



TESIS DOCTORAL

Variación de la conductividad térmica efectiva de materiales de protección al fuego de estructuras metálicas a altas temperaturas.

Análisis mediante estudios sobre placas de yeso laminado.

Doctorando: D. Javier Parras Simón

Director de Tesis: Dr. D. Federico de Isidro Gordejuela

Curso Académico 2012-2013

A mis padres.

CONTENIDO

CAPÍTULOS

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 HERRAMIENTA DE CÁLCULO
- 3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS DE CÁLCULO SIMPLIFICADOS
- 4 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL
- 5 ESTUDIOS INTERNACIONALES SOBRE PLACAS DE YESO LAMINADO
- 6 DATOS DE DISTRIBUIDORES NACIONALES DE PLACAS DE YESO LAMINADO
- 7 CAMPAÑA DE ENSAYOS
- 8 OBTENCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EFECTIVA
- 9 PROPUESTA DE VALORES PARA LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EFECTIVA
- 10 CONCLUSIONES Y NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

ÍNDICES

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE GRÁFICOS

ÍNDICE DE IMÁGENES

REFERENCIAS

APÉNDICES

APÉNDICE 1 - Resultados del análisis comparativo de métodos de cálculo simplificados para el espesor de la protección.

APÉNDICE 2 - Resultados del estudio de valores de la temperatura del acero en función de la variación de las propiedades físicas de los materiales de protección.

APÉNDICE 3 - Datos de los ensayos realizados de acuerdo a la norma UNE ENV 13381-4 por los distribuidores nacionales de placas de yeso laminado.

APÉNDICE 4 - Datos de la campaña de ensayos.

APÉNDICE 5 - Resultados numéricos de los cálculos realizados para obtener el valor de la conductividad térmica efectiva.

SOPORTE INFORMÁTICO

RESUMEN

La presente Tesis analiza como la variación de la conductividad térmica de los materiales de protección al fuego de estructuras metálicas durante un incendio influye en la temperatura que va alcanzando el elemento estructural.

En la reglamentación nacional se ofrecen valores constantes de este parámetro (usualmente a temperatura ambiente) que, como se trata de demostrar, no corresponden con el comportamiento real del mismo.

Con tal objetivo, se ha centrado el análisis en las placas de yeso laminado investigando diversos estudios internacionales y resultados de ensayos realizados, de acuerdo con la Norma ENV 13381-4, por distribuidores nacionales de este tipo de material.

Para completar el estudio se han realizado diversos ensayos a pequeña escala de probetas de acero laminado revestidas de placas de yeso laminado en horno eléctrico y, a partir de los resultados obtenidos, se realiza una propuesta simplificada de valores de conductividad térmica efectiva para ser utilizados en los procedimientos analíticos de cálculo que determinan el espesor de material protección necesario.

Códigos UNESCO

- 3305.21 Construcciones Metálicas.
- 3305.28 Regulaciones, Códigos y Especificaciones.
- 3305.32 Ingeniería de Estructuras
- 3305.33 Resistencia de Estructuras.
- 3305.90 Transmisión de Calor en la Edificación.

SUMMARY

This Thesis analyses how variation of the thermal conductivity of fire protection materials (FPM) of steel structures, at high temperatures, affects the temperature reached by the steel.

Constant values of this parameter (usually at ambient temperature) are included in our National Building Codes that, as demonstrated, do not correspond with its real behaviour.

Focusing on plasterboard sheets as FPM, several international studies as well as laboratory tests in compliance with ENV 13381-4 (from national distributors) have been analysed.

In addition, small-scale tests - with steel sheets protected with plasterboards - have been carried out using an electrical furnace, in order to establish a proposal of effective thermal conductivity values to be used in the existing analytic calculation procedures to determine the protection material depth required.

UNESCO Codes

- 3305.21 *Metallic constructions.*
- 3305.28 *Regulations, Codes and Specifications.*
- 3305.32 *Structural engineering.*
- 3305.33 *Structural strength..*
- 3305.90 *Heat transfer in building.*

1 INTRODUCCIÓN

1.1 FUNDAMENTOS

1.1.1 EFECTOS DEL INCENDIO SOBRE LA ESTRUCTURA

La estructura de un edificio en el que se produce un incendio está sometida a dos tipos de acciones mecánicas: directas e indirectas.

- Las acciones directas son aquellas que pueden actuar sobre la estructura del edificio independientemente de la existencia del incendio.
- Las acciones indirectas son aquellas originadas por las deformaciones, impuestas o restringidas, originadas por los cambios de temperatura y deben ser tenidas en cuenta explícitamente salvo que sean estimadas a priori como favorables o despreciables o estén implícitamente incluidas en las hipótesis o modelos de cálculo elegidos conservadoramente.

Adicionalmente, la acción de incendio provoca alteraciones en las propiedades de los elementos estructurales ya que, la elevación de la temperatura durante un incendio, provoca dos tipos de efectos en los mismos que deben ser contemplados:

- Las propiedades del material se ven afectadas en general, disminuyendo de forma importante sus propiedades mecánicas y alterándose las propiedades térmicas.
- Las citadas acciones indirectas dan lugar a tensiones que se añaden a las actuantes previas al incendio tales como restricción a la dilatación de los elementos, gradientes térmicos en la sección transversal que originan tensiones internas y/o dilatación de elementos adyacentes (movimiento en cabeza de un pilar por dilatación de la viga).

1.1.2 PRINCIPIOS BÁSICOS DE CÁLCULO

La comprobación de la resistencia al fuego de una estructura, subestructura o elemento estructural implica que se satisfagan las prescripciones establecidas en la reglamentación de aplicación respecto a su comportamiento ante el fuego durante un período de tiempo establecido y comprobándose mediante la debida justificación.

Desde la transposición de las Euroclases¹ de comportamiento al fuego a nuestra reglamentación nacional, el valor exigible se corresponde con un valor numérico que se sitúa detrás de la letra “R” (símbolo que define la capacidad portante del elemento estructural) siendo el citado valor numérico el tiempo en minutos de la curva de incendio que sea de aplicación según el proceso de cálculo. Pueden establecerse, por tanto, dos fases de cálculo:

1. La obtención del tiempo que la estructura debe resistir de acuerdo con la reglamentación de aplicación.
2. La comprobación de que la estructura posee el comportamiento ante el fuego durante ese tiempo.

¹ Real Decreto 312/2005 del Ministerio de la Presidencia del Gobierno de España (modificado por el Real Decreto 110/2008) que establece, de forma armonizada, la clasificación de los productos de construcción en función de su comportamiento ante el fuego en el ámbito de la Unión Europea.

1.1.2.1 VALOR DEL TIEMPO DE RESISTENCIA AL FUEGO EXIGIDO

El período de tiempo se obtiene de la reglamentación de ámbito nacional mediante:

- a) Datos tabulados, como es el caso de las tablas que se recogen en los distintos reglamentos, siempre que se esté dentro de las hipótesis de aplicación de las citadas tablas.
 - a. Tablas 3.1 y 3.2 de la Sección SI 6 del DB-SI².
 - b. Tabla 2.2 del Anexo II del RSCIEI³.
- b) Cálculos analíticos en función de parámetros como la carga térmica, ventilación y propiedades de los cerramientos del recinto considerado.
 - a. Anejo B: Tiempo equivalente de exposición al fuego del DB-SI.
 - b. Anejo 8: Acciones para el análisis térmico de la Instrucción EAE⁴.

1.1.2.2 COMPROBACIÓN DEL VALOR DEL TIEMPO DE RESISTENCIA AL FUEGO EXIGIDO

La comprobación del valor de la resistencia al fuego de una estructura o elemento estructural exigido (en concreto de su capacidad portante “R”) puede hacerse mediante ensayos y mediante métodos de cálculo teórico-experimental.

1.1.2.2.1 Comprobación mediante ensayos

La comprobación del valor de resistencia al fuego de elementos estructurales prefabricados está regulada por el Reglamento de Productos de la Construcción de la Unión Europea⁵ del que, junto con la reglamentación nacional de aplicación, se deducen dos casos:

- a) Elementos estructurales prefabricados.
 - a. Productos con marcado CE: Existencia de la clase de resistencia al fuego en el etiquetado o documentación de acompañamiento del marcado CE de acuerdo con la norma de referencia correspondiente.
 - b. Productos sin marcado CE o con marcado CE en el que no conste la clase de resistencia al fuego: Acreditación documental de la clase de resistencia al fuego mediante informe de clasificación, emitido por un organismo acreditado, de acuerdo con la norma UNE-EN 13501-2 y con las condiciones expresadas en la norma UNE-EN 1363-1 y la norma correspondiente:
 1. UNE-EN 1365-1. Paredes.
 2. UNE-EN 1365-2. Suelos y cubiertas.
 3. UNE-EN 1365-3. Vigas.
 4. UNE-EN 1365-4. Pilares.
 5. UNE-EN 1365-5. Balcones y pasarelas.
 6. UNE-EN 1365-6. Escaleras.
- b) Protecciones ejecutadas en obra aplicadas a elementos de acero.
 - a. Productos con marcado CE: Existencia en el D.I.T.E. elaborado de acuerdo a Guía DITE 018-1: General y:
 1. Guía DITE 018-2: Productos o kits para protección contra el fuego a base de productos reactivos.

² Documento Básico Seguridad en caso de Incendio del Código Técnico de la Edificación del Ministerio de Vivienda.

³ Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales del Ministerio de Industria.

⁴ Instrucción de Acero Estructural del Ministerio de Fomento.

⁵ Reglamento (UE) n° 305/2011 del Parlamento Europeo y del Consejo de 9 de marzo de 2011 por el que se establecen condiciones armonizadas para la comercialización de productos de construcción y se deroga la Directiva 89/106/CEE del Consejo.

2. Guía DITE 018-3: Productos o kits para protección contra el fuego a base de morteros.
3. Guía DITE 018-4: Productos o kits para protección contra el fuego a base de tableros y paneles rígidos, placas semi-rígidas y mantas flexibles.

En la que se indique:

- i. Resistencia al fuego del elemento estructural en función del espesor y disposición del producto protector.
 - ii. Tipo del producto de protección en función del elemento a proteger.
 - iii. Tipo de condiciones ambientales de uso..
- b. Productos sin marcado CE: Acreditación documental de la clase de resistencia al fuego mediante informe de caracterización emitido por un organismo acreditado de acuerdo con la norma UNE-EN 13501-2 y con las condiciones expresadas en la norma UNE-EN 1363-1 y la norma correspondiente:
1. UNE-ENV 13381-4 si la separación entre la membrana protectora y el elemento es inferior a 5 mm.
 2. UNE-ENV 13381-1 si la separación entre la membrana protectora horizontal y el elemento es superior a 5 mm.
 3. UNE-ENV 13381-2 si la separación entre la membrana protectora vertical y el elemento es superior a 5 mm.

1.1.2.2.2 Comprobación mediante métodos de cálculo

Para los métodos de cálculo teórico-experimental se han definido dos modelos y tres dominios:

- a) **Modelo general** (dominio del tiempo) en el que se verifica que el tiempo de resistencia al fuego de la estructura o subestructura es mayor que el tiempo requerido por la reglamentación usando métodos de cálculo en los que se simula el desarrollo del incendio, la distribución e influencia en las propiedades de los materiales y la interacción de esfuerzos efecto de las dilataciones y deformaciones térmicas entre los elementos estructurales.

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ}$$

La comprobación de la resistencia al fuego de una estructura en el dominio del tiempo es solamente factible, en general, usando modelos de cálculo avanzados en los que se modeliza la evolución tiempo-temperatura de una curva de incendio natural⁶ usando Dinámica de Fluidos Computacional para comprobar que el tiempo que resiste la estructura en situación de incendio de diseño ($t_{fi,d}$) es superior o igual al tiempo requerido ($t_{fi,requ}$)

El análisis estructural debe representar adecuadamente las propiedades del material dependientes de la temperatura, incluyendo la rigidez, la distribución de temperatura en los distintos elementos de la estructura y el efecto de las dilataciones y deformaciones térmicas (acciones indirectas debidas al fuego), para lo que se suele utilizar el Método de Elementos Finitos.

⁶ Como la que se puede observar en el Gráfico IV.1.

- c) **Modelos simplificados** (dominio de la resistencia y dominio de la temperatura) en los que se comprueban elementos estructurales aislados despreciando las acciones indirectas debidas al fuego (dilataciones, deformaciones, etc.), a cambio de suponer que la temperatura es uniforme en toda la sección e igual al máximo valor alcanzado en la misma.

Para verificar los requisitos de resistencia al fuego establecidos en los modelos simplificados frente a la curva de incendio correspondiente⁷, es suficiente realizar el análisis a nivel de elemento y pueden emplearse siempre que conduzcan a resultados equivalentes o del lado de la seguridad con respecto a los que se obtendrían con los métodos generales.

En general, los métodos simplificados suponen una comprobación de los distintos Estados Limite Últimos⁸ considerando elementos estructurales aislados (se desprecian las acciones indirectas debidas al fuego: dilataciones, deformaciones...) con distribuciones de temperatura preestablecidas, generalmente para secciones rectangulares y usando modelos simplificados y sencillos para las variaciones de las propiedades de los materiales por efecto de la temperatura.

El dominio de la resistencia consiste en la comprobación de los distintos Estados Limite Últimos teniendo en cuenta, tanto en la obtención de esfuerzos de diseño como en el análisis de la respuesta estructural, la influencia de la acción del fuego.

Con este método se puede evaluar, mediante cálculos manuales fácilmente automatizables, la capacidad resistente reducida del elemento a la temperatura de diseño debiendo verificarse para el periodo de tiempo de estabilidad frente al fuego exigido que se cumple la inecuación:

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$$

donde:

- $E_{fi,d,t}$ es el valor de cálculo del efecto de las acciones en situación de fuego, incluyendo las acciones indirectas debidas al fuego,
- $R_{fi,d,t}$ es la resistencia de cálculo correspondiente a altas temperaturas.

El dominio de la temperatura trata de hallar la temperatura crítica de carga del elemento estructural ($\theta_{cr,d}$) y compararla con la temperatura de diseño asociada a la exposición requerida al fuego nominal (θ_d) verificándose el cumplimiento de la inecuación:

$$\theta_{cr,d} \geq \theta_d$$

Si bien en cualquiera de los tres métodos, la respuesta estructural debiera tener en cuenta las características de los materiales para las distintas temperaturas que pueden producirse en una misma sección transversal o elemento estructural, y si bien es cierto que las propiedades del acero laminado han sido exhaustivamente determinadas no se constata, sin embargo, la existencia de valores apropiados para la variación de las propiedades de los materiales de protección a lo largo de la evolución del incendio.

⁷ Normalmente la curva de incendio nominal estándar como la que se puede observar en el Gráfico IV.2.

⁸ Los estados límites últimos (E.L.U.) son aquellos que entrañan la puesta de fuera de servicio en toda o en parte de la estructura (vuelco, rotura...) mientras que los estados límites de servicio (E.L.S.) suponen incomodidad en la utilización pero sin pérdida de su capacidad resistente (deformación, vibración, pérdida de estanqueidad...)

A partir de que la Comisión Europea se propuso como objetivo la consecución, en 1992, de un mercado libre europeo, se comenzó a desarrollar una labor de armonización de las prescripciones técnicas de los diversos países miembros.

En el ámbito de la seguridad en caso de incendio la prioridad consistió en unificar las técnicas de ensayo de los materiales de construcción y elementos constructivos.

En las reuniones que tuvieron lugar en Bruselas los días 24 y 25 de noviembre de 1986 entre diversos Institutos y Organismos relacionados con esta materia, se decidió que la determinación de la idoneidad técnica de las estructuras de acero frente al incendio no debía realizarse en el dominio de la resistencia sino en el dominio de la temperatura aunque, como se analiza mas adelante, ambos dominios acaban arrojando el mismo resultado respecto a la temperatura crítica del elemento estructural.

1.1.3 APLICACIÓN DE MÉTODOS DE CÁLCULO SIMPLIFICADOS

Como se ha indicado anteriormente, los métodos simplificados solamente pueden aplicarse al análisis de elementos, ya que para el análisis global de la estructura o de parte de la misma debe utilizarse un método general de cálculo.

En los métodos simplificados se admite que:

- De forma conservadora, puede considerarse que la temperatura en un instante determinado es uniforme en toda la sección e igual al máximo valor alcanzado en la misma en dicho instante.
- En el análisis del elemento puede considerarse que las coacciones en los apoyos y extremos del elemento durante el tiempo de exposición al fuego no varían con respecto a las que se producen a temperatura normal.

Estos métodos simplificados (dominio de la resistencia y dominio de la temperatura) se pueden sintetizar en el siguiente procedimiento:

1. Se determina la temperatura crítica⁹ del elemento estructural (θ_{cr}) en función de su nivel de carga y la clasificación de su sección transversal:
 - a. Mediante una expresión analítica en la que interviene el factor de utilización del elemento (dominio de la temperatura)
 - b. En función del factor de reducción del límite elástico por interpolación en las tablas de correspondencia (dominio de la resistencia)
2. Se calcula la temperatura que alcanza el acero en el incendio (θ_s) en función de la curva de incendio utilizada y del tiempo de resistencia al fuego requerido por la normativa y, en caso de ser superior a la temperatura crítica, se calcula la protección necesaria mediante alguno de los siguientes procedimientos:
 - a. Por aplicación de los resultados del ensayo realizado con un determinado material protector según se especifica en la Norma UNE-ENV 13381-4¹⁰.
 - b. Mediante los valores tabulados del Anejo D del DB-SI del CTE con las limitaciones de aplicación que en él se expresan.
 - c. Utilizando métodos de cálculo analíticos
 - i. Propuestos por la CECM¹¹.

⁹ Se define como temperatura crítica (θ_{cr}) aquella para la cual se produce el fallo del elemento bajo la carga soportada.

¹⁰ UNE-ENV 13381-4: Ensayos para determinar la contribución a la resistencia al fuego de los elementos estructurales. Parte 4: Protección aplicada a elementos de acero.

¹¹ Convención Europea de la Construcción Metálica.

- ii. Propuestos por el EC3¹² y recogidos, tanto en el Anejo D del DB SI del CTE como en la Instrucción EAE.

Debiendo verificarse al final del proceso la inecuación que determina que la temperatura que alcanza el acero durante el incendio en el tiempo reglamentado no supera la temperatura crítica del elemento estructural:

$$\theta_s \leq \theta_{cr}$$

Se procede, a continuación, a hacer una breve descripción de los métodos simplificados descritos.

1.1.3.1 NORMA UNE-ENV 13381-4

La norma UNE-ENV 13381-4¹³ especifica un método de ensayo para determinar la contribución hecha por los sistemas de protección a la resistencia al fuego de elementos estructurales de acero. La evaluación se diseña para cubrir:

- Un rango de espesores de material de protección.
- Un rango de perfiles de acero, caracterizado por sus factores de sección.
- Un rango de temperaturas de diseño.
- Un rango de períodos de clasificación de protección válidos.

Esta norma se aplica a materiales de protección donde la holgura entre el material y las caras del elemento de acero es menor de 5 mm. En caso de no ser así, se deberían aplicar los métodos descritos en las Normas ENV 13381-1 (para membranas protectoras horizontales) y ENV-13381-2 (para membranas protectoras verticales).

En la norma UNE-ENV 13381-4 se definen los ensayos de fuego que deben llevarse a cabo para determinar, tanto la capacidad que tiene el sistema de protección contra el fuego para permanecer consistente y fijo a la estructura metálica, como para facilitar datos sobre las características térmicas del sistema de protección cuando se expone a la curva normalizada de temperatura-tiempo especificada en la Norma EN 1363-1.

En circunstancias especiales, y donde lo especifique la reglamentación nacional de aplicación, puede haber necesidad de someter al material de protección reactivo a una curva de fuego lento. El ensayo para ello y las circunstancias especiales de su uso se describen en el anexo A de la Norma UNE-ENV 13381-4.

La metodología del ensayo al fuego especifica disposiciones para la recopilación y presentación de datos que pueden usarse como entradas directas para el cálculo de la resistencia al fuego de elementos estructurales de acuerdo con los procedimientos dados en el EC-3.

Esta norma contiene también la evaluación que prescribe cómo debe hacerse el análisis y proporciona directrices sobre los procedimientos bajo los que deben realizarse las interpolaciones.

El procedimiento de evaluación se usa para establecer:

- a) un factor de corrección y cualquier restricción en el uso del sistema de protección bajo condiciones de ensayo (su ejecución física), en base a los datos de temperatura derivados del ensayo de secciones cargadas y no cargadas.

¹² UNE-EN 1993-1-2:2011: Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-2: Reglas generales. Proyecto de estructuras sometidas al fuego.

¹³ En la fecha de redacción de este documento existen dos proyectos de norma en la que se separan los ensayos para materiales de protección reactivos y no reactivos (PrEN 13381-4 para no reactivos y PrEN 13381-8 para reactivos) que sustituirán a la actual norma UNE ENV 13381-4.

- b) las propiedades térmicas del sistema de protección (su ejecución física), en base a los datos de temperatura derivados del ensayo de secciones cortas de pilares de acero.

Se definen los límites de aplicabilidad de los resultados de la evaluación que surjan del ensayo junto con la aplicación directa permitida de los resultados a diferentes secciones y grados de acero y a diferentes sistemas de protección y fijaciones.

Los resultados del ensayo y la evaluación obtenidos según esta parte de la Norma UNE ENV 13381-4 son directamente aplicables a las secciones o perfiles de acero en forma de “I” y “H”, dándose en el anexo B guías sobre la aplicación de los datos obtenidos de las secciones en “I” y “H” a otras secciones.

La Norma se estructura en tres partes:

1. Ensayo al fuego.
 - a. Se aplica a perfiles tipo “I” o “H”
 - b. Se realiza sobre una serie de muestras de perfiles de pequeño tamaño cargados y sin carga (pilares cortos, pilares altos y vigas) cuyo número y tipo se obtiene de tablas contenidas en la Norma.
 - c. Las muestras están cargadas al 60% de su momento resistente de diseño obtenido de acuerdo con el Eurocódigo (en el caso de vigas cargadas) y al 60% de su resistencia a pandeo de diseño obtenida de acuerdo con el Eurocódigo (en el caso de pilares cargados) de acuerdo con las condiciones que se indican en la Norma.
 - d. El ensayo en horno se atiene a la curva de incendio nominal estándar de acuerdo con la Norma UNE 1363-1 y con la colocación de termopares que se indica en la Norma para los diferentes tipos de muestras así como registradores de presión del horno. El ensayo debe continuar hasta alcanzar una temperatura del acero de 750°.
 - e. Se miden las propiedades mecánicas de adherencia y cohesión (“pegabilidad”) y las propiedades físicas y térmicas del sistema de protección (espesores reales, densidades, contenido de humedad y calor específico)
2. Datos y procedimientos de interpolación de valores.
 - a. Las temperaturas obtenidas (en períodos que no excedan de un minuto) se usan para relacionar el tiempo en que cada muestra alcanza una temperatura específica, el factor de sección de cada perfil y el espesor del material de protección.
 - b. Todos estos datos se tabulan (junto con las velocidades de deformación en el caso de vigas de con carga y la contracción axial en el caso de pilares cargados)
 - c. Los resultados del ensayo de perfiles cortos se modifican con factores de corrección obtenidos por comparación directa entre perfiles cargados y no cargados.
 - i. Factor de corrección por discrepancias en el espesor
 - ii. Factor de corrección de datos de temperatura para pegabilidad.
 - d. En el caso de los sistemas de protección reactivos, adicionalmente:
 - i. Corrección de valores por zonas localizadas a altas temperaturas locales.
 - ii. Correcciones adicionales por discrepancia en el espesor.
 - iii. Correcciones adicionales por pegabilidad.
 - e. El análisis de datos se evalúa mediante uno de los posibles métodos incluidos (ecuaciones diferenciales, regresión numérica o métodos de análisis gráfico) y se someten a los criterios de aceptabilidad y se presentan según el modelo de informe de la evaluación definido en la Norma.

3. Aplicabilidad de los resultados de la evaluación realizada.

- a. Los resultados pueden aplicarse directamente a secciones tipo “I” o “H” de acuerdo con el método de interpolación usado y previa comprobación de la coherencia y compatibilidad de los datos analizados.
- b. Los resultados pueden ser aplicables fuera del rango de espesores, factores de sección y temperaturas estrictamente ensayadas mediante extrapolación (de acuerdo con los márgenes establecidos en la Norma)
- c. En el anexo B de la Norma se proporciona una guía de aplicación de los resultados obtenidos para perfiles “I” o “H” a otros diferentes tipos de sección de perfiles.

El resultado final se debe expresar en 7 tablas (correspondientes a R15, R30, R60, R90, R120, R180 y R240) en las que se indica el espesor mínimo del material de protección necesario para mantener la temperatura del acero por debajo de la temperatura de la fila superior, todo ello en escalones de masividad de no más de 20 m⁻¹ como, por ejemplo:

R60

Tª diseño	350°	400°	450°	500°	550°	600°	650°	700°	>700°
Masividad	Espesor del material de protección para mantener la temperatura del acero por debajo de la temperatura de cálculo								
40									
60									
80									
.....									
400									

Tabla I.1 – Tabla ejemplo de resultados de la Norma UNE ENV 13381-4¹⁴.

Conocida la temperatura crítica que alcanza el elemento estructural podremos determinar el espesor del material de protección necesario en la tabla correspondiente al grado de resistencia al fuego requerido.

¹⁴ Cabe reseñar que esta presentación de valores no es la usual en el mercado, limitándose generalmente a una tabla de masividades y espesores para una temperatura del acero de 500°C, como la que se incluye a modo de ejemplo en la siguiente Tabla I.2.

Masividad	Espesor (μm)				
	15 min.	30 min.	45 min.	60 min.	90 min.
m ⁻¹					
68	(286)	(286)	(342)	(585)	(1070)
70	(286)	(286)	355	602	1098
80	(286)	(286)	413	686	(1232)
90	(286)	(286)	467	764	---
100	(286)	(286)	518	836	---
110	(286)	(286)	565	904	---
120	(286)	(286)	610	968	---
130	(286)	(286)	652	1028	---
140	(286)	(298)	691	1084	---
150	(286)	319	728	1137	---
160	(286)	339	763	1187	---
170	(286)	357	796	(1234)	---
180	(286)	375	827	(1279)	---
190	(286)	392	857	---	---
200	(286)	408	885	---	---
210	(286)	423	912	---	---
220	(286)	438	937	---	---
230	(286)	452	962	---	---
240	(286)	465	985	---	---
250	(286)	477	1007	---	---
260	(286)	489	1028	---	---
270	(286)	501	1049	---	---
280	(286)	(512)	(1068)	---	---
290	(286)	(523)	(1087)	---	---
300	(286)	(533)	(1105)	---	---

Tabla válida para 500 °C de temperatura en el acero.
 Los valores entre parentesis se han evaluado extrapolando en un 5% los espesores ensayados y en un 10% los valores de masividad.
 s/ UNE ENV 13381-4: 2005

Tabla I.2– Tabla usual de resultados del fabricante de la Norma UNE ENV 13381-4.

1.1.3.2 VALORES TABULADOS DEL ANEJO D DEL DB-SI

En el citado Anejo se incluye (para tirantes, vigas arriostradas lateralmente y soportes de estructuras arriostradas) una tabla de triple entrada en la que, en función del tiempo de resistencia al fuego requerido, el factor de sección y el coeficiente de sobredimensionado (o factor de utilización), se obtiene el coeficiente de protección d/λ_p [m²K/W] en el que:

- d es el espesor del revestimiento [m]
- λ_p es la conductividad térmica efectiva del revestimiento para el desarrollo total del tiempo de resistencia a fuego considerado [W/mK] debiendo tomarse los valores correspondientes a las temperaturas alcanzadas y admitiéndose que, en el caso de materiales de tipo pétreo, cerámicos, hormigones, morteros y yesos se pueda tomar el valor correspondiente a 20°C¹⁵.

¹⁵ Este último párrafo es el principal objeto de discusión en la presente Tesis.

Tabla D.1. Coeficiente de protección, d/λ_p (m^2K/W) de vigas y tirantes

Tiempo estándar de resistencia al fuego	Factor de forma A_m/V (m^{-1})	Coeficiente de sobredimensionado $>\mu_{fl}$		
		$0,70 >\mu_{fl} \geq 0,60$	$0,60 >\mu_{fl} \geq 0,50$	$0,50 >\mu_{fl} \geq 0,40$
R 30	30	0,05	0,00 ⁽¹⁾	0,00 ⁽¹⁾
	50		0,05	0,05
	100			
	150			
	200		0,10	0,10
	250			
300	0,10	0,10		
R 60	30	0,05	0,05	0,05
	50	0,10	0,10	0,10
	100			
	150			
	200	0,15	0,15	0,10
	250			
300	0,15	0,15		
R 90	30	0,05	0,05	0,05
	50	0,15	0,10	0,10
	100		0,15	0,15
	150			
	200	0,20	0,20	0,15
	250			
300	0,20	0,20		
R 120	30	0,10	0,05	0,05
	50	0,10	0,10	0,10
	100	0,15	0,15	0,15
	150	0,20	0,20	
	200			
	250			
300	0,25	0,25		
R 180	30	0,10	0,10	0,10
	50	0,15	0,15	0,15
	100	0,25	0,20	0,20
	150		0,25	0,25
	200			
	250	0,30		
300				
R 240	30	0,15	0,15	0,10
	50	0,20	0,20	0,15
	100	0,30	0,25	0,25
	150	-	0,30	0,30
	200		-	-
	250			
300	-		-	

Tabla I.3– Tabla del Anejo D del DB SI del CTE.

1.1.3.3 ECUACIÓN DE LA CECM

Este método de la Convención Europea de la Construcción Metálica se basa en los resultados de numerosos ensayos, proviene del DTU-CAHIER-CT-3 y consiste en determinar el tiempo de estabilidad al fuego de un perfil metálico no protegido mediante la aplicación de la fórmula:

$$T = \frac{40 \cdot (\theta_{cr} - 140)}{(R \cdot \mu)^{0,77}}$$

Siendo:

- **T** el tiempo de estabilidad al fuego en minutos (con unos límites comprendidos entre 30 y 240 minutos)
- **θ_{cr}** la temperatura crítica del acero en ° (con unos límites comprendido entre 400° y 600°)
- **μ** el factor de sección del perfil (con unos límites comprendidos entre 10 y 300 m^{-1})
- **R** el coeficiente de aislamiento térmico del material protector (con unos límites comprendidos entre 3,3 y 10 m^2/W)

Y como $R = e / \lambda$ (cociente entre el espesor y el coeficiente de conductividad térmica) se puede despejar el espesor (e) en m del material necesario.

$$e = \frac{\lambda^{0,77} \sqrt{40 \cdot (\theta_{cr} - 140)}}{\mu}$$

1.1.3.4 ECUACIÓN DIFERENCIAL INCREMENTAL

El último método de cálculo es el empleo de la ecuación diferencial incremental que se incluye en:

- El Artículo 4.2.5.2 del EC-3.
- El Artículo D.2.3 del DB SI del CTE.
- El Artículo 48.2 del Capítulo XII de la Instrucción EAE.
- El Anexo G (normativo) de la norma UNE ENV 13381-4

Esta ecuación establece que, para una distribución uniforme de temperaturas en una sección transversal, el incremento de temperaturas $\Delta\theta_{s,t}$ de un elemento de acero aislado durante un intervalo de tiempo Δt se obtiene mediante la expresión:

$$\Delta\theta_{s,t} = \frac{\lambda_p}{d_p c_s \rho_s} \frac{A_p}{V} \left(\frac{1}{1 + \phi/3} \right) (\theta_{g,t} - \theta_{s,t}) \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \geq 0$$

siendo Φ un factor que indica el grado de protección del elemento:

$$\phi = \frac{c_p}{c_s} \frac{\rho_p}{\rho_s} d_p \frac{A_p}{V}$$

- λ_p la conductividad térmica del material de protección frente al fuego [W/mK]
- A_p el área de la superficie interna del material de protección frente al fuego, por unidad de longitud del elemento, [m²/m]. El área A_p del material de protección frente al fuego se tomará generalmente como el área de su cara interior, pero en el caso de elementos metálicos protegidos con pantallas térmicas separadas del elemento se puede adoptar el mismo valor que para elementos metálicos protegidos con pantallas térmicas que estén en contacto directo con el elemento.
- V el volumen del elemento por unidad de longitud [m³/m]
- $\theta_{g,t}$ la temperatura del gas en el instante t. [°]
- $\theta_{s,t}$ la temperatura del acero en el instante t. [°]
- d_p el espesor del material frente al fuego. [m]
- c_s el calor específico del acero [J/kgK]
- ρ_s la densidad del acero [Kg/m³]
- Δt el intervalo de tiempo [segundos]. Considerándose para Δt un valor no superior a 30 segundos
- $\Delta\theta_{g,t}$ el incremento de la temperatura ambiente durante el intervalo de tiempo Δt . [°]
- c_p el calor específico del material de protección frente al fuego [J/kgK]
- ρ_p la densidad del material de protección frente al fuego [kg/m³]

En el Artículo 48.2 del Capítulo XII de la Instrucción EAE el incremento elemental de temperatura en el acero viene definido por la siguiente ecuación (que es la ya conocida con una reagrupación de términos):

$$\Delta\theta_{s,t} = r_{p,ef,d} \left(\frac{A_p}{V} \right) (\theta_{g,t} - \theta_{s,t}) \Delta t \left(\frac{1}{c_s \rho_s} \right) - (e^{\varphi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \geq 0$$

teniendo todos los términos el mismo significado que el indicado en el apartado anterior excepto el de “resistividad térmica”, compuesto por la agrupación de términos:

$$r_{p,ef,d} = \left(\frac{1}{\gamma_p} \right) \frac{(1 + \varphi / 3) d_p}{\lambda_{p,k}}$$

siendo:

- $\lambda_{p,k}$ la conductividad térmica característica del material de protección frente al fuego [W/mK]
- γ_p el coeficiente parcial de seguridad que se define en el Art. 48.3 de la EAE

1.2 CONCLUSIONES

Para el cálculo de la resistencia al fuego de las estructuras de acero se pueden utilizar

- **Modelos generales** que tienen en cuenta el comportamiento global de la estructura y que se desarrollan mediante modelos matemáticos basados en Dinámica de Fluidos Computacional y el Método de Elementos Finitos.
- **Modelos simplificados** que estudian el comportamiento individual de piezas aisladas y que desprecian las acciones indirectas debidas al fuego (dilataciones, deformaciones, etc.), a cambio de suponer que la temperatura es uniforme en toda la sección e igual al máximo valor alcanzado en la misma.

Como concepto general se establece que, durante el transcurso de un incendio, se produce un incremento de temperatura de los gases en el ambiente que transmiten un flujo de calor por radiación y convección a los elementos estructurales. Por este motivo la temperatura del acero sufre, asimismo, incrementos.

En el caso de los modelos simplificados, se ha establecido que el elemento estructural mantiene su capacidad portante hasta el momento en que alcanza su temperatura crítica, definida como aquella para la cual se produce el fallo del elemento bajo la carga soportada.

Se ha de verificar, por tanto, que la temperatura que alcanza el acero durante el incendio sea inferior a la temperatura crítica del elemento estructural. (Habitualmente, para que eso no suceda, se ha de revestir a los elementos estructurales de acero con materiales de protección).

$$\theta_s \leq \theta_{cr}$$

Para verificar la anterior inecuación se han de determinar, por tanto, dos valores:

- la temperatura crítica del elemento estructural
- la temperatura que alcanza durante el desarrollo del incendio.

La temperatura crítica del elemento estructural se obtiene a partir de la clasificación de la sección transversal (función de la esbeltez de las partes de la sección transversal sometidas a compresión) y del cálculo propiamente dicho (bien en el dominio de la resistencia o en el de la temperatura), todo ello según se establece en el EC-3.

La determinación de la temperatura que alcanza el acero depende de si el elemento esta o no protegido. Si no lo está se utiliza la siguiente fórmula incremental:

$$\Delta\theta_{s,t} = k_{sh} \frac{1}{c_s \rho_s} \frac{A_m}{V} h_{net,d} \Delta t$$

En el mas que probable caso de que la temperatura del acero sobrepase la crítica se calcula la protección necesaria mediante materiales de protección no reactivos (morteros o placas) o reactivos (pinturas intumescentes).

Para determinar el espesor de material de protección necesario se puede optar por:

- Obtenerlo de los valores de los ensayos realizados por los fabricantes de acuerdo con la norma UNE ENV 13381-4
- A partir de los valores tabulados incluidos en el Anejo D del DB SI del CTE

- Utilizar métodos de cálculo analíticos reconocidos como la fórmula recomendada por la CECM (dentro de sus límites de aplicación)

$$e = \frac{\lambda \cdot 0,77 \sqrt{\frac{40 \cdot (\theta_{cr} - 140)}{T}}}{\mu}$$

- Empleando la ecuación diferencial incremental que se incluye tanto en el EC-3, como en el Anejo D del DB SI del CTE, el Capítulo XII de la Instrucción EAE o en la norma UNE ENV 13381-4

$$\Delta \theta_{s,t} = \frac{\lambda_p}{d_p c_s \rho_s} \frac{A_p}{V} \left(\frac{1}{1 + \phi/3} \right) (\theta_{g,t} - \theta_{s,t}) \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta \theta_{g,t} \geq 0$$

2 HERRAMIENTA DE CÁLCULO

Para el cálculo de la temperatura del acero mediante la ecuación diferencial incremental se ha desarrollado, para la presente Tesis, una herramienta con una hoja de cálculo en la que, introduciendo datos del elemento estructural y de sus solicitaciones, se determina la temperatura crítica y, posteriormente, la temperatura que alcanza el elemento estructural, tanto sin protección como protegido por un material que se puede elegir entre un listado de los mas habituales.

De la ecuación diferencial descrita al final del anterior capítulo puede deducirse que es necesario, para el cálculo, considerar los valores de determinadas propiedades físicas, tanto del acero estructural como del material de protección, que se relacionan y analizan a continuación:

2.1 PROPIEDADES DEL ACERO ESTRUCTURAL

2.1.1 A TEMPERATURA NORMAL

Se resumen las características mecánicas mas relevantes, a los efectos de esta Tesis, de los aceros de calidades normalizadas (que se corresponden a los especificados por la normativa UNE-EN-10025 "Productos laminados en caliente, de acero no aleado, para construcciones metálicas de uso general") tomados de la Instrucción EAE - siendo "t" el espesor nominal - y la parte 1-1 del EC-3.¹⁶

Tipo de acero	S235		S275		S355	
	t=<40	40<t<80	t=<40	40<t<80	t=<40	40<t<80
f_y [MPa] Límite elástico	235	215	275	255	355	335
f_u [MPa] Tensión de rotura	360	360	430	410	490	470
	510	510	580	560	680	630

Tabla II.1 – Límite elástico y tensión de rotura en función del tipo de acero.

