pies derechos en el caso de los elementos verticales y las vigas en el caso de los elementos horizontales. Lo anterior se presenta gráficamente en las siguientes ilustraciones previas al gráfico estadístico.

Elementos divisorios horizontales

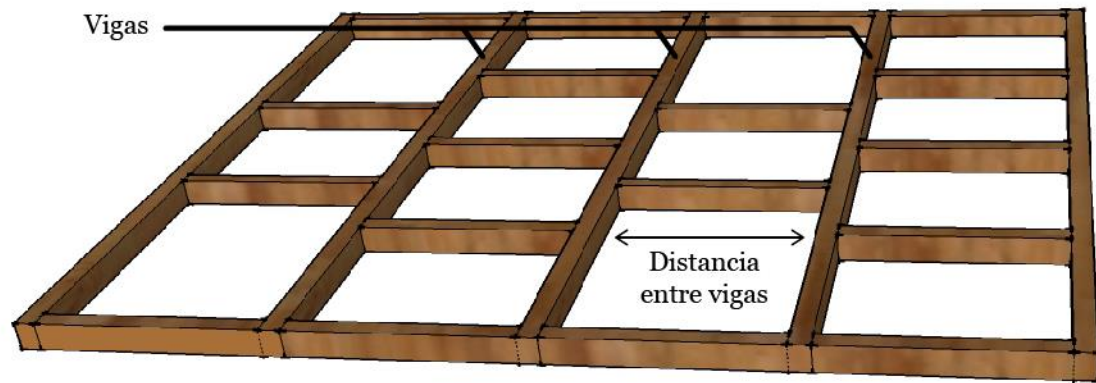


Figura 7: Perfiles principales en elementos divisorios horizontales (vigas) y distancia entre estos (distancia medida de centro a centro de perfil).

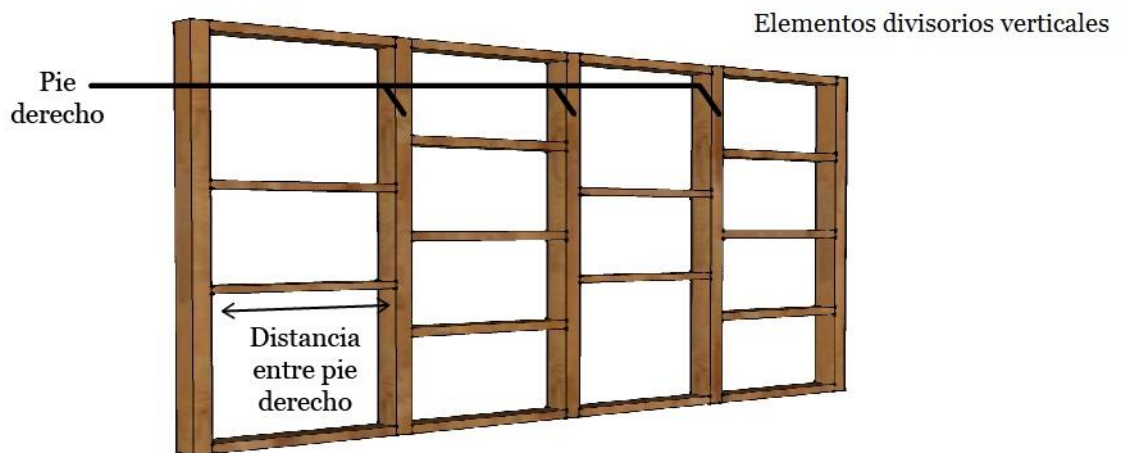


Figura 8: Perfiles principales en elementos divisorios verticales (pie derecho) y distancia entre estos (distancia medida de centro a centro de perfil).

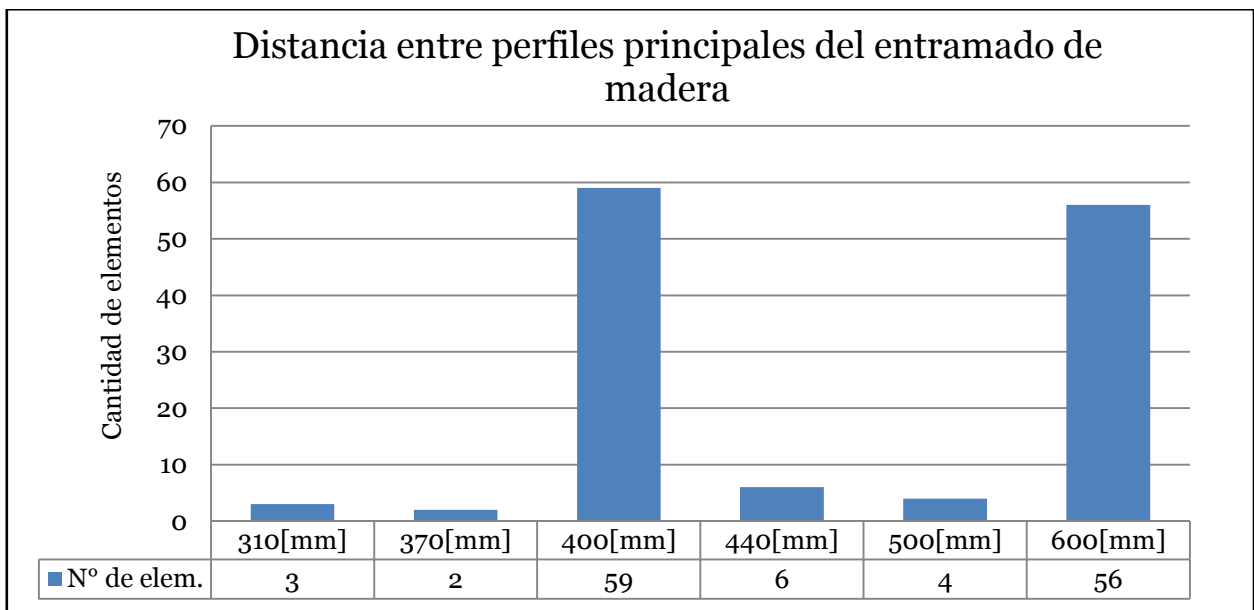


Gráfico 13: Cantidad de elementos según distanciamiento de los perfiles principales que componen el entramado, en elementos divisorios con entramados de madera, presentes en el Listado Oficial, MINVU.

Como se aprecia en el Gráfico 13, los distanciamientos entre los perfiles principales suele ser de 400[mm] o 600[mm]. Cabe destacar que para el Método de Adición de Componentes, presente en el *Design for Code Acceptance 4* del American Wood Council, se requiere un distanciamiento máximo de 400[mm] para considerar el aporte del entramado. Para cerrar este punto se muestra en los siguientes gráficos la utilización de aislación y sus materiales, de manera de establecer los aislantes utilizados y la recurrencia de éstos, en los elementos divisorios con entramado de madera presentes en el listado del MINVU.

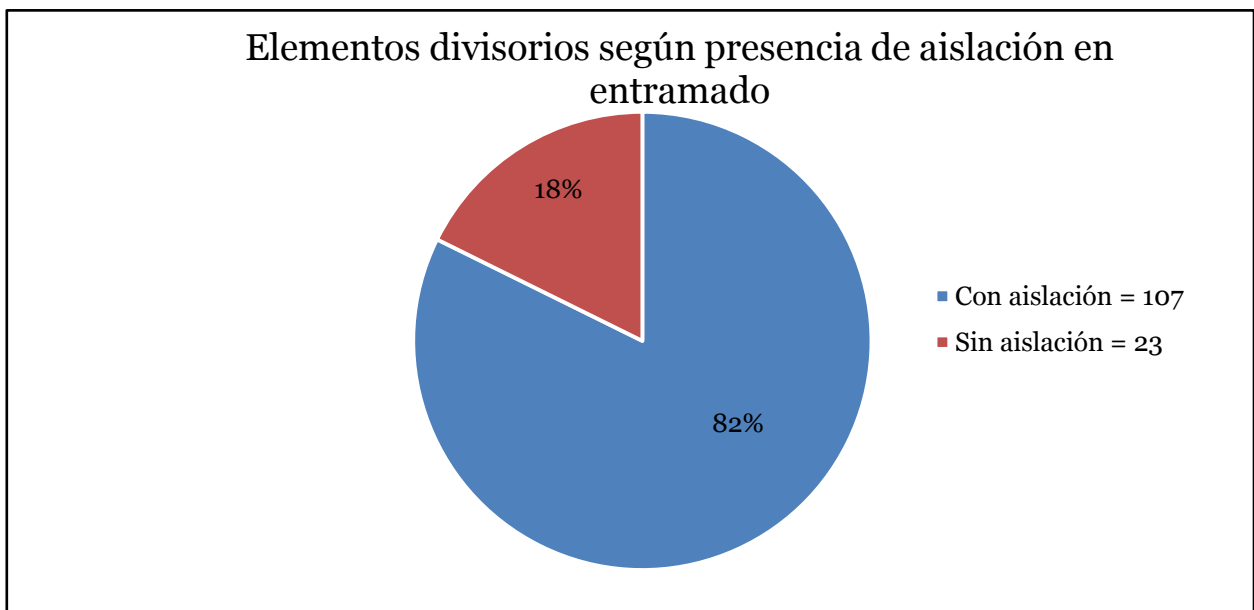


Gráfico 14: Cantidad de elementos según utilización de aislación, en elementos divisorios con entramados de madera presentes en el Listado Oficial del MINVU.

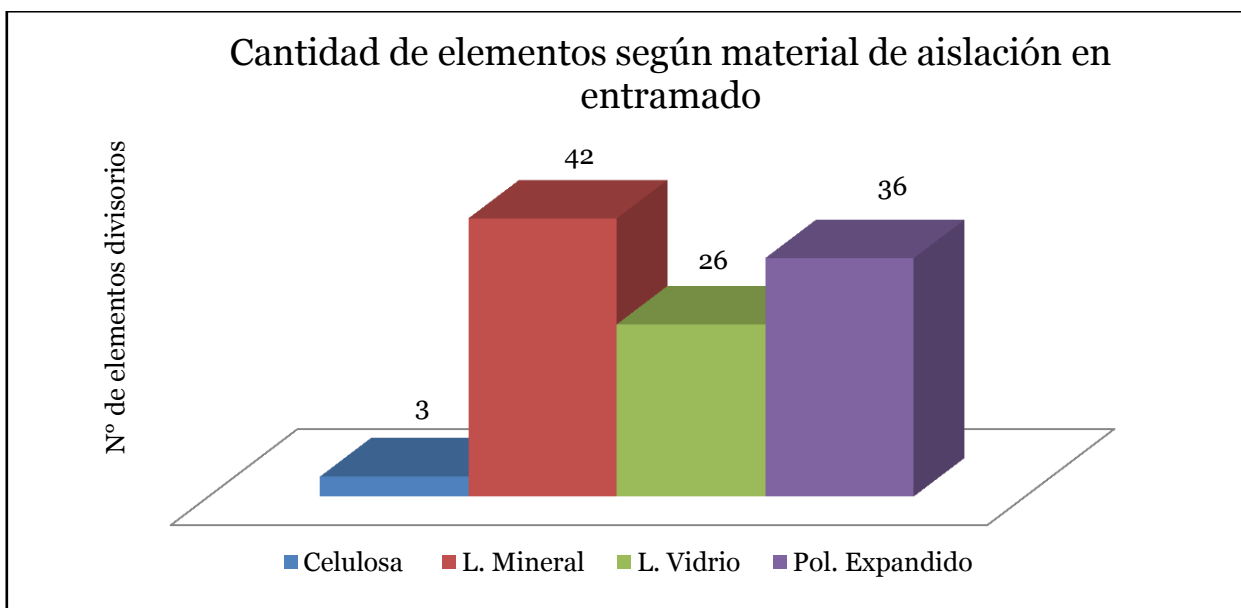


Gráfico 15: Cantidad de elementos según material utilizado en aislación, en elementos divisorios con entramados de madera presentes en el Listado Oficial del MINVU.

En las últimas dos gráficas se puede apreciar el porcentaje de utilización de aislación y los materiales utilizados en ésta, para los elementos divisorios con entramado de madera presentes en el listado del MINVU. Se puede observar como más del 80% de los elementos cuenta con aislación, siendo la más utilizada la lana mineral.

3.4 Análisis de Informes de resistencia al fuego de la base de datos generada.

Se muestra a continuación el análisis de los 176 ensayos de resistencia al fuego realizados en Chile, reunidos en la base de datos. Cabe señalar que la base de datos generada cuenta solo con elementos divisorios verticales y horizontales con entramado de madera, considerando elementos ensayados con y sin carga.

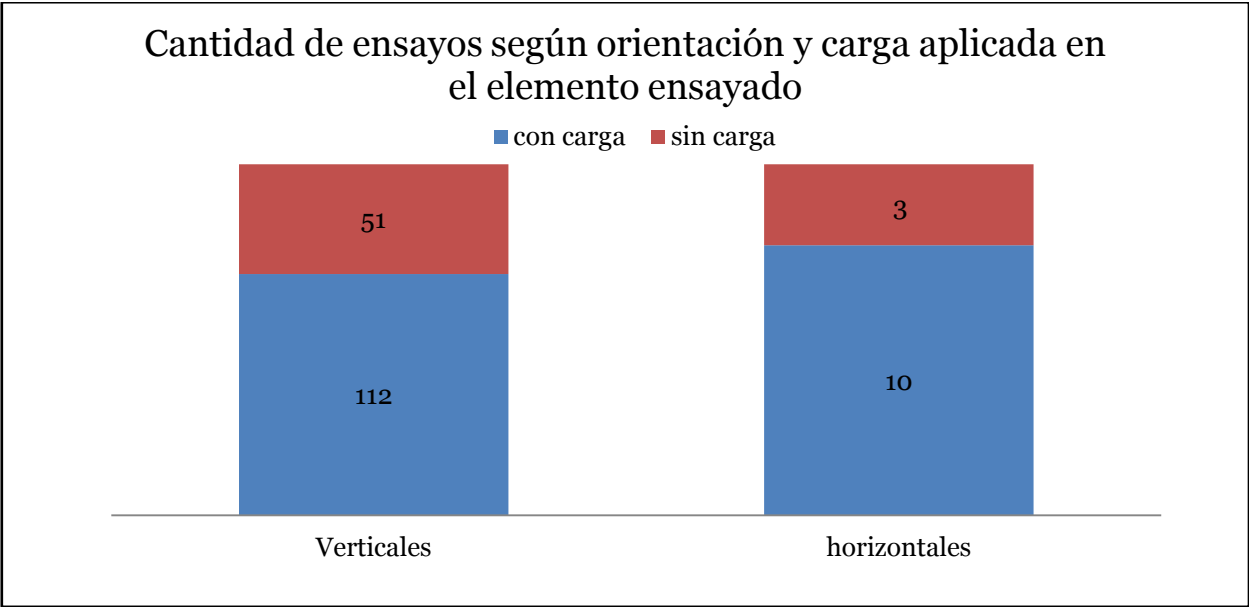


Gráfico 16: Cantidad de elementos divisorios con entramado de madera según orientación y carga, con informe de resistencia al fuego en la base de datos.

Comparando el Gráfico 16 al Gráfico 2, se aprecia en ambos una baja cantidad de elementos divisorios horizontales con entramado de madera, esto tiene una justificación en las limitantes que tiene la construcción en madera dichas anteriormente, dado que la construcción en altura es limitada para este material. Lo anterior implica una baja necesidad de elementos divisorios horizontales con entramados de madera, ya que a nivel nacional la construcción en altura generalmente es realizada en acero y hormigón.

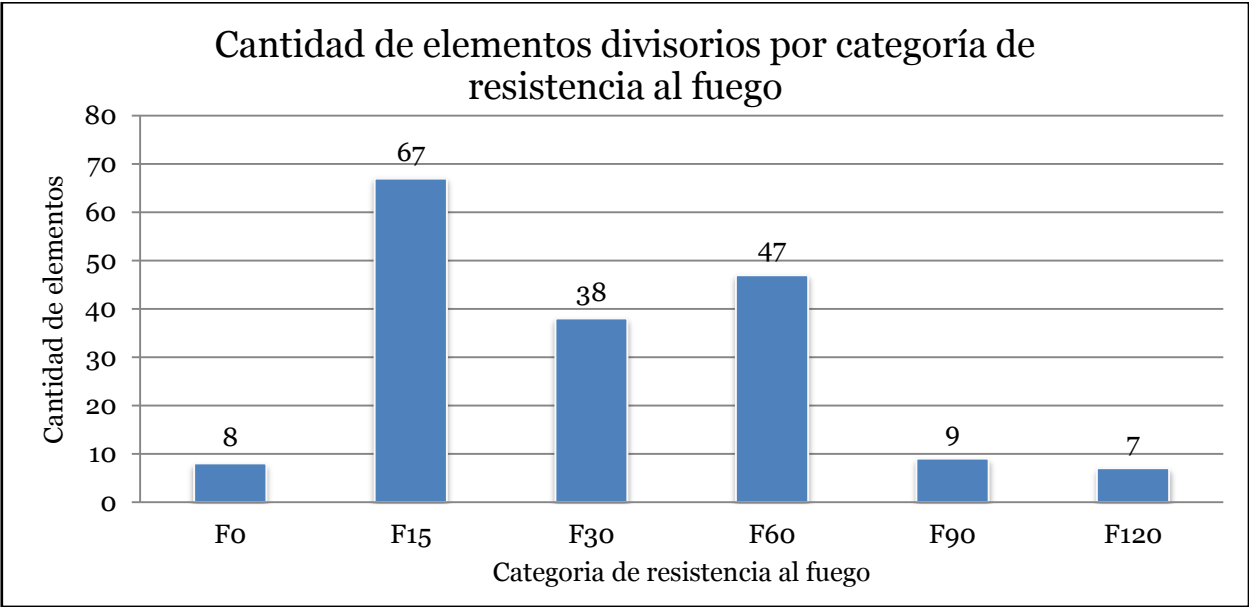


Gráfico 17: Cantidad de elementos divisorios con entramados de madera según la categoría de resistencia al fuego, con informe de resistencia al fuego en la base de datos.