Características comunes a todos los tipos de acero	
Módulo de Elasticidad (E)	210.000 MPa
Módulo de Rigidez (G)	81.000 MPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,30
Coefficiente de dilatación térmica (α_L)	$1,2 \cdot 10^{-6} (^\circ\text{C})^{-1}$
Densidad (ρ)	7.850 kg/m ³
Emisividad (ϵ)	0,7

Tabla II.2 – Propiedades físicas comunes a todos los tipos de acero.

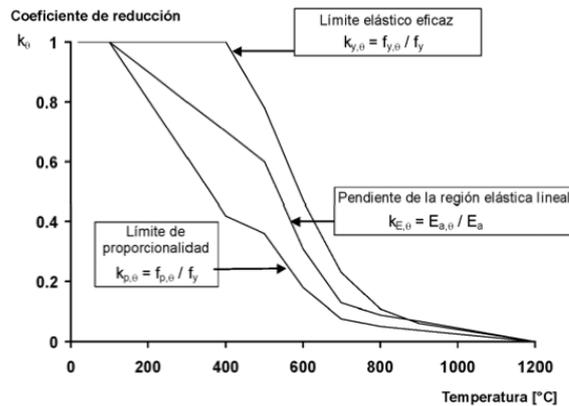
¹⁶ UNE-EN 1993-1-1:2008. Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificios.

2.1.2 A TEMPERATURA ELEVADA

Para la determinación de la variación de las propiedades térmicas y mecánicas del acero estructural laminado en caliente existen resultados de los ensayos a los que se viene sometiendo a este material desde hace varias décadas¹⁷ que se incluyen, asimismo, tanto en la Instrucción EAE como en el la parte 1-2 EC-3 relacionándose, a continuación, los valores mas relevantes a los efectos de esta Tesis.

2.1.2.1 LÍMITE ELÁSTICO

En las siguientes gráfica y tabla se pueden observar numérica y gráficamente los citados valores de forma mas detallada.



Gráfica II.1 – Coeficientes de reducción para la relación tensión-deformación a temperaturas elevadas tomado de la Instrucción EAE.

La mayoría de materiales de construcción sufren una reducción progresiva de sus propiedades mecánicas (resistencia y rigidez) a temperaturas elevadas, sin embargo, para el acero el descenso se inicia a una temperatura relativamente baja como son los 300°, a los 700° sólo le queda un 23% de la resistencia a temperatura-ambiente, a 800° se ha reducido a un 11%, a 900° a un 6% y la fusión se produce sobre los 1.500°.

Temperatura del acero θ_a	Coeficientes de reducción a temperatura θ_s , respecto al valor de f_y o E_s a 20 °C		
	Coeficiente de reducción (respecto a f_y) para el límite elástico eficaz $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	Coeficiente de reducción (respecto a f_y) para el límite de proporcionalidad $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	Coeficiente de reducción (respecto a E_s) para la pendiente de la región elástica lineal $k_{E,\theta} = E_{\theta,\theta} / E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1 000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1 100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1 200 °C	0,000	0,0000	0,0000

NOTA: Puede emplearse una interpolación lineal para valores intermedios de temperatura del acero.

Tabla II.3 – Coeficientes de reducción para la relación tensión-deformación a temperaturas elevadas tomada de la Instrucción EAE.

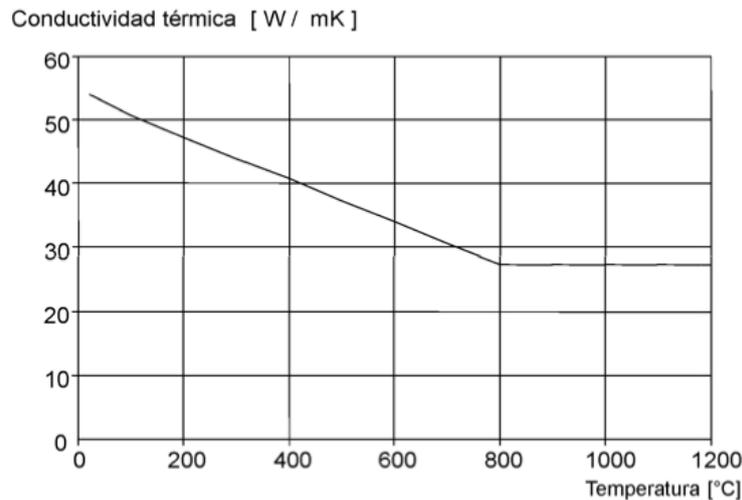
¹⁷ Como, por ejemplo, el document “Fire Resistance – Tests for Thermo-Physical and Mechanical Properties of Structural Materials at Elevated Temperatures for Fire Engineering Design” del Comité Técnico ISO/TC 92/SC 2 o el informe “High-temperature testing of structural steel and modelling of structures at fire temperatures” de Jyri Outinen, Olli Kaitila and Pentti Mäkeläinen (Helsinki University of Technology Laboratory of Steel Structures)

2.1.2.1.1 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

En la siguiente gráfica y tabla se pueden observar, numérica y gráficamente, la variación de los valores de la conductividad en relación con la temperatura, tomándose - para modelos de cálculo simplificados - el valor conservador de 45W/mK.

$20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 800^{\circ}$	$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \text{ W/mK}$
$800^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 1200^{\circ}$	$\lambda_a = 27,3 \text{ W/mK}$

Tabla II.4 – Conductividad térmica del acero en función de la temperatura.



Gráfica II.2 – Conductividad térmica del acero en función de la temperatura tomada de la Instrucción EAE.

2.1.2.1.2 Calor específico

En la siguiente gráfica y tabla se pueden observar numérica y gráficamente la variación de los valores de la conductividad en relación con la temperatura.

$20^{\circ}\text{C} \leq \theta_s < 600^{\circ}\text{C}$	$c_s=425+7,73 \times 10^{-1} \theta_s - 1,69 \times 10^{-3} \theta_s^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_s^3 \text{ J/kgK}$
$600^{\circ}\text{C} \leq \theta_s < 735^{\circ}\text{C}$	$c_s=666 + \frac{13002}{738 - \theta_s} \text{ J/kgK}$
$735^{\circ}\text{C} \leq \theta_s < 900^{\circ}\text{C}$	$c_s=545 + \frac{17820}{\theta_s - 731} \text{ J/kgK}$
$900^{\circ}\text{C} \leq \theta_s \leq 1200^{\circ}\text{C}$	$c_s=650 \text{ J/kgK}$

Tabla II-5 – Calor específico del acero en función de la temperatura.

Como se puede apreciar en el siguiente diagrama este valor presenta variaciones a lo largo de la temperatura produciéndose un llamativo pico en el rango de los 700-800°.

Este pico, que se presenta sobre los 735°, y que tiende a un valor muy elevado, indica la cantidad de calor latente necesaria para que se produzca la transformación cristalográfica del material (paso de la estructura de la ferrita a la de la austenita) a esa temperatura.

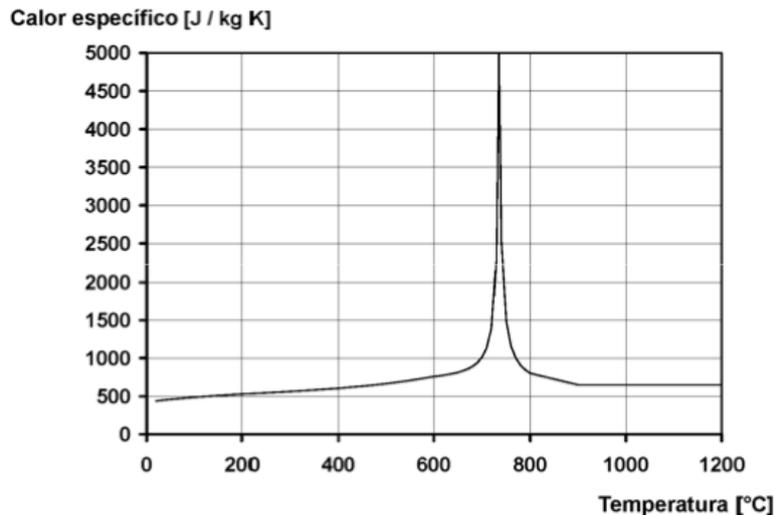


Gráfico II.3 – Calor específico del acero en función de la temperatura.

Para modelos de cálculo simplificados se toma el valor conservador de 600 J/kgK que es bastante adecuado para la mayor parte del rango de temperaturas pero no lo es para el cambio de estado.

2.2 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE PROTECCIÓN

Los materiales utilizados como protección de las estructuras contra el incendio tienen como misión revestir los elementos estructurales aislándolos del calor. Esta protección puede conseguirse, fundamentalmente:

1. Con morteros o productos prefabricados, interponiendo un determinado espesor de un material (generalmente inerte al fuego) dotado de un alto coeficiente de aislamiento térmico. Este es el caso de los diversos tipos de placas y productos proyectados, así como de los materiales constructivos y estructurales convencionales como el ladrillo, yeso, mortero de cemento y hormigones.
2. Con productos reactivos intumescentes (materiales que reaccionan químicamente ante el fuego haciéndoles desarrollar un importante volumen de espuma aislante que evita que la temperatura afecte al elemento protegido)

Existen, también otros tipos de protección que abarcarían los productos ablativos (material reactivo que, al ser expuestos al calor, producen una reacción endotérmica que tiene como resultado la liberación de agua) así como las estructuras con sistema de refrigeración por agua.

Entre los componentes de los materiales de protección citados en el primer epígrafe encontramos los silicatos, las fibras minerales, la vermiculita y la perlita, que se deshidratan bajo la acción del calor, formando gránulos contenedores de aire, que en esta forma expandida son buenos aislantes térmicos. Son materiales estables hasta temperaturas superiores a 1000° y, al fundirse, no emiten ningún gas combustible, corrosivo ni tóxico.

- La vermiculita tiene una densidad en torno a los 100 Kg/m³, y una conductividad térmica de 0,063 W/m°.
- La perlita expandida, con una densidad de 160 Kg/m³, tiene una conductividad térmica de 0,047 W/m°.
- Los silicatos, se utilizan en forma de fibras mezclados con un ligante, tienen un alto poder de aislamiento térmico y un elevado punto de fusión. El silicato de calcio tiene una densidad de 220 Kg/m³ y una conductividad térmica de 0,057 W/m°.

- Las lanas minerales contienen sílice y aluminio. Se obtienen sometiendo al mineral a un proceso de fusión y posterior centrifugación. Tienen un alto punto de fusión, por encima de los 1000 °, una densidad entre 120 y 300 Kg/m³ y una conductividad térmica de 0,038 W/m°.

2.2.1 TIPOLOGÍA

2.2.1.1 MORTEROS

Los morteros proyectados crean un espesor de capa protectora determinada alrededor de los elementos. Su aplicación en la obra es rápida, y no sufre los problemas propios de recubrimientos rígidos alrededor de detalles estructurales complejos. El acabado de este producto es inaceptable en áreas públicas de edificios, por lo que se suele ocultar de la vista. También hay que tener en cuenta que la acción de oficios que actúan en la obra posteriormente a su aplicación puede deteriorar enormemente el revestimiento aplicado.

El sistema de aplicación suele ser con proyección neumática en capas sucesivas, lo que proporciona acabados rugosos, o manual que permite el maestreado. El mortero se proyecta directamente sobre el elemento soporte, lo que hace imprescindible garantizar la perfecta adherencia del producto. Se hace necesario utilizar mallas para algunas aplicaciones en elementos estructurales compuestos y/o con superficies discontinuas y zonas de difícil acceso para formar superficies continuas de proyección. Para espesores de recubrimiento superiores a 2 o 3 cm también suele ser necesario el uso de un mallazo para armar el mortero.

En la elección del tipo de mortero a utilizar hay que tener en cuenta la rigidez o flexibilidad de éste, debido a que en los elementos susceptibles de sufrir deformaciones de flexión importantes puede producirse la fisuración del revestimiento, con la consiguiente pérdida de parte de su capacidad de protección. El material de la estructura a proteger también condiciona la elección del revestimiento. Los morteros que tienen entre sus componentes el yeso y/o la escayola pueden, como es sabido, producir puntos de oxidación en los elementos de acero en presencia de humedad.

Entre los productos existentes en el mercado de este tipo pueden citarse, a modo de ejemplo, los siguientes:

MORTEROS DE ÁRIDOS LIGEROS

- Morteros de vermiculita y cemento Portland.
- Morteros a base de ligantes hidráulicos inorgánicos, áridos ligeros (perlita y vermiculita) y aditivos especiales.
- Morteros compuestos por áridos ligeros expandidos, de perlita y vermiculita, ligantes hidráulicos, controladores de fraguado y rodantes de proyección.
- Mortero de cemento con áridos ligeros de perlita y vermiculita expandida.

MORTEROS DE FIBRAS MINERALES

- Morteros de lana de roca y aglomerantes hidráulicos inorgánicos.
- Morteros de cemento y lana de roca.
- Morteros de por lanas minerales y aglomerantes hidráulicos inorgánicos.

2.2.1.2 PANELES

Los recubrimientos con paneles, placas, tableros y mantas colocados alrededor de las partes expuestas de los elementos de acero constituyen una protección bastante fácil de aplicar y crean

un perfil exterior estéticamente aceptable, pero complicado de ejecutar alrededor de detalles complejos tales como las uniones.

Los productos del tipo placas y paneles se obtienen por la combinación en diversas proporciones de los materiales antes indicados con ligantes como el yeso, la escayola y el cemento. En el mercado existen diferentes tipos de placas y paneles que permiten elegir determinadas características, además del coste del material y la instalación, como la composición, a base de polvo o fibra, el peso, la flexibilidad, las características de su superficie, dureza, aspecto, posibilidad de decoración etc.

Este sistema, aunque tiene como principal dificultad la correcta y estética ejecución de las juntas y uniones entre placas para asegurar la total estanqueidad al fuego, presenta muchas ventajas a tener en cuenta; entre ellas que se fabrican con un espesor uniforme, lo que permite asegurarse de que en cada caso se aplica el recubrimiento estimado como suficiente.

Como productos de este tipo se encuentran en el mercado, entre otros:

PANELES de FIBRAS MINERALES

- Paneles rígidos de lana de roca.
- Paneles de alta densidad de lana de roca.

PANELES de FIBROSILICATO

- Paneles a base de silicatos y Placas de silicato cálcico hidratado sintético de forma esférica reforzado con fibras integrado en una base mineral.

PANELES de YESO

- Normales: Laminado continuo constituido por un alma de yeso dihidrato entre dos celulosas especiales multihoja de igual porosidad que el alma.
- Mejorados: Laminado continuo constituido por un alma de yeso dihidrato (con fibra de vidrio incorporada) entre dos celulosas especiales multihoja de igual porosidad que el alma.

2.2.1.3 REVESTIMIENTOS INTUMESCENTES

Un sistema intumescente está formado por diversos componentes que, a partir de unos 200°, inician entre sí una serie de reacciones químicas que dan origen a la formación de una capa aislante.

Los compuestos con base de grafito que forman estos productos no tienen nada en común con los comentados anteriormente. Como sistemas de protección contra incendios los materiales intumescentes actúan de diversas formas:

- Consumen una gran cantidad de calor del incendio ya que la reacción química de la intumescencia es endotérmica.
- Los gases que desprenden actúan como refrigerantes de la capa intumescente en su escape hacia el exterior (conviene asegurarse de que estos gases no sean tóxicos).
- El volumen de espuma formada, muy porosa y llena de gases proporciona una capa de espesor controlado que actúa como aislante del elemento protegido.

Para la protección de estructuras los materiales intumescentes habitualmente utilizados son las pinturas, incluyendo diversos tipos de barnices para la madera, y los morteros extra-ligeros de bajo espesor. En general solo pueden llegar a proporcionar una resistencia al fuego de 120 minutos.

Los principales problemas que existen actualmente, en relación con estos productos, están relacionados con la falta de un conocimiento suficiente sobre su comportamiento. Existen dudas, por ejemplo, con la durabilidad del efecto intumescente; con su posible desprendimiento por efecto del chorro de agua; con la posibilidad de que alguno de los compuestos que lo forman desprenda gases tóxicos durante el incendio, etc.

En principio se pueden considerar las pinturas intumescentes como un modo de protección fácil de aplicar y de reparar. Sin embargo hay que poner especial atención al conjunto de operaciones a realizar y el correcto orden y ejecución de los productos a aplicar para obtener el sistema de protección requerido siendo fundamental seguir, en cada caso, las recomendaciones del fabricante.

Esquemáticamente, para proteger convenientemente una estructura mediante este sistema, hay que realizar las siguientes operaciones:

- Preparar la superficie de manera que esté completamente limpia y seca.
- Seleccionar una imprimación que debe ser anticorrosiva, ignífuga y compatible tanto con la preparación hecha como con el revestimiento intumescente elegido.
- Aplicar un revestimiento intumescente convenientemente acreditado e identificado; teniendo perfectamente determinado el espesor de cada capa a aplicar, el número de éstas y el intervalo de tiempo necesario para la aplicación de las distintas capas.
- Sellado de la protección intumescente (esto es necesario porque estos productos son porosos) para lo que, generalmente, se aplica una pintura o barniz que proporciona al elemento el acabado definitivo. Esta pintura debe ser compatible con el revestimiento intumescente, impermeable al agua y las agresiones y elástica.

Así pues, las pinturas intumescentes proporcionan un acabado decorativo bajo condiciones normales cuya espuma se hincha cuando es calentada, produciendo una capa termoaislante del orden de 50 veces el espesor original, y se aplican con brocha, pulverización o rodillo, con un espesor especificado que puede llevar a varias capas de pintura (debiendo observarse para su aplicación el cumplimiento de la norma UNE 48.287: “Sistemas de pinturas intumescentes para la protección del acero estructural”).

2.3 BASES DE CÁLCULO

2.3.1 MÉTODOS DE CÁLCULO

Es fundamental que, tanto para temperatura ambiente como para situaciones de fuego, los elementos estructurales que actúan a compresión y, total o parcialmente, a flexión estén clasificados de forma que se pueda establecer un método de cálculo adecuado (plástico o elástico)

El método de cálculo elástico finaliza el análisis cuando en alguno de los puntos de la sección analizada la tensión de comparación alcanza el valor del límite elástico (MOMENTO ELÁSTICO) y comienza la plastificación en dicho punto considerando, en ese momento, que la pieza está agotada.

Las observaciones realizadas sobre el comportamiento real de las piezas han permitido desarrollar el método de cálculo plástico al constatar que cuando se alcanza el momento elástico lo único que sucede es que se plastifican las fibras extremas de la sección (aunque no pueden fluir libremente ya que las restantes fibras de la sección permanecen en régimen elástico) produciéndose, si el momento de sollicitación supera al momento elástico, una plastificación de las fibras hacia el interior de la sección.

Cuando toda la sección se encuentra plastificada, el flector que actúa en ese instante sobre la sección será el máximo momento que puede soportar y se le denomina MOMENTO PLÁSTICO.

Al alcanzar el momento plástico en una sección del elemento (y plastificarse ésta) la pieza se comporta como si estuviese formada por dos trozos unidos mediante una articulación con rozamiento en esa sección y comienza a girar denominándose RÓTULA PLÁSTICA

2.3.1.1 CLASIFICACIÓN DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL

La CLASIFICACIÓN DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES consiste, básicamente, en comprobar la esbeltez de aquellos elementos de la sección transversal solicitados a compresión para valorar su vulnerabilidad al pandeo local de modo que determinemos si alguna parte de la sección puede fallar por abolladura antes de hacerlo por plastificación e impedir, así, la formación de la rótula plástica.



Imagen II.1 – Situaciones de pandeo local en alas y alma de perfiles sometidos a la acción del fuego (tomadas del Cardington Fire Test realizado en 2003)

La clasificación de las secciones transversales en situación de cálculo frente a fuego, se realiza de la misma forma que a temperatura normal.

Según su capacidad de rotación y de desarrollo del momento plástico las secciones de las piezas se clasifican en las cuatro clases siguientes:

CLASE 1	PLÁSTICA	Permiten la formación de la rótula plástica con la capacidad de rotación suficiente para la redistribución de momentos. Método de cálculo global plástico y método de cálculo para comprobación de secciones plástico.
CLASE 2	COMPACTA	Permiten el desarrollo y alcance del momento plástico pero con una capacidad de rotación limitada (no pueden girar a momento constante sin que aparezcan abolladuras locales) y no puede haber redistribución de momentos. Método de cálculo global elástico y método de cálculo para comprobación de secciones plástico.

CLASE 3	SEMI COMPACTA	En la fibra mas comprimida se puede alcanzar la tensión del límite elástico pero la abolladura impide el desarrollo del momento plástico. Método de cálculo global elástico y método de cálculo para comprobación de secciones elástico.
CLASE 4	ESBELTA	No pueden alcanzar, ni siquiera, el momento elástico, en estas secciones para determinar su resistencia, es necesario tener en cuenta explícitamente los efectos locales de abolladura. Método de cálculo global elástico con posible reducción de rigidez y método de cálculo para comprobación de secciones elástico con resistencia reducida.

Tabla II.6 – Clasificación de las secciones transversales en función de su vulnerabilidad al pandeo local.

Y, en función de su clasificación, se determinan los métodos de cálculo apropiados para los distintos tipos de secciones:

	MÉTODO DE CÁLCULO	
	GLOBAL	SECCIONES
CLASE 1	Plástico o Elástico	Plástico o Elástico
CLASE 2	Elástico	Plástico o Elástico
CLASE 3	Elástico	Elástico
CLASE 4	Elástico con posible reducción de rigidez	Elástico con resistencia reducida

Tabla II.7 – Método de cálculo en función de la clasificación de la sección transversal.

Los criterios para definir las Clases 1, 2 y 3 pueden encontrarse en el Art.20 “Clasificación de las secciones transversales” de la Instrucción EAE. Se consideran de Clase 4 los elementos que sobrepasan los límites para la Clase 3.

2.3.1.2 CÁLCULO DE LA TEMPERATURA CRÍTICA

2.3.1.2.1 En el dominio de la temperatura

La temperatura crítica de un elemento depende de la clasificación de su sección transversal, se ha convenido que, en elementos con secciones transversales de Clase 4, la temperatura del acero θ_s en todas las secciones transversales no debe superar los 350°.

En elementos con secciones transversales de Clase 1,2 y 3 la temperatura del acero θ_s que no se debe superar se puede determinar mediante un parámetro que adopta dos nombres diferentes pero que, conceptualmente, viene a ser el mismo:

- El factor de utilización
- El factor de reducción del límite elástico

ya que una vez obtenido éste se puede determinar el valor de la temperatura crítica por medios analíticos (factor de utilización) o interpolando en la tabla del apartado factor de reducción según se expone a continuación.

La temperatura crítica se puede determinar en función del factor de utilización μ_0 del elemento mediante la siguiente expresión:

$$\theta_{cr} = 39,19 \cdot \ln \left[\frac{1}{0,9674 \cdot \mu_0^{3,883}} - 1 \right] + 482$$

El factor de utilización μ_0 en el instante $t=0$ (es decir, a temperatura ambiente) puede obtenerse mediante la siguiente expresión:

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}}$$

En la que el valor resultante debe ser al menos 0,013 donde:

- $R_{fi,d,0}$ es el valor de cálculo $R_{fi,d,t}$ para el instante $t=0$ en situación de fuego
- $E_{fi,d}$ es el valor de cálculo de los efectos de las acciones en situación de fuego

2.3.1.2.2 En el dominio de la resistencia

En el dominio de la resistencia, para el tiempo exigido, debe verificarse la expresión:

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t}$$

donde:

- $E_{fi,d}$ es el valor de cálculo del efecto de las acciones para la situación de cálculo frente a fuego.
- $R_{fi,d,t}$ es el valor de la resistencia de cálculo del elemento para la situación de cálculo frente a fuego, en el instante t considerado.

El valor de cálculo de los efectos de las acciones (reacciones en los apoyos y esfuerzos internos) puede obtenerse a partir del análisis de la estructura para temperatura normal mediante la siguiente expresión:

$$E_{fi,d} = \eta_{fi} E_d$$

donde:

- E_d es el valor de cálculo del efecto de las acciones para la situación de cálculo a temperatura ambiente para una combinación fundamental de acciones.
- η_{fi} es el coeficiente de reducción de la carga de cálculo para la situación de cálculo frente a fuego, que se define mediante la siguiente expresión:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}$$

siendo:

- G_k es el valor característico de las acciones permanentes.
- $Q_{k,1}$ es el valor característico de la principal acción variable.
- γ_G es el coeficiente parcial para acciones permanentes.
- $\gamma_{Q,1}$ es el coeficiente parcial de la principal acción variable.
- Ψ_{fi} es el factor de combinación de valores.

Cuyos valores pueden obtenerse en las Tablas correspondientes tanto en el EC-3, como el DB SEA¹⁸, como la Instrucción EAE.

¹⁸ Documento Básico Seguridad Estructural – Acero” (DB SE-A) del Código Técnico de la Edificación del Ministerio de Vivienda.

2.3.1.2.3 Analogía entre el dominio de la resistencia y el de la temperatura

El valor de $R_{fi,d,t}$ se determina considerando la distribución de temperatura en la sección transversal y modificando las propiedades mecánicas del acero teniendo en cuenta su variación a temperaturas elevadas.

La capacidad resistente de un elemento en situación de fuego se deduce de la capacidad resistente a temperatura normal afectada por:

- El factor de reducción del límite elástico a la temperatura considerada.
- Mayorada por el coeficiente parcial de seguridad del acero γ_M (que anula el coeficiente introducido para el cálculo a temperatura normal)
- Minorada por el coeficiente parcial de seguridad del acero para la situación de cálculo frente a fuego (que al tomar el valor 1,00 no afecta a la expresión)

como podemos deducir del siguiente desarrollo, tomado del caso de tracción pura:

$$N_d = \frac{f_y \cdot A}{\gamma_M}$$

que, para una determinada temperatura resultaría:

$$N_{d,fi,\theta} = k_{y,\theta} \frac{f_y \cdot A}{\gamma_M} \frac{\gamma_M}{\gamma_{M,fi}}$$

en la que, simplificando, tenemos:

$$N_{d,fi,\theta} = k_{y,\theta} \cdot f_y \cdot A$$

es decir, para un determinado tiempo t, hay que afectar al límite elástico del correspondiente valor de reducción a la temperatura correspondiente:

$$R_{fi,d,t} = k_{y,\theta} \cdot R_{fi,d,0}$$

igualdad que, al sustituir en la inecuación

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t}$$

nos ofrece como resultado:

$$E_{fi,d} \leq k_{y,\theta} \cdot R_{fi,d,0}$$

en la que despejando obtenemos:

$$k_{y,\theta} \geq \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}}$$

Una vez determinado el valor mínimo que puede adoptar el factor de reducción del límite elástico del elemento para que no se produzca el colapso del mismo podemos (interpolando en la ya conocida tabla de valores del factor de reducción del límite elástico en función de la temperatura del acero) obtener la temperatura crítica del elemento:

θ_s	de 20 a 400°	500°	600°	700°	800°	900°	1000°	1100°	1200°
k_y	1,00	0,78	0,47	0,23	0,11	0,06	0,04	0,02	0,00

De las expresiones obtenidas en ambos casos resulta evidente la analogía entre los citados parámetros (factor de utilización y factor de reducción del límite elástico).

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} \quad k_{y,\theta} \geq \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}}$$

así como del gráfico resultante de la comparación entre la aplicación de la fórmula

$$\theta_{cr} = 39,19 \cdot \ln \left[\frac{1}{0,9674 \cdot \mu_0^{3,883}} - 1 \right] + 482$$

(válida en el entorno de temperaturas superiores a 400°) de la que se puede despejar el valor de μ_0 en función de la temperatura crítica y la tabla del apartado anterior (en la que se han interpolado linealmente los valores intermedios) obteniendo la siguiente tabla:

θ	μ_0	$k_{y,\theta}$
1200	0,01	0,00
1150	0,01	0,01
1100	0,02	0,02
1050	0,02	0,03
1000	0,03	0,04
950	0,04	0,05
900	0,06	0,06
850	0,09	0,09
800	0,12	0,11
750	0,17	0,17
700	0,24	0,23
650	0,33	0,35
600	0,45	0,47
550	0,61	0,63
500	0,79	0,78
450	0,92	0,89
400	0,98	1,00

Tabla II.8 – Analogía entre el dominio de la resistencia y el de la temperatura.

y el siguiente gráfico comparativo en el que, en el eje de abscisas se representan las temperaturas del acero y en el eje de ordenadas el valor del factor de reducción del límite elástico, correspondiendo la gráfica de color azul al calculado en el dominio de la temperatura y el de color granate al calculado en el dominio de la resistencia:

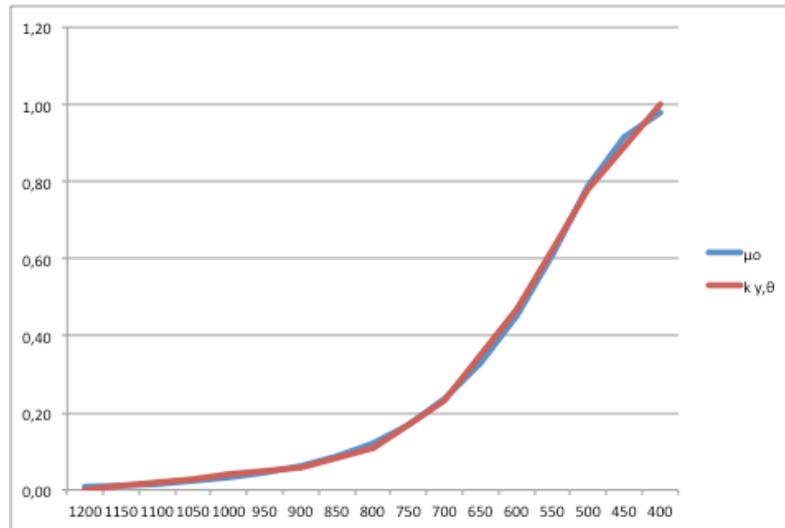


Gráfico II.4 – Analogía entre el dominio de la resistencia y el de la temperatura.

De todo lo expuesto se deduce que, en la práctica, para obtener el valor de la temperatura crítica de un elemento estructural de acero se trata de calcular el factor mínimo de reducción del límite elástico, es decir, el cociente:

$$\frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}}$$

2.3.1.2.4 Valores de cálculo del factor de reducción del límite elástico

Así pues, si despejamos de las ecuaciones para los diferentes tipos de solicitaciones contenidas tanto en el EC-3, como el DB SEA, como la Instrucción EAE, los valores del factor mínimo de reducción del límite elástico que determinan la temperatura crítica del elemento estructural d.en el dominio de la resistencia- serían los contenidos en la siguiente Tabla (que han sido los utilizados en la herramienta de cálculo desarrollada):

TRACCIÓN PURA	$k_{y,\theta} \geq \frac{E_{fi,d}}{f_y \cdot A}$
COMPRESIÓN PURA	$k_{y,\theta} \geq \frac{E_{fi,d}}{\chi_{fi} \cdot A \cdot f_y}$
FLEXIÓN PURA (1) Si la viga está arriostrada lateralmente $\chi_{LT,fi} = 1$	$k_{y,\theta} \geq \frac{E_{fi,d}}{\chi_{LT,fi} \cdot W_{PL/EL} \cdot f_y}$
CORTANTE PURO	$k_{y,\theta} \geq \frac{E_{fi,d} \cdot \sqrt{3}}{A_{v,net} \cdot f_y}$
FLEXIÓN + CORTANTE (2)	$k_{y,\theta} \geq \frac{E_{fi,d}}{W_{PL} \cdot (1 - \rho) \cdot f_y}$
FLEXIÓN + TRACCIÓN (3) Si la viga está arriostrada lateralmente $\chi_{LT,fi} = 1$	$\frac{N_{fi,d}}{k_{y,\theta} \cdot f_y \cdot A} + \frac{M_{fi,y,d}}{\frac{\chi_{LT,fi}}{12} \cdot W_{PL/EL,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y} + \frac{M_{fi,z,d}}{\frac{\chi_{LT,fi}}{12} \cdot W_{PL/EL,z} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y} \leq 1$

<p>FLEXIÓN + TRACCIÓN + CORTANTE (2) (3) Si la viga está arriostrada lateralmente $\chi_{LT.fi} = 1$</p>	$\frac{N_{fi,d}}{k_{y,\theta} \cdot f_y \cdot A} + \frac{M_{fi,y,d}}{\frac{\chi_{LT.fi}}{1,2} \cdot W_{PL/EL,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y \cdot (1 - \rho_y)} + \frac{M_{fi,z,d}}{\frac{\chi_{LT.fi}}{1,2} \cdot W_{PL/EL,z} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y \cdot (1 - \rho_z)} \leq 1$
<p>FLEXIÓN + COMPRESIÓN(3) Si la viga está arriostrada lateralmente $\chi_{LT.fi} = 1$</p>	$\frac{N_{fi,d}}{\frac{\chi_{fi}}{1,2} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y \cdot A} + \frac{M_{fi,y,d}}{\frac{\chi_{LT.fi}}{1,2} \cdot W_{PL/EL,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y} + \frac{M_{fi,z,d}}{\frac{\chi_{LT.fi}}{1,2} \cdot W_{PL/EL,z} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y} \leq 1$
<p>FLEXIÓN + COMPRESIÓN + CORTANTE (2) (3) Si la viga está arriostrada lateralmente $\chi_{LT.fi} = 1$</p>	$\frac{N_{fi,d}}{\frac{\chi_{fi}}{1,2} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y \cdot A} + \frac{M_{fi,y,d}}{\frac{\chi_{LT.fi}}{1,2} \cdot W_{PL/EL,y} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y \cdot (1 - \rho_y)} + \frac{M_{fi,z,d}}{\frac{\chi_{LT.fi}}{1,2} \cdot W_{PL/EL,z} \cdot k_{y,\theta} \cdot f_y \cdot (1 - \rho_z)} \leq 1$
<p>Con las siguientes observaciones</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) Se tomará el módulo resistente plástico para secciones de clase 1 y 2 y el módulo resistente elástico para secciones de clase 3. (2) Para perfiles laminados en I o H, en el caso de que el valor del cortante no supere la mitad de la capacidad de la sección podemos despreciar el efecto de interacción, es decir $\rho=0$ (3) En el caso de perfiles laminados en I o H, el efecto de interacción puede despreciarse si el valor del axil no llega a la mitad de la capacidad a tracción del alma o a un cuarto de la resistencia a tracción de la sección. 	

Tabla II.9 – Valores del factor mínimo de reducción del límite elástico en función del tipo de sollicitación.

2.3.1.3 CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DEL ACERO SIN PROTECCIÓN

Para una distribución uniforme de temperaturas equivalente en la sección transversal, el incremento de temperatura $\Delta_{s,t}$ en un elemento desprotegido de acero durante un intervalo de tiempo Δt se determina mediante la expresión:

$$\Delta \theta_{s,t} = k_{sh} \frac{1}{c_s \rho_s} \frac{A_m}{V} h_{net,d} \Delta t$$

donde:

- A_m/V es el factor de sección para elementos de acero sin protección. Puede considerarse para A_m/V un valor no inferior a 10 m^{-1} (A_m es la superficie perimetral expuesta al fuego del elemento por unidad de longitud [m^2/m] y V es el volumen del elemento por unidad de longitud [m^3/m])
- c_s es el calor específico del acero [J/kgK]
- ρ_s es la densidad del acero [Kg/m^3]
- $h_{net,d}$ es el valor de cálculo del flujo de calor neto por unidad de área [W/m^2]. Se considera el valor de cálculo del flujo de calor neto como la suma del valor del flujo de calor por radiación y el valor del flujo de calor por convección.
- Δt es el intervalo de tiempo [s]. Pudiendo considerarse para Δt un valor no superior a 5 segundos.
- k_{sh} es el factor de corrección del efecto sombra tal y como se indica en el Artículo 48 de la Instrucción EAE.

Una vez determinada la temperatura que alcanza el acero al final del tiempo de duración del incendio podemos comprobar si esta es inferior a la temperatura crítica. En caso de ser así el elemento no necesitaría protección, pero en caso contrario debemos proceder o a sobredimensionar el elemento y proceder de nuevo al cálculo de la temperatura del acero o a establecer que tipo y grado de protección necesita.

2.3.1.4 CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DEL ACERO PROTEGIDO

Para proteger a los elementos estructurales del flujo de calor proveniente de los gases del incendio, se revisten de materiales protectores de forma que se retarde el incremento de la temperatura del acero para que, de este modo, no se alcance su temperatura crítica.

Para calcular el espesor necesario del sistema de protección que deseamos utilizar se emplean alguno de los métodos usualmente descritos anteriormente, habiéndose utilizado para la herramienta, el de la ecuación diferencial incremental.

$$\Delta\theta_{s,t} = \frac{\lambda_p}{d_p c_s \rho_s} \frac{A_p}{V} \left(\frac{1}{1 + \phi/3} \right) (\theta_{g,t} - \theta_{s,t}) \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \geq 0$$

con el significado de los parámetros indicados en el Capítulo anterior.

2.4 DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO

El método de cálculo se ha desarrollado sobre una hoja de cálculo del programa MICROSOFT EXCEL que se incluye en el soporte informático adjunto a la presente Tesis y obedece al siguiente esquema.

2.4.1 DATOS DE ENTRADA

En la hoja aparecen una serie de celdas en color amarillo que corresponden a los valores de entrada que se necesitan introducir. En la cabecera de la hoja una fila para identificación del elemento estructural (número de pieza, posición...). La segunda indica, automáticamente, el tipo de sollicitación al que está sometido.

SOPORTE CENTRAL									
FLEXIÓN SIMPLE									
DATOS DE ENTRADA									
Escenario de incendio									
T _{R,REQ}	60	[min]	Curva de incendio			ESTANDAR			
Características geométricas									
Perfil	Luz [cm]	h [mm]	t _w [mm]	b [mm]	t _r [mm]	d [mm]		I _y [cm ⁴]	I _z [cm ⁴]
HEB 300	430,00	300,0	11,0	300,0	19,0	208,0		25.168,00	8.563,00
		A [cm ²]	A _w [m ² /m]	W _{ELy} [cm ³]	W _{ELz} [cm ³]	W _{PLYy} [cm ³]	W _{PLYz} [cm ³]	i _y [cm]	i _z [cm]
		149,10	1,732	1.677,80	570,90	1.868,80	870,10	12,99	7,58
Características mecánicas									
Acero	f _y [Mpa]	f _u [Mpa]	c [J/kg ^o K]	ρ [kg/m ³]	E [Mpa]				
S275	275	430	600	7.850	210.000				
Acciones y sollicitaciones									
Sustentación	G _s [kN/m ²]	Q _{s,t} [kN/m ²]	Tipo	N _i [Kn]	N _e [Kn]	M _y [Kn.m]	M _z [Kn.m]	V _y [Kn]	V _z [Kn]
1	3,75	2,00	5			10,00		18,85	

T _{R,REQ}	Tiempo de resistencia al fuego requerido por el elemento estructural, pudiéndose introducir el valor tabulado o el calculado por otros métodos analíticos como, por ejemplo el del tiempo equivalente.
Perfil	Tipo de perfil. Esta celda está vinculada a una tabla que proporciona automáticamente los valores geométricos y de cálculo de perfiles laminados comerciales. No obstante, son totalmente editables para el caso de querer introducir una sección especial o de que los datos vinculados no correspondan exactamente con el perfil a analizar.
Luz	Longitud del elemento estructural entre ejes.
Acero	Tipo de acero. Como en el caso anterior, esta celda está vinculada a una tabla que proporciona automáticamente las características mecánicas del tipo de acero siendo, asimismo, totalmente editables.

Sustentación	Condiciones de sustentación del elemento de acuerdo con la siguientes posibilidades: 1: Biarticulado/Biempotrado con desplazamiento 2: Articulado-empotrado 3: Biempotrado 4: Voladizo
G_k	Valor de la carga permanente que actúa sobre el elemento estructural.
$Q_{k,1}$	Valor de la principal carga variable que actúa sobre el elemento estructural.
Tipo	Tipo de la sollicitación que afecta al elemento estructural de acuerdo con las siguientes posibilidades: 1: Tracción pura (N) 2: Compresión pura (N) 3: Flexión pura (M) 4: Cortante puro (V) 5: Flexión simple (M+V) 6: Flexotracción (N+M+M) 7: Flexocompresión (N+M+M) En las siguientes celdas se introducen los valores de las sollicitaciones que correspondan.
Clase	Tipo de la sección para determinar el método de cálculo.
A_m	Perímetro de la sección expuesto al fuego. Para secciones no protegidas.
A_p	Perímetro del material de protección expuesto al fuego. Para secciones protegidas.
Material	Tipo de material protector. Esta celda está vinculada a una tabla que proporciona automáticamente los valores del material.
d	Espesor del material protector.

2.4.2 PROCESO DE CÁLCULO

La hoja comienza calculando la esbeltez mecánica (en función de las condiciones de apoyo), la esbeltez de Euler y la esbeltez adimensional (para elementos sometidos a compresión) al ser necesarios alguno o todos de estos parámetros para cálculos posteriores. La esbeltez reducida no se calcula, bien por no estar sometido el elemento a sollicitaciones de flexión o, en caso de ser así, por considerar que existe suficiente arriostamiento para que no se produzca pandeo lateral.

CLASIFICACIÓN DE LA SECCIÓN	
CLASE	1
CÁLCULO DE ESBELTECES	
Esbeltez mecánica	56,73
Esbeltez de Euler	86,81
Esbeltez adimensional	NO PROCEDE POR NO ESTAR SOLICITADO A COMPRESIÓN
Esbeltez reducida	NO PROCEDE POR ARRIOSTRAMIENTO LATERAL SUFICIENTE

El factor de reducción de las acciones se calcula tomando el valor del coeficiente de minoración de acciones cuasi-permanentes.

FACTOR DE REDUCCIÓN DE LAS ACCIONES			
γ_G	$\gamma_{Q,1}$	Uso	$\psi_{1,1}$
1,35	1,50	Residencial	0,30
η_n		0,5395	
TEMPERATURA CRÍTICA DEL ELEMENTO			
Valor mínimo del factor de reducción $k_{y,\theta}$			0,0691
Temperatura crítica (dominio temperatura) θ_{cr}			888,48 [°C]
Temperatura crítica (dominio resistencia) θ_{cr}			881,00 [°C]
Temperatura crítica del elemento θ_{cr}			881,00 [°C]

La temperatura crítica del elemento se obtiene del menor de los valores calculados por los dos procedimientos: la fórmula del dominio de la temperatura o, en el dominio de la resistencia, interpolando linealmente en la tabla que de factores de reducción del límite elástico en función de la temperatura alcanzada.

En cualquiera de los dos casos, es necesario el cálculo previo del coeficiente de utilización / factor de reducción del límite elástico que es hecho para cada uno de los distintos tipos casos de sollicitación del elemento de acuerdo a las fórmulas anteriormente indicadas.

1. Tracción pura
2. Compresión pura
3. Flexión pura
4. Cortante puro
5. Flexión simple
6. Flexotracción
7. Flexocompresión

A raíz de la realización de numerosos cálculos se ha constatado que, aún arrojando valores diferentes, los valores de temperatura crítica obtenidos por ambos métodos son sensiblemente iguales.

2.4.3 SALIDA DE RESULTADOS

La hoja de cálculo produce dos tablas como salida de resultados, la primera de ellas la evolución de la temperatura del acero sin proteger en función del tiempo transcurrido (también se incluye la temperatura del gas en el recinto y una cuarta columna que compara la temperatura alcanzada por el elemento con la temperatura crítica del mismo indicando su validez o invalidez)

TEMPERATURA DEL ACERO NO PROTEGIDO					
A_e [m ² /m]	V [m ² /m]	A_e / V [m ⁻¹]	Φ	ϵ_f	ϵ_m
0,619	0,01491	41,52	1,00	1,00	0,50
				α [W/m ² °K]	α_c [W/m ² °K]
				0,00000567	25
t (min)	θ_g [°C]	θ_s [°C]			
0,00	20,00	20,00	VALIDO		
1,00	349,21	117,05	VALIDO		
2,00	444,50	332,83	VALIDO		
3,00	502,29	471,88	VALIDO		
4,00	543,89	530,52	VALIDO		
5,00	576,41	567,62	VALIDO		
6,00	603,12	596,62	VALIDO		
7,00	625,78	620,69	VALIDO		
8,00	645,46	641,32	VALIDO		
9,00	662,85	659,39	VALIDO		
10,00	678,43	675,48	VALIDO		
15,00	738,56	736,94	VALIDO		
20,00	781,35	780,29	VALIDO		
30,00	841,80	841,20	VALIDO		
45,00	902,34	902,00	NO VALIDO		
60,00	945,34	945,11	NO VALIDO		

La segunda tabla es análoga a la primera pero, al tratarse de acero protegido, el rango de tiempos se establece en los valores fijados por el Real Decreto 312/2005 (modificado por el Real Decreto 110/2008).

TEMPERATURA DEL ACERO PROTEGIDO						
Material protector		Mortero de cemento-vermiculita				
A_e [m ² /m]	V [m ² /m]	A_e / V [m ⁻¹]	λ [W/m ² K]	d [m]	c [J/kg ² K]	ρ [kg/m ³]
0,640	0,00560	114,29	0,12	0,0200	1.100	650
t (min)	θ_g [°C]	θ_s [°C]				
0	20,00	20,00	VALIDO			
15	738,56	68,59	VALIDO			
20	781,35	93,61	VALIDO			
30	841,80	145,76	VALIDO			
45	902,34	224,53	VALIDO			
60	945,34	300,80	VALIDO			
90	1005,99	440,98	VALIDO			
120	1049,04	562,94	VALIDO			
180	1109,74	756,70	NO VALIDO			
240	1152,82	897,07	NO VALIDO			
360	1213,54	1074,23	NO VALIDO			

2.5 VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO

Esta herramienta de cálculo ha sido validada con el programa comercial ELEFIR (desarrollado por las Universidades de Lieja y Oporto) para comprobar que los resultados son concordantes, tal y como se puede apreciar en el gráfico obtenido para la misma pieza (HEB 140) e idénticas sollicitaciones con diversos espesores de revestimientos.

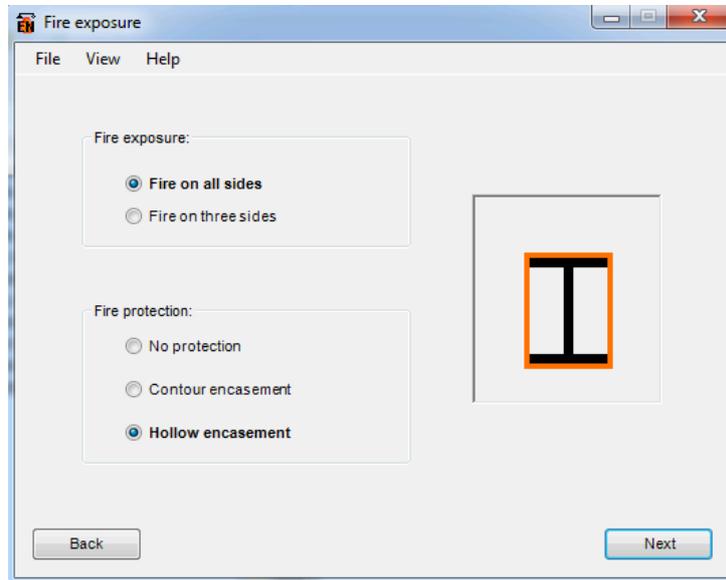


Gráfico II.5 – Pantalla de entrada de datos del programa ELEFIR.

2.5.1 HEB 140 REVESTIDO CON UNA PLACA

2.5.1.1 ELEFIR-EN REPORT

Project name: TESIS HEB 140 1 PLACA. Date: 08/08/2012

PROFILE: HE 140 B

STEEL: Carbon Steel

TIME FUNCTION OF TEMPERATURE: Steel temperature: 693 °C

EXPOSURE

Fire exposure: Fire on all sides

Fire protection: Hollow encasement

PROTECTION

Protection material: gypsum boards

Thickness: 15 mm

Thermal conductivity: $l = .2 \text{ W/mK}$

Unit mass: $r = 800 \text{ kg/m}^3$

Specific heat: $c = 1700 \text{ J/kgK}$

Moisture content: $p = 20 \%$. Consider the effect of moisture content? No

RESULTS

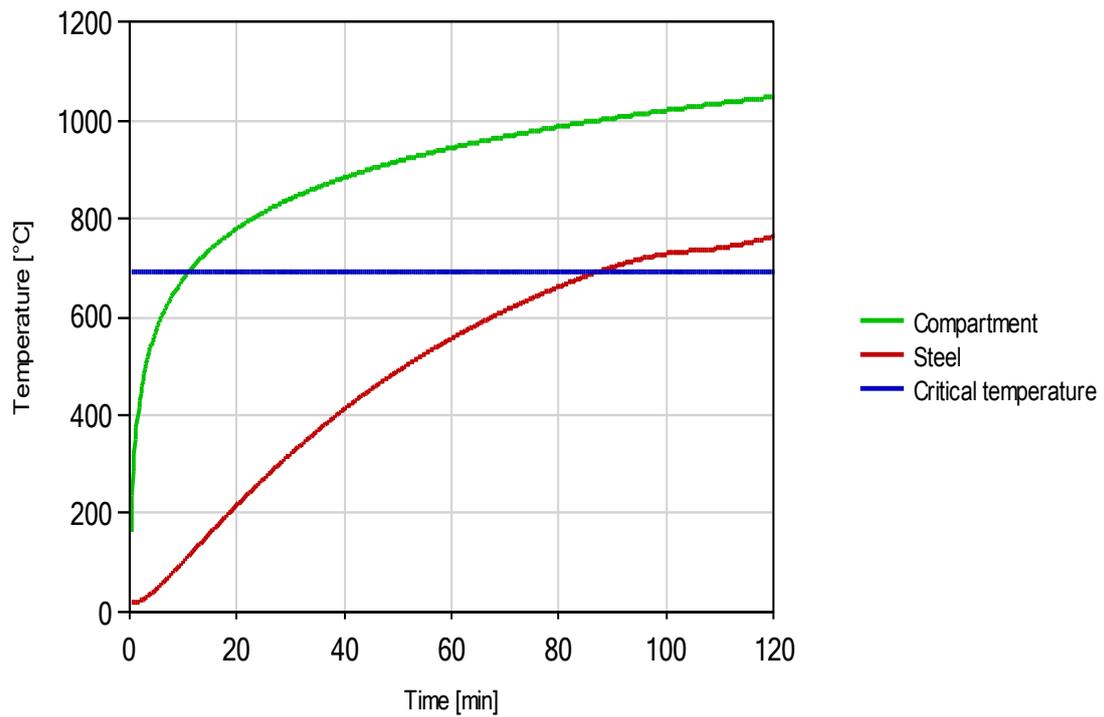
Standard fire curve, ISO 834

Section factor: $[A_p/V] = 130.4 \text{ m}^{-1}$

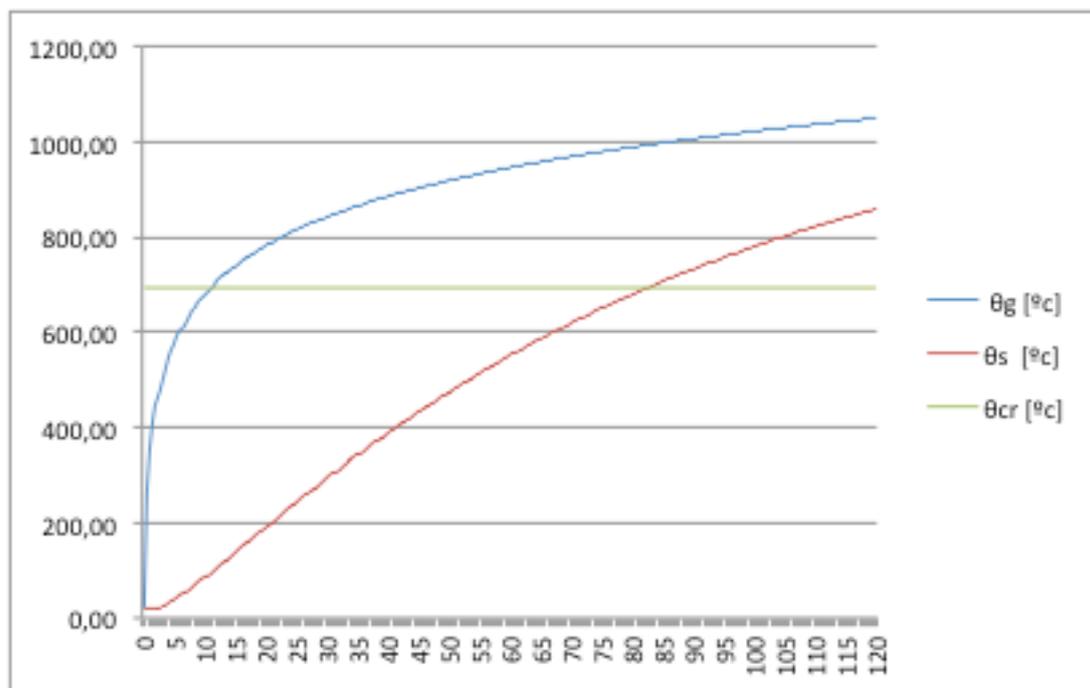
A temperature of 693.0 °C is reached after 87.42 minutes

GRAPH

FIRE COMPARTMENT AND STEEL TEMPERATURE



2.5.1.2 RESULTADOS XLS



TEMPERATURA DEL ACERO PROTEGIDO						
Material protector			Placas de cartón-yeso		CURVA NOMINAL ESTANDAR	
A_p [m ² /m]	V [m ³ /m]	A_p / V [m ⁻¹]	λ [W/m ² K]	d [m]	c [J/kg ^o K]	ρ [kg/m ³]
0,560	0,00430	130,23	0,20	0,0150	1.700	800
t (min)	θ_g [°C]	θ_s [°C]	θ_{cr} [°C]			
0	20,00	20,00	693,00	VALIDO		
15	738,56	137,04	693,00	VALIDO		
20	781,35	190,14	693,00	VALIDO		
30	841,80	293,15	693,00	VALIDO		
45	902,34	432,30	693,00	VALIDO		
60	945,34	550,69	693,00	VALIDO		
90	1005,99	732,40	693,00	NO VALIDO		
120	1049,04	858,38	693,00	NO VALIDO		
180	1109,74	1010,31	693,00	NO VALIDO		
240	1152,82	1093,65	693,00	NO VALIDO		
360	1213,54	1183,31	693,00	NO VALIDO		

El acero alcanza la temperatura de 693° a los 83 minutos (lo que supone una diferencia de 4 minutos respecto a los resultados obtenidos con ELEFIR)

2.5.2 HEB 140 REVESTIDO CON DOS PLACAS

2.5.2.1 ELEFIR-EN REPORT

Project name: TESIS HEB 140 2 PLACAS. Date: 08/08/2012

PROFILE: HE 140 B

STEEL: Carbon Steel

TIME FUNCTION OF TEMPERATURE: Steel temperature: 693 °C

EXPOSURE

Fire exposure: Fire on all sides

Fire protection: Hollow encasement

PROTECTION

Protection material: gypsum boards

Thickness: 30 mm

Thermal conductivity: $l = .2 \text{ W/mK}$

Unit mass: $r = 800 \text{ kg/m}^3$

Specific heat: $c = 1700 \text{ J/kgK}$

Moisture content: $p = 20 \%$. Consider the effect of moisture content? No

RESULTS

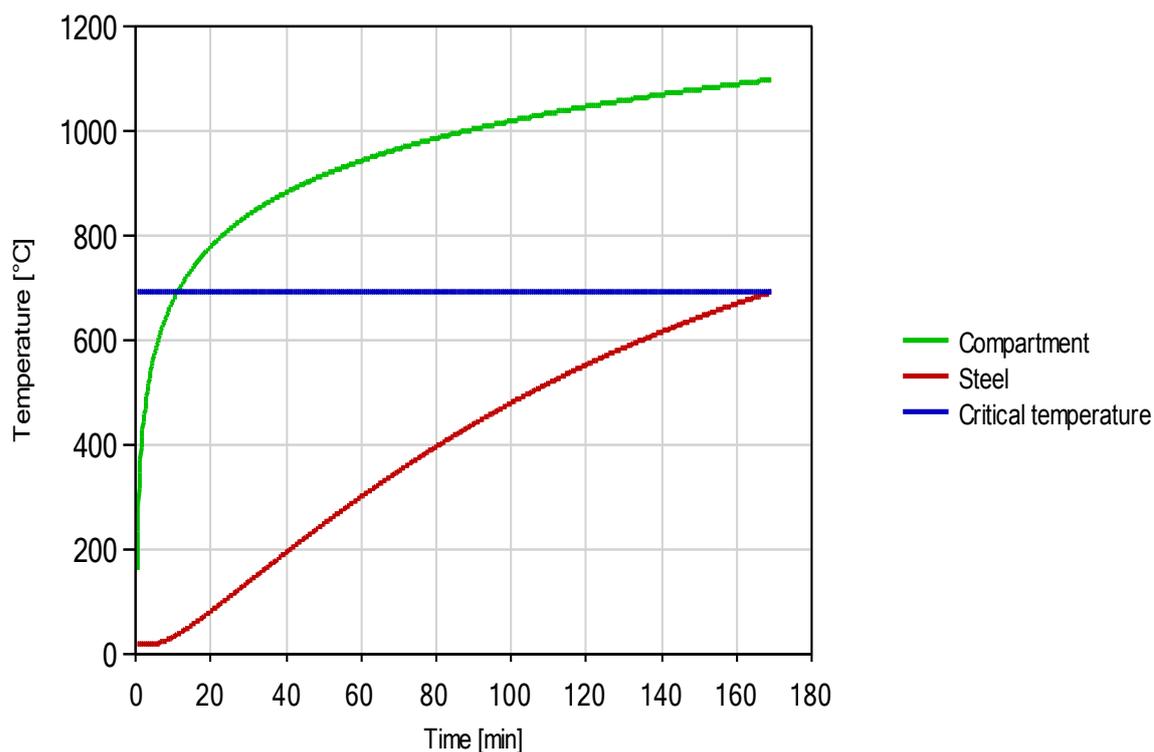
Standard fire curve, ISO 834

Section factor: $[A_p/V] = 130.4 \text{ m}^{-1}$

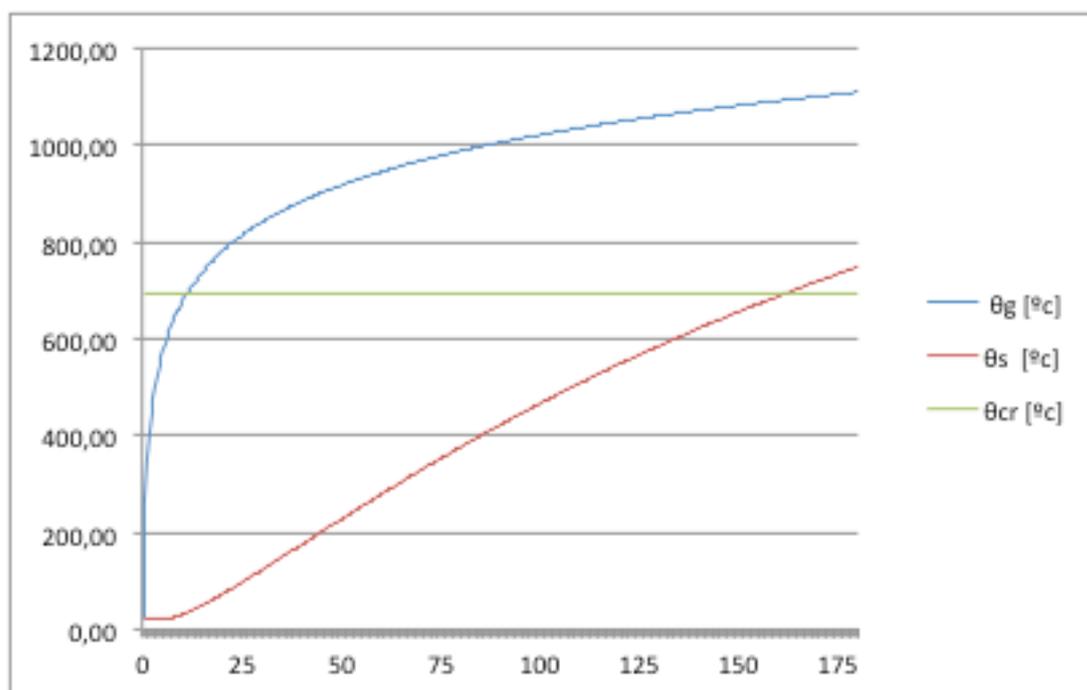
A temperature of 693.0 °C is reached after 168.97 minutes

GRAPH

FIRE COMPARTMENT AND STEEL TEMPERATURE



2.5.2.2 RESULTADOS XLS



TEMPERATURA DEL ACERO PROTEGIDO						
Material protector		Placas de cartón-yeso			CURVA NOMINAL ESTANDAR	
A_p [m ² /m]	V [m ³ /m]	A_p / V [m ⁻¹]	λ [W/m ² K]	d [m]	c [J/kg ^o K]	ρ [kg/m ³]
0,560	0,00430	130,23	0,20	0,0300	1.700	800
t (min)	θ_g [°C]	θ_s [°C]	θ_{cr} [°C]			
0	20,00	20,00	693,00	VALIDO		
15	738,56	50,64	693,00	VALIDO		
20	781,35	73,43	693,00	VALIDO		
30	841,80	123,55	693,00	VALIDO		
45	902,34	202,02	693,00	VALIDO		
60	945,34	279,36	693,00	VALIDO		
90	1005,99	422,97	693,00	VALIDO		
120	1049,04	548,49	693,00	VALIDO		
180	1109,74	747,86	693,00	NO VALIDO		
240	1152,82	891,73	693,00	NO VALIDO		
360	1213,54	1071,92	693,00	NO VALIDO		

El acero alcanza la temperatura de 693° a los 163 minutos (lo que supone una diferencia de 6 minutos respecto a los resultados obtenidos con ELEFIR)

2.5.3 HEB 140 REVESTIDO CON TRES PLACAS

2.5.3.1 ELEFIR-EN REPORT

Project name: TESIS HEB 140 3 PLACAS. Date: 08/08/2012

PROFILE: HE 140 B

STEEL: Carbon Steel

TIME FUNCTION OF TEMPERATURE: Steel temperature: 693 °C

EXPOSURE

Fire exposure: Fire on all sides

Fire protection: Hollow encasement

PROTECTION

Protection material: gypsum boards

Thickness: 45 mm

Thermal conductivity: $l = .2 \text{ W/mK}$

Unit mass: $r = 800 \text{ kg/m}^3$

Specific heat: $c = 1700 \text{ J/kgK}$

Moisture content: $p = 20 \%$. Consider the effect of moisture content? No

RESULTS

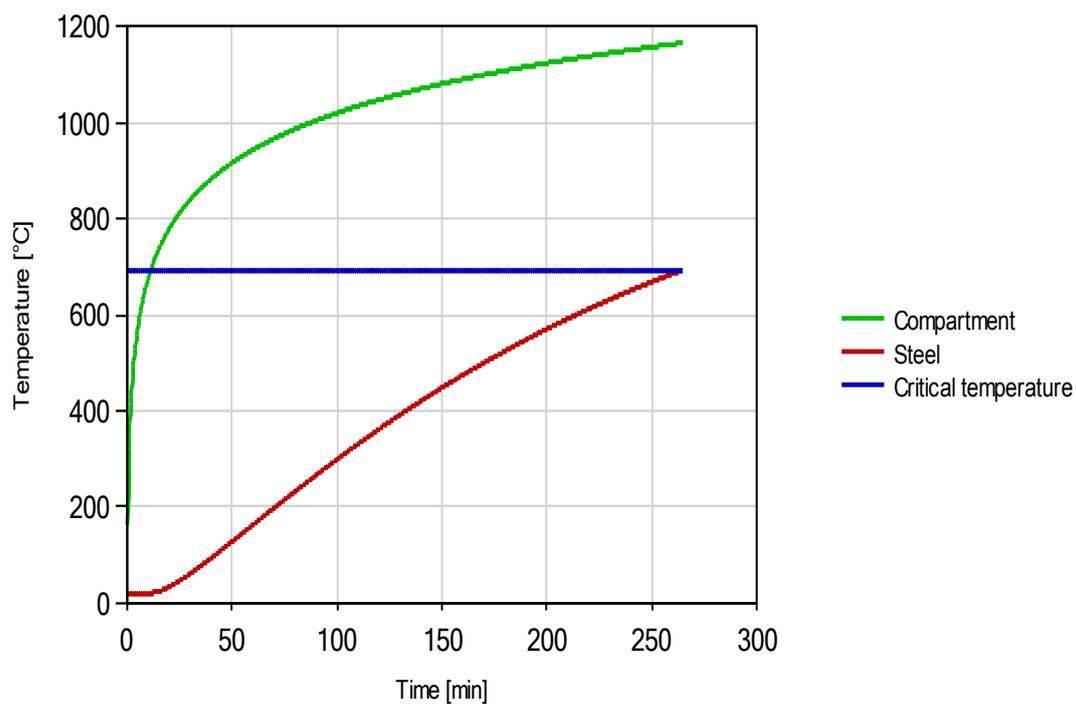
Standard fire curve, ISO 834

Section factor: $[A_p/V] = 130.4 \text{ m}^{-1}$

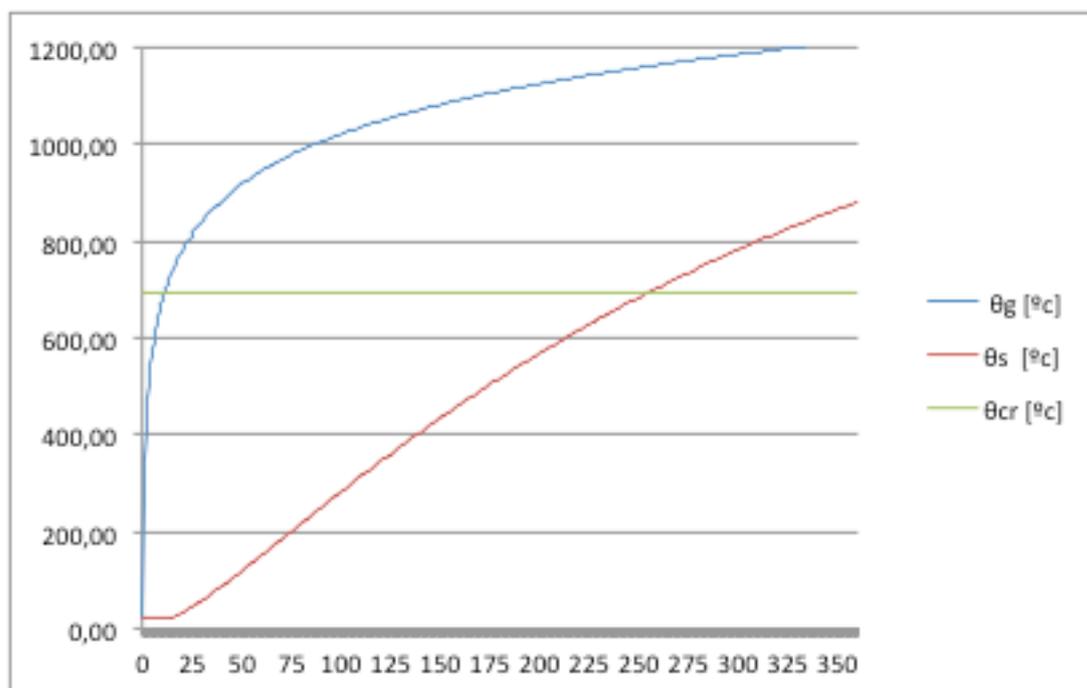
A temperature of 693.0 °C is reached after 264,23 minutes

GRAPH

FIRE COMPARTMENT AND STEEL TEMPERATURE



2.5.3.2 RESULTADOS XLS



TEMPERATURA DEL ACERO PROTEGIDO						
Material protector		▶	Placas de cartón-yeso		CURVA NOMINAL ESTANDAR	
A_p [m ² /m]	V [m ³ /m]	A_p / V [m ⁻¹]	λ [W/m ² K]	d [m]	c [J/kg ^o K]	ρ [kg/m ³]
0,560	0,00430	130,23	0,20	0,0450	1.700	800
t (min)	θ_g [°C]	θ_s [°C]	θ_{cr} [°C]			
0	20,00	20,00	693,00	VALIDO		
15	738,56	24,67	693,00	VALIDO		
20	781,35	33,76	693,00	VALIDO		
30	841,80	58,55	693,00	VALIDO		
45	902,34	103,33	693,00	VALIDO		
60	945,34	151,73	693,00	VALIDO		
90	1005,99	250,34	693,00	VALIDO		
120	1049,04	345,69	693,00	VALIDO		
180	1109,74	517,73	693,00	VALIDO		
240	1152,82	662,61	693,00	VALIDO		
360	1213,54	881,36	693,00	NO VALIDO		

El acero alcanza la temperatura de 693° a los 256 minutos (lo que supone una diferencia de 8 minutos respecto a los resultados obtenidos con ELEFIR)

2.5.4 HEB 140 REVESTIDO CON CUATRO PLACAS

2.5.4.1 ELEFIR-EN REPORT

Project name: TESIS HEB 140 4 PLACAS. Date: 08/08/2012

PROFILE: HE 140 B

STEEL: Carbon Steel

TIME FUNCTION OF TEMPERATURE: Steel temperature: 693 °C

EXPOSURE

Fire exposure: Fire on all sides

Fire protection: Hollow encasement

PROTECTION

Protection material: gypsum boards

Thickness: 60 mm

Thermal conductivity: $l = .2 \text{ W/mK}$

Unit mass: $r = 800 \text{ kg/m}^3$

Specific heat: $c = 1700 \text{ J/kgK}$

Moisture content: $p = 20 \%$. Consider the effect of moisture content? No

RESULTS

Standard fire curve, ISO 834

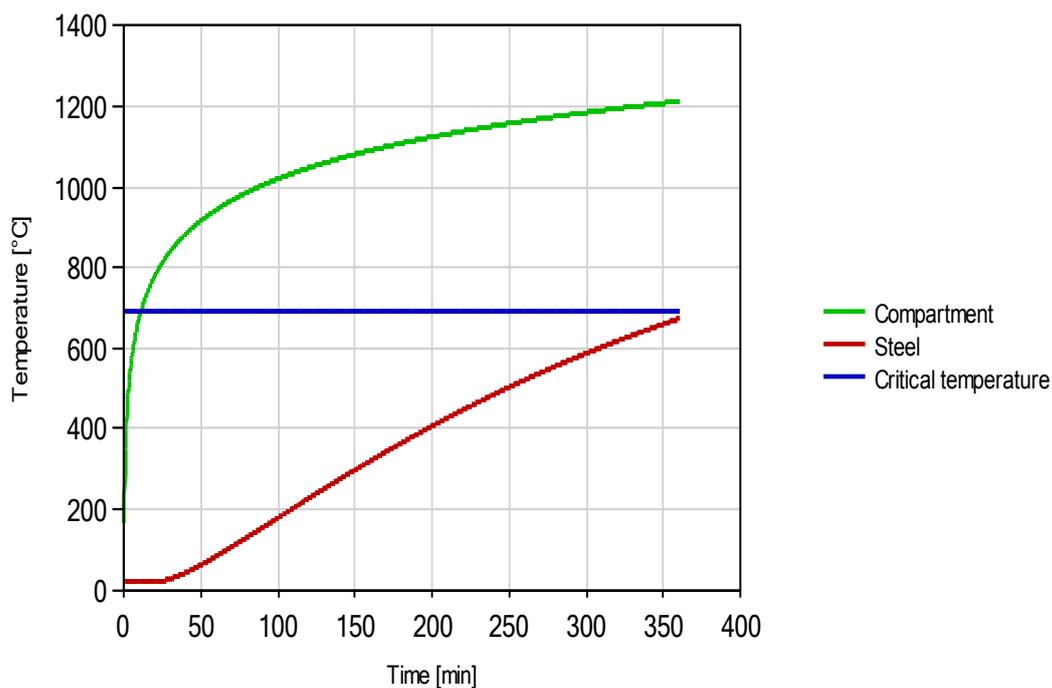
Section factor: $[A_p/V] = 130.4 \text{ m}^{-1}$

The temperature was not reached before 360.0 minutes.

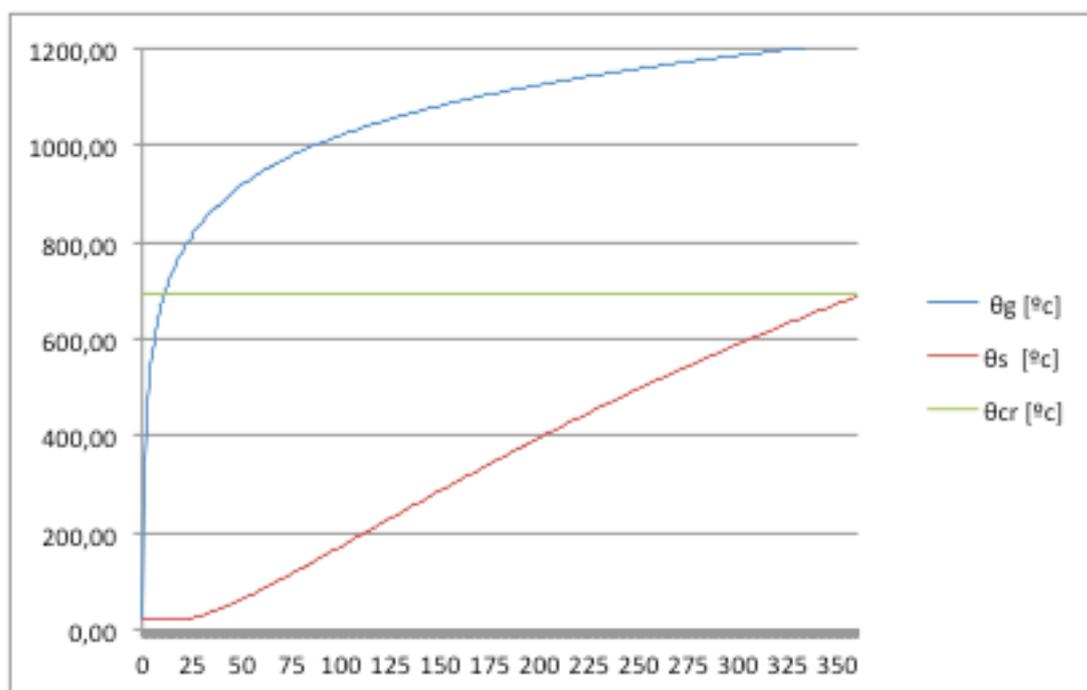
[Maximum temperature] Steel: 673.9 °C at 360.00 min

GRAPH

FIRE COMPARTMENT AND STEEL TEMPERATURE



2.5.4.2 RESULTADOS XLS



TEMPERATURA DEL ACERO PROTEGIDO						
Material protector		Placas de cartón-yeso			CURVA NOMINAL ESTANDAR	
A_p [m ² /m]	V [m ³ /m]	A_p / V [m ⁻¹]	λ [W/m ² K]	d [m]	c [J/kg ^o K]	ρ [kg/m ³]
0,560	0,00430	130,23	0,20	0,0600	1.700	800
t (min)	θ_g [°C]	θ_s [°C]	θ_{cr} [°C]			
0	20,00	20,00	693,00	VALIDO		
15	738,56	20,00	693,00	VALIDO		
20	781,35	20,79	693,00	VALIDO		
30	841,80	30,03	693,00	VALIDO		
45	902,34	53,89	693,00	VALIDO		
60	945,34	83,44	693,00	VALIDO		
90	1005,99	149,58	693,00	VALIDO		
120	1049,04	218,61	693,00	VALIDO		
180	1109,74	353,73	693,00	VALIDO		
240	1152,82	478,32	693,00	VALIDO		
360	1213,54	689,24	693,00	VALIDO		

El acero no alcanza la temperatura de 693° a los 360 minutos. La temperatura del acero a los 360 minutos es de 689°.