En el Gráfico 17 se muestra la cantidad de elementos divisorios con entramado de madera, según las categorías de resistencia al fuego de la norma NCh935, donde se aprecia una distribución similar a la del Gráfico 3, sin embargo cabe destacar la presencia de elementos FO, es decir existen en la base de datos ensayos con resultados menor a 15[min].

Si analizamos el Gráfico 17 según los extractos de la *Ordenanza General de Urbanismo y Construcción* presentes al inicio de esta memoria, podemos ver que esta distribución se justifica por las necesidades de resistencia al fuego según el tipo de construcción. En Chile la construcción en altura, como se mencionó anteriormente, se realiza en acero y hormigón, debido a los buenos resultados de estos ante las sollicitaciones sísmicas del país. Es por ésto que las construcciones de gran envergadura y/o industriales en altura, no utilizan la madera como elemento estructural en estructuras divisorias.

Como las edificaciones que utilizan entramados de madera no son de gran envergadura, no consideran por lo general muros cortafuego o zonas verticales de seguridad ni escaleras. Por esto si descartamos del análisis los Tipo (1) y (2) del Extracto 1 presentado en el Capítulo 2, podemos ver que la máxima resistencia exigida es F90 para las estructuras no industriales de baja superficie edificada, por lo que no se consideran los tipos de edificio del Extracto 3.

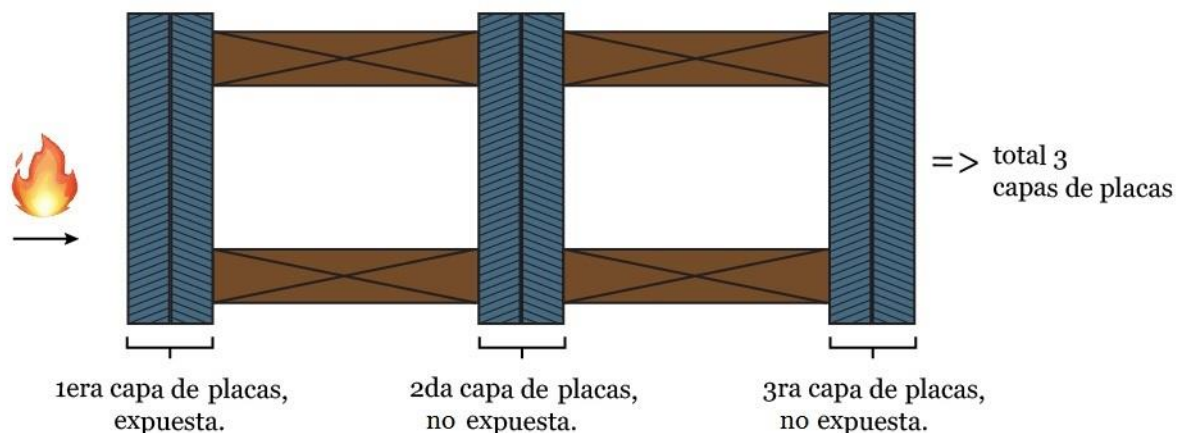


Figura 9: ejemplo de conteo de capas de placas.

En la gráfica siguiente se muestra la cantidad de ensayos en la base de datos, según la cantidad de “capas de placas”, término que hace referencia a la cantidad de caras aisladas con placas y la cantidad de entramados de madera. El entramado de madera de un elemento divisorio tiene que estar cubierto al menos por una cara con una placa aislante para cumplir con el requerimiento de aislación, sin embargo un marco puede contar con hasta caras aisladas con placas, una expuesta al fuego y la otra en la cara posterior del entramado. En el caso de contar con dos entramados en una estructura divisoria, se pueden tener hasta tres capas de placas aislantes, con una capa extra separando los perfiles del marco. Bajo el mismo concepto anterior, por cada entramado extra se puede agregar una capa de placas extra, como se ejemplifica en la Figura 9 y 10.

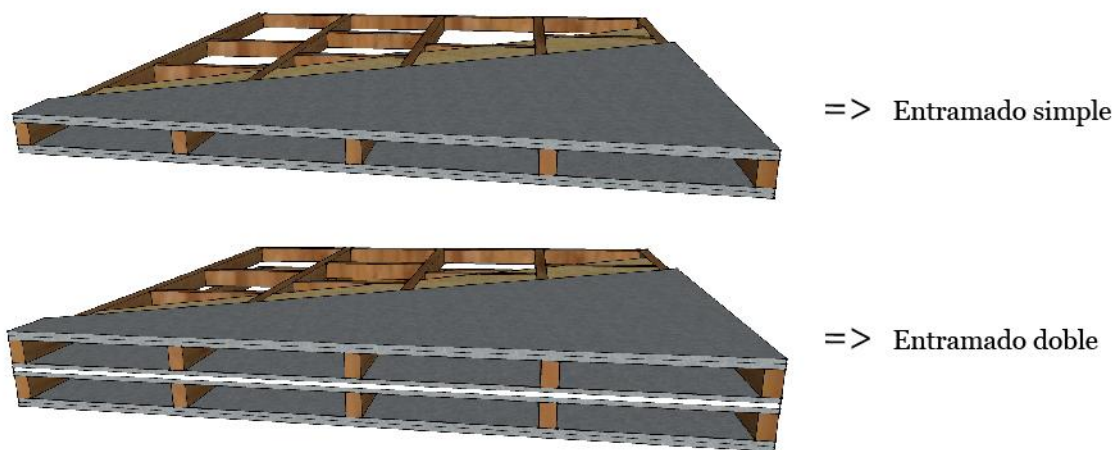


Figura 10: forma de considerar los entramados de madera.

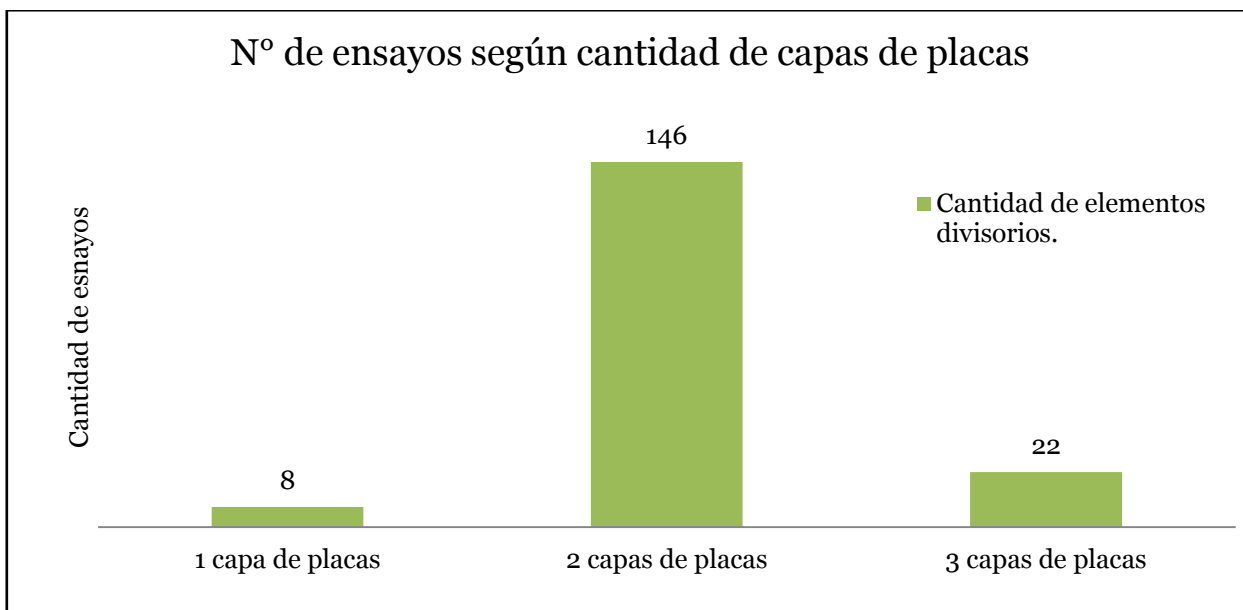


Gráfico 18: Cantidad de elementos divisorios con entramados de madera según la cantidad de capas de placas, con informe de resistencia al fuego en la base de datos.

En el Gráfico 18 se puede realizar un análisis similar al expuesto en el Gráfico 17, donde se estimó una exigencia máxima resistencia al fuego F90. Es por esto que no se justifica la necesidad de un mayor número de capas de placas aislantes, las que serían necesarias en caso de buscar una resistencia al fuego mayor. Por lo anterior se espera que haya en su mayoría elementos con un solo marco y dos capas de placas, ya que como se analizó anteriormente se cuenta principalmente con elementos verticales, justificando con esto que las dos caras del perfil estén cubiertas, de manera de no dejar expuesto el entramado de madera y la aislación en caso de contar con esta.

Otra justificación para la utilización de dos capas de placas y no simplemente una, es la expuesta en los requerimientos de la norma NCh935, donde surge la necesidad de considerar ambos lados del elemento divisorio en el ensayo, a menos que este sea simétrico y de uso perimetral.

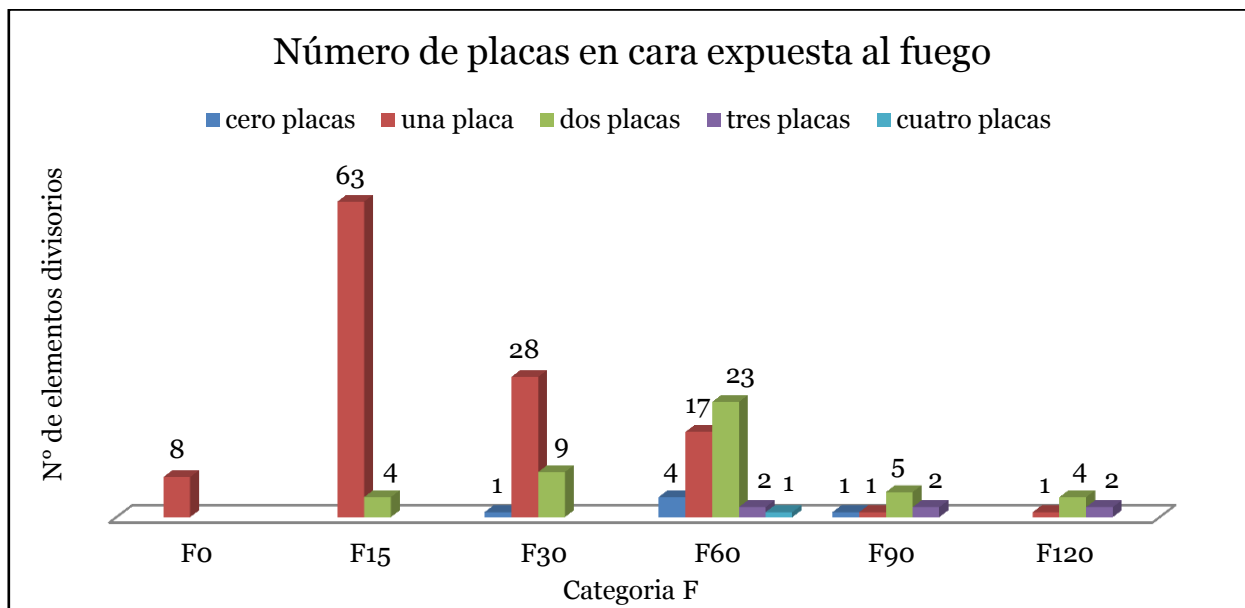


Gráfico 19: Cantidad de elementos divisorios con entramados de madera según la cantidad de capas de placas y categoría de resistencia al fuego, con informe de resistencia al fuego en la base de datos.

El Gráfico 19 nos muestra la cantidad de placas en la cara expuesta al fuego de los elementos divisorios con entramados de madera de la base de datos, donde se aprecia preferencia en la utilización de una sola placa en la cara expuesta, además de una eventual baja utilización de tres a cuatro placas en la cara expuesta. Lo anterior se justifica bajo lo mencionado anteriormente en el análisis de los Gráficos 15 y 16, donde se hace alusión a los requisitos de resistencia al fuego necesarios para las edificaciones que ocupan estos elementos divisorios.

Además, en el Gráfico 19 cabe destacar cómo afecta el número de capas en el método de adición de componentes, donde en todas las versiones estudiadas se ve como el aumento las placas aumentan la resistencia al fuego. Si bien lo anterior es en cierto grado deducible, es importante destacar nuevamente que las placas en la cara expuesta al fuego tienen mayor relevancia en la resistencia al fuego del elemento divisorio.

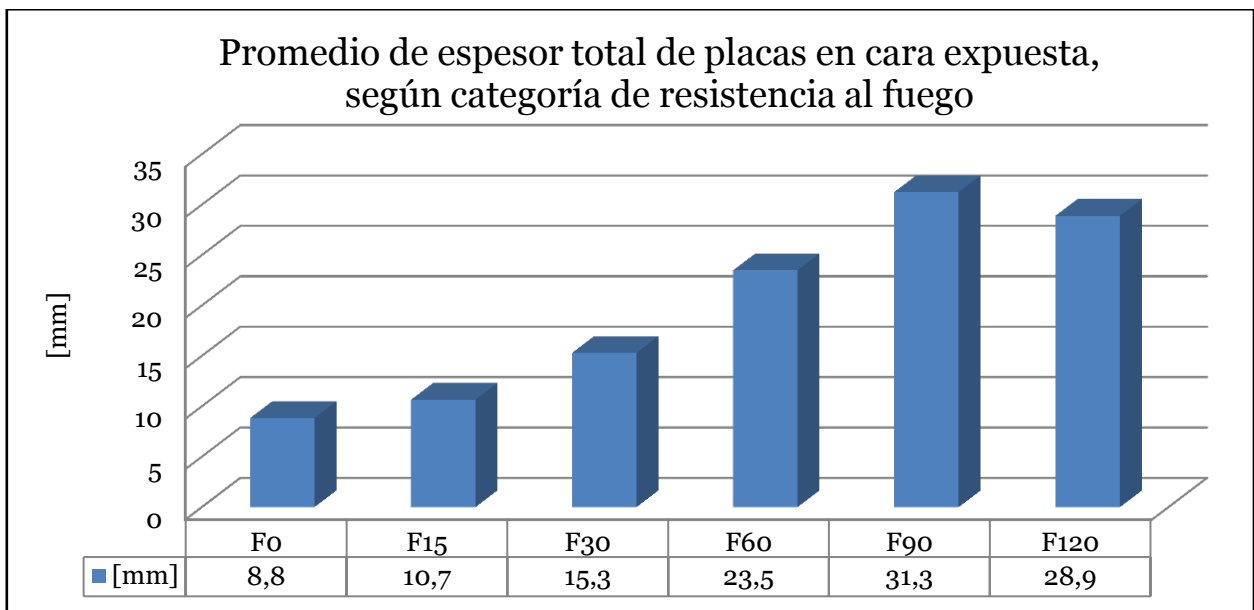


Gráfico 20: Espesor promedio de cara expuesta al fuego en milímetros según categoría de resistencia al fuego, de los elementos divisorios con entramado de madera con informe de resistencia al fuego en la base de datos.

En la gráfica anterior se aprecia al igual que en la similar del *Listado Oficial de Comportamiento al Fuego de Elementos y Componentes de la Construcción* del MINVU, cómo los elementos tienden a tomar un mayor espesor en la cara expuesta a medida que se busca obtener una mayor resistencia al fuego. Junto con esto se aprecia una gran similitud entre los valores promedios obtenidos desde la categoría F15 a la categoría F60, en comparación a los promedios de los elementos del listado del MINVU, similitud de espesor que se pierde desde la categoría F90. La diferencia entre los promedios se justifica por el bajo número de datos evaluados en las categorías F90 y F120, lo cual hace que el valor promedio varíe de mayor manera dependiendo de los materiales utilizados.