2.6 CONCLUSIONES

- Para el cálculo de la temperatura del acero mediante la ecuación diferencial se ha desarrollado, en la presente Tesis, una herramienta con una hoja de cálculo en la que, introduciendo datos del elemento estructural y de sus solicitaciones, se determina la temperatura crítica y, posteriormente, la temperatura que alcanza el elemento estructural, tanto sin protección como protegido por un material que se puede elegir entre un listado de los mas habituales.
- Los valores de temperatura crítica del elemento estructural obtenidos mediante la formulación propuesta en el dominio de la resistencia y en el dominio de la temperatura son sensiblemente iguales.
- Para el cálculo en el dominio de la resistencia se propone una tabla de fórmulas que relacionan el factor de reducción del límite elástico con las diversas solicitaciones a la que puede estar sometida la pieza o elemento estructural.
- Esta herramienta ha sido validada con el programa comercial ELEFIR (desarrollado por las Universidades de Lieja y Oporto) para comprobar que los resultados son concordantes, tal y como se puede apreciar en los resultados obtenidos para la misma pieza e idénticas solicitaciones.

3 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS DE CÁLCULO SIMPLIFICADOS

Con el fin de determinar cual de los cuatro métodos simplificados descritos arroja una mayor precisión en el cálculo del espesor de material de protección necesario, se ha realizado un estudio aplicando cada uno de los procedimientos a diversas piezas sometidas a diferentes tipos de solicitaciones, tal y como se indica a continuación.

3.1 DATOS DE ENTRADA

Se han utilizado los siguientes datos correspondientes a un caso real de elementos estructurales calculados para un edificio de viviendas

	SOLICITACIONES SIMPLES				SOLICITACIONES COMBINADAS	
	TRACCIÓN	COMPRESIÓN	FLEXIÓN	CORTANTE	FLEX. SIMPLE	FLEXOCOMP.
Acero	S275	S275	S275	S275	S275	S275
Perfil	IPN160	HEB140	UPN180	UPN180	IPN200	2UPN180
Luz [cm]	427	500	270	270	430	500
Sustentación	1	2	1	1	1	3
G_k [kN/m ²]	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75
$Q_{k,1}$ [kN/m ²]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
N_t [Kn]	14,36					
N_c [Kn]		177,70				496,00
M_y [Kn.m]			23,63		10,00	0,60
M_z [Kn.m]						8,00
V_y [Kn]				31,71	18,85	

Tabla III.1 – Datos de entrada para el análisis comparativo de métodos de cálculo.

Como se puede observar, se han seleccionado todos los posibles casos de sollicitación de piezas y con esos datos de partida se ha calculado el espesor de la protección necesaria mediante los diversos métodos indicados.

3.2 CÁLCULO DEL ESPESOR DE LA PROTECCIÓN

3.2.1 TABLA ANEJO D - DB-SI

Se adjunta a continuación una tabla con los valores de espesor de material de protección obtenidos al aplicar la Tabla contenida en el Anejo D del DB SI para el cálculo del mismo:

			TRACCIÓN	COMPRESIÓN	FLEXIÓN	CORTANTE	FLEX.SIMPLE	FLEXOCOMP.
COEFICIENTE DE UTILIZACIÓN			0,1208	0,2462	0,259	0,0748	0,2468	0,3899
			$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$
			252,19	187,21	189,64	189,64	185,23	114,29
Material protector	$\lambda [W/m^{\circ}C]$	$T_{R,REQ} [min]$	Coeficiente d/ λ					
Mortero de perlita/vermiculita	0,15	60	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
		90	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
		120	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,15
			Espesores en metros					
60		60	0,01500	0,01500	0,01500	0,01500	0,01500	0,01500
		90	0,02250	0,02250	0,02250	0,02250	0,02250	0,02250
		120	0,03000	0,03000	0,03000	0,03000	0,03000	0,02250
			$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$
			205,26	130,33	153,57	153,57	146,71	114,29
Material protector	$\lambda [W/m^{\circ}C]$	$T_{R,REQ} [min]$	Coeficiente d/ λ					
Placas de silicato cálcico	0,06	60	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
		90	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
		120	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,15
			Espesores en metros					
60		60	0,00600	0,00600	0,00600	0,00600	0,00600	0,00600
		90	0,00900	0,00900	0,00900	0,00900	0,00900	0,00900
		120	0,01200	0,01200	0,01200	0,01200	0,01200	0,00900
			$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$
			252,19	187,21	189,64	189,64	185,23	114,29
Material protector	$\lambda [W/m^{\circ}C]$	$T_{R,REQ} [min]$	Coeficiente d/ λ					
Pintura intumescente	0,01	60	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
		90	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
		120	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,15
			Espesores en metros					
60		60	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100	0,00100
		90	0,00150	0,00150	0,00150	0,00150	0,00150	0,00150
		120	0,00200	0,00200	0,00200	0,00200	0,00200	0,00150

Tabla III.2 – Resultados del cálculo según la Tabla del Anejo D del DB SI.

3.2.2 ECUACIÓN DE LA CECM

Se adjunta a continuación una tabla con los valores de espesor de material de protección obtenidos al aplicar la fórmula propuesta por la CECM para el cálculo del mismo:

			TRACCIÓN	COMPRESIÓN	FLEXIÓN	CORTANTE	FLEX.SIMPLE	FLEXOCOMP.
$\theta_{cr,S} [^{\circ}C]$			791	693	687	870	692	628
			$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$
			252,19	187,21	189,64	189,64	185,23	114,29
Material protector	$T_{R,REQ} [min]$	$\lambda [W/m^{\circ}C]$	Espesores en metros					
Mortero de perlita/vermiculita	60	0,15	0,01421	0,01304	0,01339	0,00921	0,01293	0,00936
	90	0,15	0,02405	0,02207	0,02268	0,01559	0,02189	0,01585
	120	0,15	0,03495	0,03207	0,03295	0,02265	0,03180	0,02303
			$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$
			205,26	130,33	153,57	153,57	146,71	114,29
Material protector	$T_{R,REQ} [min]$	$\lambda [W/m^{\circ}C]$	Espesores en metros					
Placas de silicato cálcico	60	0,06	0,00463	0,00363	0,00434	0,00298	0,00410	0,00374
	90	0,06	0,00783	0,00615	0,00735	0,00505	0,00693	0,00634
	120	0,06	0,01138	0,00893	0,01067	0,00734	0,01008	0,00921
			$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$	$A_p / V [m^{-1}]$
			252,19	187,21	189,64	189,64	185,23	114,29
Material protector	$T_{R,REQ} [min]$	$\lambda [W/m^{\circ}C]$	Espesores en metros					
Pintura intumescente	60	0,01	0,00095	0,00087	0,00089	0,00061	0,00086	0,00062
	90	0,01	0,00160	0,00147	0,00151	0,00104	0,00146	0,00106
	120	0,01	0,00233	0,00214	0,00220	0,00151	0,00212	0,00154

Tabla III.3 – Resultados del cálculo según la fórmula de la CECM.

3.2.3 DATOS DEL FABRICANTE SEGÚN UNE-ENV 13 381

Se han calculado los espesores de material según los datos aportados por algunos fabricantes de acuerdo con los siguientes datos de catálogo:

3.2.3.1 PINTURA INTUMESCENTE

Masividad	Espesor (µm)					
	m ⁻¹	15 min.	30 min.	45 min.	60 min.	90 min.
68		(286)	(286)	(342)	(585)	(1070)
70		(286)	(286)	355	602	1098
80		(286)	(286)	413	686	(1232)
90		(286)	(286)	467	764	---
100		(286)	(286)	518	836	---
110		(286)	(286)	565	904	---
120		(286)	(286)	610	968	---
130		(286)	(286)	652	1028	---
140		(286)	(298)	691	1084	---
150		(286)	319	728	1137	---
160		(286)	339	763	1187	---
170		(286)	357	796	(1234)	---
180		(286)	375	827	(1279)	---
190		(286)	392	857	---	---
200		(286)	408	885	---	---
210		(286)	423	912	---	---
220		(286)	438	937	---	---
230		(286)	452	962	---	---
240		(286)	465	985	---	---
250		(286)	477	1007	---	---
260		(286)	489	1028	---	---
270		(286)	501	1049	---	---
280		(286)	(512)	(1068)	---	---
290		(286)	(523)	(1087)	---	---
300		(286)	(533)	(1105)	---	---

Tabla válida para 500 °C de temperatura en el acero.
 Los valores entre parentesis se han evaluado extrapolando en un 5% los espesores ensayados y en un 10% los valores de masividad.
 s/ UNE ENV 13381-4: 2005

3.2.3.2 MORTERO PROYECTADO

Factor de Forma (m ⁻¹)	65	70	75	80	85	90	95	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340		
Espeor (mm) R (EF) 15	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
R (EF) 30	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	12	12	13	13	13	14	14	14	14	14	15	15	15	15	15	15	15	15	16	16	16	16	16
R (EF) 60	11	11	12	13	14	15	15	16	16	17	18	18	19	19	20	20	20	21	21	21	21	21	22	22	22	22	22	22	22	23	23	23	23	23
R (EF) 90	17	18	19	20	20	21	22	22	23	24	25	25	26	26	26	27	27	27	28	28	28	28	28	29	29	29	29	29	29	29	29	29	29	30
R (EF) 120	23	24	25	26	27	28	28	29	30	31	31	32	32	33	33	33	34	34	34	35	35	35	35	35	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
R (EF) 180	36	37	38	39	40	41	41	42	43	44	45	45	46	46	47	47	47	48	48	48	48	49	49	49	49	49	49	50	50	50	50	50	50	50
R (EF) 240	49	50	51	52	53	54	55	55	56	57	58	59	59	60	60	60	61	61	61	62	62	62	62	63	63	63	63	63	63	63	63	63	-	-

Tabla de espesores para una Temperatura Crítica de referencia de 500°C

3.2.3.3 REVESTIMIENTO CON PLACAS

Tabla de espesores de Promatect® 200 para pilares y vigas según Norma UNE ENV 13381-4																																
Factor de Forma (m ⁻¹)	60	65	70	75	80	85	90	95	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330
Espesor (mm)	R 15	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	
	R 30	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	
	R 60	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	15	16	17	17	18	19	19	19	20	20	21	21	21	22	22	22	22	23	23	23	23
	R 90	14	15	16	17	18	19	20	21	21	23	24	25	26	27	27	28	29	29	30	30	31	31	31	32	32	32	33	33	33	33	33
	R 120	20	22	23	25	26	27	28	29	30	31	33	34	35	36	37	37	38	39	39	40	40	41	41	42	42	42	43	43	43	44	44
	R 180	35	37	38	40	42	43	44	46																							

Tª Crítica: 500 °C

Tabla de espesores de Promatect® H para pilares y vigas según Norma UNE ENV 13381-4																											
Factor de Forma (m ⁻¹)	45	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	265			
Espesor (mm)	R 15	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14		
	R 30	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14		
	R 45	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	15	15	16	16	16	17	17	17	17	17	17	18	18	18
	R 60	14	14	14	14	14	15	16	17	17	18	19	19	20	20	21	21	21	21	22	22	22	22	23	23		
	R 90	14	15	17	20	21	23	24	25	26	27	28	28	29	29	30	30	31	31	31	32	32	32	32	32	32	
	R 120	20	21	25	27	29	31	32	34	35	36	36	37	38	38	39	39	40	40	41	41	41	42	42	42		
	R 180	33	35	39	42	45	47	49	51	52	53	54	55	56	57	57	58	59	59	60	60	61	61	61	61		
	R 240	46	49	54	58	61	63	66	68																		

Tª Crítica: 500 °C

Espesores válidos para perfiles en H e I, así como para perfiles tubulares cuadrados y redondos y en general todo tipo de perfiliería, de acuerdo con la Norma UNE ENV 13381-4 Anexo B.

Siendo los resultados obtenidos los que se indican a continuación.

R	60	90	120	60	90	120	60	90	120	60	90	120	60	90	120	60	90	120
MORTERO PROYECTADO	Mortero de perlita-vermiculita ($\lambda=0,15 / c=1.100 / \rho=800$) Espesor de la protección en mm																	
Factor de sección (m ²)	252,19			187,21			189,64			189,64			185,33			114,29		
CTE DB Si Anejo D	15	22	30	15	22	30	15	22	30	15	22	30	15	22	30	15	22	30
C.E.C.M.	14	24	35	13	22	32	13	22	32	9	16	23	13	22	32	9	16	23
Fabricante	22	28	35	20	27	34	20	27	34	20	27	34	20	27	34	20	27	34
XLS	10	20	25	15	20	25	15	20	25	7	12	17	11	18	24	9	15	20
REVESTIMIENTO DE PLACAS	Placas de silicato cálcico ($\lambda=0,06 / c=1.100 / \rho=220$) Espesor de la protección en mm																	
Factor de sección (m ²)	205,26			130,23			153,57			153,57			146,71			114,29		
CTE DB Si Anejo D	6	9	12	6	9	12	6	9	12	6	9	12	6	9	12	6	9	12
C.E.C.M.	5	8	11	4	6	9	4	7	11	3	5	7	4	7	10	4	6	9
Fabricante	21	31	40	18	27	36	19	28	37	19	28	37	19	28	37	19	28	37
XLS	4	7	10	5	6	9	5	7	10	2	4	6	6	7	10	4	7	9
PINTURA INTUMESCENTE	Pintura intumescente ($\lambda=0,01 / c=0 / \rho=0$) Espesor de la protección en micras																	
Factor de sección (m ²)	252,19			187,21			189,64			189,64			185,33			114,29		
CTE DB Si Anejo D	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20
C.E.C.M.	10	16	23	9	15	21	9	15	22	6	10	15	9	15	21	6	11	15
Fabricante							11			11			11			9		
XLS	7	12	18	7	12	18	8	13	18	4	7	11	7	12	18	6	9	13

* Todos los datos de fabricantes son para una $\theta_{cr}=500^\circ\text{C}$

Tabla III.4 – Resultados del cálculo según los datos facilitados por los fabricantes.

3.2.4 ECUACIÓN DIFERENCIAL INCREMENTAL

En el Apéndice 1 de la presente Tesis se detallan los resultados obtenidos por aplicación de la herramienta de cálculo basada en la ecuación diferencial incremental.

3.2.5 ANÁLISIS COMPARATIVO

En la siguiente hoja de cálculo pueden observarse agrupados los datos así como, a continuación, una serie de gráficos¹⁹ agrupados por tipo de sollicitación que reflejan los resultados del estudio:

	SOLICITACIONES SIMPLES						SOLICITACIONES COMBINADAS					
	TRACCIÓN	COMPRESIÓN	FLEXIÓN	CORTANTE	FLEX. SIMPLE	FLEXOCOMP.	TRACCIÓN	COMPRESIÓN	FLEXIÓN	CORTANTE	FLEX. SIMPLE	FLEXOCOMP.
Acero	S275	S275	S275	S275	S275	S275	S275	S275	S275	S275	S275	S275
Perfil	IPN160	HEB140	UPN180	UPN180	IPN200	2UPN180	IPN160	HEB140	UPN180	IPN200	2UPN180	2UPN180
Luz [cm]	427	500	270	270	430	500	427	500	270	430	500	500
Sustentación	1	2	1	1	1	3	1	2	1	1	3	3
G ₁ [kN/m ²]	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75
Q _{4,1} [kN/m ²]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
N ₁ [Kn]	14,36											
N ₂ [Kn]		177,70										496,00
M ₁ [Kn.m]			23,63									0,60
M ₂ [Kn.m]												8,00
V ₁ [Kn]									31,71			
V ₂ [Kn]										18,85		
Exposición al fuego	4 caras	4 caras	3 caras	3 caras	3 caras	4 caras	4 caras	3 caras	3 caras	3 caras	4 caras	4 caras
Coefficiente de utilización (XLS)	0,1208	0,2462	0,2590	0,2468	0,2468	0,3899	0,1208	0,2462	0,2468	0,2468	0,3899	0,3899
Temperatura crítica θ _{cr} (XLS)	791º	693º	687º	870º	870º	628º	791º	693º	870º	870º	628º	628º
R	60	90	120	60	90	120	60	90	120	60	90	120
MORTERO PROYECTADO	Mortero de perflita-vermiculita (λ=0,15 / c=1.100 / p=800) Espesor de la protección en mm											
Factor de sección (m ⁻¹)	252,19	187,21	189,64	189,64	185,33	114,29	252,19	187,21	189,64	185,33	114,29	114,29
CTE DB SI Anejo D	15	22	30	15	22	30	15	22	30	15	22	30
C.E.C.M.	14	24	35	13	22	32	13	22	32	13	22	32
Fabricante	22	28	35	20	27	34	20	27	34	20	27	34
XLS	10	20	25	15	20	25	15	20	25	15	20	25
REVESTIMIENTO DE PLACAS	Placas de silicato cálcico (λ=0,06 / c=1.100 / p=220) Espesor de la protección en mm											
Factor de sección (m ⁻¹)	205,26	130,23	153,57	153,57	146,71	114,29	205,26	130,23	153,57	146,71	114,29	114,29
CTE DB SI Anejo D	6	9	12	6	9	12	6	9	12	6	9	12
C.E.C.M.	5	8	11	4	6	9	4	7	11	3	5	7
Fabricante	21	31	40	18	27	36	19	28	37	19	28	37
XLS	4	7	10	5	6	9	5	7	10	4	6	7
PINTURA INTUMESCENTE	Pintura intumescente (λ=0,01 / c=0 / p=0) Espesor de la protección en micras											
Factor de sección (m ⁻¹)	252,19	187,21	189,64	189,64	185,33	114,29	252,19	187,21	189,64	185,33	114,29	114,29
CTE DB SI Anejo D	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20
C.E.C.M.	10	16	23	9	15	21	9	15	22	6	10	15
Fabricante												
XLS	7	12	18	7	12	18	8	13	18	4	7	11

Tabla III.5 – Resultados del cálculo según la ecuación diferencial incremental

¹⁹ En el eje de abscisas de los gráficos se refleja el tiempo de resistencia al fuego alcanzado con el espesor de material de protección que se encuentra en el eje de ordenadas.

3.2.5.1 TRACCIÓN

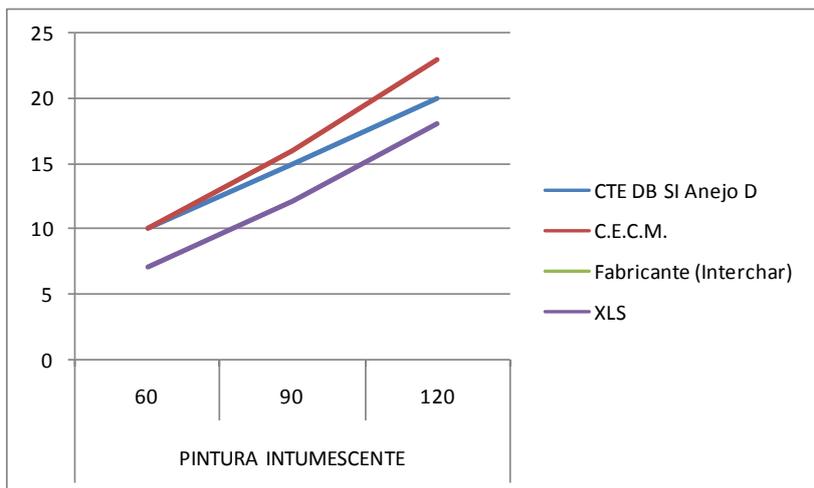
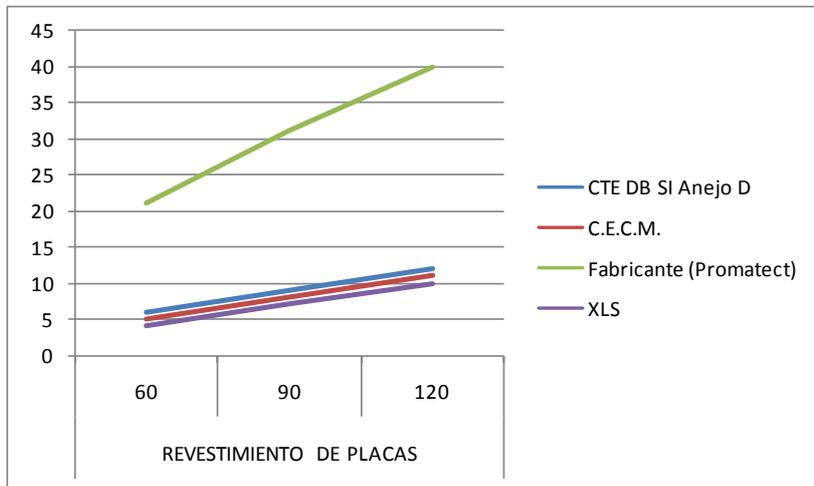
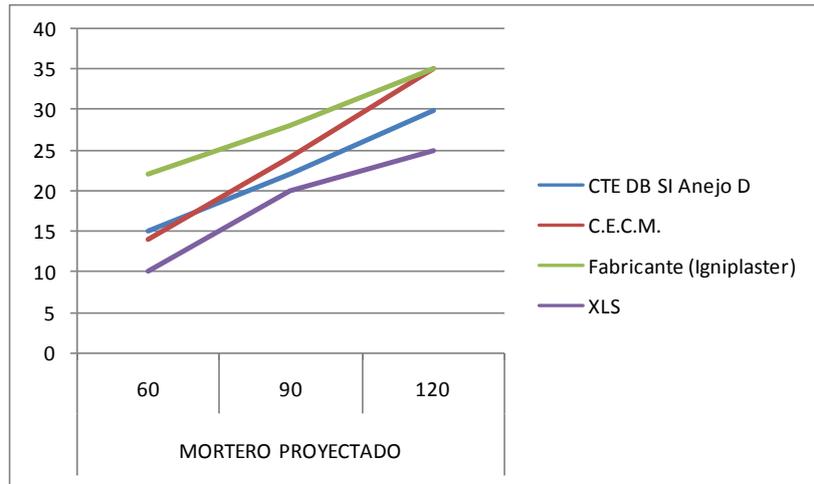


Gráfico III.1 – Gráficas comparativas de tracción.

3.2.5.2 COMPRESIÓN

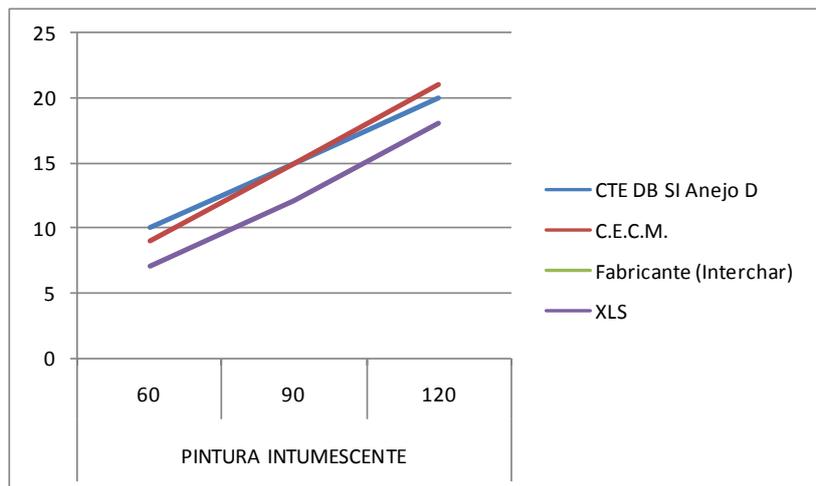
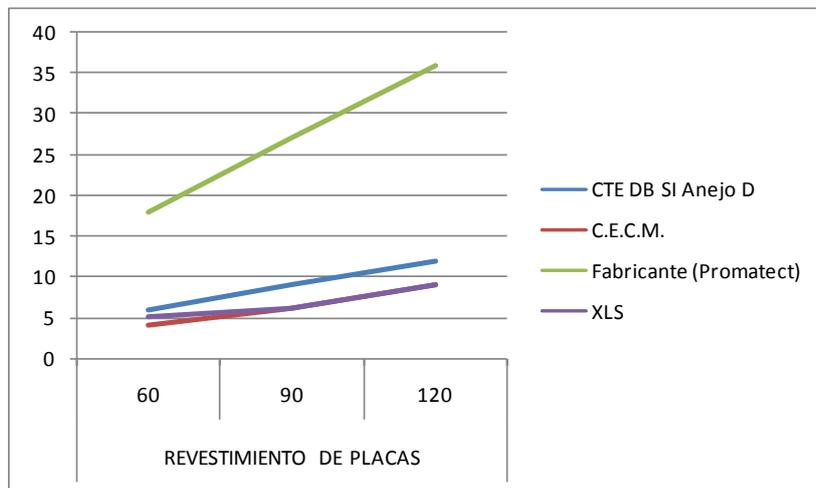
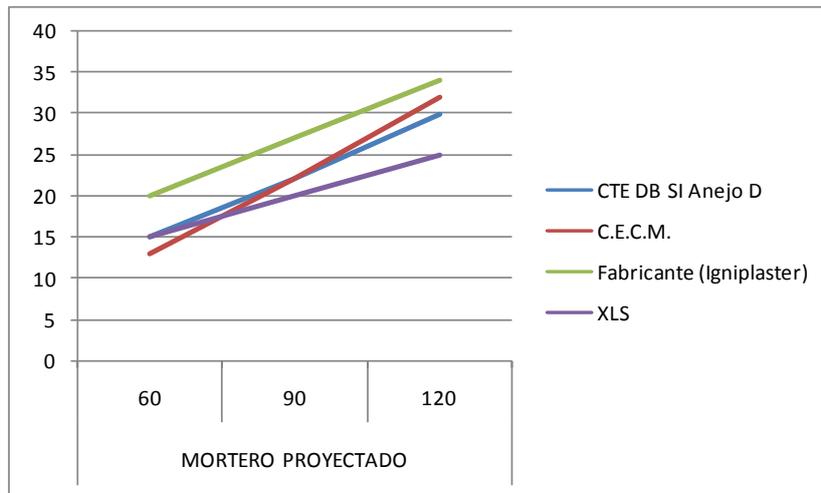


Gráfico III.2 – Gráficas comparativas de compresión.

3.2.5.3 FLEXIÓN

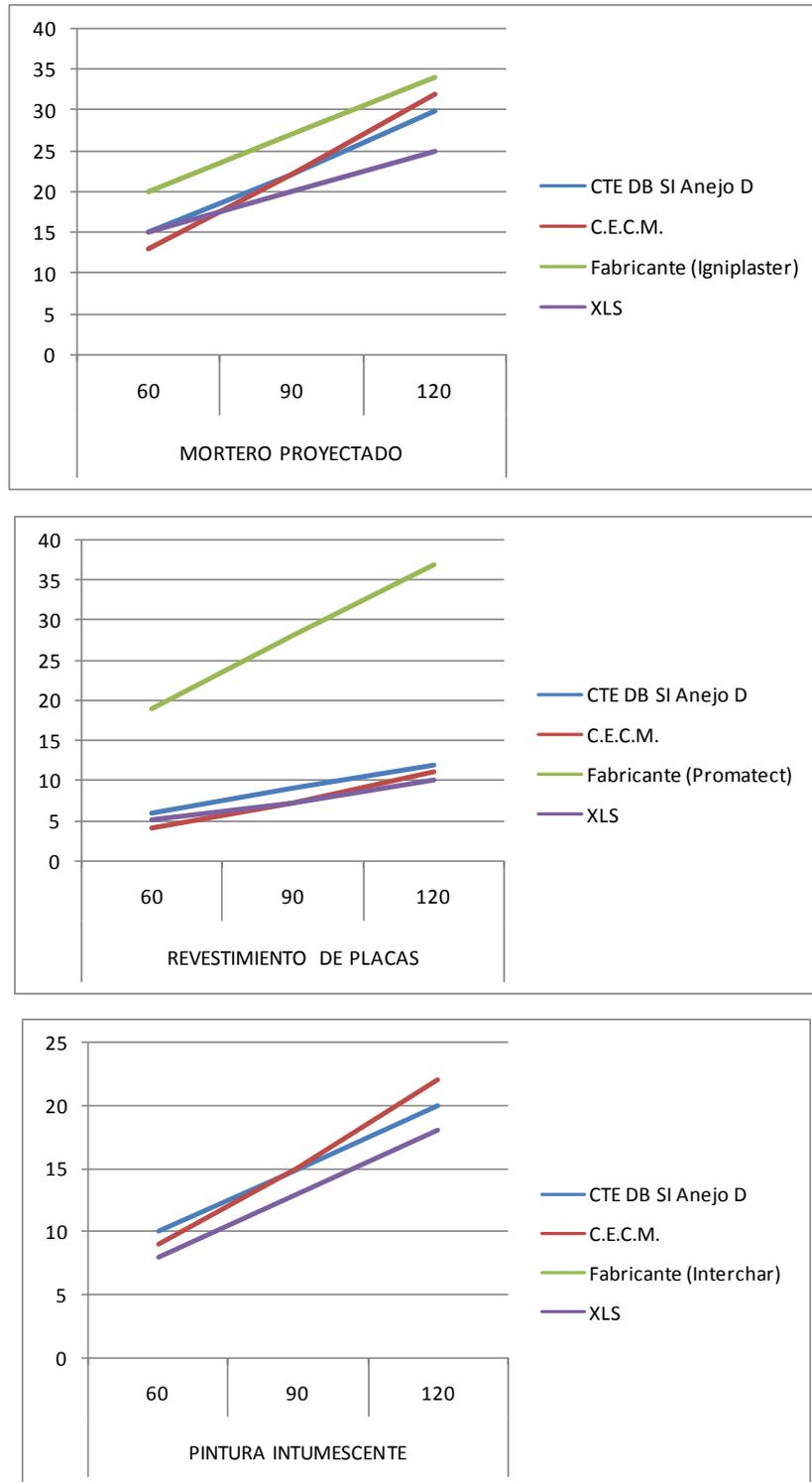


Gráfico III.3 – Gráficas comparativas de flexión

3.2.5.4 CORTANTE

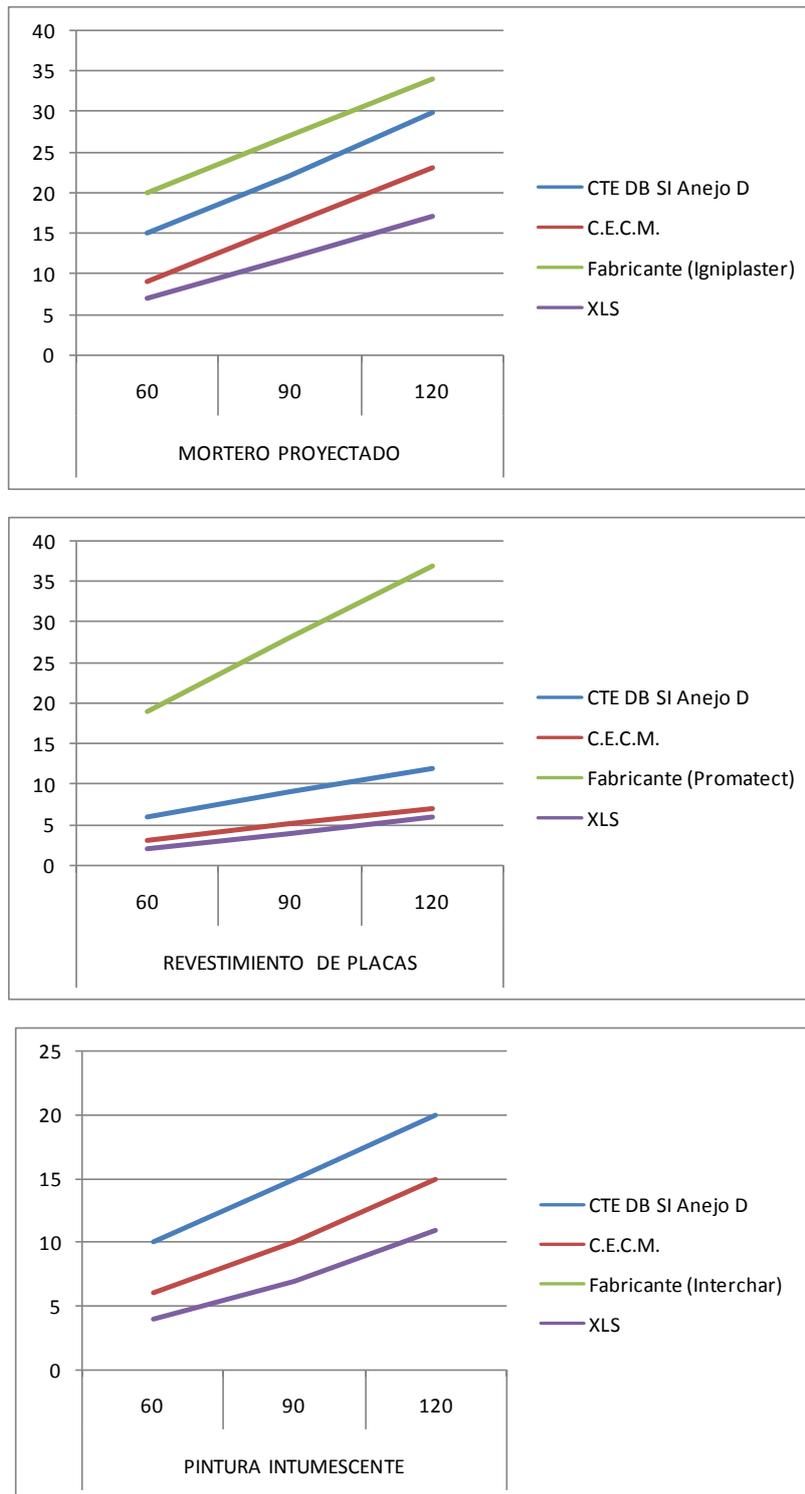


Gráfico III.4 – Gráficas comparativas de cortante

3.2.5.5 FLEXIÓN SIMPLE

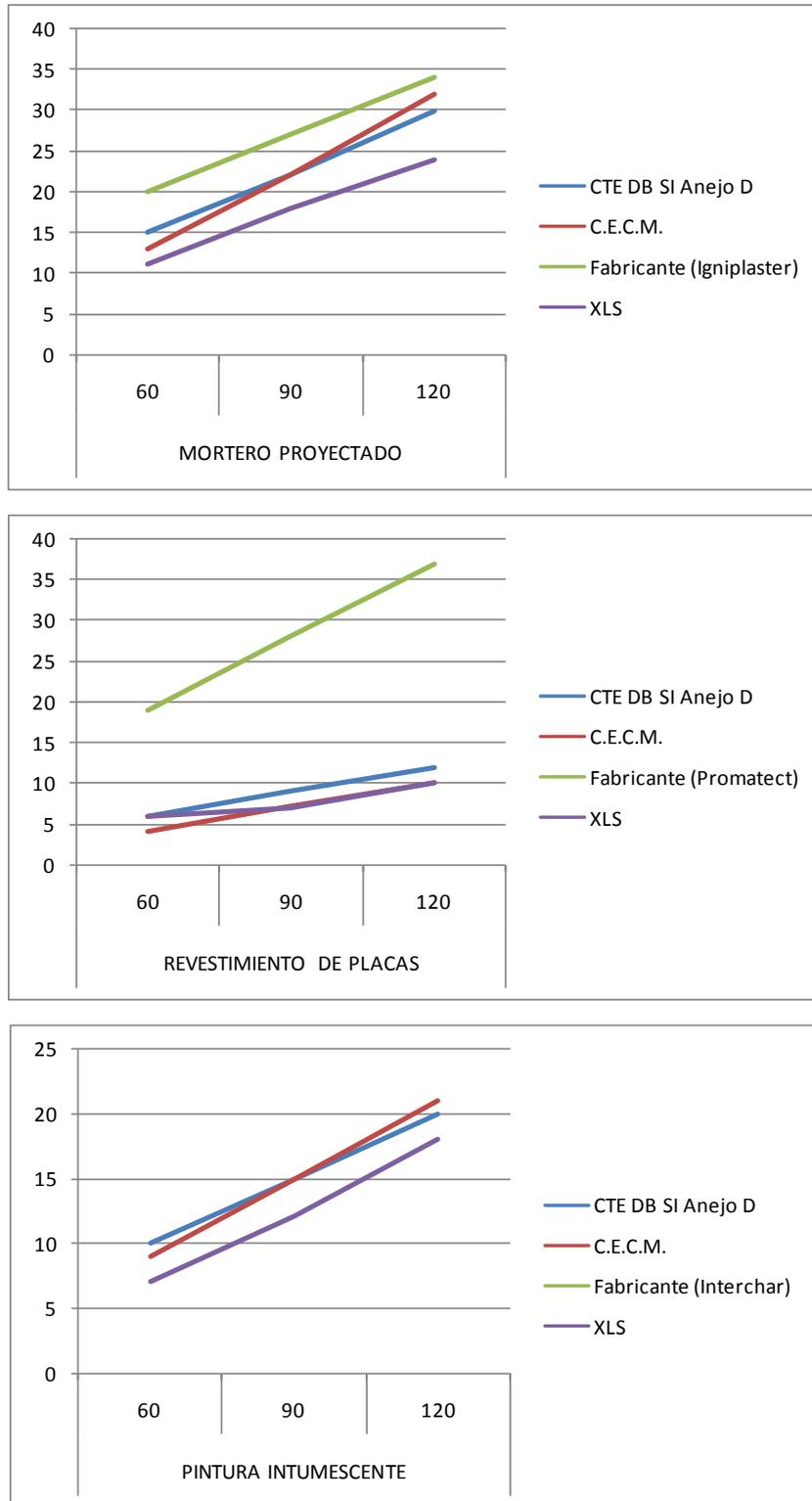


Gráfico III.5 – Gráficas comparativas de flexión simple.

3.2.5.6 FLEXOCOMPRESIÓN

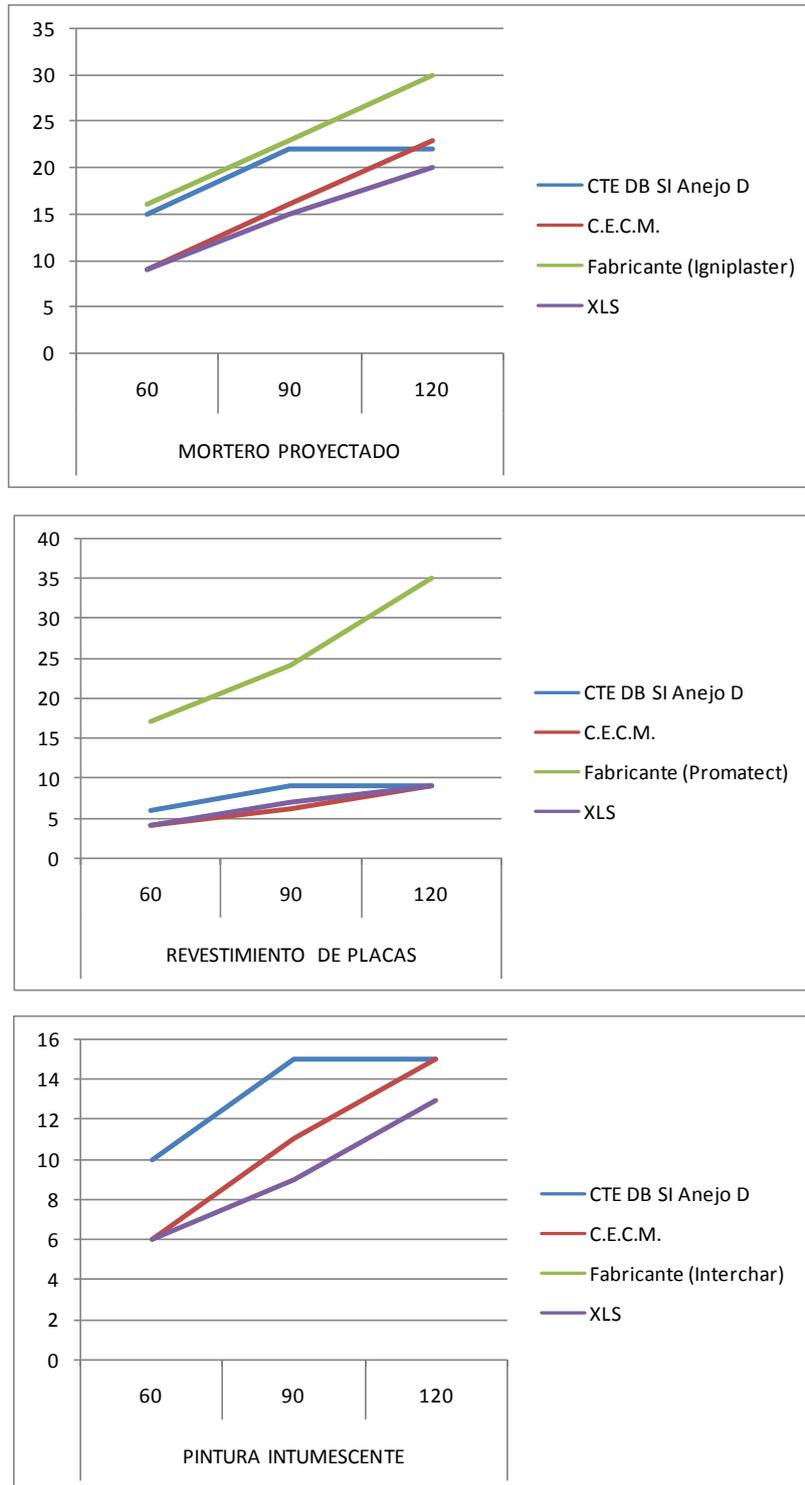


Gráfico III.6 – Gráficas comparativas de flexocompresión.

3.3 CONCLUSIONES

Del análisis de los datos obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Para valores convencionales de resistencia al fuego (60, 90 y 120 minutos) y solicitaciones habituales las tendencias de las gráficas son homogéneas.
- La comparación de resultados permite deducir que los valores obtenidos por la herramienta de cálculo desarrollada para la presente Tesis son aceptables, ya que coinciden sensiblemente con los obtenidos por los otros métodos, si bien, al tratarse de un proceso de cálculo más afinado, los espesores son, en general, menores, pudiendo permitir un ahorro en el espesor del material a aplicar.
- Los factores de utilización de las piezas analizadas arrojan valores muy bajos, lo que indica un sobredimensionado de las mismas:
 - El μ_0 del elemento solicitado a tracción pura es de 0,12.
 - El μ_0 del elemento solicitado a compresión es de 0,25.
 - El μ_0 del elemento solicitado a flexión pura es de 0,26.
 - El μ_0 del elemento solicitado a cortante es de 0,07.
 - El μ_0 del elemento solicitado a flexión simple es de 0,25.
 - El μ_0 del elemento solicitado a flexocompresión es de 0,39.
- Los valores que se obtienen por aplicación de las tablas de resultados de los fabricantes son superiores²⁰ debido, fundamentalmente, a que la temperatura crítica de los elementos estructurales para los que están calculados es de 500°, pudiendo observarse que su valor calculado según el dominio de la resistencia o la temperatura suele rondar los 700°:
 - La θ_{cr} del elemento solicitado a tracción pura es de 791°.
 - La θ_{cr} del elemento solicitado a compresión es de 693°.
 - La θ_{cr} del elemento solicitado a flexión pura es de 687°.
 - La θ_{cr} del elemento solicitado a cortante es de 870°.
 - La θ_{cr} del elemento solicitado a flexión simple es de 692°.
 - La θ_{cr} del elemento solicitado a flexocompresión es de 627°.
- Los valores obtenidos por aplicación del Anejo D del DB SI suelen ser similares a los calculados mediante la fórmula de la CECM que, aún siendo superiores a los de la hoja de cálculo presentan, como ventaja, la facilidad de manejo aunque el hecho de que el coeficiente de utilización haya de ser previamente calculado resta operatividad al método.
- Los valores de espesor de revestimiento de material de protección mas ajustados se obtienen con el empleo de la ecuación diferencial.

²⁰ Esto es especialmente notable en el caso de los revestimientos con placas debido a los espesores de comercialización de las mismas.

4 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL

El presente Capítulo tiene como objeto analizar cómo, al someter el material de protección a las altas temperaturas que se producen en un incendio, las variaciones de sus propiedades físicas afectan a la temperatura del acero revestido.

Para ello se realiza un análisis numérico-gráfico mediante la citada herramienta de cálculo (en la que se han introducido las oportunas modificaciones) basada en la ecuación diferencial que determina la transferencia de calor de los gases en un incendio al acero.

De ese modo puede compararse cómo evoluciona la temperatura del acero, considerando las propiedades del material de protección constantes o variables, y concluir cuáles son relevantes durante el proceso.

4.1 LA ECUACIÓN DIFERENCIAL

4.1.1 ECUACIÓN BÁSICA DE LA CONDUCCIÓN DE CALOR

Cuando en un incendio asciende la temperatura de los gases del ambiente se forma un campo de temperaturas dentro de un perfil de acero, contenido en el recinto donde se produce el incendio, a raíz de la transferencia de calor entre ambiente y acero que puede describirse a partir de la ecuación diferencial dada por Fourier²¹

$$\dot{Q} = -\lambda \frac{d\theta}{dx}$$

En la que Q es el flujo de calor (transmisión de calor por tiempo y superficie), λ el coeficiente de conductividad térmica del medio que separa los puntos considerados (con signo negativo ya que el flujo de calor es opuesto al aumento de temperaturas) y $d\theta/dx$ el gradiente de temperatura entre ambos puntos en función de su separación.

Sobre esta expresión, cuya formulación completa contemplando una evaluación tridimensional y temporal del fenómeno de transmisión de calor resulta ser

$$\frac{d\theta}{dt} = \lambda \left(\frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{d^2\theta}{dy^2} + \frac{d^2\theta}{dz^2} \right)$$

En la que se puede hacer una simplificación considerando en la ecuación general una condición unidimensional, a la par que se introducen la densidad (ρ) y conductividad térmica (c) del material, resultando:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \frac{d^2\theta}{dx^2}$$

²¹ Jean Baptiste Joseph Fourier (Auxerre 1768 – París 1830)

A efectos prácticos, en los años 70, se constató que la solución de esta ecuación diferencial (ya simplificada) resultaba en exceso complicada debido a la difícil cuantificación de algunos de sus parámetros en las condiciones térmicas que se producen en los ensayos²².

4.1.2 DESARROLLO - MANUALES DE DISEÑO DE LA CECM²³

En los años 80, el Comité Técnico nº 3 de la Convención Europea de la Construcción Metálica publicó un Manual en el que se establece como punto de partida el hecho de que, debido a la dificultad de calcular analíticamente la transferencia de calor a los elementos de acero, es posible adoptar una aproximación en régimen cuasi estacionario mediante la iteración de operaciones sucesivas en intervalos de tiempo Δt .

En ese Manual se desarrolla un método de cálculo simplificado en el que se considera que el acero posee una resistencia insignificante al flujo de calor y, de ese modo, se considera que hay una distribución uniforme de temperaturas en toda la sección.

Para simplificar el cálculo se considera, asimismo, que el material protector no absorbe flujo de calor aportando, únicamente, resistencia al paso del mismo²⁴.

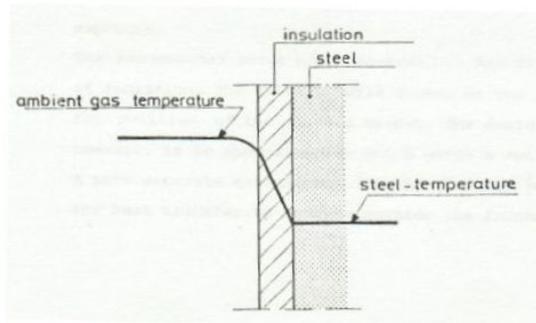


Imagen IV.1 – Transferencia de calor desde el gas ambiente al acero a través del material aislante.

Basándose en esas premisas, en una simplificación unidimensional y asumiendo que no hay flujo de calor en los bordes de la placa, se planteó la siguiente ecuación de transferencia de flujo de calor del gas ambiente a una placa acero durante un incremento de tiempo Δt

$$\Delta Q = K.F.(\theta_t - \theta_s).\Delta t$$

En la que ΔQ es el calor transmitido en el período de tiempo Δt , K el coeficiente total de transferencia de calor del material de protección, F la superficie de la placa de acero, θ_t la temperatura del gas ambiente del medio durante el período de tiempo Δt y θ_s la temperatura del acero durante el período de tiempo Δt .

Por otra parte, el incremento de temperatura del acero (basándose en el concepto termodinámico de capacidad calorífica²⁵ de un sistema) es dado por la siguiente expresión:

$$\Delta \theta_s = \frac{\Delta Q}{V.c_s.\rho_s}$$

²² Al final de la presente Tesis se puede constatar este extremo, sobre todo en el periodo inicial del ensayo comprendido entre los 0 y los 10 minutos.

²³ “European recommendations for the fire safety of steel structures” y “Design Manual on the European Recommendations for the fire safety of steel structures”. CECM - TC3

²⁴ Aunque en la formulación final si se considera la absorción de calor por parte del material de protección.

²⁵ La capacidad calorífica de un cuerpo es el cociente entre la cantidad de calor transferida y el cambio de temperatura que experimenta, y depende de la masa (densidad x volumen) y calor específico del material.

En la que V es el volumen de la placa de acero, c_s el calor específico del acero y ρ_s la densidad del acero.

Combinando las dos anteriores expresiones se obtiene la siguiente:

$$\Delta\theta_s = \frac{K}{c_s \cdot \rho_s} \cdot \frac{F}{V} \cdot (\theta_t - \theta_s) \cdot \Delta t$$

Quedando por determinar el valor de K (coeficiente total de transferencia de calor del material de protección) que depende de diversos factores: los coeficientes de transferencia de calor por convección (α_c) radiación (α_r), coeficiente de conductividad térmica (λ) y el espesor del material de protección (d) para el que se propuso la siguiente expresión:

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_c + \alpha_r}\right) + \left(\frac{d}{\lambda}\right)}$$

SI bien se indica que se puede despreciar el valor de la fracción que incluye a los coeficientes de transferencia de calor por ser, en la práctica, muy pequeño, resultando que $K = \lambda/d$ ²⁶, por lo que la expresión se convierte en:

$$\Delta\theta_s = \frac{\lambda_p}{c_s \cdot \rho_s \cdot d_p} \cdot \frac{F}{V} \cdot (\theta_t - \theta_s) \cdot \Delta t$$

No obstante se hace mención a que en el caso de que el valor d/λ sea pequeño, se debe tener en cuenta el valor de los coeficientes de transferencia de calor por convección y radiación.

En el manual se hace especial hincapié en que el valor de λ_p no es el valor que se puede obtener en los manuales habituales sobre transferencia de calor ya que, no solo depende de su variación a altas temperaturas, sino de las posibles fisuras, roturas o desprendimientos que el material protector puede sufrir.

En este aspecto, se relacionan tres tipos posibles de materiales protectores indicando que deben considerarse por separado debido a su comportamiento:

- Materiales secos (para los que la ecuación anterior es plenamente válida)
- Materiales con humedad permanente (para los que se produce un retardo en la temperatura del acero debido a la pérdida del agua en él contenida al alcanzar una temperatura determinada²⁷)

²⁶ El subíndice “p” de la fórmula hace referencia a que se trata de propiedades del material protector.

²⁷ Los materiales de protección a menudo contienen un porcentaje de humedad que se evapora a los 100°C, con una considerable absorción del calor latente. Esto causa una “detención” en la curva de calentamiento del elemento de acero protegido, a esta temperatura, originada por la cantidad de agua que se libera de la capa de protección. La relación incremental tiempo-temperatura dada no tiene en cuenta este efecto, pero es por lo menos una propuesta conservadora. En una prenorma Europea para ensayos de fuego (prENV yyy5) se incluye un método para calcular el tiempo de parada.

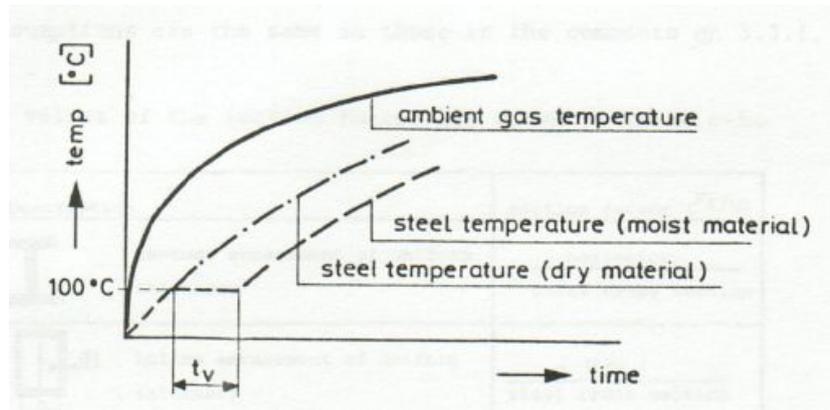


Imagen IV.2 – Retraso del incremento de la temperatura del acero debido a la humedad del material protector.

- Materiales intumescentes (para los que no resulta posible definir su conductividad térmica debido a su comportamiento reactivo y variable)

Con el objeto de tener en cuenta el caso de que la protección se haya realizado con materiales en los que el material aislante tenga una gran inercia térmica, la fórmula hasta ahora desarrollada se varió introduciendo un coeficiente φ que representa la inercia térmica relativa del material aislante:

$$\varphi = \frac{c_p \rho_p}{c_s \rho_s} d_p \frac{A_p}{V}$$

Cuando el valor de este coeficiente es inferior a $\frac{1}{2}$ se considera que la pieza está moderadamente protegida y, en caso contrario, se considera fuertemente protegida y se tiene en cuenta que el material protector absorbe parte del flujo de calor afectándose a la expresión mediante dos parámetros:

$$\frac{\lambda_p}{d_p} \left(\frac{1}{1 + \varphi/3} \right)$$

que modifica las propiedades térmicas del revestimiento debido a la absorción de calor, y

$$\left(e^{\varphi/10} - 1 \right) \Delta\theta_{g,t}$$

que representa el retraso en el aumento de la temperatura del acero debido a esa absorción.

Quedando la expresión final en:

$$\Delta\theta_{s,t} = \frac{\lambda_p}{d_p c_s \rho_s} \frac{A_p}{V} \left(\frac{1}{1 + \varphi/3} \right) (\theta_{g,t} - \theta_{s,t}) \Delta t - \left(e^{\varphi/10} - 1 \right) \Delta\theta_{g,t} \geq 0$$

4.1.3 UTILIZACIÓN NORMATIVA DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL

4.1.3.1 NORMA UNE 23820 EX

Esta ecuación se contenía en el Anejo G (normativo) de la Norma UNE 23820 Experimental de 1997 que contenía el Método de ensayo para determinar la contribución a la resistencia al fuego de los elementos estructurales mediante la aplicación de protección a los elementos estructurales de acero, y que fue vigente (por su inclusión como norma de referencia en los Apéndices de las familias de Normas Básicas de Edificación de Condiciones de Protección contra Incendios, por ejemplo, en el Apéndice 3 de la NBE CPI 96) hasta la publicación y entrada en vigor de la:

4.1.3.2 NORMA UNE-ENV 13381-4

En esta Norma del año 2005: Ensayos para determinar la contribución a la resistencia al fuego de los elementos estructurales. Parte 4: Protección aplicada a elementos de acero, la ecuación se incluye en el Anexo F (normativo). Esta Norma es citada en el Anejo G del DB SI del CTE como norma relacionada con la aplicación del Código Técnico de la Edificación.

4.1.3.3 EUROCÓDIGOS ESTRUCTURALES

Para calcular el incremento de temperatura de elementos internos de acero aislados mediante material de protección frente al fuego, la ecuación diferencial se incluye en la Norma UNE-EN 1993-1-2:2005 dentro de su Artículo 4.2.5.2

4.1.3.4 CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN

La ecuación diferencial se incluye en el Apartado D.2.3 (Determinación de la temperatura del acero) del Anejo D (Resistencia al fuego de las estructuras de acero) del DB SI del vigente CTE.

4.1.3.5 INSTRUCCIÓN EAE

En el Artículo 48.2 del Capítulo XII de la Instrucción EAE el incremento elemental de temperatura en el acero viene definido por la ecuación con una reagrupación de términos y la introducción del concepto de resistividad térmica²⁸.

4.2 PARÁMETROS A ANALIZAR

4.2.1 PROPIEDADES DEL AMBIENTE

4.2.1.1 TEMPERATURA

Las temperaturas que se producen durante un incendio se representan gráficamente en las denominadas curvas de incendio mediante un gráfico en el que el eje de abscisas refleja el tiempo de duración del mismo y el eje de ordenadas refleja la temperatura alcanzada.

Un fuego real crece y decrece según el balance de masa y energía dentro del local donde se produce (ver Gráfico IV.1). La energía desprendida depende de la cantidad y del tipo de combustible y de las condiciones de ventilación existentes.

El fuego real se desarrolla en tres fases, que son: crecimiento, desarrollo máximo y cese. El incremento más rápido de la temperatura se produce en un período posterior al punto de inflamación (“*flashover*”), que es el punto en el que todos los materiales orgánicos del local se queman espontáneamente.

²⁸ Según se ha indicado en el Apartado 1.1.3.4 de la presente Tesis.

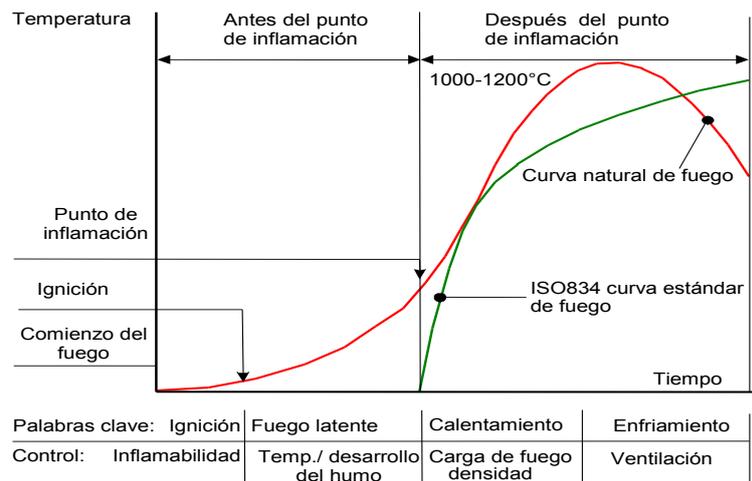


Gráfico IV.1 – Fases de un fuego natural, comparando temperaturas atmosféricas con la curva estándar de fuego ISO 834

Ante la imposibilidad de reproducir en las condiciones de ensayo una curva de fuego natural, se convino la formulación de unas curvas de incendio nominales, internacionalmente reconocidas, con las que realizar las pruebas y ensayos en laboratorios.

Estas curvas establecen la evolución de la temperatura del gas en función del tiempo transcurrido desde que el incendio está totalmente desarrollado y están definidas en la norma UNE EN 1363 (a su vez tomadas de la norma ISO 834) subdividiéndose en los siguientes tipos:

- Estándar.
- De incendio exterior.
- De hidrocarburos.

El tiempo de resistencia al fuego, en la práctica totalidad de los Códigos de Edificación se basa en una prueba del comportamiento al calentamiento según la curva tiempo-temperatura definida en ISO 834 (UNE EN 1363), que no representa ningún tipo de fuego natural. Se caracteriza por una temperatura del gas que crece continuamente con el tiempo, pero a una intensidad reducida (su representación gráfica puede verse en el Gráfico IV.2 y su relación con la curva de incendio natural en la figura anterior).

Este tipo de curva es válida para material incendiado, fundamentalmente de tipo celulósico, y está definida por la expresión:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10} (8t + 1) [^{\circ}]$$

siendo θ_g la temperatura del gas en el compartimento [$^{\circ}$] y t el tiempo desde el desarrollo del incendio [min].

Esta es la curva utilizada para establecer las propiedades de resistencia al fuego de los productos de construcción y se ha convertido en una curva estándar que se usa para pruebas de elementos en horno de laboratorio.

El valor indicado del tiempo de resistencia al fuego no representa, por tanto, el tiempo real que el elemento estructural resiste, sino que es una comparación relativa que indica la severidad del fuego bajo el cual la pieza puede resistir en función de la temperatura alcanzada.

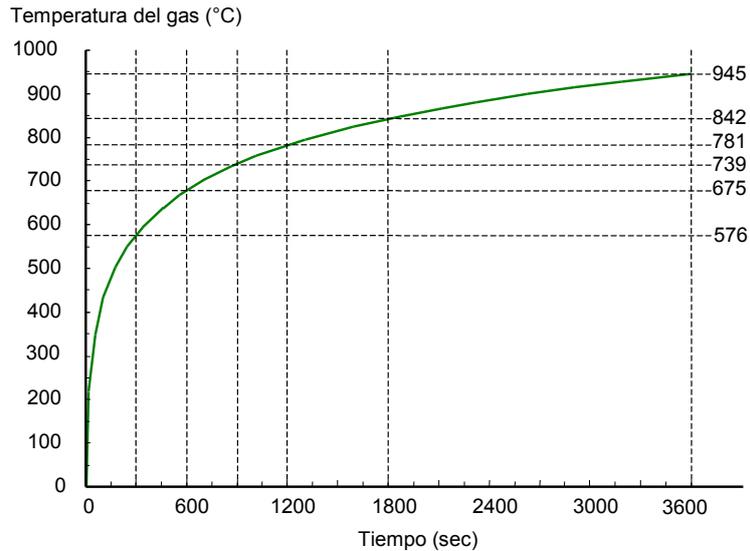


Gráfico IV.2 – Curva de incendio nominal estándar (ISO 834)

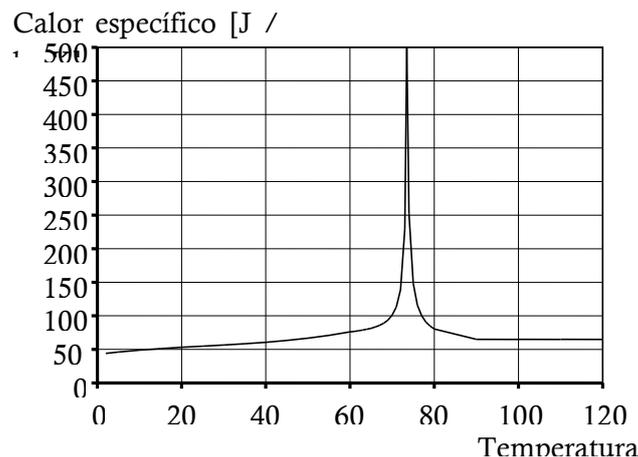
4.2.2 PROPIEDADES DEL ACERO

4.2.2.1 TEMPERATURA

La temperatura del acero se obtiene mediante procesos iterativos añadiendo el resultado de la ecuación diferencial a la temperatura obtenida en el período anterior, por lo que no es necesario profundizar en este aspecto.

4.2.2.2 CALOR ESPECÍFICO

El valor del calor específico del acero y su variación con la temperatura se han incluido en el Capítulo 2 de la presente Tesis y se resumen a continuación.



4.2.2.3 DENSIDAD

La densidad del acero puede considerarse independiente de la temperatura del acero²⁹, aceptándose el valor constante de 7.850 kg/m³.

²⁹ Artículo 3.2.2 de la Norma EN 1993-1-2 : 2005

4.2.3 PROPIEDADES DE LA SECCIÓN

4.2.3.1 FACTOR DE SECCIÓN

Para un elemento de acero protegido es la relación entre la superficie interna del revestimiento expuesto y el volumen de acero.³⁰

4.2.4 PROPIEDADES DEL MATERIAL DE PROTECCIÓN

Las propiedades del material de protección que intervienen en la ecuación diferencial son su espesor, su calor específico, su densidad y su coeficiente de conductividad térmica.

Al margen de la primera de ellas, meramente geométrica, buscando datos sobre las propiedades estrictamente físicas se detecta la carencia de valores homogéneos y estudios de su variación al someterlos a altas temperaturas ya que, usualmente, los fabricantes proporcionan algunos de estos valores a temperatura ambiente y, por tanto, al ser así introducidos en la formulación, pueden producir resultados no adecuados.

A continuación se relacionan tabulados diversos valores, encontrados en distintas fuentes, de las tres propiedades físicas de materiales de protección no reactivos así como valores a temperatura ambiente (20°) tomados del Catálogo de elementos constructivos del CTE.

	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ ³¹ [W/mK]
MORTEROS DE FIBRA MINERAL			
Manual de diseño de la C.E.C.M.	250-350	1.100	0,10
Nomogramas APTA	300	1.200	0,12
Escuela de la Edificación	300	1.100	0,10
MORTEROS de CEMENTO y VERMICULITA o PERLITA			
Valores a temperatura ambiente	<1.000	1.000	0,41
Nomogramas APTA (baja densidad)	350	1.200	0,12
Nomogramas APTA (alta densidad con cemento)	550	1.100	0,12
Nomogramas APTA (alta densidad con yeso)	650	1.100	0,12
Publicaciones ENSIDESA	800	850-1.300	0,17
Escuela de la Edificación	800	1.100	0,17
TABLEROS de PERLITA o VERMICULITA			
Manual de diseño de la C.E.C.M.	300-800	1.100	0,15
Nomogramas APTA	800	1.200	0,20
Escuela de la Edificación	300-800	1.100	0,10
TABLEROS de FIBROSILICATO			
Manual de diseño de la C.E.C.M.	450-900		0,15
Nomogramas APTA	600	1.200	0,15
Escuela de la Edificación	450-900	1.100	0,15
GUARNECIDO de YESO			
Valores a temperatura ambiente	900-1.300	1.000	0,40-0,57
Publicaciones ENSIDESA	700-1.000	1.130	
ENFOSCADO DE MORTERO de CEMENTO			
Valores a temperatura ambiente	750-2.000	1.000	0,30-1,80

³⁰ Artículo 1.5.4.5 de la Norma EN 1993-1-2 : 2005

³¹ La conductividad térmica indicada por el Manual de diseño de la CECM es una media bajo condiciones de incendio.

PLACAS de YESO			
Valores a temperatura ambiente	750-1.000	1.000	0,25
Manual de diseño de la C.E.C.M.	800	1.700	0,20
Nomogramas APTA	800	1.700	0,20
Escuela de la Edificación	800	1.700	0,20
MANTAS de LANA MINERAL / LANA DE ROCA			
Manual de diseño de la C.E.C.M.	120-150	1.100	0,25
Nomogramas APTA	150	1.200	0,20
Escuela de la Edificación	150	1.100	0,25
HORMIGÓN CELULAR			
Valores a temperatura ambiente	800-1.700	1.000	0,27-0,76
Manual de diseño de la C.E.C.M.	600-1.300	1.200	0,30-0,65
Publicaciones ENSIDESA	620	800	
Escuela de la Edificación	600-1.000	1.200	0,30-0,45
HORMIGÓN LIGERO			
Valores a temperatura ambiente	1.600-2.000	1.000	1,15-1,35
Manual de diseño de la C.E.C.M.	1.600	1.200	0,80
Publicaciones ENSIDESA	1.400	875	
HORMIGÓN NORMAL			
Valores a temperatura ambiente	2.000-2.600	1.000	1,65-2,00
Manual de diseño de la C.E.C.M.	2.000-2.200	1.200	1,30-1,70
Publicaciones ENSIDESA	2.080	850	
LADRILLO			
Valores a temperatura ambiente (arcilla cocida)	900-2.400	1.000	0,30-0,90
Valores a temperatura ambiente (silico calcáreo)	900-2.200	1.000	0,33-1,54
Manual de diseño de la C.E.C.M.	2.000	1.200	1,20
Publicaciones ENSIDESA	1.450	1.080	1,15
FÁBRICA de LADRILLO			
Valores a temperatura ambiente (macizo)	2.140-2.170	1.000	1,00-1,47
Valores a temperatura ambiente (perforado)	1.000-1.140	1.000	0,57-0,61
Valores a temperatura ambiente (hueco)	920-1.000	1.000	0,47
FÁBRICA de BLOQUE de HORMIGÓN			
Valores a temperatura ambiente	500-1.210	1.000	0,63-1,15

Tabla IV.1 – Valores de propiedades físicas de materiales de protección a temperatura ambiente tomadas de Catálogo.

Incluyéndose, a continuación, los datos facilitados en catalogo de algunos productos de diferentes casas comerciales:

	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]
MORTEROS de FIBRAS MINERALES			
EUROFIRE – Eurofibre / Profibre	150-200		0,033
ROCKWOOL – Tecwool	250		0,044
PROMAT IBERICA - Fibrofeu	180-250		0,052
MORTEROS de ÁRIDOS LIGEROS			
CAFCO – Mandolite CP2	390		0,10
PROMAT - Igniplaster	800		0,15
PERLITA Y VERMICULITA - Perlifoc	600-650		0,12
PERLITA Y VERMICULITA – Pyrok	550-600		0,20
PANELES de SILICATO / FIBROSILICATO			
PROMAT – Promatect H	870		0,175
PROMAT – Promatect 100	850		0,270
PROMAT – Promatect 200	700		0,189
PROMAT – Promatect L500	500		0,090
PROMAT – Promatect LS	490		0,087
PROMAT – Promatect L	450		0,083
PANELES de YESO			
URALITA - Pladur	800		0,180
URALITA – Pladur FOC 13	800		0,069
URALITA – Pladur FOC 15	800		0,083
PANELES de FIBRAS MINERALES			
ROCKWOOL - Conlit	180	840	0,041
ISOVER - Top Heat	165		0,036

Tabla IV.2 – Valores de propiedades físicas de materiales de protección a temperatura ambiente tomadas de fabricantes.

4.2.4.1 ESPESOR

El espesor del material de protección aplicado a la sección es un parámetro puramente geométrico, por lo que no es necesario profundizar en este aspecto, señalándose a continuación los espesores mínimos y de comercialización de diversos materiales que se pueden encontrar en el mercado.

MORTERO de FIBRAS MINERALES	
EUROFIRE – Eurofibre / Profibre	De 10 a 80 mm
TECRESA – Tecwool	De 10 a 60 mm
PROMAT IBERICA - Fibrofeu	De 17 a 80 mm
MORTEROS de ÁRIDOS LIGEROS	
CAFCO – Mandolite CP2	> 8 mm sin armar / >15 mm armado
PROMAT - Igniplaster	De 11 a 63 mm
PERLITA Y VERMICULITA - Perlifoc	De 10 a 61 mm
PANELES de SILICATOS / FIBROSILICATO	
PROMAT – Promatect H	6-8-10-12-15-20-25 mm
PROMAT – Promatect 100	8-10-12-15-20-25 mm
PROMAT – Promatect 200	12-15-18-20-25-30 mm
PROMAT – Promatect L500	20-25-30-35-40-50-52-60 mm

PROMAT – Promatect LS	30-35-45-50 mm
PROMAT – Promatect L	20-25-30-40-50 mm
PANELES de YESO	
URALITA - Pladur	12,5 - 15 mm
URALITA – Pladur FOC	12,5 - 15 mm
PLACO – Estándar	10 - 13 -15 -20 -25 mm
PLACO – Placoflam	10 - 13 -15 -20 -25 mm
KNAUF – Placa A	12,5-15-18 mm
KNAUF – Placa DF	12,5-15-18 mm
PANELES de FIBRAS MINERALES	
ROCKWOOL - Conlit	20-25-30-40-50-60-70-80-90-100-110-120 mm
ISOVER - Top Heat	30-50-70 mm

Tabla IV.3 – Valores de espesores comerciales de materiales de protección.

4.2.4.2 CALOR ESPECÍFICO

Como se puede observar del análisis de los datos tabulados en apartados anteriores, los fabricantes no suelen proporcionar este valor, por lo que para el desarrollo del presente Capítulo se tomarán como datos de partida los valores proporcionados por los manuales y publicaciones citados. Resumidamente:

Tipo de material de protección	c [J/kgK]
MORTEROS DE FIBRA MINERAL	1.100-1.200
MORTEROS DE ÁRIDOS LIGEROS	1.100-1.200
PANELES DE FIBROSILICATO	1.100-1.200
PANELES DE YESO	1.700
PANELES DE LANA MINERAL	1.100-1.200

Tabla IV.4 – Valores genéricos de calor específico de materiales de protección a temperatura ambiente.

4.2.4.3 DENSIDAD

Como se puede observar del análisis de los datos tabulados en apartados anteriores, los valores proporcionados por fabricantes y manuales son similares, por lo que para el desarrollo del presente trabajo se tomarán como datos de partida los valores proporcionados por los rangos que se relacionan:

Tipo de material de protección	ρ [J/kgK]
MORTEROS DE FIBRA MINERAL	150-300
MORTEROS DE ÁRIDOS LIGEROS	350-800
PANELES DE FIBROSILICATO	450-900
PANELES DE YESO	800
PANELES DE LANA MINERAL	120-180

Tabla IV.5 – Valores genéricos de densidad de materiales de protección a temperatura ambiente.

4.2.4.4 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Como se puede observar del análisis de los datos tabulados en apartados anteriores, los valores proporcionados por catálogos de fabricantes y manuales no son similares en bastantes de los casos:

Tipo de material de protección	λ [W/mK]	
	Manuales	Catálogos
MORTEROS DE FIBRA MINERAL	0,10-0,12	0,033-0,052
MORTEROS DE ÁRIDOS LIGEROS	0,12-0,17	0,10-0,20
PANELES DE FIBROSILICATO	0,15	0,083-0,175
PANELES DE YESO	0,20-0,25	0,083-0,18
PANELES DE LANA MINERAL	0,20-0,25	0,036-0,041

Tabla IV.6 – Valores genéricos de conductividad térmica de materiales de protección a temperatura ambiente.

4.3 VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES A ALTAS TEMPERATURAS

Resulta evidente que el espesor del material protección puede verse afectado por las altas temperaturas debido a desprendimientos del mismo, tanto por falta de adherencia o “pegabilidad”, como por no soportar los movimientos del elemento estructural debido a sus dilataciones.

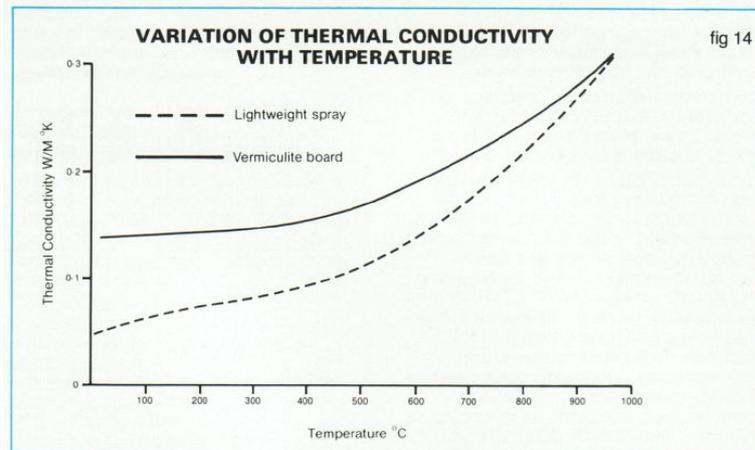
A este respecto, se han encontrado muy pocos estudios o datos tabulados respecto a la variación del resto de las propiedades físicas, pudiendo citarse la tabla incluida en el documento “*Scientific background to the harmonization of structural Eurocodes*” del Centro Técnico Industrial de la Construcción Metálica francés en la que se pueden apreciar incrementos de hasta el séptuple del valor de λ , a temperatura ambiente, en el caso de la lana mineral y de vez y media en el silicato cálcico.

Las densidades se mantienen inalterables mientras que el calor específico sufre incrementos del orden del 38% en el caso de la lana mineral y del 42% en el caso del silicato cálcico.