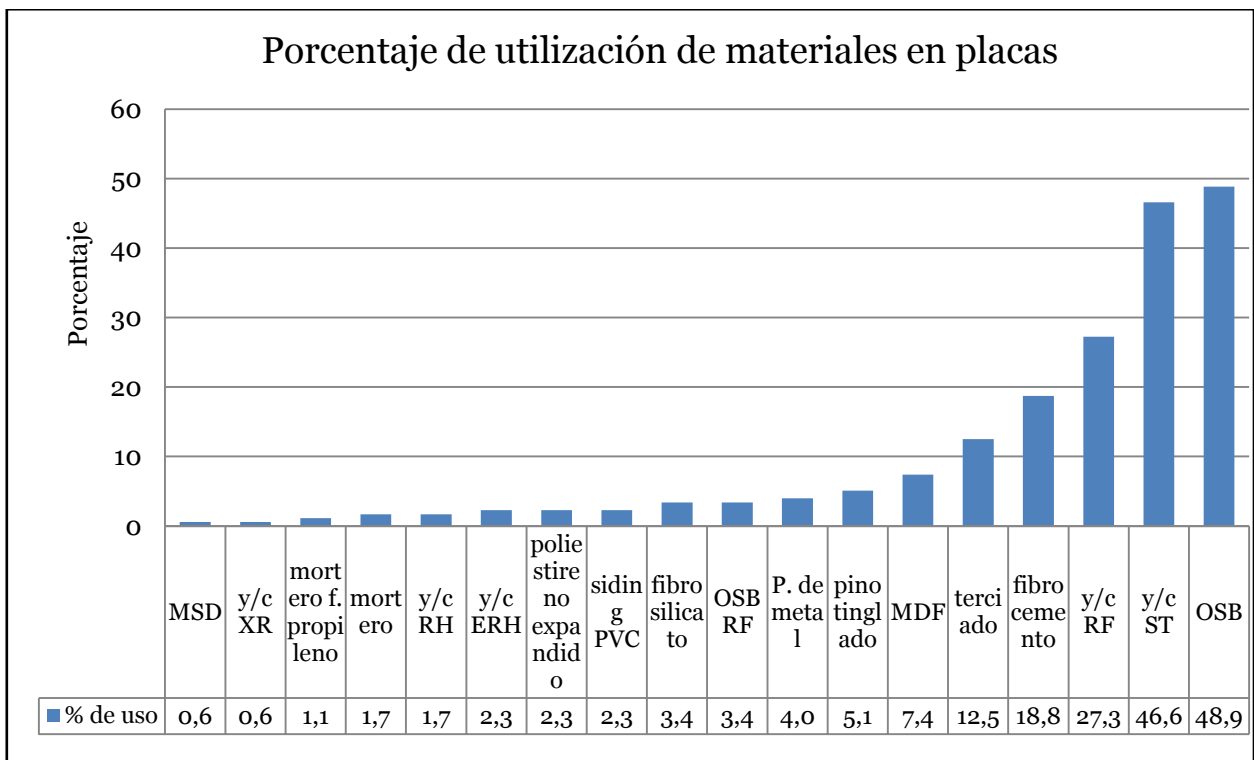


Gráfico 21: Porcentaje de utilización de materiales como placa en elementos divisorios con entramados de madera, con informe de resistencia al fuego en la base de datos.

En el Gráfico 21 se aprecia cómo las placas de madera tienen un mayor porcentaje de presencia, en relación a lo evaluado para los elementos divisorios con entramado de madera del listado del MINVU. Se ve que al considerar todos los tipos de placas de yeso-cartón, además de todos los tipos de placas de madera, ambos materiales están presentes en alrededor del 75% de los elementos evaluados de la base de datos. Otro punto a destacar al realizar una comparación entre los elementos de la base de datos y los del listado del MINVU, es que en el listado del MINVU existe una baja cercana al 20% en la utilización de placas de fibrocemento. Esto nos corrobora la necesidad de considerar las placas de yeso-cartón y de madera como un posible método de adición de componentes nacional para el cálculo de resistencia al fuego, con mayor énfasis en la utilización de las placas de OSB y yeso-cartón ST, ya que si no son considerados dentro del método se estaría dejando fuera del alcance de éste más de la mitad de las estructuraciones ensayadas a nivel nacional.

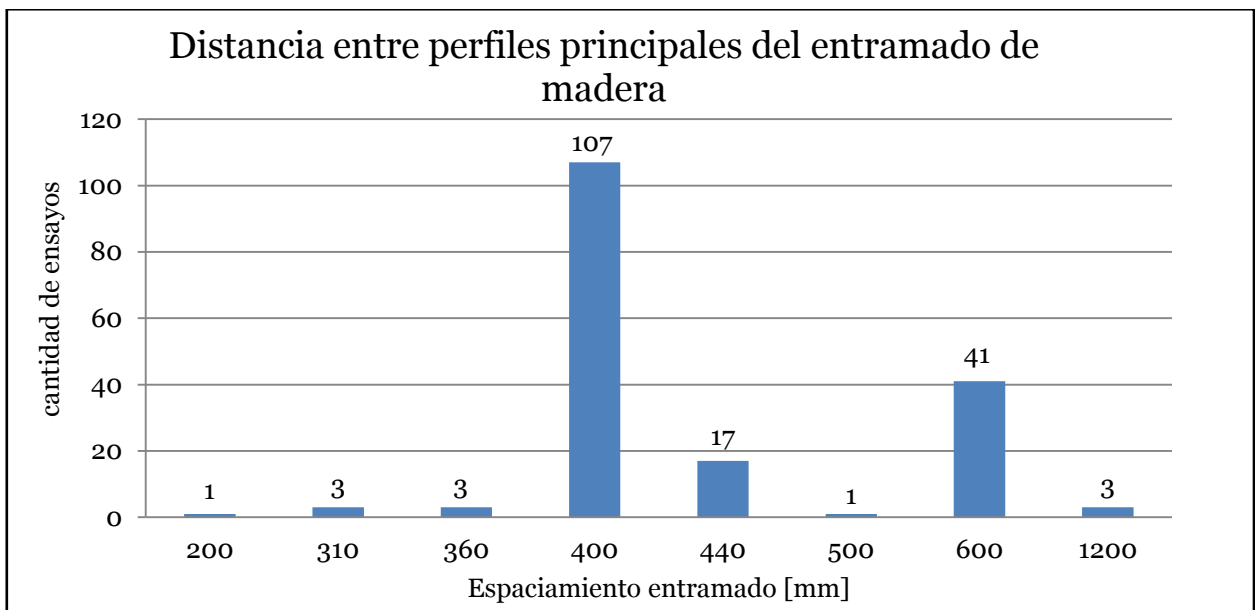


Gráfico 22: Cantidad de ensayos a elementos divisorios con entramados de madera, según distanciamiento entre perfiles del marco, con informe de resistencia al fuego en la base de datos.

Del Gráfico 22 podemos ver que la mayoría de los elementos divisorios con entramado de madera de la base de datos considera un distanciamiento de perfiles principales de 400[mm], a diferencia de los elementos evaluados del listado del MINVU, donde se vio que existía un número similar con perfiles principales distanciados a 400[mm] y 600[mm]. Esta tendencia de uso de perfiles a 400[mm], coincide con el requerimiento de distancia máxima de los perfiles principales para considerar su aporte a la resistencia, presente en el *Desing for Code Acceptance 4* del American Wood Council.

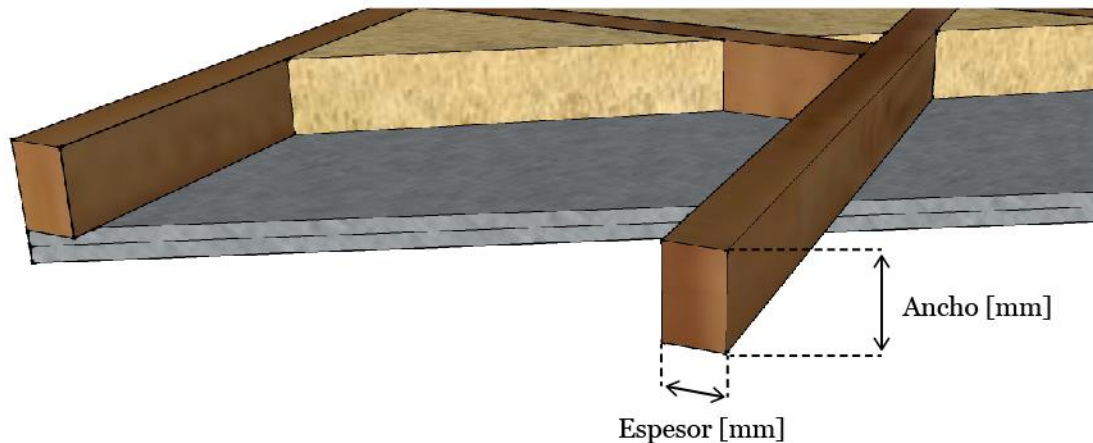


Figura 11: Diagrama explicativo para espesor y ancho de perfiles en entramados de madera de elementos divisorios.

A continuación se muestran las estadísticas de espesor y ancho de los perfiles de madera utilizados en los entramados de los elementos divisorios con ensayo dentro de la base de datos, estas medidas corresponden a las diagramadas en la Figura 10.

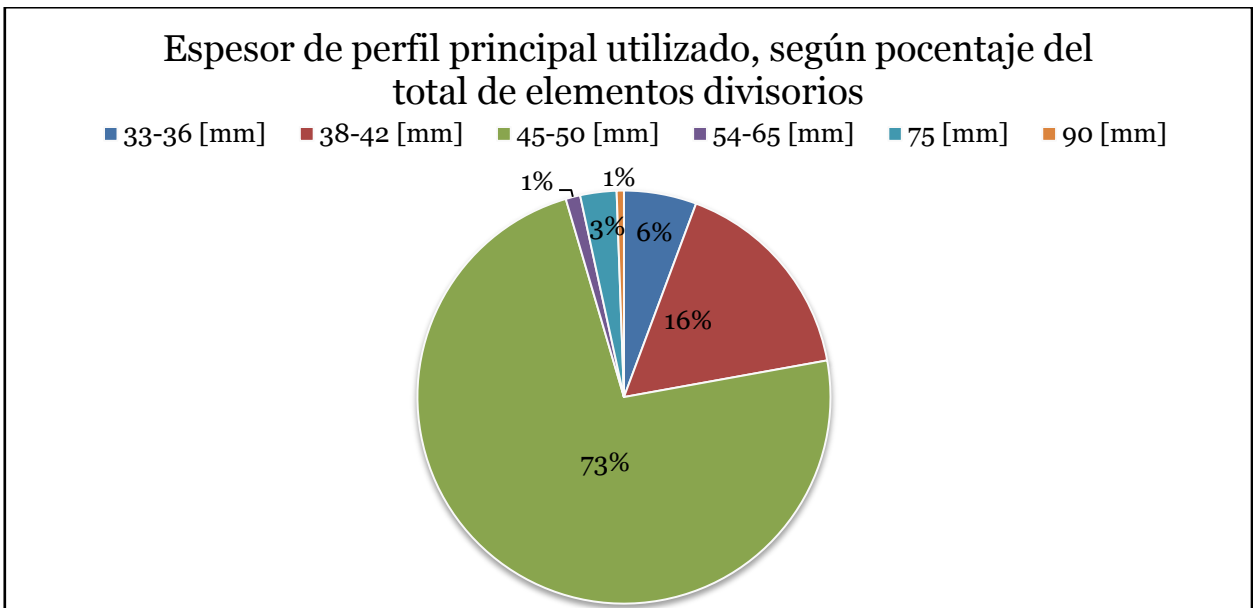


Gráfico 23: Porcentaje de ensayos a elementos divisorios con entramados de madera según el espesor en [mm] del entramado, con informe de resistencia al fuego en la base de datos.

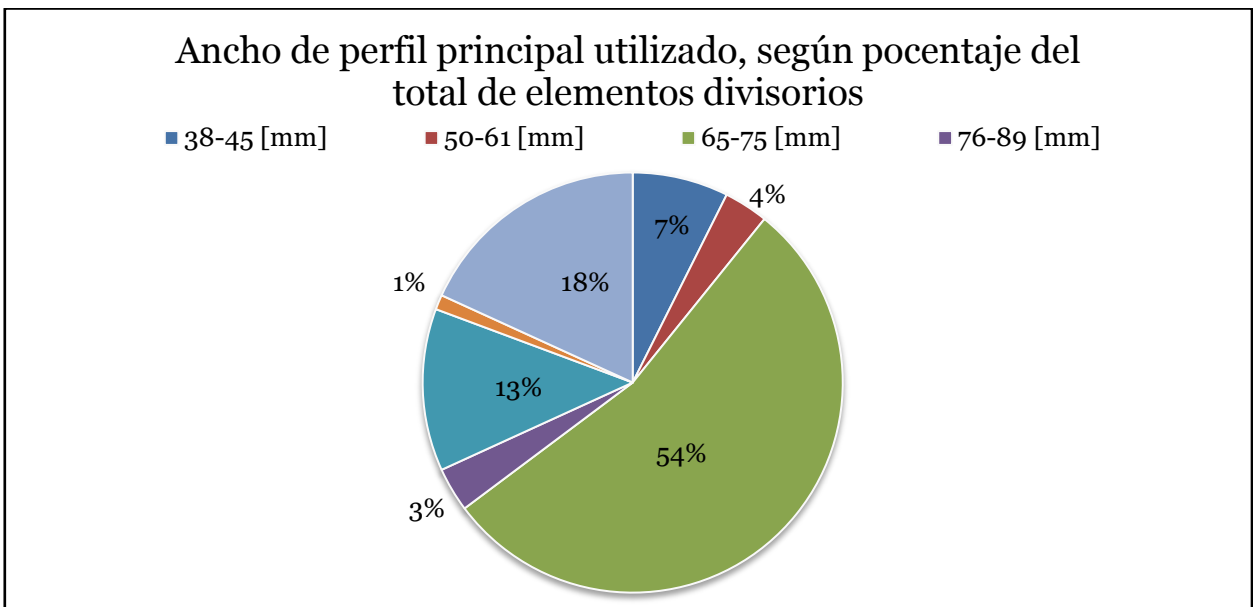


Gráfico 24: Porcentaje de ensayos a elementos divisorios con entramados de madera, según el ancho en [mm] del entramado, con informe de resistencia al fuego en la base de datos.

En las últimas dos gráficas, se puede apreciar la dominancia de utilización de perfiles de 45[mm] a 50[mm] de espesor, además de una tendencia importante a la utilización de perfiles de entre 65[mm] y 75[mm] de ancho. Cabe recordar que el método de adición de componentes del documento norteamericano *Design for Code Acceptance 4* del American Wood Council, requiere perfiles de 2x4” para ser considerados dentro de la resistencia al fuego. De lo anterior también es importante destacar que el método de adición de componentes del American Wood Council está hecho para las maderas del *International Building Code* y que este último documento cuenta restricciones de

categoría estructural para las maderas en entramados de elementos horizontales. Esto último es muy importante, ya que en las descripciones de los entramados de madera de las estructuras divisorias nacionales rara vez se encuentran los grados estructurales, lo cual es un punto importante a considerar para impulsar la construcción en madera.

Otro punto importante es que los elementos divisorios con entramado de madera de la base de datos y del listado del MINVU, es que no se muestra en casi la totalidad de las descripciones de los elementos el grado estructural, lo cual es un requerimiento para aplicar correctamente el método de adición de componentes de la norma norteamericana. Este punto debe ser analizado en detalle si se desea implementar un método de adición de componentes para la resistencia al fuego en la normativa nacional, con el fin de establecer distanciamientos mínimos que prevengan una falla prematura por estabilidad mecánica del elemento divisorio.

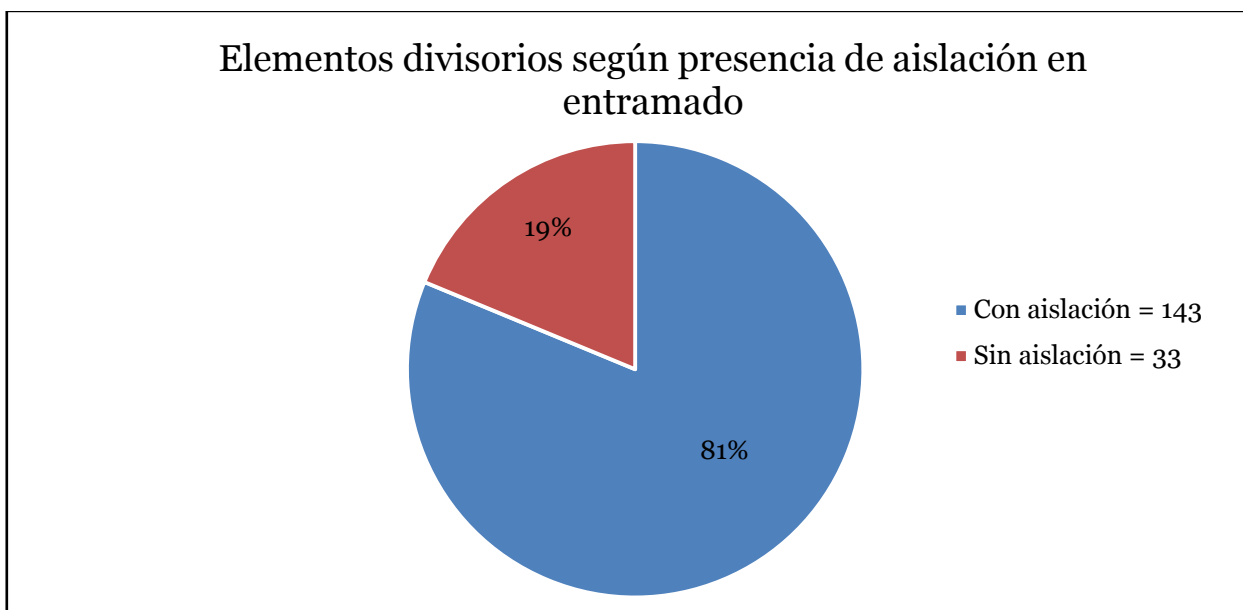


Gráfico 25: Cantidad de elementos divisorios con entramado de madera según utilización de aislación en entramado, con informe de resistencia al fuego en la base de datos.

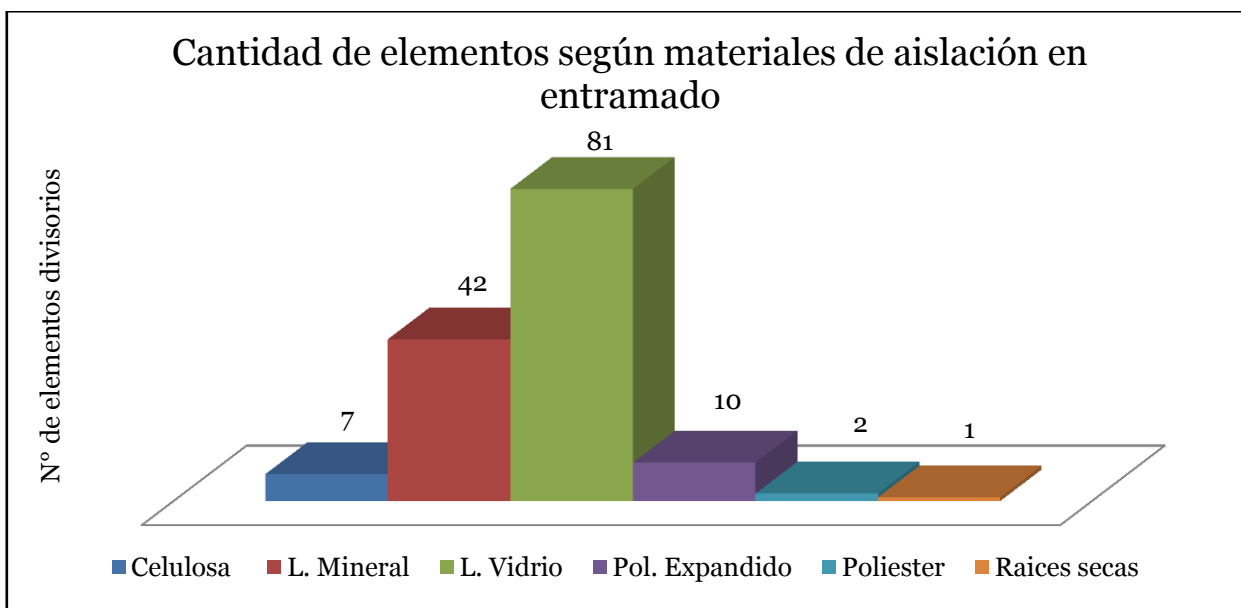


Gráfico 26: Cantidad de elementos divisorios con entramado de madera según material utilizado en aislación en entramado, con informe de resistencia al fuego en la base de datos.

En las últimas dos graficas se puede apreciar el porcentaje de utilización de aislación y los materiales utilizados en ésta, para los elementos divisorios con entramado de madera presentes en la base de datos generada. Se ve una distribución muy similar entre los Gráficos 14 y 25, lo cual nos corrobora que cerca del 80% de los elementos divisorios con entramados de madera utilizados en Chile tienen aislación.

Realizando una comparación entre los Gráficos 15 y 26 se aprecia que cambia la dominancia del material más utilizado. Se ve que para los elementos de la base de datos se tiene una dominancia clara de la aislación de lana de vidrio, estando en casi la mitad de los elementos divisorios evaluados, además de una disminución porcentual significativa en cuanto a la utilización de aislación de poliestireno expandido, en comparación a los elementos evaluados del listado del MINVU.

Del análisis a las descripciones de la lana de vidrio utilizada en los entramados de madera de las estructuras divisorias con informe en la base de datos, los puntos más destacables son la ejecución de la capa de aislación de lana de vidrio y la densidad de esta. Lo anterior ya que las normas norteamericanas y europeas vistas requieren una densidad y una ejecución de la capa que no deje espacios libres.

En los informes de resistencia al fuego revisados en la base de datos se vio que la lana de vidrio llegaba hasta una densidad de 14[kg/m³], lo cual es inferior a los criterios utilizados en las metodologías CAM revisadas en este estudio. Junto con esto se apreció en los informes que la ejecución de la lana de aislación era aplicada muchas veces como capa libre en el entramado y no como una capa fija a este.

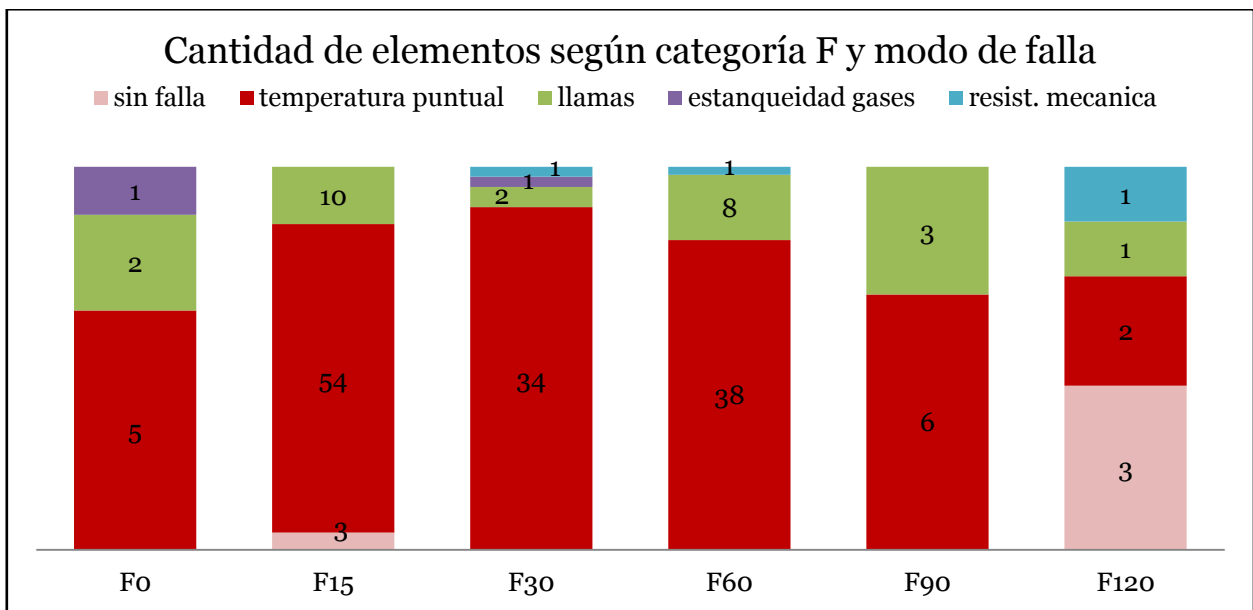


Gráfico 27: Cantidad de ensayos a elementos divisorios con entramados de madera según modo de falla y categoría de resistencia al fuego, con informe de resistencia al fuego en la base de datos.

En el Gráfico 27 se observa el modo de falla de los elementos divisorios con entramado de madera en la base de datos, según su categoría de resistencia al fuego alcanzada. Cabe destacar el dominio del método de falla por temperatura promedio, que es lo buscado, ya que éste método de falla indica que los componentes trabajaron de buena manera para resistir el fuego y no generaron una falla prematura.

El segundo método de falla más común para los elementos de la base de datos es la estanqueidad de llamas. En este caso se tiene que existen zonas débiles por las que trayecta el flujo de calor, por las cuales el flujo logra pasar con mayor celeridad, de la misma manera que lo haría la corriente eléctrica viajando primero por las zonas de menor resistencia. Esto se pudo apreciar en las fotografías térmicas existentes en la base de datos.

Del análisis anterior es importante considerar recomendaciones o exigencias de buenas prácticas en la materialización de elementos divisorios en la normativa nacional, con el objetivo de lograr el buen desempeño de las estructuras en cuanto a la resistencia al fuego. Sin estas exigencias es difícil aplicar de manera segura un método de cálculo de resistencia al fuego, por las fallas prematuras que puedan presentar los elementos divisorios frente al fuego.

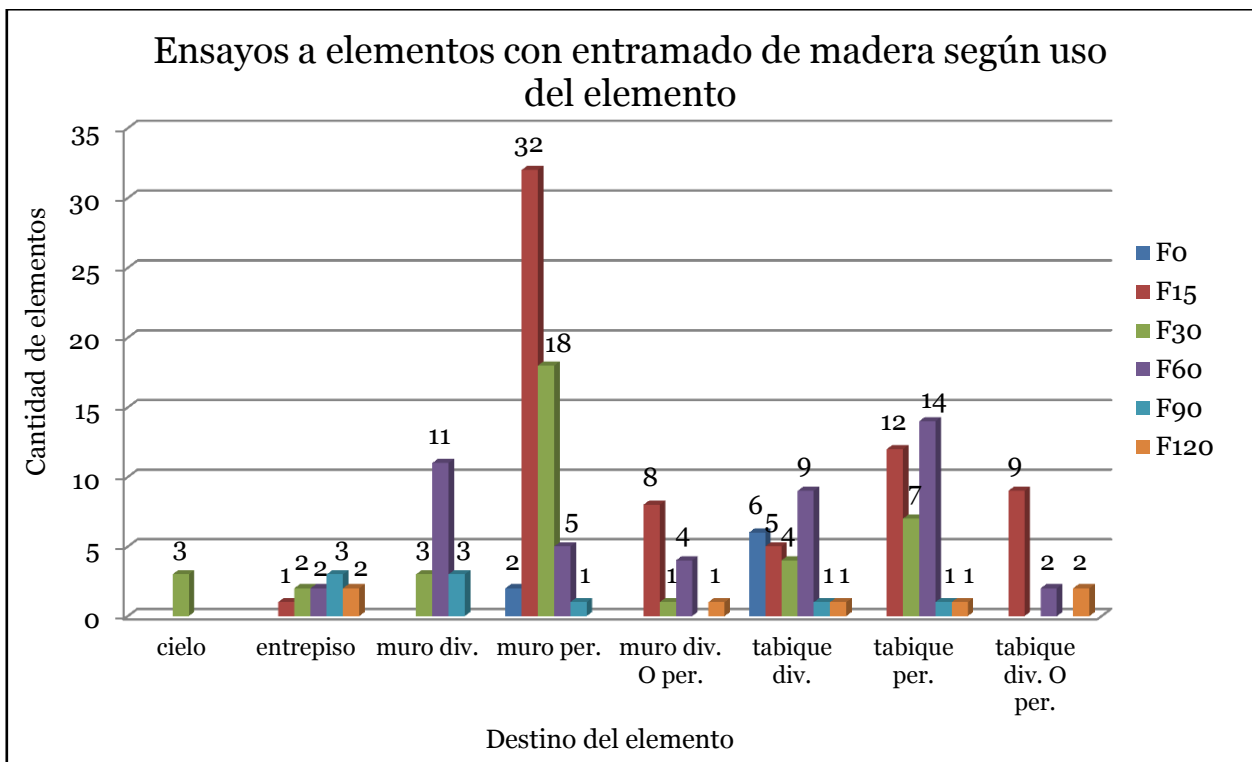


Gráfico 28: Cantidad de ensayos a elementos divisorios con entramados de madera, según el uso del elemento y la categoría de resistencia al fuego, presentes la base de datos.

Como se aprecia en la gráfica anterior, la mayoría de los ensayos realizados son a elementos perimetrales, ya sean muros o tabiques. Esto quiere decir que su ensayo fue orientado preferentemente por la cara de mayor resistencia, a diferencia de un muro o tabique divisorio, el cual sería orientado por la cara de menor resistencia en caso de ser asimétrico. Esto trae consigo la necesidad de poner énfasis a la hora de evaluar el elemento mediante cualquiera métodos de cálculo expuestos, ya que si se considerara una u otra como la cara expuesta en un elemento, puede traer grandes diferencias en el cálculo de la resistencia, sobre todo en el método de adición de componentes del documento del American Wood Council, ya que este método de cálculo solo considera el aporte de la cara expuesta y no el de la cara exterior.

En los métodos de adición de componentes estudiados en este trabajo, se ve que los valores de resistencia asignados a cada placa dependen del espesor y el material. Se toman en consideración además el que la cara expuesta aporta en mayor manera a la resistencia al fuego. A continuación se muestran gráficas para ilustrar el efecto de la cara expuesta y su relación con la resistencia al fuego.

Las gráficas que vienen a continuación hacen mayor referencia al método de adición de componentes norteamericano, ya que no considera las placas en las caras no expuestas ni el coeficiente de posición para éstas, como lo hacen los métodos europeos. Más adelante en este trabajo también se muestran gráficas para evaluar de manera básica, cómo afectan las capas posteriores, tratando de ilustrar el funcionamiento de los coeficientes de posición para obtener una mejor predicción.

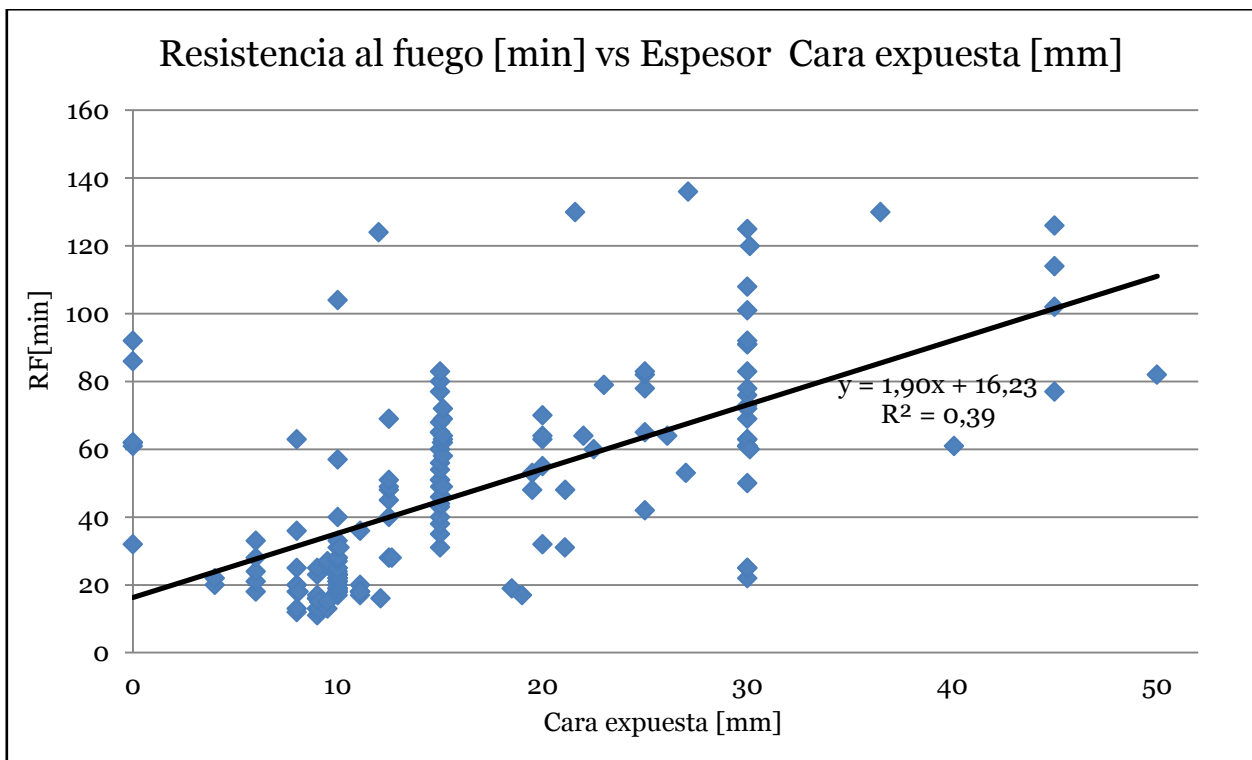


Gráfico 29: Resistencia al fuego en [min] vs espesor de cara expuesta en [mm], de los elementos divisorios con entramados de madera con ensayos presentes la base de datos.

En la gráfica anterior se aprecian los resultados en minutos de los ensayos de resistencia al fuego, de los elementos divisorios con entramados de madera en la base de datos. En el Gráfico 29 el eje de las abscisas es el espesor total de las placas en la cara expuesta, además de incluir aquellos elementos ensayados con el marco expuesto a las llamas, es decir, con espesor cero de placas en cara expuesta, ya que todas sus placas están en caras interiores al marco.