Table 3. Typical values of the thermal properties of relevant materials for the compartment envelop

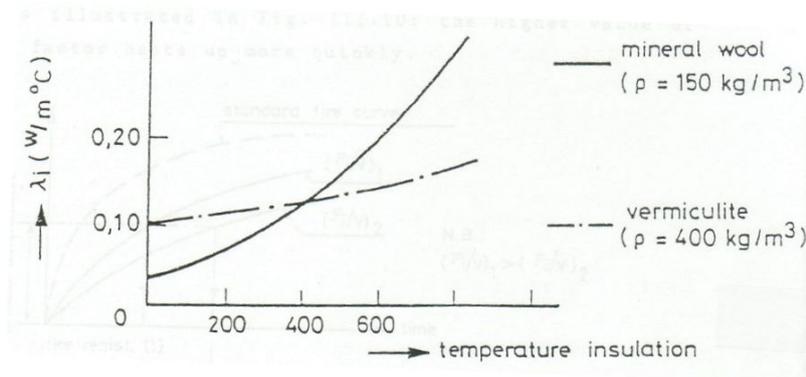
Material	Temperature (°C)	λ (W/m/K)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg°K)
Ceramic Wool	20	0,035	128	800
	200	0,06	128	900
	500	0,12	128	1050
	1000	0,27	128	1100
Cement	20	0,0483	200	751
	250	0,0681	200	954
	500	0,1128	200	1052
	800	0,2016	200	1059
Calcium Silicate	20	0,0685	450	748
	250	0,0786	450	956
	450	0,0951	450	1060
Bricks	20	1,04	2000	1113
	200	1,04	2000	1125
	500	1,18	2000	1135
	1000	1,41	2000	1164

De la variación de la conductividad térmica a altas temperaturas existen, además, algunos indicadores como los incluidos en la publicación “*Fire resistance of steel structures*” de la *British Steel Corporation* en la que se incluye el siguiente gráfico:

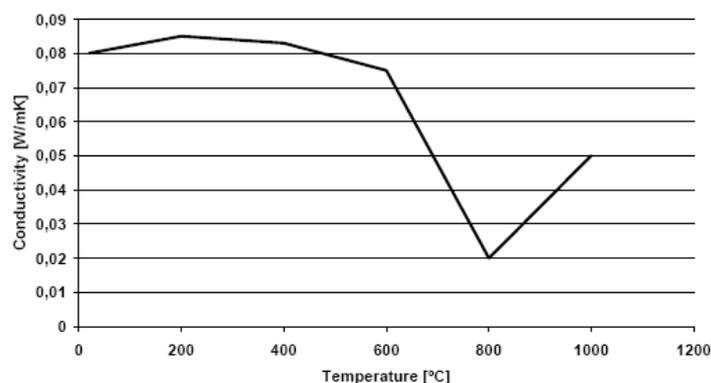


en el que se pueden apreciar incrementos de hasta el triple de su valor a temperatura ambiente en el caso de los paneles de vermiculita y del séxtuple en el de morteros ligeros.

O el “*Design Manual of the European recommendations for the fire safety of steel structures*” del TC3 de la C.E.C.M., donde se incluye este otro gráfico en el que se pueden apreciar incrementos de cerca del doble de su valor a temperatura ambiente en el caso de la vermiculita y del séxtuple en el de la lana mineral:



Los estudios desarrollados por Berge y Danielsen, en el año 2006, sobre algunos materiales de protección pasiva en el SINTEF (Organización de investigación escandinava) mostraron figuras como la que se adjunta de un material intumescente:



4.4 HERRAMIENTA DE CÁLCULO NUMÉRICO-GRÁFICO

Para el desarrollo del presente trabajo se ha utilizado una hoja de cálculo (a través de modificaciones de la herramienta de cálculo inicial) con el siguiente aspecto general:

t (min)	t (s)	θ_g [°C]	ρ_s [kg/m ³]	c_s [J/kg°K]	ρ_p [kg/m ³]	c_p [J/kg°K]	λ_p [W/m°K]	θ_s [°C]
0	0	20,00	7850	439,80	220	1100	0,15	20,00
15	900	738,56	7850	2.901,85	220	1100	0,15	60,40
30	1800	841,80	7850	705,84	220	1100	0,15	120,43
45	2700	902,34	7850	650,00	220	1100	0,15	199,72
60	3600	945,34	7850	650,00	220	1100	0,15	278,51
75	4500	978,71	7850	650,00	220	1100	0,15	352,95
90	5400	1005,99	7850	650,00	220	1100	0,15	422,62
105	6300	1029,05	7850	650,00	220	1100	0,15	487,46
120	7200	1049,04	7850	650,00	220	1100	0,15	547,60
135	8100	1066,67	7850	650,00	220	1100	0,15	603,24
150	9000	1082,44	7850	650,00	220	1100	0,15	654,63
165	9900	1096,71	7850	650,00	220	1100	0,15	702,07
180	10800	1109,74	7850	650,00	220	1100	0,15	745,82
195	11700	1121,72	7850	650,00	220	1100	0,15	786,16
210	12600	1132,82	7850	650,00	220	1100	0,15	823,36
225	13500	1143,15	7850	650,00	220	1100	0,15	857,67
240	14400	1152,82	7850	650,00	220	1100	0,15	889,32
255	15300	1161,90	7850	650,00	220	1100	0,15	918,55
270	16200	1170,46	7850	650,00	220	1100	0,15	945,54
285	17100	1178,55	7850	650,00	220	1100	0,15	970,50
300	18000	1186,24	7850	650,00	220	1100	0,15	993,60
315	18900	1193,54	7850	650,00	220	1100	0,15	1014,99
330	19800	1200,51	7850	650,00	220	1100	0,15	1034,83
345	20700	1207,17	7850	650,00	220	1100	0,15	1053,24
360	21600	1213,54	7850	650,00	220	1100	0,15	1070,36

4.4.1 PARÁMETROS DE ENTRADA

Dos de los parámetros de entrada: el factor de sección y el espesor del material de protección, se introducen como valores constantes, siendo valores variables a medida que progresa el tiempo los siguientes:

t (min)	t (s)	θ_g [°C]	ρ_s [kg/m ³]	c_s [J/kg°K]	ρ_p [kg/m ³]	c_p [J/kg°K]	λ_p [W/m°K]	θ_s [°C]
---------	-------	-----------------	-------------------------------	----------------	-------------------------------	----------------	---------------------	-----------------

4.4.1.1 TIEMPO

Como la formulación de la ecuación diferencial prescribe que no se pueden introducir para Δt valores superiores a 30 segundos se han establecido dos columnas, una con el tiempo en minutos (cuyo objeto es proporcionar valores resumidos cada 15 minutos) y otra con su correspondiente valor en segundos (a los efectos de introducción de valores en la formulación de la ecuación) introducidos mediante serie de valores en periodos de treinta segundos:

t (min)	t (s)
0	0
15	900
30	1800
45	2700
60	3600
75	4500
90	5400
105	6300
120	7200
135	8100
150	9000
165	9900
180	10800
195	11700
210	12600
225	13500
240	14400
255	15300
270	16200
285	17100
300	18000
315	18900
330	19800
345	20700
360	21600

Cabe reseñar que este formato es de presentación de datos, ya que los periodos de 30 segundos imperativos de la ecuación se hallan contenidos en celdas agrupadas:

t (min)	t (s)
0	0
0,5	30
1	60
1,5	90
2	120
2,5	150
3	180
3,5	210
4	240
4,5	270
5	300
5,5	330
6	360
6,5	390
7	420
7,5	450
8	480
8,5	510
9	540
9,5	570
10	600
10,5	630
11	660
11,5	690
12	720
12,5	750
13	780
13,5	810
14	840
14,5	870
15	900

4.4.1.2 TEMPERATURA DEL GAS AMBIENTE

Este valor se calcula de acuerdo con la formulación de la curva nominal estándar

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(\delta t + 1) [^\circ]$$

en función del tiempo desde el desarrollo del incendio transcurrido en minutos.

4.4.1.3 DENSIDAD DEL ACERO

La densidad del acero se toma como un valor constante e igual a 7.850 kg/m³ a lo largo de todo el proceso de cálculo.

4.4.1.4 CALOR ESPECÍFICO DEL ACERO

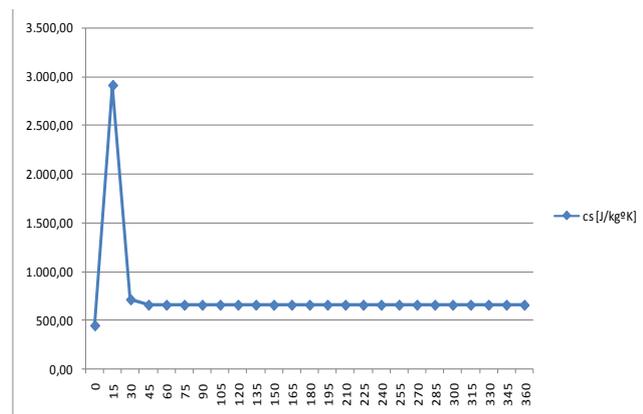
El valor del calor específico del acero se ha introducido en la hoja de cálculo de acuerdo con las ecuaciones reseñadas en el apartado anterior correspondiente:

$20^\circ\text{C} \leq \theta_s < 600^\circ\text{C}$	$c_s = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_s - 1,69 \times 10^{-3} \theta_s^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_s^3$ J/kgK
$600^\circ\text{C} \leq \theta_s < 735^\circ\text{C}$	$c_s = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_s}$ J/kgK
$735^\circ\text{C} \leq \theta_s < 900^\circ\text{C}$	$c_s = 545 + \frac{17820}{\theta_s - 731}$ J/kgK
$900^\circ\text{C} \leq \theta_s \leq 1200^\circ\text{C}$	$c_s = 650$ J/kgK

Dando lugar a la siguiente serie de valores:

t (min)	t (s)	θ_g [°C]	ρ_s [kg/m ³]	c_s [J/kg°K]
0	0	20,00	7850	439,80
15	900	738,56	7850	2.901,85
30	1800	841,80	7850	705,84
45	2700	902,34	7850	650,00
60	3600	945,34	7850	650,00
75	4500	978,71	7850	650,00
90	5400	1005,99	7850	650,00
105	6300	1029,05	7850	650,00
120	7200	1049,04	7850	650,00
135	8100	1066,67	7850	650,00
150	9000	1082,44	7850	650,00
165	9900	1096,71	7850	650,00
180	10800	1109,74	7850	650,00
195	11700	1121,72	7850	650,00
210	12600	1132,82	7850	650,00
225	13500	1143,15	7850	650,00
240	14400	1152,82	7850	650,00
255	15300	1161,90	7850	650,00
270	16200	1170,46	7850	650,00
285	17100	1178,55	7850	650,00
300	18000	1186,24	7850	650,00
315	18900	1193,54	7850	650,00
330	19800	1200,51	7850	650,00
345	20700	1207,17	7850	650,00
360	21600	1213,54	7850	650,00

que gráficamente adoptan la siguiente forma debido a la rápida elevación de temperatura en el ambiente que induce la formulación de la curva nominal estándar en el que, a los 700° (15 minutos) se produce el pico de cristalización:



4.4.1.5 DENSIDAD, CALOR ESPECÍFICO Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL MATERIAL DE PROTECCIÓN

Estos tres valores son sobre los que, al desconocerse datos convenientemente tabulados de los mismos, se va a actuar produciendo variaciones que proporcionen valores de la temperatura del acero que puedan inducir a determinar la importancia de su variación en el resultado de la ecuación.

4.4.2 PROCESO DE CÁLCULO

Para poder apreciar los diferentes valores que se producen al alterar los parámetros correspondientes al material de protección se han duplicado las columnas correspondientes a estos. En la siguiente Tabla se puede observar, en fondo azul, los valores con parámetros constantes y, en fondo verde, los valores obtenidos al variar la conductividad térmica³².

		PARÁMETROS FIJOS							PARÁMETROS VARIABLES				
t (min)	t (s)	θ_g [°C]	ρ_s [kg/m ³]	c_s [J/kg°K]	ρ_p [kg/m ³]	c_p [J/kg°K]	λ_p [W/m°K]	θ_s [°C]	ρ_p [kg/m ³]	c_p [J/kg°K]	λ_p [W/m°K]	θ_s [°C]	
0	0	20,00	7850	439,80	220	1100	0,15	20,00	220	1100	0,150	20,00	
15	900	738,56	7850	2.901,85	220	1100	0,15	60,40	220	1100	0,155	61,06	
30	1800	841,80	7850	705,84	220	1100	0,15	120,43	220	1100	0,159	123,76	
45	2700	902,34	7850	650,00	220	1100	0,15	199,72	220	1100	0,164	208,33	
60	3600	945,34	7850	650,00	220	1100	0,15	278,51	220	1100	0,168	293,90	
75	4500	978,71	7850	650,00	220	1100	0,15	352,95	220	1100	0,173	375,91	
90	5400	1005,99	7850	650,00	220	1100	0,15	422,62	220	1100	0,177	453,48	
105	6300	1029,05	7850	650,00	220	1100	0,15	487,46	220	1100	0,182	526,19	
120	7200	1049,04	7850	650,00	220	1100	0,15	547,60	220	1100	0,186	593,86	
135	8100	1066,67	7850	650,00	220	1100	0,15	603,24	220	1100	0,191	656,49	
150	9000	1082,44	7850	650,00	220	1100	0,15	654,63	220	1100	0,195	714,19	
165	9900	1096,71	7850	650,00	220	1100	0,15	702,07	220	1100	0,200	767,11	
180	10800	1109,74	7850	650,00	220	1100	0,15	745,82	220	1100	0,204	815,50	
195	11700	1121,72	7850	650,00	220	1100	0,15	786,16	220	1100	0,209	859,62	
210	12600	1132,82	7850	650,00	220	1100	0,15	823,36	220	1100	0,213	899,74	
225	13500	1143,15	7850	650,00	220	1100	0,15	857,67	220	1100	0,218	936,15	
240	14400	1152,82	7850	650,00	220	1100	0,15	889,32	220	1100	0,222	969,14	
255	15300	1161,90	7850	650,00	220	1100	0,15	918,55	220	1100	0,227	999,01	
270	16200	1170,46	7850	650,00	220	1100	0,15	945,54	220	1100	0,231	1026,02	
285	17100	1178,55	7850	650,00	220	1100	0,15	970,50	220	1100	0,236	1050,43	
300	18000	1186,24	7850	650,00	220	1100	0,15	993,60	220	1100	0,240	1072,51	
315	18900	1193,54	7850	650,00	220	1100	0,15	1014,99	220	1100	0,245	1092,49	
330	19800	1200,51	7850	650,00	220	1100	0,15	1034,83	220	1100	0,249	1110,57	
345	20700	1207,17	7850	650,00	220	1100	0,15	1053,24	220	1100	0,254	1126,97	
360	21600	1213,54	7850	650,00	220	1100	0,15	1070,36	220	1100	0,258	1141,87	

Para obtener el valor de la temperatura del acero de acuerdo con la formulación de la citada ecuación diferencial y, con objeto de evitar errores de cálculo se han utilizado, tanto en el caso de cálculo con parámetros fijos como variables, siete columnas auxiliares:

PARÁMETROS FIJOS															
6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16					
ρ_p [kg/m ³]	c_p [J/kg°K]	λ_p [W/m°K]	Φ	1er	2°	3°	4°	$\Delta\theta_{CAL}$ [°C]	$\Delta\theta$ [°C]	θ_s [°C]					
220	1100	0,15	0,2002722	0,000199	0,93742	0	0	0,00	0,00	20,00					
220	1100	0,15	0,0303531	3,01E-05	0,989984	20344,76	0,01531158	0,59	0,59	60,40					
220	1100	0,15	0,1247882	0,000124	0,960065	21641,03	0,03148922	2,54	2,54	120,43					
220	1100	0,15	0,1355078	0,000134	0,956783	21078,69	0,02277632	2,69	2,69	199,72					
220	1100	0,15	0,1355078	0,000134	0,956783	20004,84	0,01707028	2,56	2,56	278,51					
220	1100	0,15	0,1355078	0,000134	0,956783	18772,86	0,01365049	2,40	2,40	352,95					
220	1100	0,15	0,1355078	0,000134	0,956783	17501,04	0,01137223	2,24	2,24	422,62					
220	1100	0,15	0,1355078	0,000134	0,956783	16247,74	0,00974569	2,08	2,08	487,46					
220	1100	0,15	0,1355078	0,000134	0,956783	15043,22	0,0085262	1,93	1,93	547,60					
220	1100	0,15	0,1355078	0,000134	0,956783	13902,98	0,00757797	1,78	1,78	603,24					
220	1100	0,15	0,1355078	0,000134	0,956783	12834,23	0,00681954	1,64	1,64	654,63					
220	1100	0,15	0,1355078	0,000134	0,956783	11839,32	0,00619911	1,52	1,52	702,07					
220	1100	0,15	0,1355078	0,000134	0,956783	10917,67	0,00568215	1,40	1,40	745,82					
220	1100	0,15	0,1355078	0,000134	0,956783	10066,98	0,00524478	1,29	1,29	786,16					
220	1100	0,15	0,1355078	0,000134	0,956783	9283,896	0,00486993	1,19	1,19	823,36					
220	1100	0,15	0,1355078	0,000134	0,956783	8564,553	0,00454509	1,10	1,10	857,67					
220	1100	0,15	0,1355078	0,000134	0,956783	7904,806	0,00426087	1,01	1,01	889,32					
220	1100	0,15	0,1355078	0,000134	0,956783	7300,453	0,00401011	0,93	0,93	918,55					
220	1100	0,15	0,1355078	0,000134	0,956783	6747,352	0,00378722	0,86	0,86	945,54					
220	1100	0,15	0,1355078	0,000134	0,956783	6241,504	0,00358781	0,80	0,80	970,50					
220	1100	0,15	0,1355078	0,000134	0,956783	5779,1	0,00340834	0,74	0,74	993,60					
220	1100	0,15	0,1355078	0,000134	0,956783	5356,548	0,00324598	0,69	0,69	1014,99					
220	1100	0,15	0,1355078	0,000134	0,956783	4970,487	0,00309838	0,64	0,64	1034,83					
220	1100	0,15	0,1355078	0,000134	0,956783	4617,79	0,00296362	0,59	0,59	1053,24					
220	1100	0,15	0,1355078	0,000134	0,956783	4295,561	0,00284009	0,55	0,55	1070,36					

La columna 9 contiene el valor del factor de protección ϕ

³² En la Tabla puede observarse como, en este caso, la propiedad que varía es el coeficiente de conductividad térmica.

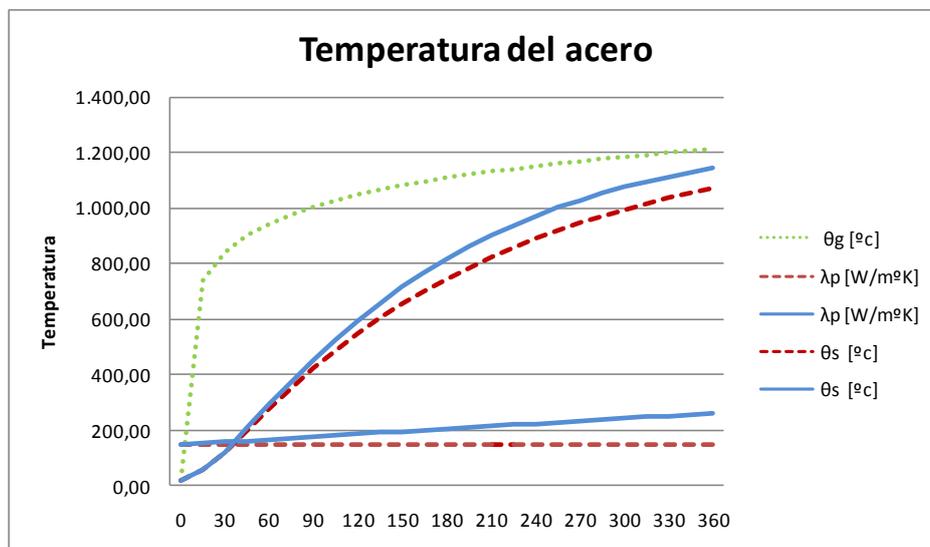
4.4.3 SALIDA DE RESULTADOS

La salida de resultados se hace de forma numérica y gráfica mediante una tabla que indica la variación de la temperatura del acero en función de la variación del parámetro considerado del material de protección.

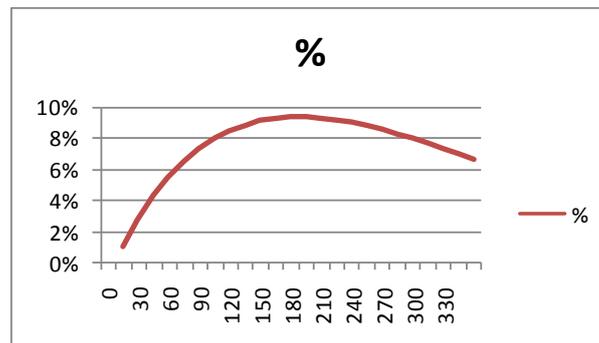
A modo de ejemplo se adjuntan los resultados obtenidos al variar la conductividad térmica linealmente al alza hasta un valor de casi el doble de la que posee a temperatura ambiente:

t (min)	θ_g [°C]	λ constante	λ creciente	λ constante	λ creciente	Diferencia	%
		λ_p [W/m²K]	λ_p [W/m²K]	θ_s pc [°C]	θ_s pv [°C]		
0	20,00	150,00	150,00	20,00	20,00	0,00	
15	738,56	150,00	154,50	60,40	61,06	-0,66	1,09%
30	841,80	150,00	159,00	120,43	123,76	-3,34	2,77%
45	902,34	150,00	163,50	199,72	208,33	-8,62	4,32%
60	945,34	150,00	168,00	278,51	293,90	-15,39	5,53%
75	978,71	150,00	172,50	352,95	375,91	-22,96	6,50%
90	1.005,99	150,00	177,00	422,62	453,48	-30,86	7,30%
105	1.029,05	150,00	181,50	487,46	526,19	-38,72	7,94%
120	1.049,04	150,00	186,00	547,60	593,86	-46,26	8,45%
135	1.066,67	150,00	190,50	603,24	656,49	-53,26	8,83%
150	1.082,44	150,00	195,00	654,63	714,19	-59,55	9,10%
165	1.096,71	150,00	199,50	702,07	767,11	-65,05	9,26%
180	1.109,74	150,00	204,00	745,82	815,50	-69,69	9,34%
195	1.121,72	150,00	208,50	786,16	859,62	-73,46	9,34%
210	1.132,82	150,00	213,00	823,36	899,74	-76,38	9,28%
225	1.143,15	150,00	217,50	857,67	936,15	-78,48	9,15%
240	1.152,82	150,00	222,00	889,32	969,14	-79,82	8,98%
255	1.161,90	150,00	226,50	918,55	999,01	-80,46	8,76%
270	1.170,46	150,00	231,00	945,54	1.026,02	-80,47	8,51%
285	1.178,55	150,00	235,50	970,50	1.050,43	-79,93	8,24%
300	1.186,24	150,00	240,00	993,60	1.072,51	-78,91	7,94%
315	1.193,54	150,00	244,50	1.014,99	1.092,49	-77,50	7,64%
330	1.200,51	150,00	249,00	1.034,83	1.110,57	-75,75	7,32%
345	1.207,17	150,00	253,50	1.053,24	1.126,97	-73,73	7,00%
360	1.213,54	150,00	258,00	1.070,36	1.141,87	-71,51	6,68%

que se puede apreciar mucho mejor de forma gráfica estando en color verde (a puntos) la temperatura del gas ambiente de acuerdo con la curva de incendio nominal estándar, en color rojo (a trazos) la variación de la temperatura del acero con un coeficiente de conductividad térmica del material protector constante y, en color azul (continuo), la variación de la temperatura del acero con un coeficiente de conductividad térmica del material protector creciente linealmente (en este ejemplo).



Para evaluar más detalladamente la diferencia se incluye un gráfico que compara el porcentaje de variación de la temperatura del acero en función de si el coeficiente de conductividad es constante o variable:



Todos los valores del estudio realizado se pueden consultar en detalle en el Apéndice 2 de la presente Tesis.

4.5 ESTUDIO ANALÍTICO DE LA INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES DE PROTECCIÓN

Previamente al estudio, cabe reseñar que no se ha considerado oportuno realizar cálculos sobre la variación de propiedades geométricas como el factor de sección y el espesor del material de protección.

En el primero de los casos es evidente que se trata de un factor constante en lo que a resultados numéricos se refiere. Cuanto mayor sea el factor de sección (o lo que es lo mismo, cuanto mayor sea la superficie del elemento expuesta al fuego) mayor será el incremento de la temperatura del acero independientemente del resto de las variables.

En el segundo de los casos, el espesor del material de protección, resulta también evidente que, cuanto mayor sea éste (al ser un divisor) menor será el incremento de temperatura del acero.

Respecto al resto de términos que intervienen en la ecuación diferencial, y tal y como se ha indicado anteriormente, la densidad del acero se mantiene constante a lo largo de los cálculos y el calor específico se introduce de acuerdo con las ecuaciones derivadas de su comportamiento a altas temperaturas.

4.5.1 VARIACIÓN DE LA DENSIDAD

Para estudiar la influencia de la variación de la densidad del material de protección en el resultado de la temperatura del acero se han introducido en la hoja de cálculo los datos medios de cinco de los tipos de productos (tanto en densidad como en espesor comercial) según se indica en la siguiente tabla:

Tipo de material de protección	ρ [Kg/m ³]	Espesor (mm)
MORTEROS DE FIBRA MINERAL	220	25
MORTEROS DE ÁRIDOS LIGEROS	600	20
PANELES DE FIBROSILICATO	600	20
PANELES DE YESO	800	15
PANELES DE LANA MINERAL	175	40

Al no haberse encontrado datos previos sobre la variación de la densidad de los materiales de protección a altas temperaturas y, aun cuando resulta lógico pensar que la tendencia será a disminuir por pérdida de masa y/o incremento de volumen, se ha simulado una variación lineal tanto creciente como decreciente de este parámetro.

Debido a la similitud de datos de partida de los morteros de áridos ligeros y paneles de fibrosilicato, se han agrupado.

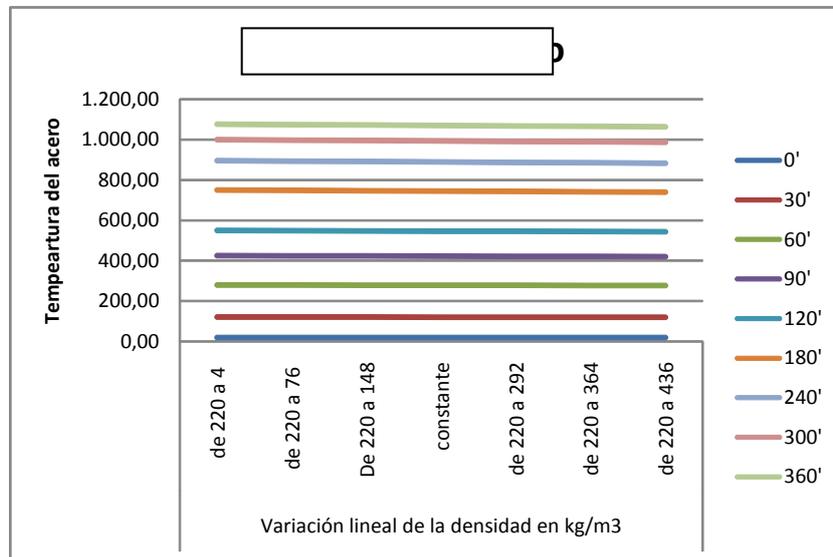
En el caso de la variación creciente se ha llegado al doble del valor y, en el caso de la decreciente, a valor nulo³³. Los resultados de los cálculos detallados pueden consultarse en el Apéndice 2 de la presente Tesis, relacionándose seguidamente los resúmenes de resultados por materiales en forma de tabla y gráfico.

Como se puede observar, en los siguientes gráficos y tablas, la variación de la densidad no afecta prácticamente a la temperatura del acero, habiéndose detectado variaciones en la misma en el entorno del 1%.

³³ Este rango de variaciones introducidas en la densidad del material de protección son físicamente inconsistentes e inalcanzables, pero se han considerado útiles a los efectos de servir a los propósitos de determinar su relevancia en el resultado de la ecuación.

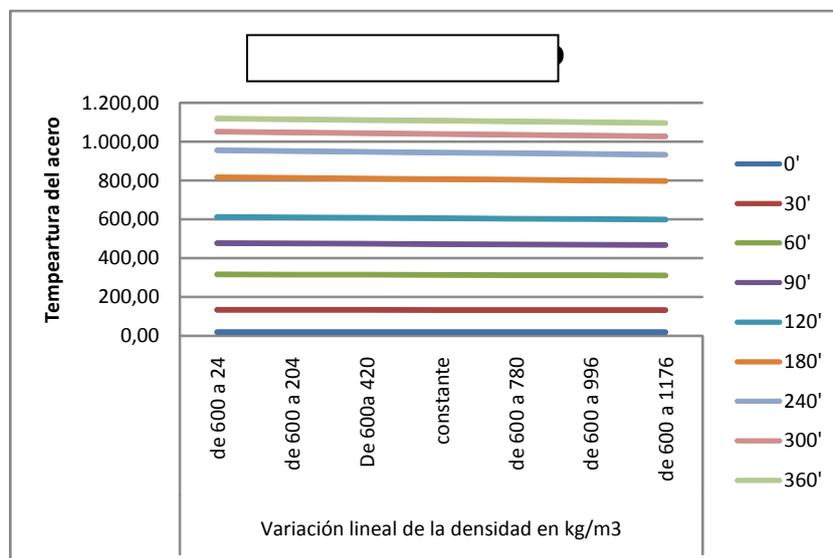
4.5.1.1 MORTEROS DE FIBRA MINERAL - $\rho=220 \text{ kg/m}^3$ - $e=25 \text{ mm}$

t (min)	Variación lineal de la densidad en kg/m ³						
	de 220 a 4	de 220 a 76	De 220 a 148	constante	de 220 a 292	de 220 a 364	de 220 a 436
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
15	60,49	60,46	60,43	60,40	60,37	60,34	60,31
30	120,70	120,61	120,52	120,43	120,34	120,25	120,16
45	200,36	200,15	199,93	199,72	199,50	199,29	199,07
60	279,63	279,26	278,88	278,51	278,14	277,77	277,40
75	354,59	354,04	353,50	352,95	352,40	351,86	351,32
90	424,81	424,08	423,35	422,62	421,89	421,17	420,45
105	490,20	489,29	488,37	487,46	486,56	485,65	484,75
120	550,88	549,78	548,69	547,60	546,51	545,43	544,35
135	607,04	605,77	604,50	603,24	601,98	600,73	599,48
150	658,92	657,49	656,06	654,63	653,22	651,80	650,40
165	706,81	705,22	703,64	702,07	700,50	698,94	697,38
180	750,97	749,24	747,53	745,82	744,11	742,42	740,73
195	791,68	789,83	787,99	786,16	784,33	782,52	780,71
210	829,20	827,24	825,30	823,36	821,43	819,50	817,59
225	863,79	861,74	859,70	857,67	855,64	853,63	851,62
240	895,68	893,55	891,43	889,32	887,22	885,13	883,04
255	925,10	922,91	920,72	918,55	916,38	914,22	912,07
270	952,25	950,01	947,77	945,54	943,32	941,11	938,90
285	977,33	975,05	972,77	970,50	968,24	965,98	963,73
300	1.000,51	998,20	995,90	993,60	991,31	989,02	986,74
315	1.021,96	1.019,63	1.017,31	1.014,99	1.012,68	1.010,37	1.008,06
330	1.041,83	1.039,49	1.037,16	1.034,83	1.032,50	1.030,18	1.027,86
345	1.060,25	1.057,91	1.055,57	1.053,24	1.050,91	1.048,58	1.046,26
360	1.077,35	1.075,02	1.072,69	1.070,36	1.068,03	1.065,70	1.063,38



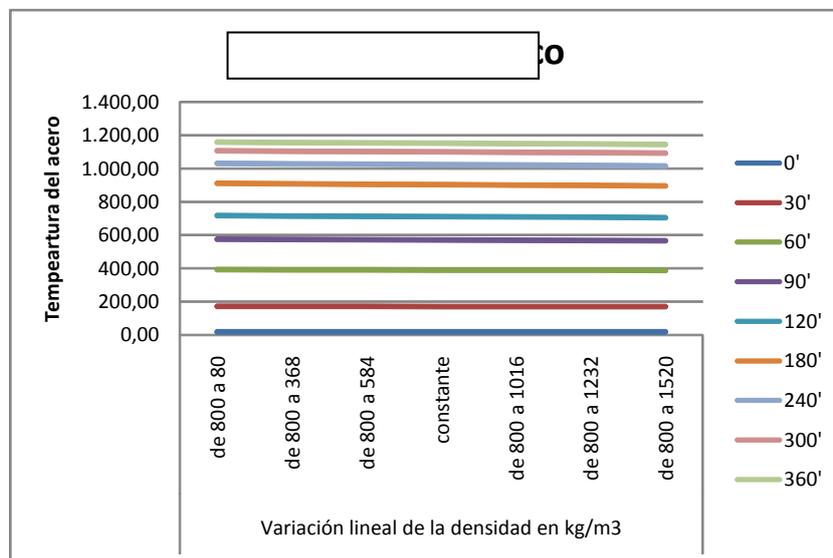
4.5.1.2 MORTEROS ÁRIDOS LIGEROS/PANELES FIBROSILICATO $\rho=600$ kg/m³ e=20 mm

t (min)	Variación lineal de la densidad en kg/m ³						
	de 600 a 24	de 600 a 204	De 600a 420	constante	de 600 a 780	de 600 a 996	de 600 a 1176
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
15	64,02	63,96	63,89	63,83	63,77	63,70	63,64
30	134,72	134,53	134,30	134,10	133,91	133,68	133,49
45	226,59	226,13	225,58	225,12	224,67	224,12	223,67
60	316,56	315,77	314,82	314,04	313,26	312,33	311,55
75	400,29	399,14	397,78	396,65	395,52	394,18	393,07
90	477,44	475,94	474,15	472,67	471,19	469,44	467,98
105	548,12	546,27	544,07	542,25	540,43	538,27	536,48
120	612,63	610,45	607,86	605,71	603,58	601,03	598,92
135	671,37	668,88	665,93	663,48	661,05	658,16	655,76
150	724,76	722,01	718,73	716,01	713,32	710,10	707,45
165	773,25	770,26	766,70	763,75	760,82	757,33	754,44
180	817,28	814,09	810,28	807,13	804,00	800,26	797,17
195	857,25	853,89	849,88	846,56	843,25	839,32	836,06
210	893,55	890,05	885,87	882,41	878,97	874,87	871,47
225	926,54	922,93	918,62	915,05	911,50	907,27	903,76
240	956,53	952,85	948,45	944,80	941,16	936,82	933,23
255	983,84	980,10	975,64	971,93	968,24	963,82	960,16
270	1.008,73	1.004,96	1.000,46	996,72	992,99	988,52	984,82
285	1.031,44	1.027,67	1.023,15	1.019,40	1.015,65	1.011,16	1.007,43
300	1.052,20	1.048,44	1.043,93	1.040,18	1.036,43	1.031,94	1.028,20
315	1.071,22	1.067,48	1.063,00	1.059,26	1.055,53	1.051,04	1.047,31
330	1.088,66	1.084,97	1.080,52	1.076,82	1.073,11	1.068,65	1.064,93
345	1.104,69	1.101,05	1.096,66	1.093,00	1.089,32	1.084,90	1.081,21
360	1.119,46	1.115,88	1.111,55	1.107,94	1.104,31	1.099,93	1.096,28



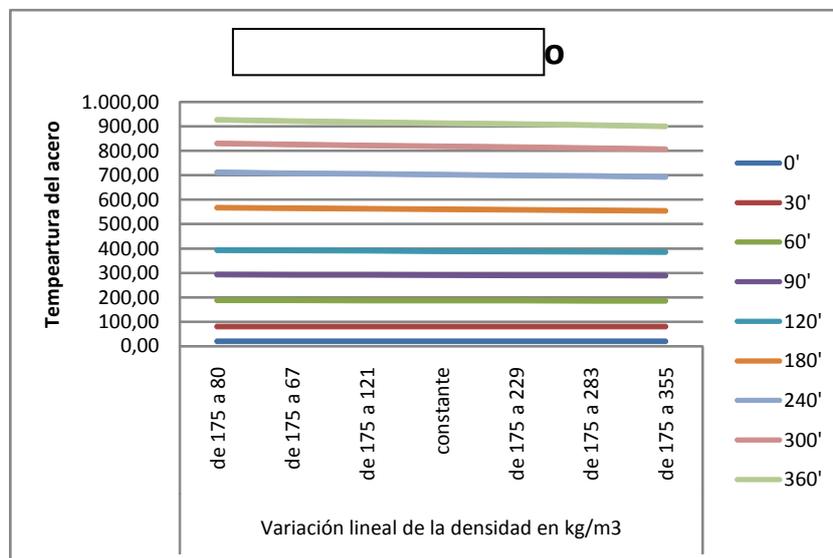
4.5.1.3 PANELES DE YESO LAMINADO - $\rho=800 \text{ kg/m}^3$ - $e=15 \text{ mm}$

t (min)	Variación lineal de la densidad en kg/m ³						
	de 800 a 80	de 800 a 368	de 800 a 584	constante	de 800 a 1016	de 800 a 1232	de 800 a 1520
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
15	81,04	80,97	80,91	80,85	80,79	80,73	80,65
30	172,22	171,96	171,76	171,56	171,36	171,17	170,90
45	286,43	285,79	285,32	284,85	284,38	283,91	283,29
60	393,88	392,83	392,04	391,25	390,47	389,68	388,65
75	490,07	488,59	487,48	486,38	485,28	484,19	482,74
90	575,43	573,55	572,15	570,75	569,36	567,98	566,14
105	650,83	648,60	646,93	645,27	643,62	641,97	639,79
120	717,28	714,73	712,84	710,95	709,07	707,20	704,72
135	775,76	772,97	770,89	768,81	766,74	764,69	761,96
150	827,25	824,26	822,02	819,80	817,58	815,37	812,45
165	872,60	869,46	867,11	864,77	862,44	860,12	857,04
180	912,60	909,36	906,93	904,52	902,11	899,70	896,51
195	947,95	944,65	942,17	939,70	937,24	934,79	931,52
210	979,27	975,93	973,43	970,94	968,45	965,97	962,66
225	1.007,07	1.003,74	1.001,24	998,75	996,25	993,76	990,44
240	1.031,85	1.028,54	1.026,06	1.023,58	1.021,10	1.018,61	1.015,30
255	1.053,99	1.050,73	1.048,28	1.045,82	1.043,37	1.040,91	1.037,63
270	1.073,84	1.070,65	1.068,24	1.065,83	1.063,41	1.060,98	1.057,74
285	1.091,73	1.088,60	1.086,24	1.083,88	1.081,50	1.079,12	1.075,94
300	1.107,89	1.104,84	1.102,54	1.100,23	1.097,91	1.095,58	1.092,45
315	1.122,56	1.119,60	1.117,36	1.115,11	1.112,84	1.110,56	1.107,50
330	1.135,93	1.133,06	1.130,88	1.128,69	1.126,48	1.124,26	1.121,27
345	1.148,17	1.145,39	1.143,27	1.141,14	1.138,99	1.136,83	1.133,91
360	1.159,42	1.156,73	1.154,68	1.152,61	1.150,52	1.148,40	1.145,56



4.5.1.4 PANELES DE LANA MINERAL - $\rho = 175 \text{ kg/m}^3$ - $e=40 \text{ mm}$

t (min)	Variación lineal de la densidad en kg/m3						
	de 175 a 80	de 175 a 67	de 175 a 121	constante	de 175 a 229	de 175 a 283	de 175 a 355
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
15	42,51	42,47	42,44	42,41	42,38	42,35	42,31
30	80,73	80,61	80,53	80,44	80,36	80,27	80,16
45	133,26	133,00	132,80	132,60	132,40	132,20	131,94
60	187,72	187,25	186,91	186,56	186,21	185,87	185,41
75	241,31	240,61	240,09	239,57	239,06	238,54	237,86
90	293,49	292,53	291,82	291,11	290,41	289,70	288,77
105	343,96	342,73	341,81	340,90	339,99	339,09	337,88
120	392,56	391,04	389,91	388,78	387,66	386,54	385,06
135	439,22	437,40	436,04	434,70	433,35	432,02	430,25
150	483,90	481,77	480,19	478,62	477,06	475,50	473,45
165	526,61	524,18	522,37	520,58	518,79	517,02	514,67
180	567,37	564,64	562,61	560,60	558,59	556,60	553,96
195	606,25	603,22	600,97	598,73	596,51	594,31	591,39
210	643,28	639,96	637,50	635,05	632,62	630,20	627,01
225	678,53	674,93	672,26	669,61	666,97	664,36	660,90
240	712,06	708,20	705,33	702,48	699,65	696,84	693,13
255	743,96	739,84	736,78	733,74	730,73	727,74	723,78
270	774,27	769,91	766,68	763,46	760,27	757,11	752,92
285	803,08	798,50	795,09	791,71	788,36	785,03	780,63
300	830,46	825,66	822,10	818,56	815,05	811,57	806,97
315	856,47	851,47	847,76	844,08	840,43	836,81	832,02
330	881,17	876,00	872,15	868,34	864,55	860,80	855,83
345	904,64	899,30	895,33	891,40	887,49	883,61	878,49
360	926,93	921,44	917,36	913,32	909,30	905,31	900,04



4.5.2 VARIACIÓN DEL CALOR ESPECÍFICO

La tabla incluida en el documento “*Scientific background to the harmonization of structural Eurocodes*” del Centro Técnico Industrial de la Construcción Metálica francés incluía datos de los se deducía que el calor específico sufre incrementos del orden del 38% en el caso de la lana mineral y del 42% en el caso del silicato cálcico por el incremento de la temperatura.