En la gráfica 29 se ve que para algunos espesores similares en la cara expuesta, se alcanza una diferencia de resistencia al fuego cercana al 600%, esto se debe a que existen materiales muy resistentes, como lo han demostrado en los ensayos analizados las placas de fibrosilicato. Otras diferencias menores, pero no despreciables, se aprecian entre las placas de madera y yeso cartón, como también la diferencia entre las mismas placas de yeso-cartón RF y ST. Cabe recordar la existencia de las placas en la cara no expuesta y que algunos de elementos estudiados en base de datos consideran hasta tres capas de placas, las que si son consideradas en el aporte a la hora del cálculo bajo las metodologías europeas.

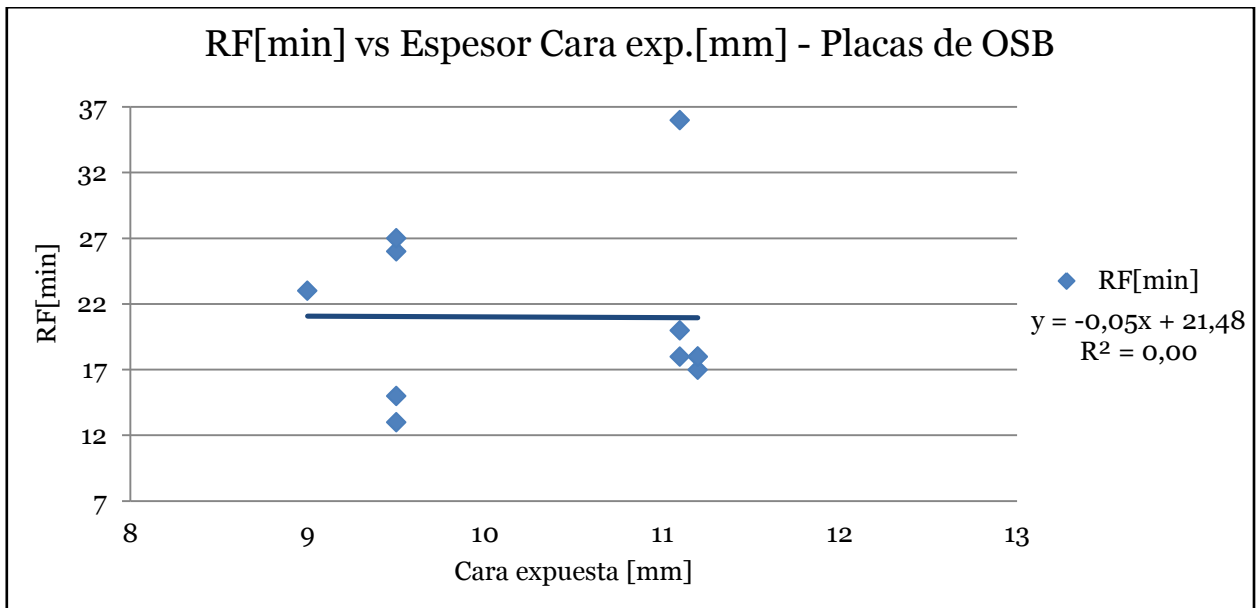


Gráfico 30: Resistencia al fuego en [min] según espesor de cara expuesta en [mm], de los ensayos con cara expuesta de placas de OSB presentes la base de datos.

En la gráfica anterior se aprecian los resultados obtenidos en ensayos de la base de datos que tenían placas de OSB en la cara expuesta al fuego, considerando elementos divisorios con entramado de madera con aislación de lana de vidrio, mineral y vacíos.

La línea de tendencia del Gráfico 30 es según los espesores en las caras expuestas, por lo que se deduce que el espesor de las placas de OSB no tiene mucha influencia en la resistencia al fuego, cuando se evalúan casos con una placa por cara y espesores de 9 a 11,1[mm], como lo son los casos presentes en la base de datos. Lo anterior nos indica que los resultados que se obtienen en los ensayos de resistencia al fuego en estos casos dependen de la aislación utilizada en el entramado de madera.

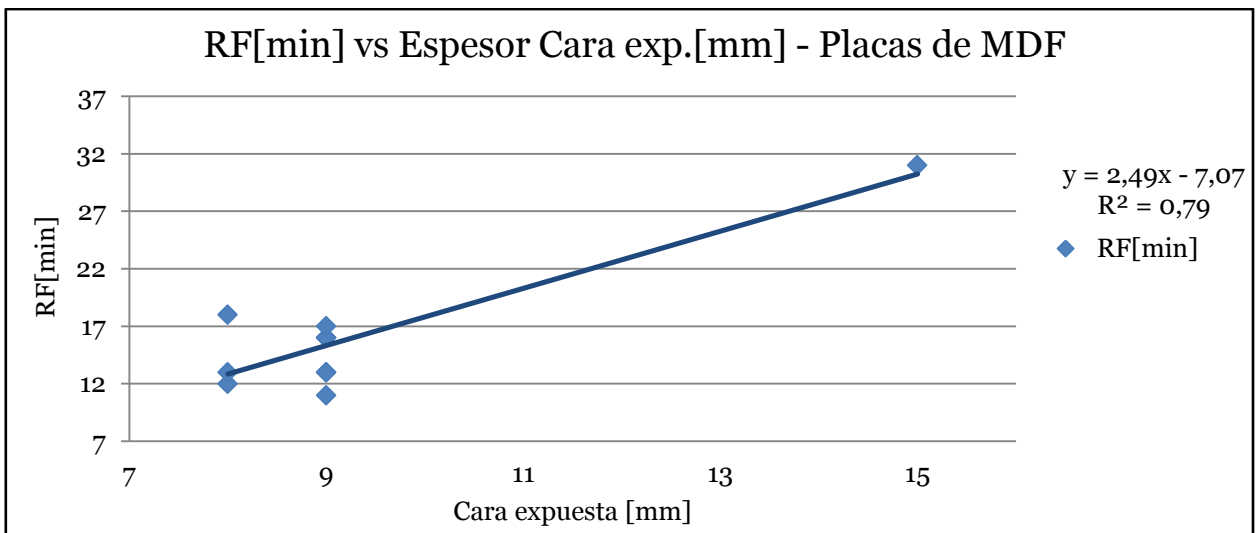


Gráfico 31: Resistencia al fuego en [min] según espesor de cara expuesta en [mm], de los ensayos con cara expuesta de placas de MDF presentes la base de datos.

En el Gráfico 31 podemos ver que cuando se consideran solo placas de MDF en la cara expuesta se tiene una línea de tendencia cercana a los datos, no obstante hay que considerar esta línea de tendencia cuenta con un solo dato con espesor sobre 9[mm], por lo cual puede ser una tendencia que no tenga relación con la realidad.

A continuación se presenta un gráfico similar a los dos anteriores, con la diferencia de que en este se muestra todos los elementos divisorios de la base de datos que cuentan solamente con placas de madera en la cara expuesta al fuego. No se presentan más gráficas específicas para otros tipos de placas de madera en la cara expuesta al fuego, ya que la cantidad de datos para las placas de otros tipos de madera no son suficientes para un análisis específico.

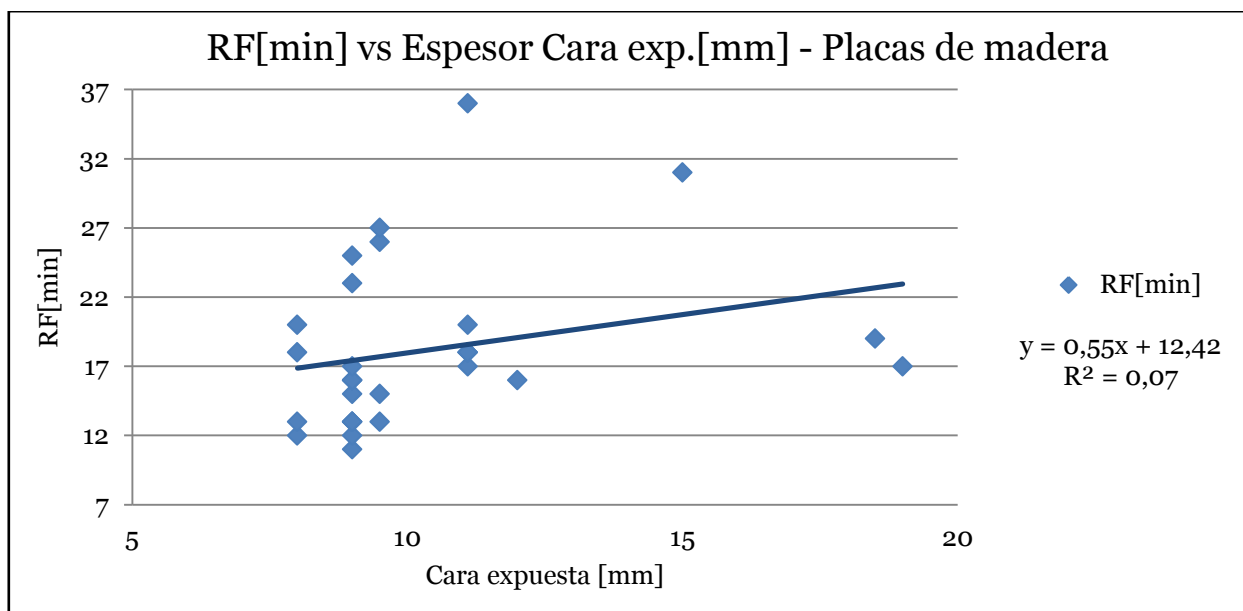


Gráfico 32: Resistencia al fuego en [min] según espesor de cara expuesta en [mm], de los ensayos con cara expuesta de placas de madera presentes la base de datos.

Los ensayos a elementos divisorios con placas de madera de la base de datos tienen resultados que varían entre los 10 y 36[min], destacando que todos los ensayos con espesor total en cara expuesta superior o igual 11[mm] alcanzan la categoría F15. Otro punto a destacar es la diferencia de resistencia para espesores similares, diferencias máximas cercanas al 100%, esto varía según la presencia o no de aislación sobre todo cuando esta es lana mineral.

Los siguientes gráficos hacen un análisis similar al anterior, pero para los elementos divisorios con entramado de madera y placas de yeso-cartón en la cara expuesta al fuego, presentes en la base de datos de ensayos. Este análisis es más preciso que el de las placas de madera, ya que se cuenta con un mayor número de elementos divisorios con cara expuesta compuesta de placas de yeso-cartón.

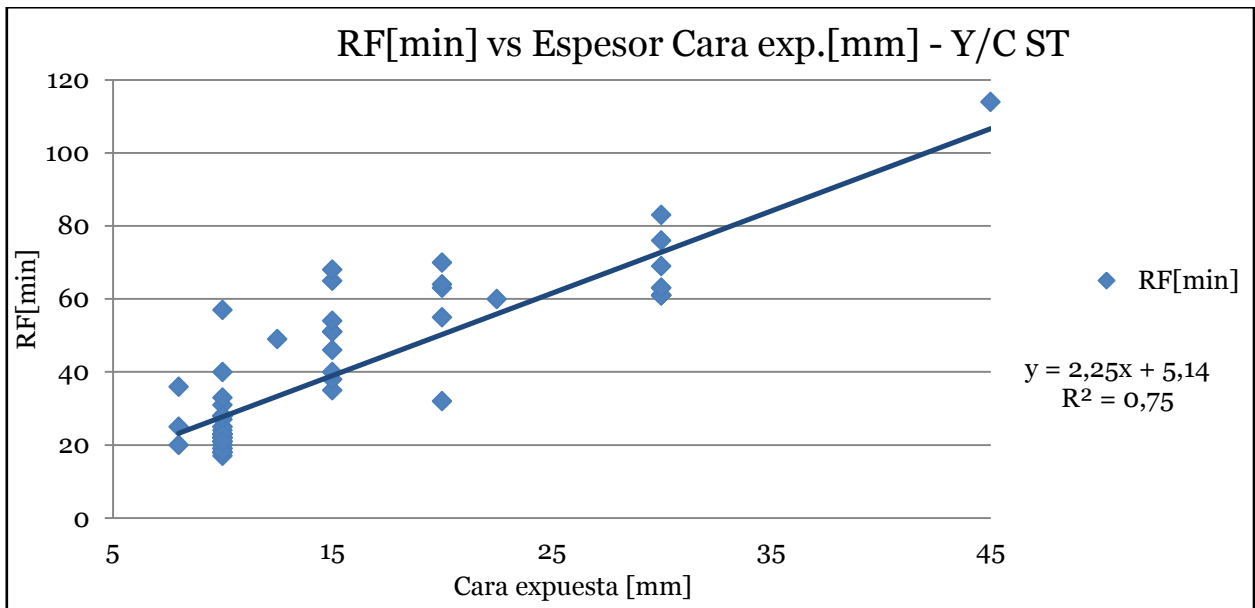


Gráfico 33: Resistencia al fuego en [min] según espesor de cara expuesta en [mm], de los ensayos con cara expuesta de placas de Y/C ST la base de datos.

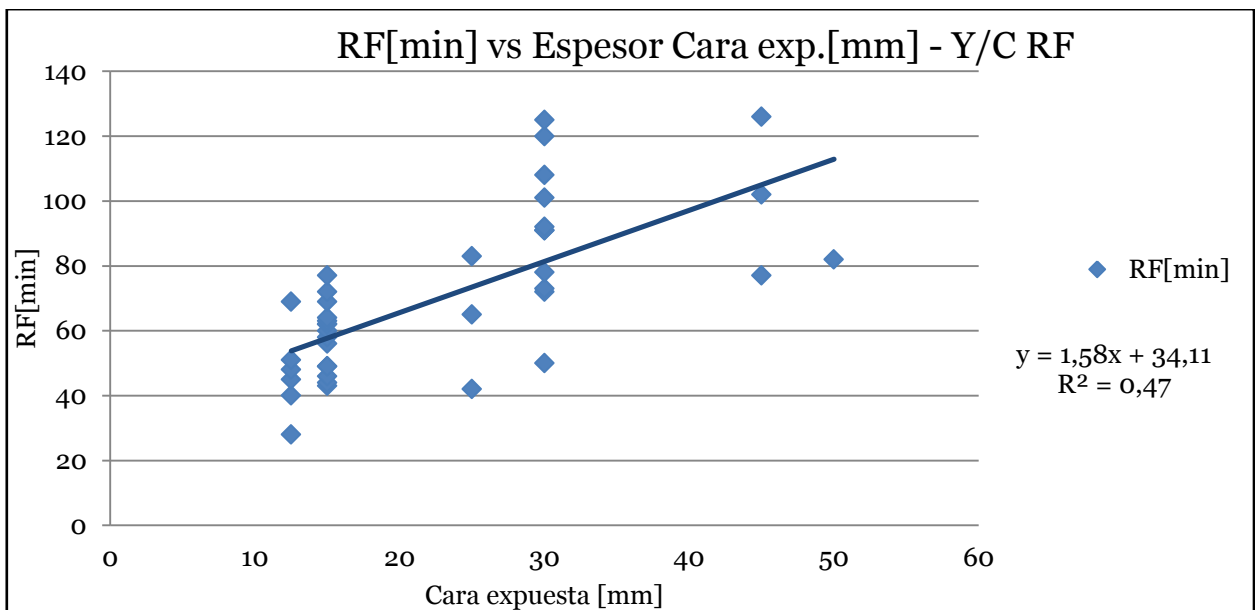


Gráfico 34: Resistencia al fuego en [min] según espesor de cara expuesta en [mm], de los ensayos con cara expuesta de placas de Y/C RF la base de datos.

En las últimas dos gráficas se observa la diferencia entre los resultados entre las placas ST y RF, siendo estas últimas las que tienen mayor resistencia según los métodos de adición de componentes revisados en este trabajo, además de ser estas placas comercializados de esta manera como su nombre lo dice. La diferencia de resistencia entre las placas de yeso-cartón RF y ST, se ve claramente al evaluar los resultados que se muestran con un espesor 15[mm] en la cara expuesta, donde las placas ST están entre 35 y 68[min] para este espesor, mientras que las placas RF están entre los 43 y 77[min], esto nos muestra una tendencia mayor para las placas RF que es lo esperado.

Se destaca que el coeficiente de determinación de la línea de tendencia de las placas de yeso-cartón ST, el cual muestra como una simple regresión lineal puede lograr predicciones decentes, para los elementos divisorios nacionales con entramados de madera y placas de yeso-cartón ST en la cara expuesta.

En cuanto a la comparación de los resultados de las placas de yeso-cartón y de madera, era de esperarse que los resultados de las placas de yeso-cartón fueran mayores. La resistencia de las placas de yeso-cartón se debe a que son un material no combustible y a su alto contenido de agua, comenzando la calcinación de las placas a los 80° [C] y terminado a los 125° [C] aproximadamente, cuando el agua ya se ha evaporado completamente. [6]

Los Gráficos 29 al 34 muestran la posibilidad de calibrar fórmulas simples de estimación de resistencia al fuego para elementos divisorios con entramados de madera, las cuales deberían depender del espesor, material y placas en la cara expuesta. Por lo anterior estas gráficas se consideran como un aporte inicial para las bases científicas de un método de estimación de resistencia al fuego, para estructuras divisorias con entramados de madera y materiales de utilización nacional.

Capítulo. 4 Análisis mediante cálculo de resistía al fuego a elementos divisorios con entramado de madera de la base de datos.

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de aplicar la metodología CAM de la guía técnica sueca del Technical Research Institute of Sweden [19], a los elementos divisorios con entramado de madera de la base de datos. Para obtener se aplica el procedimiento presentado en el capítulo 2, utilizando las tablas presentadas en el anexo de este trabajo de memoria.

El alcance de los elementos divisorios evaluados en este capítulo es el siguiente:

- Solo se calcula el camino de transferencia “a” solo a estructuras divisorias verticales (Figura 3).
- Placas de madera y yeso-cartón.
- Mínimo 1 placa en la cara expuesta al fuego y máximo 2.
- Una placa en la cara no expuesta al fuego.
- Entramados de madera simple (Figura 10).
- Aislación en entramado de lana mineral o vidrio.

Luego del filtro que genera el alcance recién descrito se encuentran 56 elementos divisorios a evaluar con estas características. Cabe destacar que la información de estos ensayos no siempre cuenta con los diagramas de las juntas de las placas, como tampoco se muestra información en la mayoría de los casos sobre aislación continua o con juntas en el caso de la lana mineral y de vidrio. Sería importante exigir estas especificaciones dentro de los informes de resistencia al fuego futuros, ya que son necesarias para un cálculo más exacto mediante el método de adición de componentes como el europeo.

A continuación se establecerán algunas consideraciones para el cálculo mediante la metodología CAM en este capítulo. Estas consideraciones se deben a la falta de detalle en la información de los elementos divisorios ensayados, junto con la necesidad de simplificar el cálculo por la gran cantidad de elementos divisorios evaluados.

- No se considera la acción de cámaras de aire en entramados de madera con aislación de lana mineral.
- La densidad de la lana mineral se considera como 40[kg/m³], ya que es la utilizada en la mayoría de los casos.
- No se considera el efecto de la aislación de lana de vidrio, por no cumplir en ninguno de los casos evaluados con el requerimiento mínimo del método de 15[kg/m³]. Por esto si existe lana de vidrio se considerara como cámara de aire.
- El coeficiente de junta se tomara en todos los casos igual a 1.

A continuación se muestra una gráfica que compara el resultado del ensayo de resistencia al fuego con el calculado mediante la metodología CAM de la guía sueca. Del método aplicado se destaca que lo que se busca es evaluar la aislación del elemento, ya que es por esto que fallan la mayoría de las estructuras divisorias con entramado de madera nacionales, como se vio en el Grafico 27.

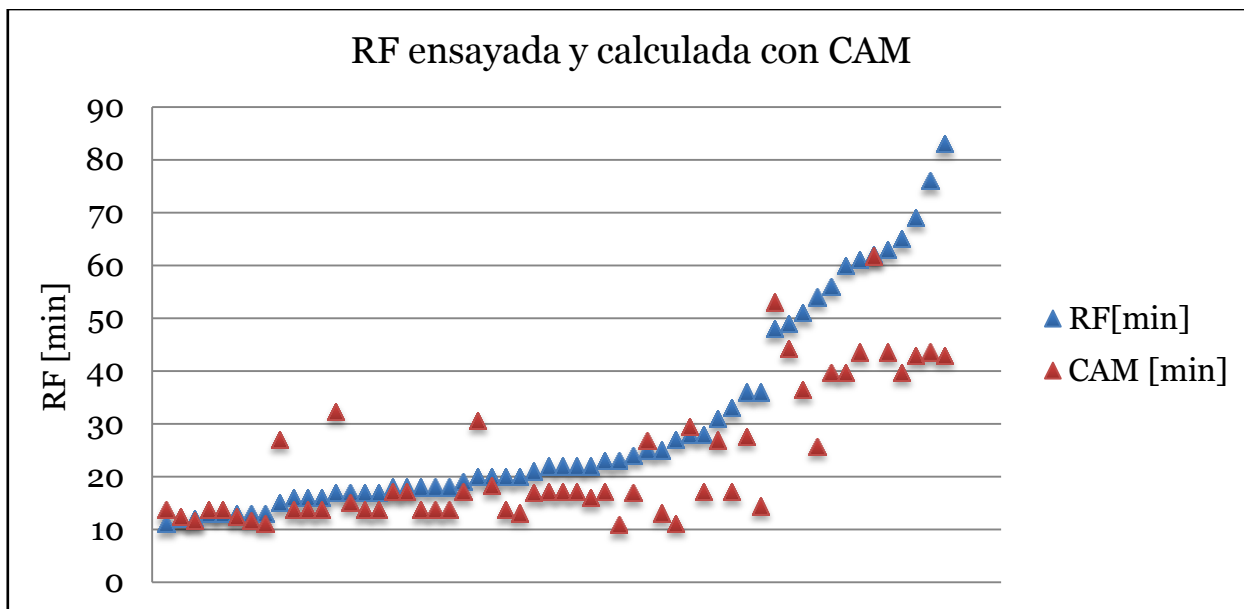


Gráfico 35: Resistencia al fuego en [min], en azul la resistencia de los ensayos y en rojo la resistencia calculada mediante CAM de la guía técnica sueca.

En el Gráfico 35 se observa que el método de adición de componentes de la guía técnica sueca logra estimar la resistencia al fuego por aislación manteniendo un buen nivel de seguridad, a pesar de que este no está calibrado para los materiales nacionales y las consideraciones aplicadas. La seguridad quiere decir que no se estime una resistencia mayor a la de los ensayos de resistencia al fuego. Este es uno de los puntos más importantes a tener en cuenta dentro de la calibración de un método de adición de componentes, ya que si bien es necesario no subestimar la resistencia al fuego en el cálculo, lo más importante debe ser la seguridad.

Del Gráfico 35 se analizan en detalle los 3 elementos divisorios que obtuvieron un resultado muy superior al ensayado. Se observa en las fotografías los informes de dos de estos tres ensayos que estos fallaron por las juntas de la placa en la cara no expuesta al fuego, lo cual explica que el cálculo arrojara un resultado superior en estos casos, ya que no se consideró la acción de los coeficientes de junta en el cálculo realizado.

Analizando los elementos divisorios del Gráfico 35 que obtuvieron los menores resultados al comparar el cálculo con lo ensayado, la única constante que se puede establecer claramente es la presencia de aislación de lana de vidrio. Si bien por las limitantes del método no se considera en el cálculo de este capítulo el aporte de la lana de vidrio, hay que recordar que esta aporta de igual manera a la resistencia al fuego en un ensayo.

Para completar el análisis de los resultados obtenidos mediante el cálculo con los resultados experimentales, se presentan a continuación tres gráficos que tienen como base la razón entre la resistencia al fuego ensayada y la resistencia al fuego calculada.

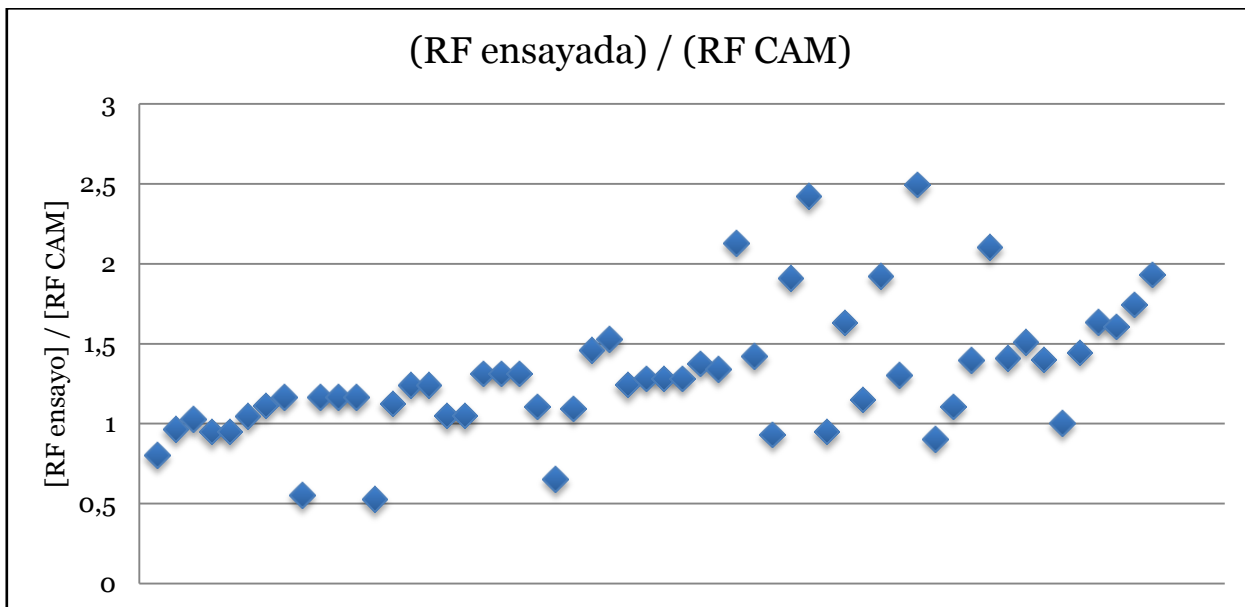


Gráfico 36: Razón entre la resistencia al fuego ensayada y la resistencia calculada con el método CAM de la guía técnica sueca.

En la gráfica anterior se aprecia de mejor manera la seguridad del método de adición de componentes aplicado con sus consideraciones. Tan solo cuatro elementos divisorios obtienen una razón de resistencia al fuego menor a 0,9 en el Gráfico 36, lo que nos indica que incluso ignorando el coeficiente de junta el método aproxima de manera segura los valores. Otro punto destacable es que la mayoría de los valores en el Gráfico 36 estén entre 0,9 y 1,5, esto nos indica que el método aproxima de buena manera la resistencia al fuego, sin caer en grandes subestimaciones.

En el Gráfico 36 los datos están ordenados según la resistencia obtenida en el ensayo del elemento de menor a mayor. De lo anterior se observa una clara tendencia, el aumento en la dispersión de los resultados calculados a medida que aumenta la resistencia al fuego de la estructura divisoria ensayada. De lo anterior no se puede realizar un análisis más profundo, ya que el método CAM usado no está calibrado para los materiales de Chile.

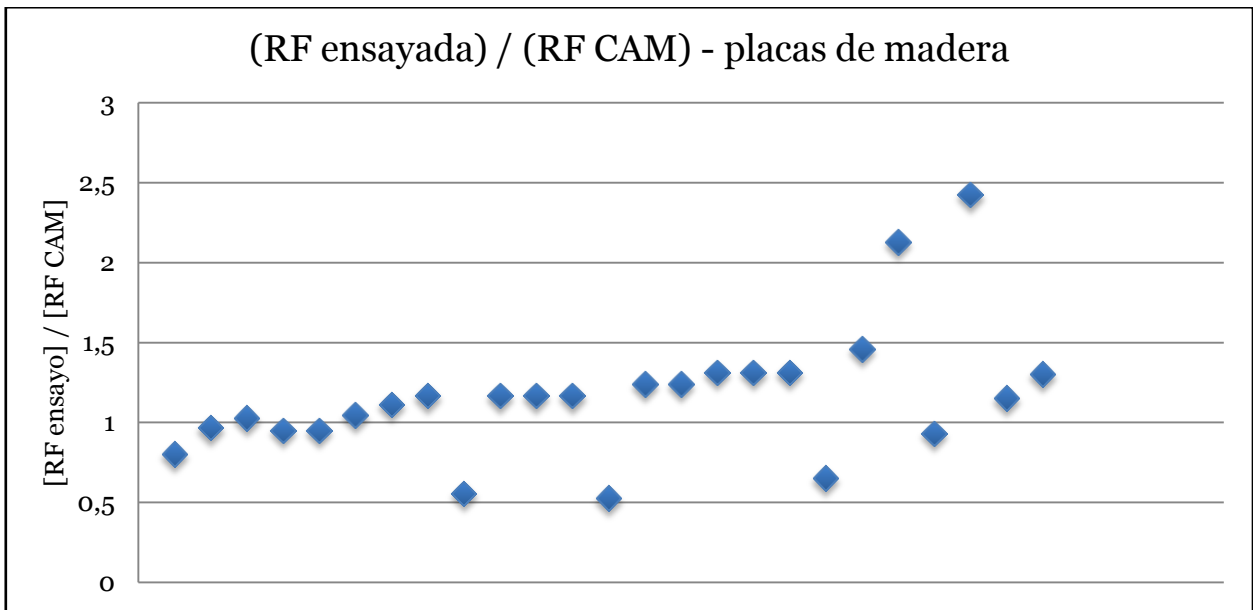


Gráfico 37: Razón entre la resistencia al fuego ensayada y la resistencia calculada con el método CAM de la guía técnica sueca, para elementos divisorios con placas de madera en la cara expuesta al fuego.

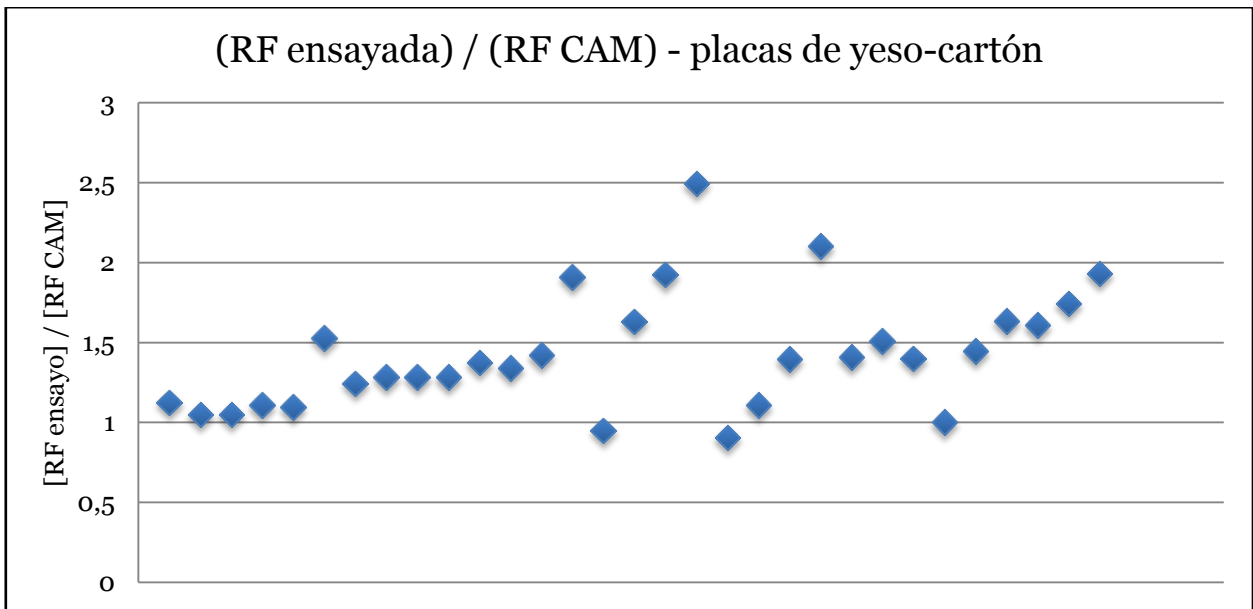


Gráfico 38: Razón entre la resistencia al fuego ensayada y la resistencia calculada con el método CAM de la guía técnica sueca, para elementos divisorios con placas de yeso-cartón en la cara expuesta al fuego.

La aislación de lana mineral es muy utilizada en los elementos divisorios con entramado de madera nacionales, como se vio en las estadísticas del listado del MINVU y de la base de datos generada, pero también encontró un alto porcentaje de utilización de la lana de vidrio y el poliestireno, materiales que deben ser analizados para considerar su efecto en la resistencia al fuego, dentro de la generación de un futuro método de cálculo para aproximar la resistencia de las estructuras divisorias con entramado de madera.

Capítulo 5. Revisión de una propuesta para agregar nuevos materiales al método de adición de componentes.

Como ya sabemos el método de adición de componentes asigna tiempos de resistencia a distintos materiales según sus medidas, sin embargo estos materiales son limitados a las calibraciones del método. Junto con lo anterior hay que considerar la necesidad de actualizar los valores asignados a los materiales a medida que estos cambian y por seguridad. Como se vio en el estudio de las normas internacionales, el método de adición de componentes se ha calibrado históricamente mediante ensayos de resistencia al fuego, sin embargo las evoluciones de este lo han llevado a una calibración utilizando métodos computacionales, los cuales son corroborados con ensayos. Por lo anterior a continuación se describe un trabajo actual que busca la calibración del método de adición de componentes, el cual mezcla el análisis numérico con el análisis experimental

El trabajo a analizar en este capítulo es el *SP Report 71*, publicado el 2016 en Suecia por Katrin Nele Mäger. En este trabajo el autor propone y prueba una metodología de calibración aplicable a nuevos materiales, para el método de adición de componentes mejorado propuesto en la guía técnica sueca *Fire safety in timber buildings*.

En la calibración propuesta de Katrin Nele M. Se determinan las propiedades de nuevos materiales en elementos divisorios compuestos, ensayando los elementos divisorios con los nuevos materiales y luego realizando modelaciones mediante elementos finitos, calibrando las propiedades de los materiales en el modelo computacional, de manera que las curvas de temperatura del modelo de elementos finitos sea lo más similar posible a las medidas en los experimentos. Con lo anterior la autora busca obtener de manera certera las propiedades térmicas del material según el modelo computacional, para finalmente comparar su modelo con los resultados de otra simulación, en base a las fórmulas de un trabajo previo de Vanessa Schleifer sobre los mismos materiales realizado el 2009 en Suiza.