Este aumento del calor específico es lógico puesto que de su definición (cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia para elevar su temperatura una unidad) se puede colegir que, cuanto más caliente esté el material de protección, mas cantidad de calor se necesitará para elevar su temperatura.

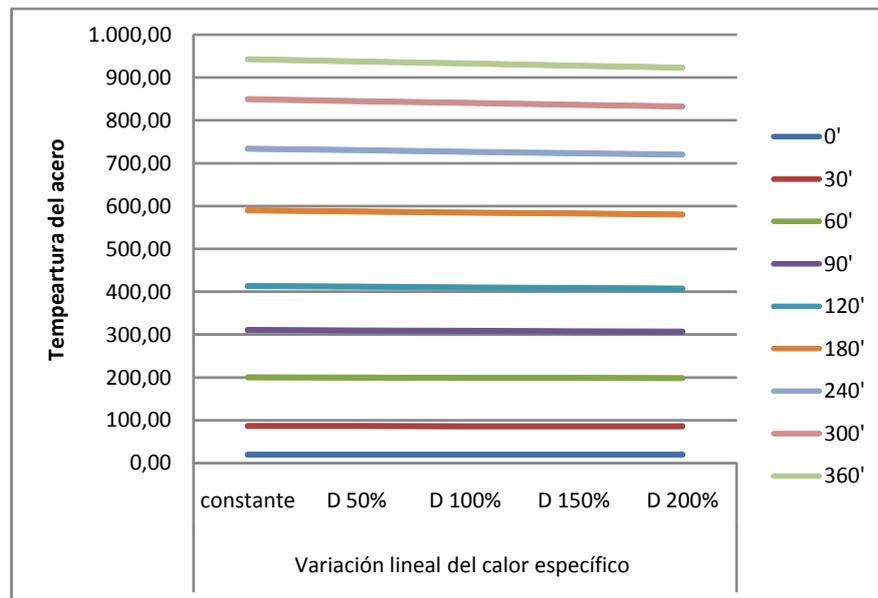
Así pues, se obvia en este caso el estudio por variación decreciente, centrándose en la influencia en la temperatura del acero de una variación lineal creciente en cuatro objetivos, el 50%, el 100%, el 150% y el 200% de incremento del calor específico.

De los resultados obtenidos se puede deducir que la variación del calor específico tampoco afecta prácticamente a la temperatura del acero, ya que las variaciones detectadas no superan 1% en rangos de tiempo y calor específico habituales.

Al haberse simulado incrementos del calor específico hasta el 200% de su valor, las máximas variaciones de esta simulación se producen al superar los 180 minutos y rondan el entorno del 3%, por lo que no se considera relevante.

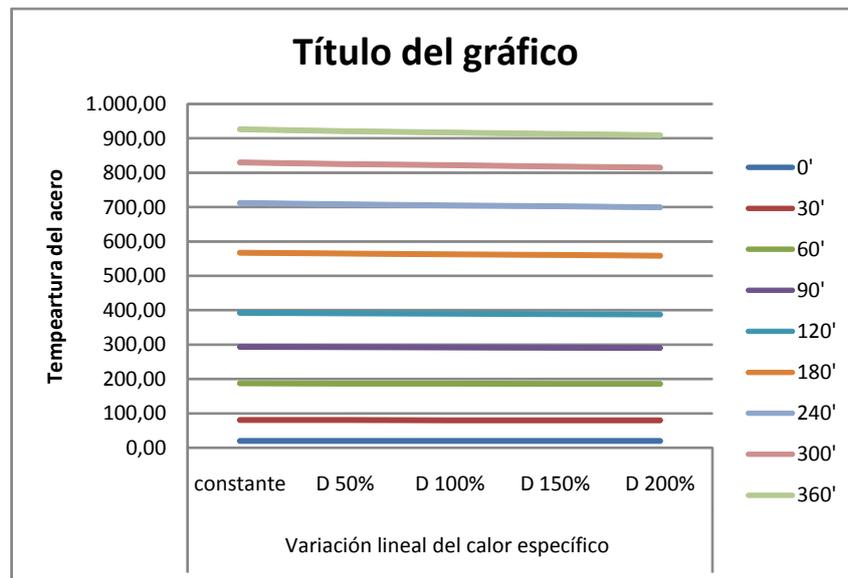
4.5.2.1 MORTEROS DE FIBRA MINERAL - $\rho=220 \text{ kg/m}^3$ - $e=25 \text{ mm}$

t (min)	Variación lineal del calor específico				
	constante	$\Delta 50\%$	$\Delta 100\%$	$\Delta 150\%$	$\Delta 200\%$
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
15	45,70	45,66	45,62	45,59	45,55
30	86,75	86,63	86,52	86,41	86,30
45	142,71	142,45	142,19	141,93	141,67
60	200,25	199,79	199,35	198,90	198,45
75	256,46	255,78	255,11	254,44	253,77
90	310,82	309,88	308,98	308,06	307,15
105	363,05	361,85	360,69	359,52	358,36
120	413,04	411,57	410,14	408,71	407,28
135	460,75	458,99	457,29	455,58	453,88
150	506,17	504,13	502,16	500,18	498,21
165	549,35	547,03	544,79	542,54	540,30
180	590,35	587,75	585,25	582,73	580,23
195	629,24	626,38	623,62	620,85	618,09
210	666,12	663,00	659,99	656,97	653,97
225	701,05	697,69	694,45	691,19	687,95
240	734,15	730,55	727,09	723,60	720,14
255	765,49	761,67	757,99	754,30	750,63
270	795,16	791,14	787,26	783,37	779,51
285	823,25	819,04	814,98	810,90	806,86
300	849,84	845,46	841,23	836,98	832,77
315	875,02	870,48	866,09	861,69	857,32
330	898,86	894,17	889,65	885,10	880,59
345	921,44	916,62	911,97	907,29	902,66
360	942,83	937,90	933,13	928,34	923,58



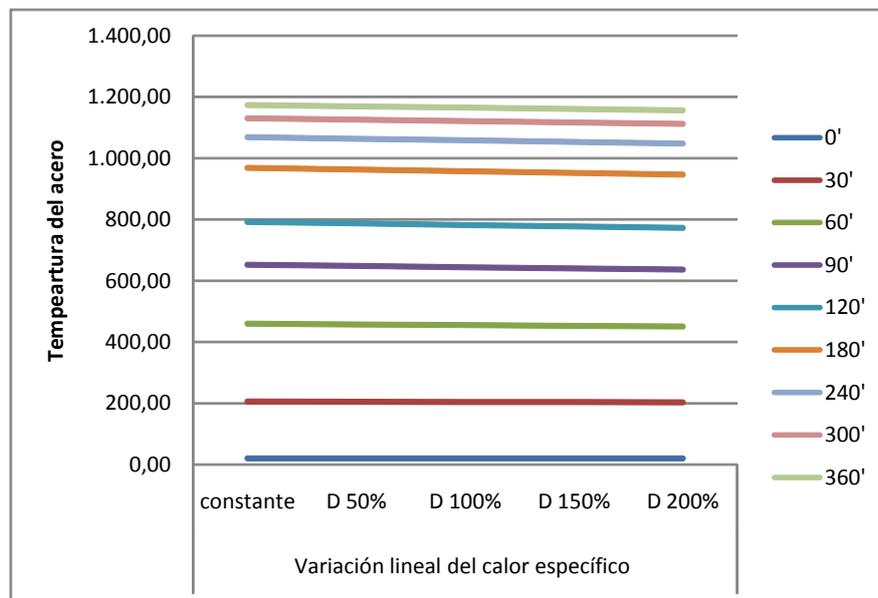
4.5.2.2 MORTEROS ÁRIDOS LIGEROS/PANELES FIBROSILICATO $\rho=600$
kg/m³ e=20 mm

t (min)	Variación lineal del calor específico				
	constante	Δ 50%	Δ 100%	Δ 150%	Δ 200%
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
15	42,51	42,47	42,44	42,41	42,38
30	80,73	80,61	80,53	80,44	80,36
45	133,26	133,00	132,80	132,60	132,40
60	187,72	187,25	186,91	186,56	186,21
75	241,31	240,61	240,09	239,57	239,06
90	293,49	292,53	291,82	291,11	290,41
105	343,96	342,73	341,81	340,90	339,99
120	392,56	391,04	389,91	388,78	387,66
135	439,22	437,40	436,04	434,70	433,35
150	483,90	481,77	480,19	478,62	477,06
165	526,61	524,18	522,37	520,58	518,79
180	567,37	564,64	562,61	560,60	558,59
195	606,25	603,22	600,97	598,73	596,51
210	643,28	639,96	637,50	635,05	632,62
225	678,53	674,93	672,26	669,61	666,97
240	712,06	708,20	705,33	702,48	699,65
255	743,96	739,84	736,78	733,74	730,73
270	774,27	769,91	766,68	763,46	760,27
285	803,08	798,50	795,09	791,71	788,36
300	830,46	825,66	822,10	818,56	815,05
315	856,47	851,47	847,76	844,08	840,43
330	881,17	876,00	872,15	868,34	864,55
345	904,64	899,30	895,33	891,40	887,49
360	926,93	921,44	917,36	913,32	909,30



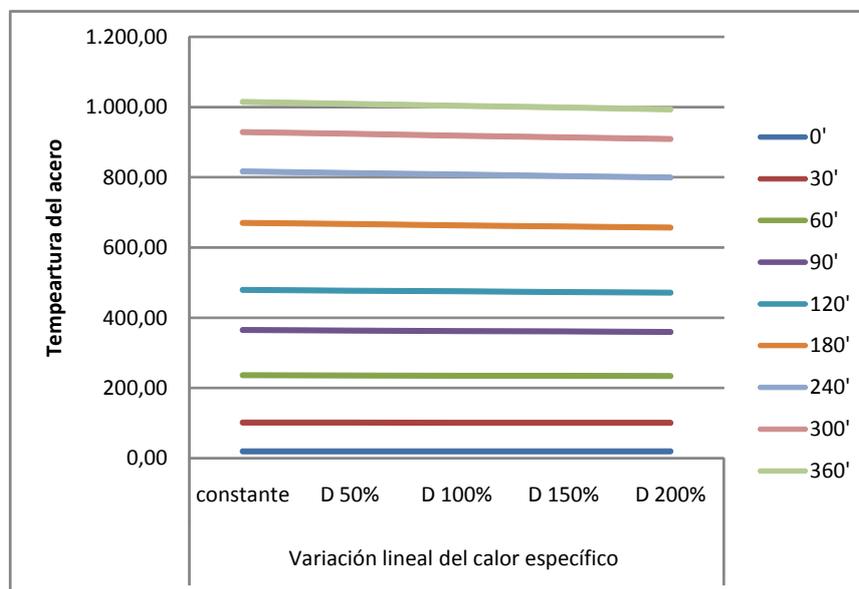
4.5.2.3 PANELES DE YESO - $\rho=800 \text{ kg/m}^3$ - $e=15 \text{ mm}$

t (min)	Variación lineal del calor específico				
	constante	Δ 50%	Δ 100%	Δ 150%	Δ 200%
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
15	94,50	94,31	94,13	93,94	93,76
30	206,10	205,46	204,83	204,20	203,57
45	339,62	338,16	336,70	335,25	333,82
60	460,02	457,66	455,33	453,01	450,71
75	563,57	560,40	557,25	554,14	551,06
90	652,04	648,17	644,34	640,55	636,79
105	727,45	723,02	718,63	714,28	709,97
120	791,72	786,86	782,05	777,27	772,54
135	846,59	841,43	836,31	831,23	826,19
150	893,56	888,21	882,89	877,61	872,35
165	933,91	928,47	923,05	917,64	912,26
180	968,74	963,28	957,82	952,37	946,93
195	998,95	993,52	988,09	982,65	977,21
210	1.025,30	1.019,95	1.014,58	1.009,20	1.003,79
225	1.048,41	1.043,18	1.037,91	1.032,61	1.027,27
240	1.068,81	1.063,71	1.058,57	1.053,37	1.048,13
255	1.086,93	1.081,98	1.076,97	1.071,89	1.066,76
270	1.103,13	1.098,34	1.093,47	1.088,52	1.083,50
285	1.117,70	1.113,07	1.108,34	1.103,52	1.098,62
300	1.130,90	1.126,42	1.121,83	1.117,15	1.112,36
315	1.142,92	1.138,59	1.134,14	1.129,58	1.124,91
330	1.153,93	1.149,74	1.145,43	1.140,99	1.136,43
345	1.164,08	1.160,02	1.155,83	1.151,51	1.147,06
360	1.173,48	1.169,55	1.165,47	1.161,26	1.156,91



4.5.2.4 PANELES DE LANA MINERAL - $\rho=175 \text{ kg/m}^3$ - $e=40 \text{ mm}$

t (min)	Variación lineal del calor específico				
	constante	Δ 50%	Δ 100%	Δ 150%	Δ 200%
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
15	51,51	51,46	51,41	51,36	51,30
30	101,59	101,43	101,28	101,12	100,97
45	168,84	168,47	168,11	167,74	167,38
60	236,92	236,28	235,65	235,01	234,38
75	302,41	301,47	300,53	299,59	298,65
90	364,79	363,52	362,25	360,98	359,73
105	423,85	422,23	420,62	419,02	417,43
120	479,53	477,56	475,61	473,67	471,75
135	531,89	529,58	527,29	525,01	522,75
150	581,04	578,39	575,77	573,16	570,58
165	627,10	624,13	621,19	618,27	615,37
180	670,23	666,96	663,71	660,49	657,30
195	710,59	707,03	703,50	700,00	696,53
210	748,34	744,51	740,72	736,95	733,22
225	783,65	779,57	775,53	771,53	767,56
240	816,65	812,35	808,09	803,87	799,69
255	847,52	843,02	838,56	834,14	829,76
270	876,39	871,71	867,07	862,47	857,92
285	903,39	898,56	893,76	889,01	884,29
300	928,66	923,69	918,76	913,87	909,02
315	952,32	947,24	942,19	937,18	932,21
330	974,49	969,30	964,16	959,05	953,98
345	995,25	989,99	984,77	979,58	974,42
360	1.014,73	1.009,41	1.004,12	998,86	993,64



4.5.3 VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Siguiendo con el proceso iniciado con la densidad y el calor específico se ha procedido a la introducción en la herramienta de cálculo de los datos característicos medios de los materiales de protección que se relacionan en el siguiente cuadro.

Con objeto de profundizar en el estudio de la variación de esta propiedad, se ha ampliado el cálculo a diferentes rangos de espesores de producto.

	ρ [kg/m ³]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	e [mm]
MORTEROS DE FIBRA MINERAL	220	1.100	0,04	10 - 45 - 80
MORTEROS de ÁRIDOS LIGEROS	600	1.100	0,15	10 - 35 - 60
PANELES de FIBROSILICATO	600	1.100	0,20	10 - 30 - 50
PANELES de YESO	800	1.700	0,10	9,5 - 12,5 - 15
PANELES de FIBRAS MINERALES	175	1.100	0,04	20 - 70 - 120

De acuerdo con los estudios citados anteriormente, la lana mineral puede llegar a sufrir en su conductividad térmica a 1.000° incrementos de hasta seis veces su valor a temperatura ambiente. Los morteros de áridos ligeros de hasta tres veces. El silicato cálcico de hasta vez y media. La vermiculita de hasta tres veces.

La forma de los gráficos de la variación encontrados no muestra un desarrollo lineal sino, más bien, pueden ser equiparables a la representación de una ecuación cuadrática parabólica en la que el vértice se situaría en la ordenada correspondiente al valor de λ a temperatura ambiente.

Siendo la ecuación general de una parábola que tiene su vértice en (u,v) de la forma:

$$y - v = a \cdot (x - u)^2$$

Situando el valor de la coordenada u en el eje de ordenadas y adoptando v el valor de λ a temperatura ambiente, resulta:

$$y - \lambda = a \cdot (x)^2 \Rightarrow y = ax^2 + \lambda$$

Siendo a una constante que se puede deducir del valor a alcanzar a los 360 minutos para cada uno de los materiales de protección en función del incremento del valor de λ que se quiere alcanzar a los 1.000°C y que se expresa en el siguiente cuadro:

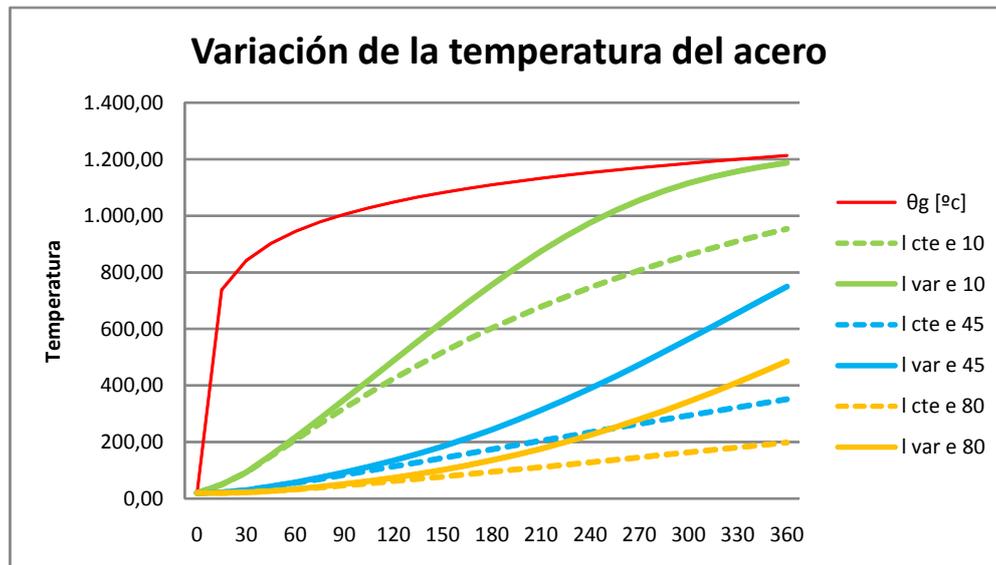
$$a = \frac{\lambda^{1.000^{\circ}\text{C}} - \lambda^{20^{\circ}\text{C}}}{360^2}$$

	λ 20°C [W/mK]	λ 1.000°C [W/mK]	Constante "a" calculada
MORTEROS de FIBRA MINERAL	0,04	0,04x6=0,24	1,54321 E-06
MORTEROS de ÁRIDOS LIGEROS	0,15	0,15x3=0,45	2,31481E-06
PANELES de FIBROSILICATO	0,20	0,20x1,5=0,30	7,71605E-07
PANELES de YESO	0,10	0,10x3=0,30	1,54321E-06
PANELES de FIBRAS MINERALES	0,04	0,04x6=0,24	1,54321 E-06

La variación del coeficiente de conductividad térmica (programada de acuerdo con la formulación y límites de valor de la ecuación cuadrática que se reseña en el apartado correspondiente) resulta, sin embargo, relevante en la evolución de la temperatura del acero según puede deducirse de los siguientes cálculos, en los que pueden apreciarse variaciones importantes.

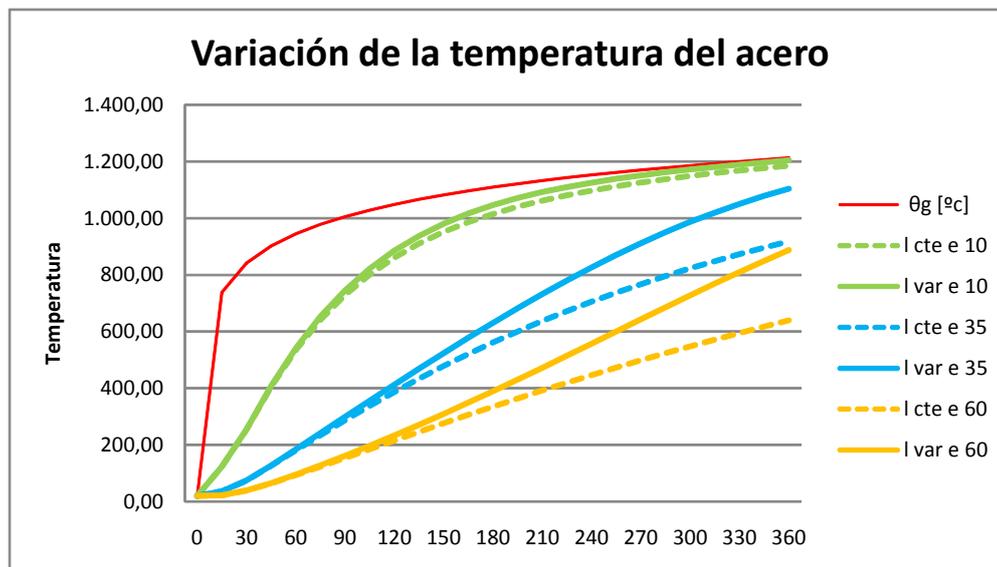
4.5.3.1 MORTEROS DE FIBRA MINERAL - $\rho=220 \text{ kg/m}^3$ - $c=1.100 \text{ J/kgK}$

		FIBRA MINERAL PROYECTADA							
		e=10 mm		e=45 mm		e=80 mm			
t (min)	θ_g [°C]	θ_s	λ_{cte} [°C]	θ_s	λ_{var} [°C]	θ_s	λ_{cte} [°C]	θ_s	λ_{var} [°C]
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
15	738,56	49,41	49,49	21,86	21,88	20,00	20,00	20,00	20,00
30	841,80	91,69	92,66	29,63	29,86	21,94	22,05	21,94	22,05
45	902,34	149,16	153,11	41,64	42,59	26,58	27,09	26,58	27,09
60	945,34	208,05	217,69	55,08	57,55	32,53	33,87	32,53	33,87
75	978,71	265,38	283,81	69,17	74,18	39,20	41,95	39,20	41,95
90	1.005,99	320,67	351,20	83,68	92,52	46,35	51,24	46,35	51,24
105	1.029,05	373,69	419,53	98,46	112,66	53,84	61,78	53,84	61,78
120	1.049,04	424,31	488,40	113,43	134,73	61,59	73,61	61,59	73,61
135	1.066,67	472,52	557,26	128,52	158,84	69,55	86,82	69,55	86,82
150	1.082,44	518,34	625,43	143,68	185,11	77,66	101,50	77,66	101,50
165	1.096,71	561,82	692,11	158,88	213,60	85,90	117,74	85,90	117,74
180	1.109,74	603,02	756,48	174,08	244,38	94,25	135,62	94,25	135,62
195	1.121,72	642,05	817,72	189,26	277,43	102,67	155,20	102,67	155,20
210	1.132,82	678,98	875,05	204,41	312,74	111,16	176,55	111,16	176,55
225	1.143,15	713,92	927,87	219,50	350,22	119,71	199,70	119,71	199,70
240	1.152,82	746,96	975,70	234,53	389,74	128,30	224,68	128,30	224,68
255	1.161,90	778,20	1.018,29	249,47	431,12	136,92	251,48	136,92	251,48
270	1.170,46	807,73	1.055,61	264,33	474,14	145,57	280,08	145,57	280,08
285	1.178,55	835,65	1.087,82	279,09	518,55	154,23	310,45	154,23	310,45
300	1.186,24	862,04	1.115,24	293,75	564,03	162,91	342,50	162,91	342,50
315	1.193,54	887,00	1.138,35	308,30	610,26	171,59	376,15	171,59	376,15
330	1.200,51	910,59	1.157,69	322,74	656,88	180,27	411,29	180,27	411,29
345	1.207,17	932,91	1.173,85	337,06	703,51	188,95	447,76	188,95	447,76
360	1.213,54	954,03	1.187,40	351,26	749,79	197,63	485,41	197,63	485,41



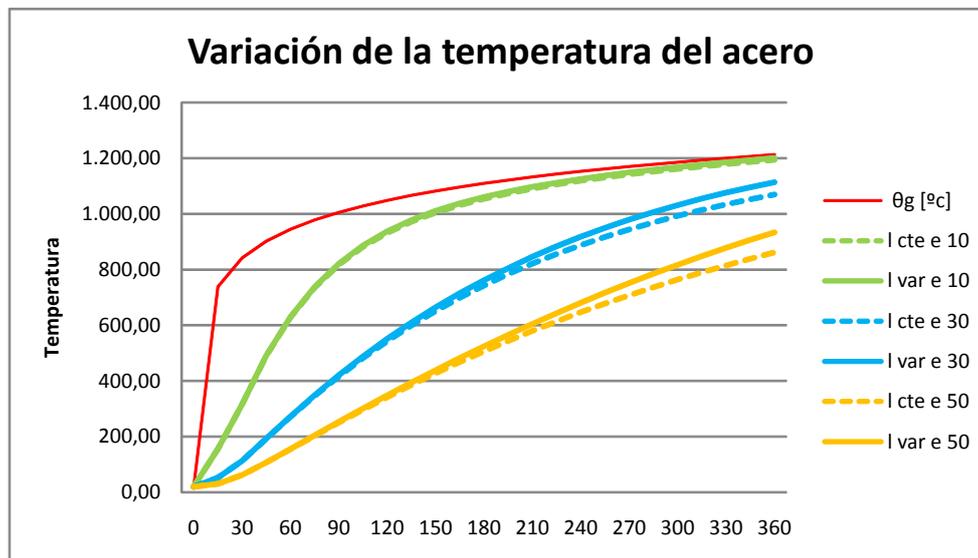
4.5.3.2 MORTEROS DE ÁRIDOS LIGEROS $\rho=600 \text{ kg/m}^3$ - $c=1.100 \text{ J/kgK}$

MORTERO de ARIDOS LIGEROS							
		e=10 mm		e=35 mm		e=60 mm	
t (min)	θ_g [°C]	θ_s λ cte[°C]	θ_s λ var[°C]	θ_s λ cte[°C]	θ_s λ var[°C]	θ_s λ cte[°C]	θ_s λ var[°C]
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
15	738,56	123,18	123,28	36,01	36,04	22,30	22,32
30	841,80	253,35	254,47	73,86	74,25	38,72	38,93
45	902,34	404,60	408,34	126,18	127,71	64,42	65,29
60	945,34	534,92	542,51	180,73	184,48	93,29	95,50
75	978,71	642,08	654,16	234,59	241,82	123,40	127,81
90	1.005,99	729,94	746,64	287,09	299,18	154,08	161,71
105	1.029,05	802,06	823,08	337,85	356,27	184,93	196,95
120	1.049,04	861,47	886,19	386,69	412,88	215,71	233,40
135	1.066,67	910,69	938,31	433,52	468,83	246,24	270,96
150	1.082,44	951,75	981,39	478,30	523,96	276,42	309,56
165	1.096,71	986,27	1.017,08	521,03	578,09	306,15	349,12
180	1.109,74	1.015,55	1.046,78	561,77	631,02	335,39	389,56
195	1.121,72	1.040,63	1.071,65	600,55	682,56	364,08	430,78
210	1.132,82	1.062,30	1.092,65	637,43	732,48	392,20	472,65
225	1.143,15	1.081,23	1.110,58	672,50	780,56	419,72	515,03
240	1.152,82	1.097,92	1.126,07	705,81	826,60	446,64	557,76
255	1.161,90	1.112,77	1.139,63	737,46	870,39	472,94	600,66
270	1.170,46	1.126,11	1.151,68	767,51	911,75	498,62	643,53
285	1.178,55	1.138,20	1.162,51	796,03	950,56	523,68	686,16
300	1.186,24	1.149,23	1.172,38	823,11	986,69	548,12	728,32
315	1.193,54	1.159,38	1.181,45	848,82	1.020,09	571,95	769,81
330	1.200,51	1.168,77	1.189,87	873,22	1.050,73	595,17	810,40
345	1.207,17	1.177,52	1.197,74	896,39	1.078,64	617,80	849,86
360	1.213,54	1.185,71	1.205,13	918,39	1.103,89	639,83	888,02



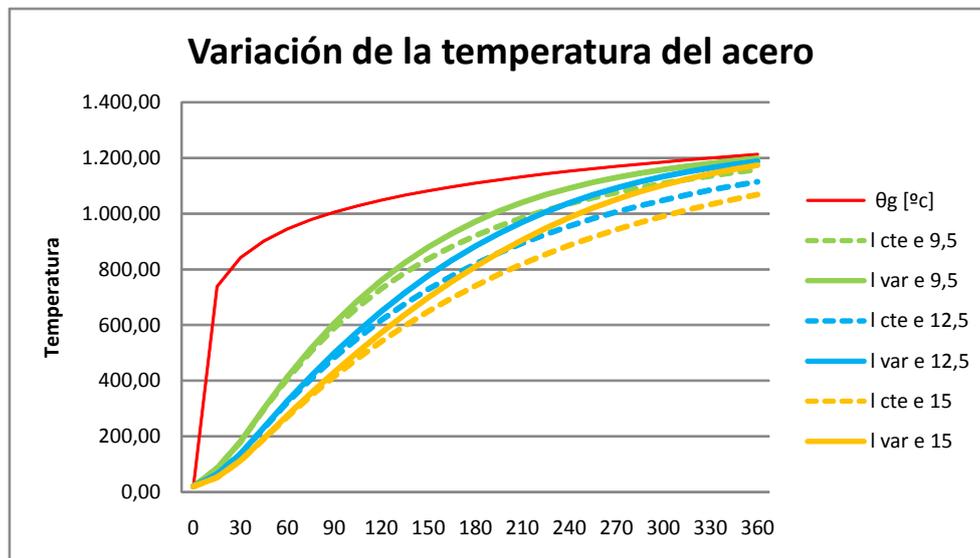
4.5.3.3 PANELES DE FIBROSILICATO $\rho=600 \text{ kg/m}^3$ - $c=1.100 \text{ J/kgK}$

PANELES de FIBROSILICATO							
		e=10 mm		e=30 mm		e=50 mm	
t (min)	θ_g [°C]	θ_s λ cte[°C]	θ_s λ var[°C]	θ_s λ cte[°C]	θ_s λ var[°C]	θ_s λ cte[°C]	θ_s λ var[°C]
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
15	738,56	155,57	155,60	52,72	52,74	30,08	30,08
30	841,80	315,87	316,21	113,02	113,16	62,00	62,09
45	902,34	489,92	490,95	192,44	192,99	107,20	107,55
60	945,34	629,09	631,02	271,62	272,93	155,23	156,08
75	978,71	735,82	738,68	346,65	349,07	203,34	205,00
90	1.005,99	818,02	821,73	416,97	420,89	250,79	253,60
105	1.029,05	881,93	886,35	482,47	488,24	297,15	301,48
120	1.049,04	932,24	937,22	543,22	551,16	342,18	348,43
135	1.066,67	972,45	977,83	599,44	609,80	385,75	394,29
150	1.082,44	1.005,12	1.010,78	651,35	664,35	427,76	439,00
165	1.096,71	1.032,14	1.037,97	699,25	715,04	468,20	482,50
180	1.109,74	1.054,87	1.060,80	743,41	762,07	507,05	524,76
195	1.121,72	1.074,32	1.080,31	784,10	805,68	544,32	565,77
210	1.132,82	1.091,24	1.097,25	821,61	846,07	580,05	605,52
225	1.143,15	1.106,18	1.112,20	856,19	883,45	614,26	644,00
240	1.152,82	1.119,53	1.125,56	888,07	918,01	647,01	681,23
255	1.161,90	1.131,61	1.137,65	917,48	949,94	678,34	717,19
270	1.170,46	1.142,64	1.148,70	944,64	979,43	708,29	751,89
285	1.178,55	1.152,81	1.158,90	969,74	1.006,63	736,92	785,34
300	1.186,24	1.162,25	1.168,37	992,94	1.031,71	764,28	817,54
315	1.193,54	1.171,07	1.177,22	1.014,43	1.054,81	790,42	848,50
330	1.200,51	1.179,35	1.185,54	1.034,34	1.076,09	815,40	878,23
345	1.207,17	1.187,16	1.193,39	1.052,81	1.095,67	839,26	906,72
360	1.213,54	1.194,56	1.200,83	1.069,97	1.113,69	862,05	934,00



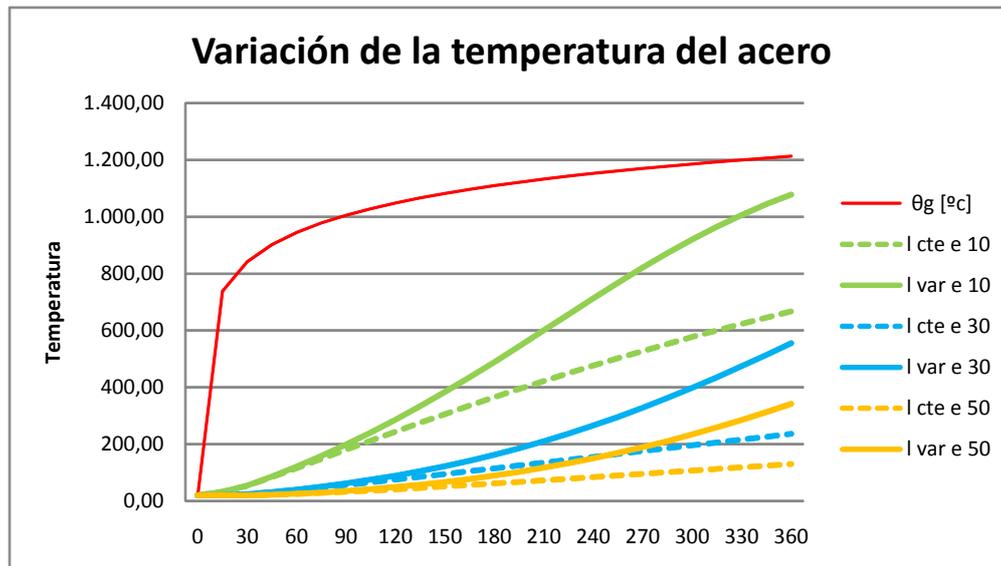
4.5.3.4 PANELES DE YESO - $\rho=800 \text{ kg/m}^3$ - $c=1.700 \text{ J/kgK}$

		PANELES de YESO							
		e=9,5 mm		e=12,5 mm		e=15 mm			
t (min)	θ_g [°C]	θ_s	λ_{cte} [°C]	θ_s	λ_{var} [°C]	θ_s	λ_{cte} [°C]	θ_s	λ_{var} [°C]
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
15	738,56	84,68	84,75	63,70	63,76	52,28	52,33		
30	841,80	179,62	180,47	136,49	137,16	112,32	112,89		
45	902,34	297,29	300,39	230,23	232,79	191,44	193,65		
60	945,34	406,88	413,68	321,46	327,34	270,38	275,58		
75	978,71	504,05	515,81	405,91	416,54	345,22	354,86		
90	1.005,99	589,56	607,21	483,32	500,01	415,40	430,91		
105	1.029,05	664,51	688,58	553,89	577,72	480,79	503,48		
120	1.049,04	730,11	760,72	618,02	649,73	541,48	572,44		
135	1.066,67	787,50	824,41	676,16	716,17	597,65	637,70		
150	1.082,44	837,75	880,38	728,84	777,19	649,55	699,19		
165	1.096,71	881,83	929,35	776,53	832,94	697,45	756,84		
180	1.109,74	920,56	972,00	819,72	883,58	741,62	810,61		
195	1.121,72	954,70	1.008,99	858,84	929,29	782,35	860,45		
210	1.132,82	984,86	1.040,94	894,31	970,31	819,90	906,36		
225	1.143,15	1.011,62	1.068,47	926,50	1.006,87	854,52	948,36		
240	1.152,82	1.035,43	1.092,16	955,75	1.039,25	886,45	986,52		
255	1.161,90	1.056,71	1.112,55	982,36	1.067,77	915,93	1.020,93		
270	1.170,46	1.075,80	1.130,16	1.006,61	1.092,77	943,14	1.051,75		
285	1.178,55	1.093,01	1.145,43	1.028,76	1.114,60	968,30	1.079,17		
300	1.186,24	1.108,58	1.158,77	1.049,01	1.133,62	991,57	1.103,43		
315	1.193,54	1.122,74	1.170,54	1.067,57	1.150,19	1.013,11	1.124,80		
330	1.200,51	1.135,67	1.181,02	1.084,61	1.164,65	1.033,08	1.143,54		
345	1.207,17	1.147,52	1.190,47	1.100,30	1.177,33	1.051,62	1.159,95		
360	1.213,54	1.158,44	1.199,07	1.114,78	1.188,51	1.068,84	1.174,33		



4.5.3.5 PANELES DE LANA MINERAL - $\rho=175 \text{ kg/m}^3$ - $c=1.700 \text{ J/kgK}$

		PANELES de FIBRAS MINERALES							
		e=20 mm		e=70 mm		e=120 mm			
t (min)	θ_g [°C]	θ_s	λ_{cte} [°C]	θ_s	λ_{var} [°C]	θ_s	λ_{cte} [°C]	θ_s	λ_{var} [°C]
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
15	738,56	32,57	32,61	20,27	20,27	20,00	20,00	20,00	20,00
30	841,80	53,87	54,38	24,12	24,26	20,10	20,13	20,10	20,13
45	902,34	83,91	86,04	30,90	31,50	21,70	22,00	21,70	22,00
60	945,34	115,86	121,26	38,88	40,46	24,56	25,40	24,56	25,40
75	978,71	148,12	158,87	47,47	50,71	28,14	29,91	28,14	29,91
90	1.005,99	180,35	198,89	56,47	62,23	32,20	35,40	32,20	35,40
105	1.029,05	212,35	241,40	65,77	75,08	36,60	41,83	36,60	41,83
120	1.049,04	243,97	286,43	75,29	89,36	41,27	49,23	41,27	49,23
135	1.066,67	275,12	333,95	84,98	105,17	46,14	57,65	46,14	57,65
150	1.082,44	305,72	383,82	94,80	122,60	51,18	67,14	51,18	67,14
165	1.096,71	335,74	435,81	104,72	141,75	56,35	77,78	56,35	77,78
180	1.109,74	365,14	489,60	114,72	162,71	61,64	89,62	61,64	89,62
195	1.121,72	393,90	544,76	124,78	185,55	67,03	102,74	67,03	102,74
210	1.132,82	422,01	600,76	134,88	210,30	72,50	117,19	72,50	117,19
225	1.143,15	449,45	657,01	145,01	236,99	78,04	133,02	78,04	133,02
240	1.152,82	476,23	712,90	155,15	265,63	83,64	150,28	83,64	150,28
255	1.161,90	502,34	767,77	165,31	296,18	89,30	169,01	89,30	169,01
270	1.170,46	527,80	820,99	175,47	328,59	95,00	189,23	95,00	189,23
285	1.178,55	552,59	871,94	185,63	362,76	100,74	210,96	100,74	210,96
300	1.186,24	576,75	920,12	195,77	398,59	106,51	234,19	106,51	234,19
315	1.193,54	600,26	965,08	205,90	435,93	112,31	258,91	112,31	258,91
330	1.200,51	623,15	1.006,48	216,01	474,61	118,14	285,09	118,14	285,09
345	1.207,17	645,42	1.044,14	226,09	514,44	123,99	312,70	123,99	312,70
360	1.213,54	667,09	1.077,95	236,14	555,19	129,87	341,67	129,87	341,67



4.6 CONCLUSIONES

- Con el uso de herramientas de cálculo numérico asequibles y de fácil manejo (como la hoja de cálculo utilizada en la presente Tesis) puede determinarse el espesor de material de protección a aplicar a los elementos estructurales de acero laminado con mayor exactitud.
- Para ello resulta necesario que los datos de partida, en concreto las propiedades físicas de los materiales de protección (calor específico, densidad y coeficiente de conductividad térmica) que se introduzcan, sean fiables.
- De los resultados de la investigación bibliográfica y documental realizada puede constatar que los datos tabulados existentes son, en parte, no homogéneos (no concordando, por ejemplo, los recogidos en manuales con los facilitados por fabricantes) y, en parte, inexistentes.
- Por otro lado, la naturaleza de los materiales de protección sufre grandes cambios durante su exposición al fuego como, por ejemplo, la pérdida de masa e incremento de volumen y la consecuente reducción de la densidad influyendo este fenómeno en la capacidad calorífica del material.
- Asimismo se ha detectado la existencia de algunas publicaciones que mencionan variaciones al alza tanto del calor específico como de la conductividad térmica³⁴ de los materiales de protección al ir alcanzando altas temperaturas.
- El objeto del presente Capítulo ha consistido en determinar la influencia de la variación de las citadas propiedades de los materiales (calor específico, densidad y coeficiente de conductividad térmica) en el incremento de la temperatura del acero protegido y, para ello, se ha utilizado un análisis numérico-gráfico, empleando una hoja de cálculo como herramienta, basado en la ecuación diferencial desarrollada por la CECM en los años 90.
- Para el estudio se han tomado datos genéricos de materiales de protección no reactivos (morteros de fibra mineral, morteros de áridos ligeros, paneles de fibrosilicato, paneles de yeso y paneles de lana mineral) promediando sus valores de los recogidos en prontuarios, manuales y catálogos comerciales.
- Con las anteriores premisas, se ha simulado la variación de las propiedades y obtenido datos acerca de la evolución de la temperatura del acero pudiendo resumirse las siguientes conclusiones:
 - La variación de la **densidad** del material de protección (tanto al alza como a la baja) no afecta prácticamente a la temperatura del acero, habiéndose detectado variaciones en la misma en el entorno del 1%.
 - La variación del **calor específico** (únicamente al alza a raíz de los resultados recogidos en algunos estudios) tampoco afecta prácticamente a la temperatura del acero, ya que las variaciones detectadas no superan el 1% en rangos de tiempo y calor específico habituales³⁵.
 - Estos resultados eran, en cierto modo, predecibles debido a su posición en la fórmula que indica el factor de protección ϕ y a la escasa influencia del coeficiente en los términos en los que interviene en la ecuación.