El procedimiento que se propone en el *SP Report 71* considera primero una calibración bajo los resultados obtenidos con modelos a escala, la cual luego es corroborada con ensayos en tamaño real. Lo anterior tiene dos grandes implicancias, la primera es la posibilidad de iniciar el proceso con modelos a escala, lo que permite una mayor variedad de ensayos a menor costo; la segunda implicancia es que la calibración mantiene los niveles de seguridad, ya que los resultados no son aceptados sin una previa corroboración de estos con ensayos a tamaño real.

Primeramente Katrin Nele M. Realiza los test a escala bajo los criterios de la norma ISO834-1, norma muy similar a la NCh935/1. Sin embargo la norma ISO considera otros instrumentos de medición de temperatura y mediciones de esta en la cara expuesta al fuego. Comienza el procedimiento con 4 ensayos horizontales, divididos en cuatro áreas iguales cada uno de los ensayos, equipando cada una de las secciones con el fin de medir cuatro diferentes productos por ensayo. Todos los ensayos fueron realizados a elementos con diferentes placas de yeso-cartón en la cara expuesta, utilizando una placa diferente en cada una de las sub áreas expuestas del ensayo, considerando dos ensayos sin marco variando las placas y dos ensayos más con marco y lana de roca variando los marcos. El

objetivo de los ensayos sin marco es determinar las propiedades de las placas aislantes, sin que las mediciones se vean afectadas por las diferentes componentes de una estructura divisoria con marco y aislación.

Con las mediciones de las termocuplas la autora procede a la calibración del modelo de elementos finitos en el software SAFIR, programa desarrollado en la Universidad de Liège. Teniendo en cuenta que estos modelos no pueden reproducir todos los efectos, como el agua libre y su re-condensación o la transferencia de calor por convección de fibras. Finalmente para la calibración de las propiedades del material utiliza el modelo computacional, tomando un método de calibración de las propiedades que ajuste los resultados del modelo a los obtenidos con un test. Luego corrobora las propiedades con el modelo computacional, pero con otra configuración del elemento divisorio utilizando el mismo material en la cara expuesta, resultados del modelo que compara con los resultados del ensayo. De esta manera repite el procedimiento hasta calibrar las propiedades del material para que el modelo reproduzca los valores lo más cercano posible a los resultados del ensayo.

En el proceso de calibración la autora considera las siguientes fórmulas matemáticas para describir el fenómeno de convección y radiación:

$$a_{c,exp} = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K}) \quad (7) \text{ convección en una superficie calentada}$$

$$- a_{c,exp} = 4 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K}) \quad (8) \text{ convección en una superficie sin calentar}$$

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} = c \rho \frac{\partial T}{\partial x} \Rightarrow \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{k}{c \rho} * \frac{\partial^2 T}{\partial^2 x} \quad (9) \text{ simplificación unidimensional de ecuación de Fourier para transferencia de calor}$$

De la ecuación (9) determina la autora que la conductividad térmica se ve dividida por el calor específico y la densidad, siendo posible determinar la variación de esta última midiendo la pérdida de masa, lo cual le permite determinar el calor específico si se miden bien las otras variantes durante el experimento.

Para el proceso de calibración de las propiedades de los materiales la autora realiza tres etapas, la primera calibración es realizada mediante conjeturas del ensayo, sin obtener buenos resultados en el modelo de elementos finitos, la segunda calibración es realizada según las propiedades térmicas determinadas en la literatura existente y aproximaciones matemáticas, logrando resultados mucho más ajustados a la curva obtenida en los ensayos experimentales.

Con las propiedades térmicas determinadas es posible determinar por modelo computacional los tiempos de aislación de los materiales por separado, con estos tiempos de aislación se puede calcular con el método de adición de componentes la resistencia de la estructura, logrando con esto un comparativo entre los resultados del método de adición de componentes con los resultados del modelo que fue calibrado con los ensayos a escala. En última instancia del trabajo Katrin Nele M. Corrobora los resultados de las calibraciones de las propiedades de los materiales de estudio, realizando ensayos a

escala real y comparando los resultados con los obtenidos del método de adición de componentes utilizando los tiempos de aislación determinados previamente.

En resumen el trabajo descrito en este capítulo utiliza un método recursivo para determinar las propiedades de un material, recalibrando los parámetros del material según sea necesario. Con cada grupo de parámetros elegidos se modifican resultados del modelo computacional, con el objetivo de ajustar los resultados de este a los resultados que se tienen de los ensayos a escala, los ensayos históricos y los ensayos en tamaño completo como lo exigen las normas.

Los siguientes gráficos son un extracto del trabajo analizado en este capítulo, que muestra un ejemplo de cómo se comparan los resultados del método computacional con los de los ensayos. Se busca mostrar con esto de manera gráfica como el modelo computacional mejora sus predicciones, a medida que se calibran de mejor manera los parámetros de los materiales del elemento divisorio.

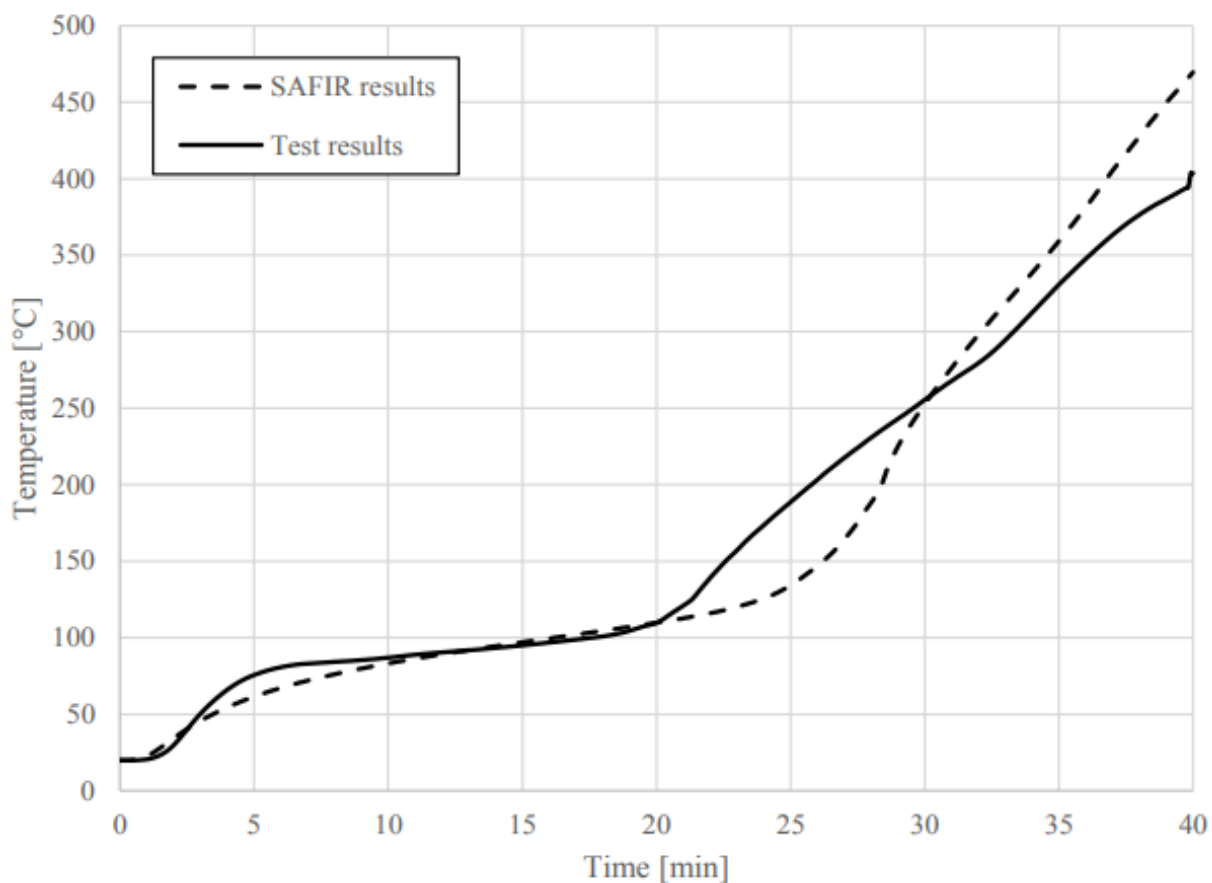


Gráfico 39 comparación de resultados de primera calibración del modelo computacional y los obtenidos en ensayo, extracto *SP Report 71*.

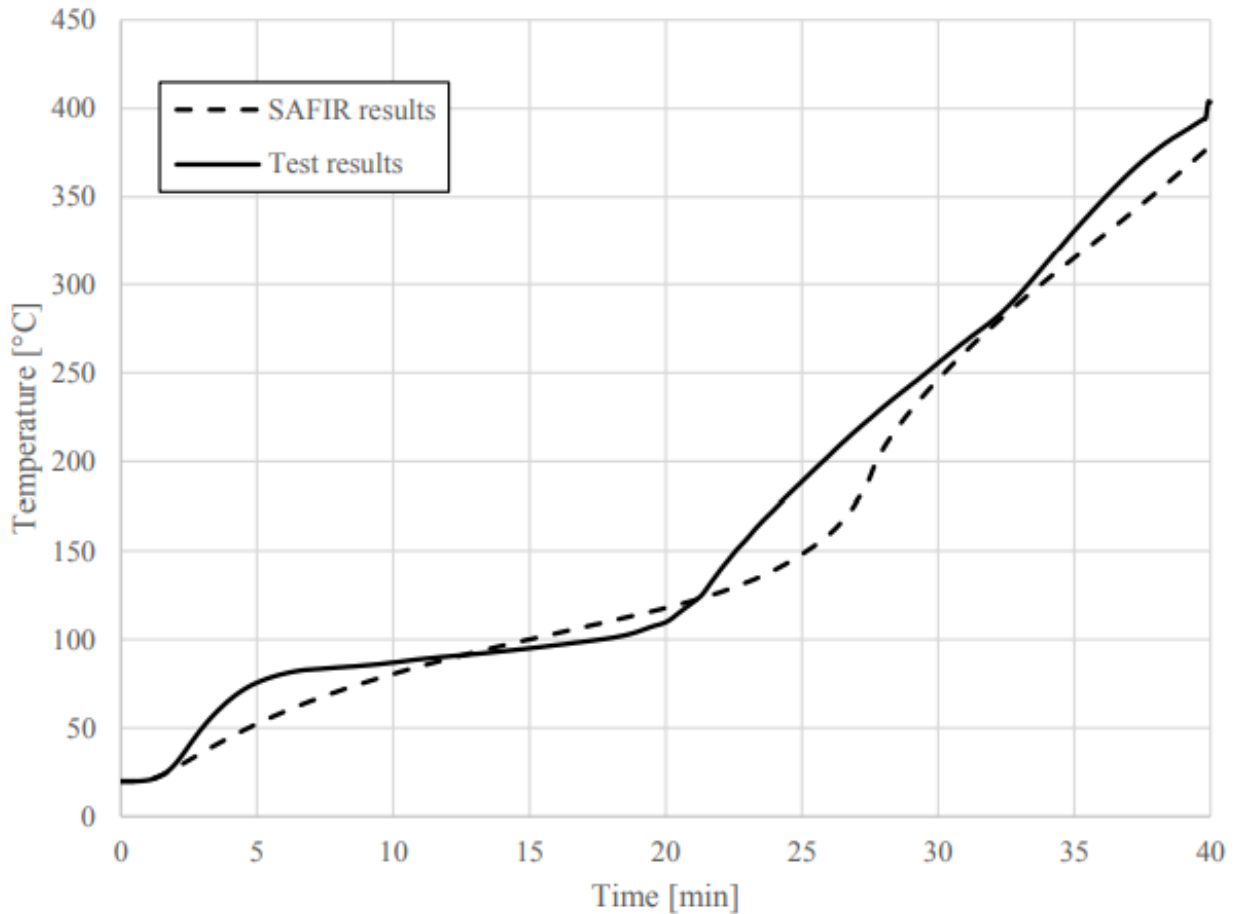


Gráfico 40 comparación de resultados de una re-calibración de modelo computacional y los obtenidos en ensayo, extracto *SP Report 71*.

Lo descrito en este capítulo muestra que, si bien el método de adición de componentes fue calibrado con una amplia data para un número muy limitado de materiales, es posible agregar nuevos materiales a este método sin la necesidad de recurrir a una gran cantidad de ensayos, ya que las herramientas computacionales de hoy en día nos permiten simularlos. Sin embargo es importante recordar que los ensayos a escala no son determinantes para evaluar la resistencia al fuego de una estructura y que incluso la norma chilena requiere de ensayos a escala real, es por esto que la corroboración de este tipo de metodologías tiene que ser finalmente con ensayos a escala real.

Cabe recordar que lo descrito en este capítulo es un trabajo realizado para el método de adición de componentes presentado en la guía técnica sueca *Fire safety in timber buildings*, sin embargo adaptaciones de este procedimiento pueden ser desarrolladas para calibrar otra variante del método de adición de componentes, siempre cuando se cumpla con el requerimiento final de que modelo sea corroborado con ensayos a escala real, ya que estos últimos son los que confirman o refutan finalmente la teoría.

Para cerrar este capítulo se describe el un flujo de trabajo necesario para realizar una calibración del método de adición de componentes. Este flujo es lo que plantea la autora de la publicación revisada en este capítulo.

Tabla 6: Flujo de trabajo de propuesta para agregar nuevos materiales a la metodología CAM presente en la guía técnica sueca.

| Etapa | Objetivos |
|---|--|
| 1. Estudio bibliográfico | Estudiar las propiedades químicas y físicas de los materiales a calibrar, específicamente las reacciones termo-químicas y las propiedades físicas según curvas térmicas. |
| 2. Configuraciones para ensayos de modelos a escala | Establecer las configuraciones de los ensayos de resistencia al fuego a escala a realizar. |
| 3. Ensayos a escala | Realizar los ensayos y obtener las lecturas térmicas en la cara expuesta al fuego y en la cara no expuesta al fuego. |
| 4. Determinar calibración | Elegir los parámetros térmicos según el modelo de simulación a calibrar y establecer la metodología para calibrar estos parámetros. |
| 5. Calibración de propiedades térmicas | Determinar una calibración de los parámetros térmicos, que ajuste los resultados de los modelos de simulación a los resultados de los ensayos de los modelos a escala. |
| 6. Simulaciones de otras configuraciones | Simular con el modelo nuevas configuraciones de la estructura divisoria con los mismos materiales de los ensayos a escala. |
| 7. Comparación de resultados | Comparar los resultados del modelo del punto 6 con resultados de ensayos de resistencia al fuego, hechos a las nuevas configuraciones simuladas pero a escala real. Otra opción es comparar resultados con otros de modelos validados que consideren estos nuevos materiales. |
| 8. Declarar las propiedades térmicas efectivas de los nuevos materiales | Establecer las propiedades térmicas efectivas de los nuevos materiales a agregar a la metodología de adición de componentes. Con estas calibrar las fórmulas para los aportes básicos de protección y aislación para el método CAM, mediante simulaciones con el método elegido. De ser necesario también calibrar nuevas fórmulas para el coeficiente de posición y de corrección para nuevos materiales. |

Capítulo 6. Conclusiones

Este trabajo presentó una revisión de las normas de Chile que influyen en la resistencia al fuego, enfocándose en lo aplicable a elementos divisorios con entramados de madera. Lo anterior se complementa con una revisión de las metodologías internacionales de cálculo de resistencia al fuego de este tipo de estructuras, finalizando con un análisis estadístico de ensayos realizados a nivel nacional.

Se concluye lo siguiente:

- Chile cuenta con exigentes requerimientos de resistencia al fuego aplicable sobre estructuras divisorias con entramado de madera, sin embargo, existen limitadas formas de cumplir dichas exigencias.
- Los ensayos de resistencia al fuego están bien cubiertos por la norma NCh935/1 del año 1997. no obstante, resulta necesaria una actualización de esta. Existen criterios importantes en otras normas, como la ISO834-1, que no son considerados en la norma chilena, como la utilización de sensores de temperatura en la cara expuesta al fuego en los ensayos.
- Del estudio de las metodologías CAM, de cálculo de resistencia al fuego de estructuras divisorias con entramado de madera, se pudo ver que existen grandes avances en cuanto a este método, utilizando incluso programas de elementos finitos para su calibración. Su adopción por algunos países (USA, Canadá y algunos países de Europa), nos muestra que esta metodología es capaz de obtener resultados con un buen nivel de seguridad.
- Las diferentes adaptaciones del método de adición de componentes tienen distintos alcances, siendo uno de los alcances más importantes los materiales a considerar en este. Entre las distintas versiones que existen de la metodología CAM, vimos una como código de diseño (la versión de estadounidense) y otras solo de referenciales para consulta (versiones del Eurocódigo y de la Guía Técnica Sueca). Un punto que tienen en común todas las versiones de la metodología CAM revisadas en este trabajo, es que se basan en resultados corroborados con ensayos experimentales, lo que mantiene el nivel de seguridad de los métodos para los materiales establecidos en los alcances.
- El método de adición de componentes de más directa aplicación es el de Estados Unidos, incluido en el International Building Code. Sin embargo la simpleza del método estadounidense tiene sus desventajas, ya que para mantener el nivel de seguridad con simples cálculos se utilizan parámetros muy conservadores, de manera que los resultados calculados cubran el peor caso de la dispersión que generan los resultados de ensayos de resistencia al fuego. Los resultados conservadores implican diseños sobredimensionados y por ende costosos, por lo que se puede afirmar que es un método que prefiere los ensayos experimentales.

- Los métodos de adición de componentes de la guía técnica sueca y el Eurocódigo no son normativos, sin embargo cuentan con un proceso de cálculo muy detallado y con muchas consideraciones, como lo son las trayectorias de transferencia de calor. Este tipo de método de adición de componentes es poco amistoso para profesionales no ingenieros, sin embargo en comparación al CAM estadounidense sus resultados son menos conservadores.
- Las primeras metodologías de adición de componentes para el cálculo de resistencia al fuego de elementos divisorios con entramado de madera fueron realizadas mediante mediciones experimentales. Hoy en día los resultados de ensayos se combinan con los de simulaciones en programas de elementos finitos. La combinación de ensayos y modelos computacionales ha llevado a calibraciones más precisas de los métodos de cálculo, los que gracias a estos avances logran considerar de mejor manera la interacción entre los distintos materiales, esto se aprecia ejemplo, en la utilización de coeficientes de posición y de juntas.

Respecto al análisis estadístico, es posible concluir lo siguiente:

- De las 130 estructuras divisorias analizadas del listado del MINVU tan solo 11 eran horizontales, similar a lo obtenido en los 176 ensayos de resistencia al fuego analizados, donde solo 13 de estos era a estructuras horizontales con entramado de madera. La escasa variedad de elementos divisorios horizontales con entramado de madera es una barrera a la hora de diseñar en altura en este material, por lo cual es necesario agregar nuevos elementos de este tipo al listado.

De la información del listado del MINVU y la base de datos generada se obtuvieron tendencias claras de las confirmaciones y materiales más utilizados, dentro las cuales destacan:

- Estructuras simples, con entramado de pino de escuadría 50x70[cm] aproximadamente, distanciados a 400[mm] o 600[mm].
 - Aislaciones de lana mineral, lana de vidrio, poliestireno expandido
 - Placas de yeso-cartón, OSB y otros tipos de madera
- Se pudo apreciar que la mayoría de los elementos divisorios con entramado de madera tiene una categoría igual o menor a F60, dejando pocas opciones que cumplan requerimientos superiores. Las categorías planteadas en los requerimientos de resistencia al fuego de la norma nos muestran que para edificaciones de dos pisos o superior, se requiere al menos una resistencia F60 para elementos soportantes. Lo anterior deja dos opciones para construcciones con elementos divisorios soportantes con entramado de madera: - construir solo en baja altura y envergadura, - ensayar elementos para cumplir con requerimientos mayores, en el caso de que las pocas opciones del listado sean incompatibles con el proyecto.

- Se estableció que falta información relevante de los elementos y sus ensayos, dentro del listado del MINVU como también los ensayos de resistencia al fuego de la base de datos. Se destaca la ausencia de especificación del grado estructural de los perfiles de madera utilizados, como también la falta de claridad sobre la carga o ausencia de esta el listado del MINVU.
- Analizando la resistencia al fuego obtenida de elementos divisorios con configuraciones similares, se pudo ver que existen diferencias significativas de resistencia considerando los mismos materiales. Esta dispersión de resultados para una configuración específica se justifica con las variaciones de las marcas de los productos, como también con las fechas de los ensayos, ya que los materiales varían entre las distintas marcas que los producen y también estas mismas marcas cambian sus estándares de producción en el tiempo. Lo anterior tiene como consecuencia la necesidad de considerar los peores resultados de esta dispersión, para que la calibración de un método de adición de componentes sea seguro, como también la necesidad de actualizar los ensayos utilizados para la generación de listados oficiales con soluciones constructivas.

Del estudio del diseño método de adición de componentes se concluye que:

- La evolución del método lo ha llevado a calibraciones con métodos computacionales, sin dejar de lado siempre la corroboración mediante ensayos a escala real, siendo estos últimos los encargados de determinar los valores máximos de resistencia, para mantener la seguridad del método y así no sobrepasar con el cálculo los valores experimentales.
- En las calibraciones modernas del método se utiliza información de curvas de temperatura de ensayos históricos y nuevos. En la base de datos revisada se contaba con los informes de los ensayos y las mediciones de temperatura de estos. El análisis de estas mediciones experimentales queda propuesto para un trabajo futuro, ya que es de suma importancia para lograr la buena calibración del método, es decir, lograr un método que sea seguro sin que este conduzca a una subvaluación exagerada de las resistencias.
- Los ensayos experimentales para corroborar el funcionamiento del método de adición de componentes comprueban que las calibraciones se ajusten a los materiales actuales, ya que si un método se calibra solo con información histórica se puede caer en errores, por modificaciones en las propiedades de los elementos que componen la solución divisoria. Junto con lo anterior cabe destacar que es necesario considerar resultados experimentales durante la calibración de un método, para así mantener los criterios del método científico.

Se concluye que el método de adición de componentes puede ser adoptado, como metodología de cálculo para la resistencia al fuego de las estructuras divisorias con entramado de madera utilizadas en Chile, dado que las configuraciones y materiales

utilizados a nivel nacional son muy similares a las que ya están presentes en la implementación internacional de este método.

Se demostró mediante un cálculo con aproximaciones, que el método de adición de componentes de la guía técnica sueca, aplicado sobre las estructuras nacionales, muestra un nivel de seguridad aceptable. Esto no implica que este método pueda ser adoptado directamente, son necesarias calibraciones y corroboraciones experimentales con los productos utilizados a nivel nacional.

Para una futura adopción en Chile del método de adición de componentes, para el cálculo de resistencia al fuego de estructuras divisorias con entramado de madera, se establecen las siguientes recomendaciones generales:

- Realizar simulaciones mediante elementos finitos que permitan calibrar los parámetros básicos de los materiales, utilizando la información histórica existente. De esta manera se pueden capacitar los profesionales para realizar buenas simulaciones sin necesidad de recurrir a nuevos ensayos.
- Realizar nuevos ensayos para cada una de las diferentes configuraciones y materiales a considerar dentro de la adaptación del método, para comparar los resultados del método con los experimentales y mantener un buen nivel de seguridad. Si bien existe una cantidad considerable de información de ensayos de resistencia al fuego y parte de esta es actual, es necesario tomar todas las precauciones para mantener un buen nivel de seguridad, además de cumplir con esto con los requerimientos de cualquier procedimiento bajo el método científico.
- Es preferible la adopción de un método de adición de componentes simple pero conservador, como el aceptado por el American Wood Council, dado que este al ser mucho más amistosa para el usuario, incentivaría de mayor manera la utilización de este tipo de elementos en la pequeña y mediana construcción. Por otro, lado lo conservador de los resultados de este método lo harían inviable económicamente para las estructuras de gran envergadura, lo cual sería un incentivo para las empresas proveedoras a certificar sus productos mediante ensayos, lo que finalmente implica un buen nivel de seguridad y seguramente una mayor oferta de productos para competir en un nuevo mercado con norma de diseño.

Bibliografía

- [1] Albert Cuchí, Gerardo Wadel, Fabian López y Albert Sagrera. *Guía de la eficiencia energética*. Fundación Gas Natural 1ª edición, España, 2007.
- [2] Caselli Gysling, Ana “et al”. *Anuario Forestal 2016*. Instituto Forestal, Chile, 2016.
- [3] Madera21. *Las iniciativas clave para impulsar la construcción en madera en Chile*. [En línea] 9 de enero, 2017. < <http://www.madera21.cl/?p=3288> > [consulta: 8 de octubre 2017]
- [4] Ministerio de Vivienda y Urbanismo. *Ordenanza General de Urbanismo y Construcción*. Chile, 2017.
- [5] Instituto Nacional de Normalización. *NCh933.Of97. Prevención de incendio en edificios - Terminología*. Chile, 1997.
- [6] Alar Just, Joachim Schmid & Jürgen König. SP Report 29: *Gypsum plasterboards used as fire protection - Analysis of a database*. SP Technical Research Institute, Suecia, 2010.
- [7] Bénichou, N.; Sultan, M. A. *Fire resistance performance of lightweight wood-framed assemblies*. National Research Council, Canadá, 2000.
- [8] Robert H. White. Cap. Analytical Methods for Determining Fire Resistance of Timber Members. En: Morgan J. Hurley. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Springer, Estados Unidos, 2016.
- [9] Bénichou, N., Sultan & M. A. *Fire resistance of lightweight wood-framed assemblies: State of art report*. National Research Council, Canadá, 1999.
- [10] Richardson, L.R., & Batista, M. Cap. *Revisiting the Component Additive Method for Light-Frame Walls Protected by Gypsum Board*. En: S. J. Grayson. *Fire and Materials*. John Wiley & Sons Ltd, International Journal Vol 21, 1997.
- [11] M.A. Sultan y V.R. Kodur. *Light-Weight Frame Wall Assemblies: Parameters for Consideration in Fire Resistance Performance-Based Design*. National Research Council, Canadá, 2000.
- [12] Instituto Nacional de Normalización. *NCh935/1: Prevención de incendio en edificios - Ensayo de resistencia al fuego - Parte 1: Elementos de construcción general*. Chile 1997.

- [13] Instituto Nacional de Normalización. NCh933: *Prevención de incendio en edificios - Terminología*. Chile 1997.
- [14] MINVU. *Listado Oficial de Comportamiento al Fuego de Elementos y componentes de la Construcción*. Chile, 2014.
- [15] International Code Council, INC. *International Building Code*. Estados Unidos, 2015.
- [16] American Wood Council. *Component Additive Method (CAM) for Calculating and Demonstrating Assembly Fire Endurance, Design for Code Acceptance (DCA) 4*. Leesburg, 2010.
- [17] European Committee for Standardization. *Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design*. Brussels, 2004.
- [18] International Organization for Standardization. ISO834-1:1999 Fire-resistance tests - Elements of - building construction - Part 1: General requirements. 1999 amendment 1 – 2012.
- [19] SP Technical Research Institute of Sweden. *Fire safety in timber buildings, Technical Guideline for Europe*. Suecia, 2010.
- [20] Katrin Nele. *SP Report 71: Implementation of new materials to the component additive method for fire design of timber structures*. SP Technical Research Institute, Suecia, 2016.

Anexo

A continuación extractos de la guía técnica para Europa *Fire Safety in Timber Buildings*, con estos se determinan los tiempos básicos y coeficientes a utilizar en este método de adición de componentes.

| Material | Basic insulation value $t_{ins,0,n}$ [min] | Basic protection value $t_{prot,0,i}$ [min] |
|--|--|---|
| Gypsum plasterboard, gypsum fibre board | $24 \cdot \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,4}$ | $30 \cdot \left(\frac{h_i}{15}\right)^{1,2}$ |
| Solid timber, cross-laminated timber, LVL | $19 \cdot \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,4}$ | $30 \cdot \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,1} \leq \frac{h_i}{\beta_0}$ |
| Particleboard, fibreboard | $22 \cdot \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,4}$ | $33 \cdot \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,1} \leq \frac{h_i}{\beta_0}$ |
| OSB, plywood | $16 \cdot \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,4}$ | $23 \cdot \left(\frac{h_i}{20}\right)^{1,1} \leq \frac{h_i}{\beta_0}$ |
| Stone wool insulation with $\rho \geq 26 \text{ kg/m}^3$ | 0 | $0,3 \cdot h_i^{(0,75 \cdot \log(\rho_i) - \rho_i / 400)}$ |
| Glass wool insulation with $\rho \geq 15 \text{ kg/m}^3$ | 0 | for $h_i < 40 \text{ mm}$: 0 for $h_i \geq 40 \text{ mm}$: $(0,0007 \cdot \rho_i + 0,046) \cdot h_i + 13 \leq 30$ |

Where h_i : Thickness of the layer considered [mm]
 ρ_i : Density of the layer considered [kg/m^3]
 β_0 : One-dimensional charring rate ($\beta_0 = 0,65 \text{ mm/min}$)

Extracto guía técnica *Fire Safety in Timber Buildings*: fórmulas para determinar tiempos básicos de aislación y protección

| 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 $\sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{prot,0,i}}{2}$ | |
| Stone wool insulation | $k_{pos,exp,i}$ 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 $\sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{prot,0,i}}{2}$ |
| Glass wool insulation for $h_i \geq 40$ mm | $k_{pos,exp,i}$ for $t_{prot,i}$ | |
| | $1 - 0,8 \cdot \frac{\sum t_{prot,i-1}}{t_{prot,0,i}}$ | for $\sum t_{prot,i-1} \leq \frac{t_{prot,0,i}}{4}$ |
| | $(0,001 \cdot \rho_i + 0,27) \cdot \left[\frac{t_{prot,0,i}}{\sum t_{prot,i-1}} \right]^{(0,75 - 0,002 \cdot \rho_i)}$ | for $\sum t_{prot,i-1} > \frac{t_{prot,0,i}}{4}$ |

With ρ_i : Density of the layer considered [kg/m^3]

Extracto guía técnica *Fire Safety in Timber Buildings*: fórmulas para determinar los coeficientes de posición en capas.

| Material of the layer considered | $k_{pos,unexp,i}$ for layers backed by cladding made of gypsum or timber | $k_{pos,unexp,i}$ for layers backed by insulation |
|---|--|--|
| Gypsum plasterboard, gypsum fibre board | 1,0 | $0,5 \cdot h_i^{0,15}$ |
| Solid timber, cross-laminated timber, LVL | 1,0 | $0,35 \cdot h_i^{0,21}$ |
| Particleboard, fibreboard | 1,0 | $0,41 \cdot h_i^{0,18}$ |
| OSB, plywood | 1,0 | $0,5 \cdot h_i^{0,15}$ |
| Stone wool insulation | 1,0 | $0,18 \cdot h_i^{(0,001\rho_i + 0,08)}$ |
| Glass wool insulation | 1,0 | $0,01 \cdot h_i - \frac{h_i^2}{30000} + \rho_i^{0,09} - 1,3$ |

With h_i : Thickness of the layer considered [mm]

Extracto guía técnica *Fire Safety in Timber Buildings*: fórmulas para determinar los coeficientes de posición en capas apoyadas por aislacion.

| 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 $t_{ins,0,n} < 8$ min | for $t_{ins,0,n} < 12$ 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 $t_{ins,0,n} \geq 8$ min | for $t_{ins,0,n} \geq 12$ 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 $t_{prot,0,i} < 8$ min | for $t_{prot,0,i} < 12$ 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 $t_{prot,0,i} \geq 8$ min | for $t_{prot,0,i} \geq 12$ min | |
| Insulation (mineral wool insulation) | Δt_i for $t_{prot,i}$ [min] | |
| | $0,1 \cdot t_{prot,i-1} - 0,035 \cdot t_{prot,0,i}$ | $0,1 \cdot t_{prot,i-1} + t_{prot,0,i} - 1,0$ |
| | | for $t_{prot,0,i} < 6$ min |
| | $0,22 \cdot t_{prot,i-1} - 0,1 \cdot t_{prot,0,i} + 3,5$ | |
| | | for $t_{prot,0,i} \geq 6$ min |

Extracto guía técnica *Fire Safety in Timber Buildings*: Tiempos de corrección aplicados a placas de yeso-cartón con especificaciones anti fuego.

| Material | Joint type | $k_{i,n}$ 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 |
| Cladding (timber) | | 0,3 | 0,3 | 1,0 |
| | | 0,4 | 0,4 | 1,0 |
| | | 0,6 | 0,6 | 1,0 |
| | no joint | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Gypsum plasterboard, gypsum fibre board | | 0,8 | 0,8 | 1,0 |
| | | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Insulation (mineral wool insulation) | | - | 0,8 | 1,0 |
| | no joint | - | 1,0 | 1,0 |

Extracto guía técnica *Fire Safety in Timber Buildings*: Coeficientes de unión según el tipo de junta utilizada.

| Material | Layer on the exposed side of the cavity | Layer on the unexposed side of the cavity | |
|--------------------------------------|--|---|--|
| Cladding (gypsum, timber) | $k_{pos,unexp,i}$ according to Table 5.3, column 3 | $1,6 \times k_{pos,exp,i}$ according to Table 5.2 | $3 \times \Delta t_i$ (or $3 \times \Delta t_n$) according to Table 5.4 |
| Insulation (mineral wool insulation) | $k_{pos,unexp,i} = 1,0$ | $1,6 \times k_{pos,exp,i}$ according to Table 5.2 | Δt_i (or Δt_n) according to Table 5.4 |

Extracto guía técnica *Fire Safety in Timber Buildings*: consideraciones para coeficientes de posición de capas en contacto con capas de aire.

European Commission, Joint Research Centre. *Fire Safety in Timber Buildings – Chapters 5-7*. [En línea]. <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/Fire_Timber_Ch_5-7.pdf>