³⁴ En algunos Manuales y Prontuarios parece indicarse un valor del coeficiente de conductividad térmica del material de protección corregido, si bien no se especifica con exactitud.

³⁵ Al haberse simulado incrementos del calor específico hasta el 200% de su valor las máximas variaciones de esta simulación se producen al superar los 180 minutos y rondan el entorno del 3%, por lo que no se considera relevante.

- Respecto a la variación del coeficiente de **conductividad térmica** (programada de acuerdo con la formulación y límites de valor de la ecuación cuadrática que se reseña en el apartado correspondiente) se puede deducir que:
 - Para los morteros de fibra mineral se observan diferencias de la temperatura del acero medias del 96%³⁶ (dependiendo del espesor de material considerado) en función de si se considera el coeficiente de conductividad térmica constante o variable a lo largo de la evolución de la temperatura.
 - Para los morteros de áridos ligeros se observan diferencias de la temperatura del acero medias del 21%³⁷ (dependiendo del espesor de material considerado) en función de si se considera el coeficiente de conductividad térmica constante o variable a lo largo de la evolución de la temperatura.
 - Para los paneles de fibrosilicatos se observan diferencias de la temperatura del acero medias del 4%³⁸ (dependiendo del espesor de material considerado) en función de si se considera el coeficiente de conductividad térmica constante o variable a lo largo de la evolución de la temperatura.
 - Para los paneles de yeso se observan diferencias de la temperatura del acero medias del 8%³⁹ (dependiendo del espesor de material considerado) en función de si se considera el coeficiente de conductividad térmica constante o variable a lo largo de la evolución de la temperatura.
 - Para los paneles de lana mineral se observan diferencias de la temperatura del acero medias del 120%⁴⁰ (dependiendo del espesor de material considerado) en función de si se considera el coeficiente de conductividad térmica constante o variable a lo largo de la evolución de la temperatura.
- Ante la relevancia⁴¹ y la dispersión⁴² de estos resultados puede establecerse como conclusión general que es necesario un estudio detallado de la evolución de los coeficientes de conductividad térmica de los materiales citados de modo que se pueda parametrizar en ecuaciones su comportamiento real.
- Por otra parte, esta variación de la conductividad térmica del material de protección (y su consiguiente influencia en la evolución de la temperatura del acero) no es tenida en cuenta, sin embargo, en la reglamentación nacional (DB SI del CTE e Instrucción EAE) que adopta valores constantes como se puede comprobar en el articulado, tanto del Anejo D del DB SI:

d/λ_p coeficiente de aislamiento del revestimiento, (m^2K/W) obtenido como promedio de las caras expuestas al fuego, siendo:

d espesor del revestimiento, [m];

λ_p conductividad térmica efectiva del revestimiento, para el desarrollo total del tiempo de resistencia a fuego considerado; (W/mK).

En materiales de tipo pétreo, cerámico, hormigones, morteros y yesos, se puede tomar el valor de λ_p correspondiente a 20 °C.

³⁶ 30% para 10 mm / 113% para 45 mm / 145% para 80 mm

³⁷ 3% para 10 mm / 20% para 35 mm / 39% para 60 mm

³⁸ 0,5% para 10 mm / 4% para 30 mm / 8% para 50 mm

³⁹ 5% para 9,5 mm / 8% para 12,5 mm / 11% para 15 mm

⁴⁰ 61% para 20 mm / 135% para 70 mm / 163% para 120 mm

⁴¹ El rango de temperaturas del acero es, en algunos casos, tan amplio, que puede llegar a alcanzarse la temperatura crítica del elemento estructural habiéndose considerado que no se llega a ella por utilizar en el cálculo un coeficiente de conductividad térmica del material de protección constante.

⁴² La gran dispersión entre porcentajes viene determinada por los valores límite a los que se ha sometido la ecuación cuadrática de variación de los coeficientes de conductividad térmica en los distintos materiales. Estos valores son los obtenidos de la bibliografía consultada, pero no se ha podido determinar con exactitud si corresponden a los del material propiamente dicho (lana mineral) o al del producto (mortero de lana mineral)

como en la Instrucción EAE:

Tabla 45.2. Valores característicos de propiedades convencionales de materiales de protección genéricos.

Material	λ_{pk} W/(m ^o K)	c_{pk} J/(kg ^o K)	ρ_{pk} kg/m ³	P_k % peso
Granito, mármol.	2,40	900	2800	0
Hormigón de densidad normal con árido silíceo (1).	1,60	1000	2300	0
Hormigón de densidad normal con árido calizo (2).	1,30	1000	2300	0
Fábrica de ladrillo cerámico con mortero de cemento.	1,15	1000	1450	0
Hormigón ligero, según su densidad.	0,80 (3)	840	1600	2
	0,65	850	1300	2
	0,50	800	1000	2
	0,35	800	700	2
Placas de yeso.	0,20	1700	800	20

A modo de ejemplo, los valores de conductividad térmica de las placas de yeso laminado que se incluyen en el Catálogo de Soluciones Acústicas y Térmicas para la Edificación (documento presentado por la Asociación de Fabricantes de Lanás Minerales, AFELMA y la Asociación Técnica y Empresarial del Yeso, Sección Placa de Yeso Laminado, ATEDY) son de $\lambda=0,25$ W/mK.

Por otra parte, el Catálogo de elementos Constructivos del CTE ofrece, asimismo, un valor $\lambda=0,25$ W/mK.

Ambos valores son a temperatura ambiente y, por tanto, no tienen en cuenta los fenómenos de variación del valor de la conductividad térmica a altas temperaturas, por lo que se procede, a continuación, a un estudio de los datos disponibles al respecto sobre este tipo de material, ya que se ha podido constatar la importancia que tiene este parámetro en el resultado de la temperatura que va alcanzando el acero que arroja la ecuación diferencial.

5 ESTUDIOS INTERNACIONALES SOBRE PLACAS DE YESO LAMINADO

Centrando el estudio de la variación de la conductividad térmica en las placas de yeso laminado como material de protección, se ha efectuado una recopilación de datos de diversos estudios nacionales realizados para determinar la evolución de la conductividad térmica de las placas de yeso laminado en función de la temperatura realizados en:

- CANADA por *FORINTEK CANADA CORPORATION* (1994) y el *NATIONAL RESEARCH COUNCIL* (1996 y 2005)
- SUECIA por *TRATEK Swedish Institute for Wood Technology Research* (2000)
- HOLANDA por la *UNIVERSIDAD DE TWENTE*. Holanda (2009)
- SUIZA por *ETH ZURICH Institute of Structural Engineering* (2009)
- EEUU por *NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS and TECHNOLOGY* (2009)

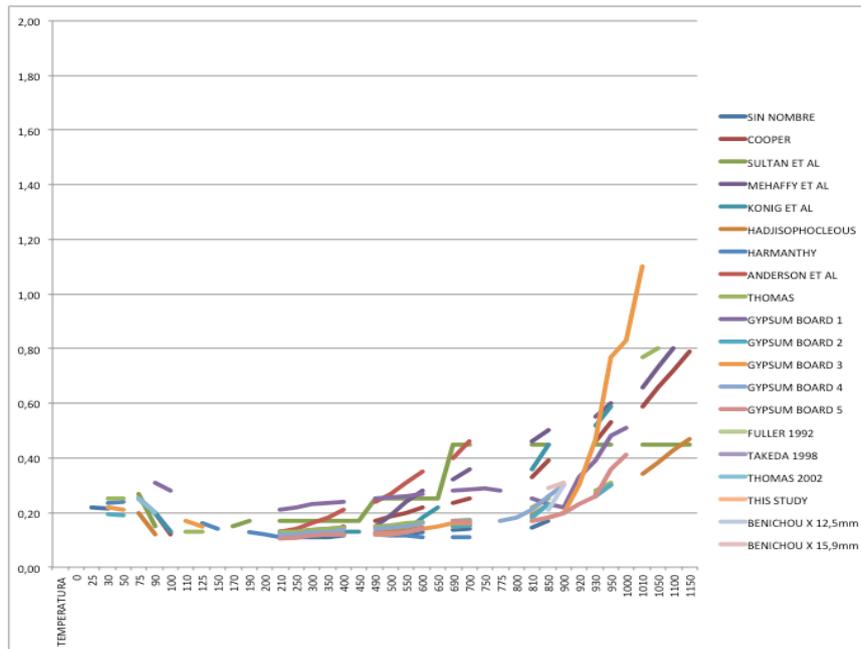
Que, a su vez, se pueden agrupar en tres clases de procedimientos:

1. Realizados con diversos tipos de medidores de conductividad térmica (NRC, Mehaffey, Benichou, Anderson, Konig..)
2. Realizados con calorímetros de placas (NIST)
3. Desarrollados mediante modelos matemáticos basados en el Método de Elementos Finitos (MEF –ANSYS / SAFIR)

Los valores recogidos en estos estudios, que se reseñan en las Referencias de la presente Tesis, han sido digitalizados, procesados y trasladados a una hoja de cálculo que presenta los siguientes valores numéricos de evolución de la conductividad térmica para diversas temperaturas del gas en el incendio :

TEMPERATURA	SIN NOMBRE	COOPER	SULTAN ET AL	MEHAFFY ET AL	KONIG ET AL	HADJISOPHOCLEOUS	HARMANTHY	ANDERSON ET AL	THOMAS	GYPSUM BOARD 1	GYPSUM BOARD 2	GYPSUM BOARD 3	GYPSUM BOARD 4	GYPSUM BOARD 5	FULLER 1992	TAKEDA 1998	THOMAS 2002	THIS STUDY	BENICHOU X 12,5mm	BENICHOU X 15,9mm	
0		0,25	0,27	0,25	0,25	0,20		0,28	0,25						0,25	0,20	0,25	0,40	0,25	0,25	
25							0,23			0,35	0,20	0,23	0,24	0,15							
30	0,22																				
50	0,22	0,25	0,27	0,25	0,25	0,20	0,24	0,27	0,25	0,34	0,20	0,22	0,23	0,15							
75							0,20			0,19	0,21								0,40	0,23	0,24
90		0,25	0,27	0,25			0,20										0,25				
100	0,19	0,20	0,15	0,20	0,20	0,12	0,21	0,20	0,20	0,31	0,12	0,18	0,18	0,14	0,25	0,15	0,20	0,30	0,18	0,20	
110		0,12		0,13	0,13					0,28											
125									0,13			0,17			0,25		0,15	0,15	0,15	0,15	
150	0,14	0,12	0,15	0,13	0,13	0,11	0,16	0,14	0,13	0,24	0,12	0,15	0,14	0,12							
170							0,14														
190			0,15																		
200	0,12	0,12	0,17	0,13	0,13	0,10	0,13	0,12	0,13	0,21	0,11	0,12	0,12	0,10	0,15	0,10	0,15	0,15	0,15	0,15	
210							0,12														
250	0,11	0,12	0,17	0,13	0,13	0,11	0,11	0,13	0,13	0,21	0,12	0,12	0,12	0,11							
300	0,11	0,12	0,17	0,13	0,13	0,12	0,11	0,14	0,13	0,22	0,12	0,12	0,12	0,11	0,15	0,13	0,15	0,15	0,15	0,15	
350	0,11	0,12	0,17	0,14	0,13	0,12	0,12	0,16	0,14	0,23	0,12	0,12	0,12	0,13							
400	0,11	0,13	0,17	0,14	0,13	0,12	0,13	0,18	0,14	0,24	0,12	0,12	0,13	0,12	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	
450	0,12	0,15	0,17	0,15	0,13	0,13	0,13	0,21	0,15	0,24	0,12	0,12	0,14	0,12							
490			0,17		0,13																
500	0,12	0,17	0,25	0,15		0,13	0,12	0,24	0,15	0,25	0,12	0,12	0,14	0,13	0,15	0,18	0,15	0,15	0,15	0,15	
550	0,12	0,19	0,25	0,19	0,13	0,14	0,12	0,27	0,16	0,26	0,12	0,12	0,15	0,13							
600	0,13	0,20	0,25	0,24	0,13	0,14	0,12	0,31	0,16	0,26	0,13	0,13	0,15	0,13	0,15	0,21	0,15	0,15	0,15	0,16	
650	0,13	0,22	0,25	0,28	0,18	0,15	0,11	0,35	0,17	0,27	0,14	0,14	0,16	0,14							
690			0,25		0,22									0,15							
700	0,14	0,24	0,45	0,32		0,15	0,11	0,40	0,17	0,28	0,15	0,16	0,17	0,17	0,30	0,24	0,30	0,30	0,15	0,19	
750	0,14	0,25	0,45	0,36	0,25	0,16	0,11	0,46	0,18	0,29	0,16	0,16	0,17	0,17							
775										0,29											
800	0,15	0,27	0,45	0,41	0,30	0,16		0,51	0,18	0,28	0,16	0,16	0,17	0,16	0,45	0,27	0,47	0,47	0,15	0,19	
810														0,18							
850	0,15	0,33	0,45	0,46	0,36	0,19			0,22	0,25	0,18	0,17	0,21	0,17							
900	0,17	0,39	0,45	0,50	0,45	0,23			0,25	0,23	0,23	0,18	0,26	0,18		0,30	0,65	0,65	0,21	0,29	
920										0,22		0,20	0,30	0,20					0,30	0,31	
930										0,33		0,30		0,23							
950	0,21	0,46	0,45	0,55	0,52	0,27			0,28	0,39	0,26	0,47		0,26							
1000		0,53	0,45	0,60	0,59	0,30			0,31	0,48	0,30	0,77		0,36		0,33	0,80	0,80			
1010										0,51		0,83		0,41							
1050		0,59	0,45	0,66	0,80	0,34			0,77			1,10									
1100		0,66	0,45	0,73		0,39			0,80									1,10	1,60		
1150		0,72	0,45	0,80		0,43															
1200		0,79	0,45			0,47												1,35	2,40		

Y que, representadas gráficamente resultan ser:

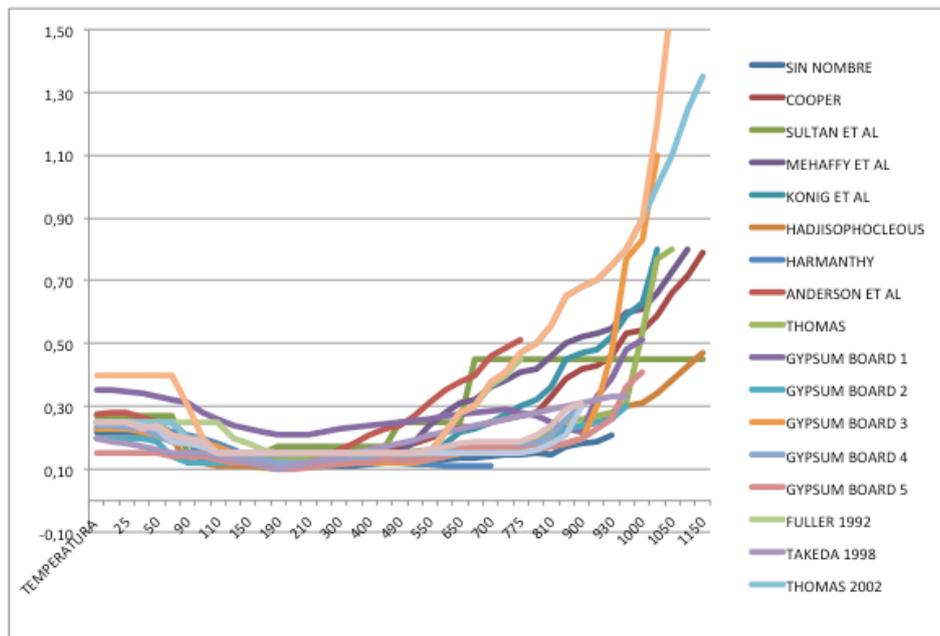


Como en muchos de los casos existe carencia de valores intermedios, se ha procedido a la obtención de los mismos mediante un proceso de interpolación lineal obteniéndose los siguientes:

TEMPERATURA	SIN NOMBRE	COOPER	SULTAN ET AL	MEHAFFY ET AL	KONIG ET AL	HADJISOPHOCLEOUS	HARMANTHY	ANDERSON ET AL	THOMAS	GYPSUM BOARD 1	GYPSUM BOARD 2	GYPSUM BOARD 3	GYPSUM BOARD 4	GYPSUM BOARD 5	FULLER 1992	TAKEDA 1998	THOMAS 2002	THIS STUDY	BENICHOU X 12,5mm	BENICHOU X 15,9mm
0	0,22	0,25	0,27	0,25	0,25	0,20	0,23	0,28	0,25	0,35	0,20	0,23	0,24	0,15	0,25	0,20	0,25	0,40	0,25	0,25
25	0,22	0,25	0,27	0,25	0,25	0,20	0,23	0,28	0,25	0,35	0,20	0,23	0,24	0,15	0,25	0,19	0,25	0,40	0,25	0,25
30	0,22	0,25	0,27	0,25	0,25	0,20	0,23	0,28	0,25	0,35	0,20	0,23	0,24	0,15	0,25	0,18	0,25	0,40	0,25	0,25
50	0,22	0,25	0,27	0,25	0,25	0,20	0,24	0,27	0,25	0,34	0,20	0,22	0,23	0,15	0,25	0,17	0,25	0,40	0,24	0,23
75	0,21	0,25	0,27	0,25	0,23	0,20	0,24	0,25	0,25	0,33	0,19	0,21	0,21	0,15	0,25	0,16	0,25	0,40	0,23	0,24
90	0,20	0,25	0,27	0,25	0,21	0,20	0,22	0,21	0,21	0,32	0,14	0,19	0,19	0,14	0,25	0,15	0,25	0,40	0,19	0,21
100	0,19	0,20	0,15	0,20	0,20	0,12	0,21	0,20	0,20	0,31	0,12	0,18	0,18	0,14	0,25	0,15	0,20	0,30	0,18	0,20
110	0,18	0,12	0,15	0,13	0,13	0,12	0,20	0,19	0,18	0,28	0,12	0,18	0,17	0,14	0,25	0,15	0,20	0,20	0,17	0,19
125	0,17	0,12	0,15	0,13	0,13	0,11	0,19	0,17	0,13	0,26	0,12	0,17	0,16	0,13	0,25	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15
150	0,14	0,12	0,15	0,13	0,13	0,11	0,16	0,14	0,13	0,24	0,12	0,15	0,14	0,12	0,20	0,13	0,15	0,15	0,15	0,15
170	0,13	0,12	0,15	0,13	0,13	0,11	0,14	0,14	0,13	0,23	0,12	0,14	0,14	0,12	0,18	0,12	0,15	0,15	0,15	0,15
190	0,12	0,12	0,15	0,13	0,13	0,11	0,14	0,13	0,13	0,22	0,12	0,13	0,13	0,11	0,16	0,11	0,15	0,15	0,15	0,15
200	0,12	0,12	0,17	0,13	0,13	0,10	0,13	0,12	0,13	0,21	0,11	0,12	0,12	0,10	0,15	0,10	0,15	0,15	0,15	0,15
210	0,12	0,12	0,17	0,13	0,13	0,11	0,12	0,12	0,13	0,21	0,12	0,12	0,12	0,10	0,15	0,11	0,15	0,15	0,15	0,15
250	0,11	0,12	0,17	0,13	0,13	0,11	0,11	0,13	0,13	0,21	0,12	0,12	0,12	0,11	0,15	0,12	0,15	0,15	0,15	0,15
300	0,11	0,12	0,17	0,13	0,13	0,12	0,11	0,14	0,13	0,22	0,12	0,12	0,12	0,11	0,15	0,13	0,15	0,15	0,15	0,15
350	0,11	0,12	0,17	0,14	0,13	0,12	0,12	0,16	0,14	0,23	0,12	0,12	0,12	0,12	0,15	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15
400	0,11	0,13	0,17	0,14	0,13	0,12	0,13	0,18	0,14	0,24	0,12	0,12	0,13	0,12	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
450	0,12	0,15	0,17	0,15	0,13	0,13	0,13	0,21	0,15	0,24	0,12	0,12	0,14	0,12	0,15	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15
490	0,12	0,16	0,17	0,15	0,13	0,13	0,13	0,23	0,15	0,25	0,12	0,12	0,14	0,13	0,15	0,17	0,15	0,15	0,15	0,15
500	0,12	0,17	0,25	0,15	0,13	0,13	0,12	0,24	0,15	0,25	0,12	0,12	0,14	0,13	0,15	0,18	0,15	0,15	0,15	0,15
550	0,12	0,19	0,25	0,19	0,13	0,14	0,12	0,27	0,16	0,26	0,12	0,12	0,15	0,13	0,15	0,20	0,15	0,15	0,15	0,15
600	0,13	0,20	0,25	0,24	0,13	0,14	0,12	0,31	0,16	0,26	0,13	0,13	0,15	0,13	0,15	0,21	0,15	0,15	0,15	0,16
650	0,13	0,22	0,25	0,28	0,18	0,15	0,11	0,35	0,17	0,27	0,14	0,14	0,16	0,14	0,22	0,22	0,22	0,22	0,15	0,17
690	0,14	0,24	0,25	0,31	0,22	0,15	0,11	0,38	0,17	0,28	0,15	0,15	0,16	0,16	0,28	0,23	0,28	0,28	0,15	0,18
700	0,14	0,24	0,45	0,32	0,23	0,15	0,11	0,40	0,17	0,28	0,15	0,16	0,17	0,17	0,30	0,24	0,30	0,30	0,15	0,19
750	0,14	0,25	0,45	0,36	0,25	0,16	0,11	0,46	0,18	0,29	0,16	0,16	0,17	0,17	0,37	0,25	0,38	0,38	0,15	0,19
775	0,15	0,26	0,45	0,39	0,28	0,16		0,49	0,18	0,29	0,15	0,16	0,17	0,17	0,40	0,26	0,41	0,41	0,15	0,19
800	0,15	0,27	0,45	0,41	0,30	0,16		0,51	0,18	0,28	0,16	0,16	0,17	0,16	0,45	0,27	0,47	0,47	0,15	0,19
810	0,15	0,28	0,45	0,42	0,32	0,16			0,19	0,27	0,17	0,16	0,18	0,17		0,28	0,50	0,50	0,16	0,21
850	0,15	0,33	0,45	0,46	0,36	0,19			0,22	0,25	0,18	0,17	0,21	0,17		0,29	0,56	0,56	0,18	0,24
900	0,17	0,39	0,45	0,50	0,45	0,23			0,25	0,23	0,23	0,18	0,26	0,18		0,30	0,65	0,65	0,21	0,29
920	0,18	0,42	0,45	0,52	0,47	0,24			0,26	0,22	0,24	0,20	0,30	0,20		0,31	0,68	0,68	0,30	0,31
930	0,19	0,43	0,45	0,53	0,48	0,25			0,27	0,33	0,25	0,30				0,32	0,70	0,70		
950	0,21	0,46	0,45	0,55	0,52	0,27			0,28	0,39	0,26	0,47				0,26	0,33	0,75	0,75	
1000		0,53	0,45	0,60	0,59	0,30			0,31	0,48	0,30	0,77				0,36	0,33	0,80	0,80	
1010		0,54	0,45	0,61	0,63	0,31			0,54	0,51		0,83				0,41		0,90	0,90	
1050		0,59	0,45	0,66	0,80	0,34			0,77			1,10						1,00	1,20	
1100		0,66	0,45	0,73		0,39			0,80									1,10	1,60	
1150		0,72	0,45	0,80		0,43												1,25	2,00	
1200		0,79	0,45			0,47												1,35	2,40	

Tabla V.1 – Resumen de datos numéricos de los estudios internacionales sobre evolución de la conductividad térmica en las placas de yeso laminado en función de la temperatura.

Con lo que la gráfica resultante de representar estos valores (indicándose en el eje de abscisas la temperatura del gas ambiente y en el de ordenadas los valores de conductividad térmica) resulta más homogénea:



adoptando el valor mediana de todos ellos el siguiente aspecto:



Gráfico V.1 – Valor mediana de los datos numéricos de los estudios internacionales sobre evolución de la conductividad térmica en las placas de yeso laminado.

Detallándose a continuación, de forma individualizada, los estudios analizados relativos a la conductividad térmica de las placas de yeso laminado⁴³.

⁴³ En varios de los estudios se incluyen resultados sobre la pérdida de masa y la variación del calor específico de las placas de yeso laminado. No se han incluido en la presente Tesis por haberse comprobado que sus variaciones no son relevantes y centrarse la misma en la propiedad de la conductividad térmica.

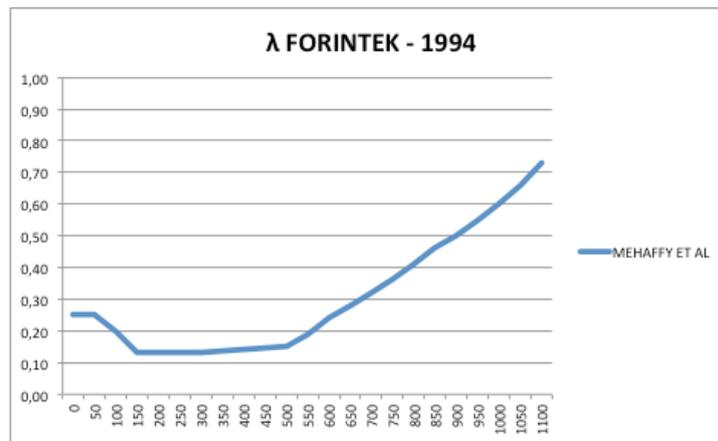
5.1 VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

5.1.1 CANADÁ - FORINTEK CORPORATION

En el año 1994, en *Forintek Canada Corporation*, un equipo dirigido por Mehaffey desarrollaron un software basado en un modelo matemático bidimensional para predecir el flujo de transferencia de calor a través de paneles de yeso laminado hacia una estructura portante de madera.

Las predicciones fueron validadas con cuatro ensayos en horno a pequeña escala y dos a gran escala usando paneles canadienses tipo C de 12,7 mm de espesor y tipo X de 15,9 mm de espesor.

Takeda y Mehaffey desarrollaron en 1998 el software WALL2D mejorando los estudios previos aunque no se realizó ninguna validación del modelo para fuegos no estándar. Los resultados pueden observarse en el siguiente gráfico:



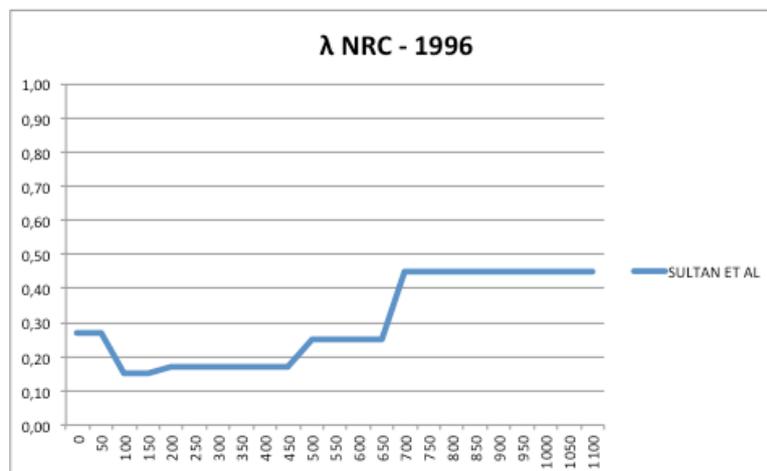
5.1.2 CANADÁ - NATIONAL RESEARCH COUNCIL

En el año 1996, en el *National Research Council* de Canada, Sultan y otros desarrollaron un modelo matemático unidimensional para predecir el flujo de transferencia de calor a través de paneles de yeso laminado hacia la estructura portante de montantes de acero galvanizado.

Las predicciones fueron validadas con dos ensayos en horno a pequeña escala usando paneles canadienses tipo X de 15,9 mm de espesor.

En el año 2000, el modelo unidimensional se amplió a particiones con cámara de aire.

Los resultados del modelo se pueden apreciar en el siguiente gráfico:



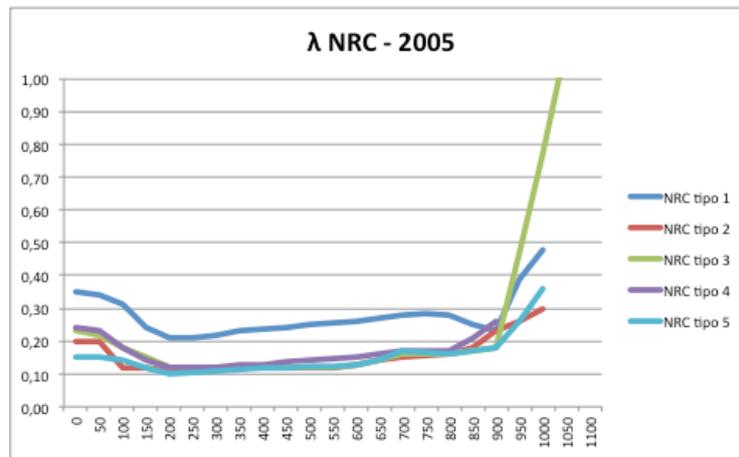
En 2005, Bénichou, N. y Sultan, M.A. realizaron mediciones mediante un aparato *Thermal Conductivity Meter KYOTO ELECTRONICS TC-31*, que utiliza métodos de tránsito gradual para la determinación de los valores de la conductividad térmica.

Debido al efecto impredecible del contenido del vapor de agua sobre el valor de la conductividad térmica hasta su deshidratación, todas las muestras se sometieron a un proceso de secado de 24 h a 40° antes de los ensayos.

Los paneles de yeso laminado utilizados fueron canadienses:

- Muestra 1. Tipo REGULAR. Espesor 12,7 mm
- Muestra 2. Tipo REGULAR HEAVY. Espesor 12,7 mm
- Muestra 3. Tipo X. Espesor 12,7 mm
- Muestra 4. Tipo X. Espesor 15,9 mm
- Muestra 5. Tipo X. Espesor 12,7 mm

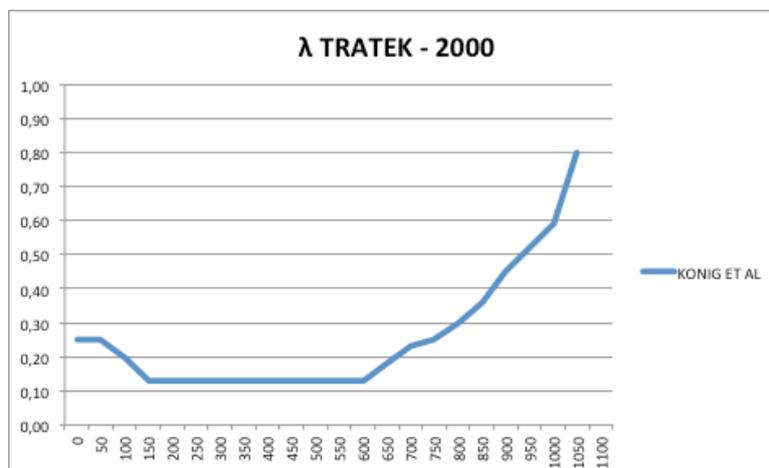
Los resultados de los ensayos se pueden apreciar en el siguiente gráfico:



5.1.3 SUECIA - TRATEK

En el año 2000, en el *Swedish Institute for Wood Technology Research*, König y otros desarrollaron un modelo matemático para calcular la capacidad de carga de una partición con estructura interna de madera revestida con paneles de yeso laminado tipo GN.

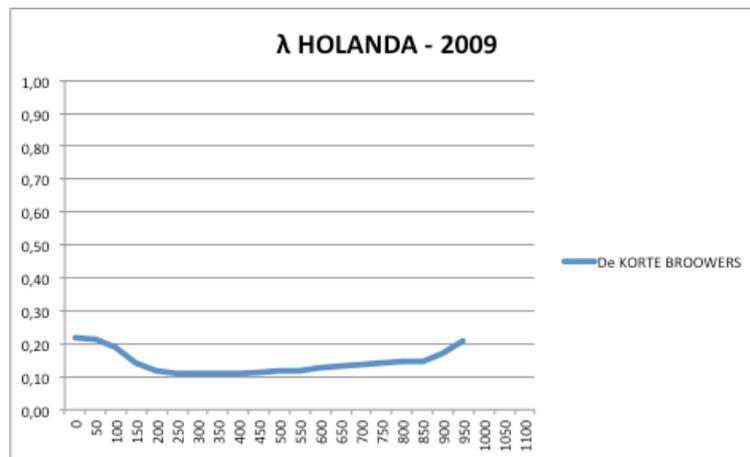
No se realizó posteriormente ninguna validación del modelo, cuyos resultados se pueden apreciar en el siguiente gráfico:



5.1.4 HOLANDA - UNIVERSIDAD DE TWENTE

En el año 2009, en la Facultad de Tecnología e Ingeniería de la Universidad de Twente (Holanda) A.C.J. de Korte y H.J.H. Brouwers desarrollaron un modelo matemático basado en la asunción del comportamiento de las placas de yeso laminado como un sistema de tres fases regido por la ecuación de Zehner & Schlünder.

Los resultados del modelo se pueden apreciar en el siguiente gráfico:



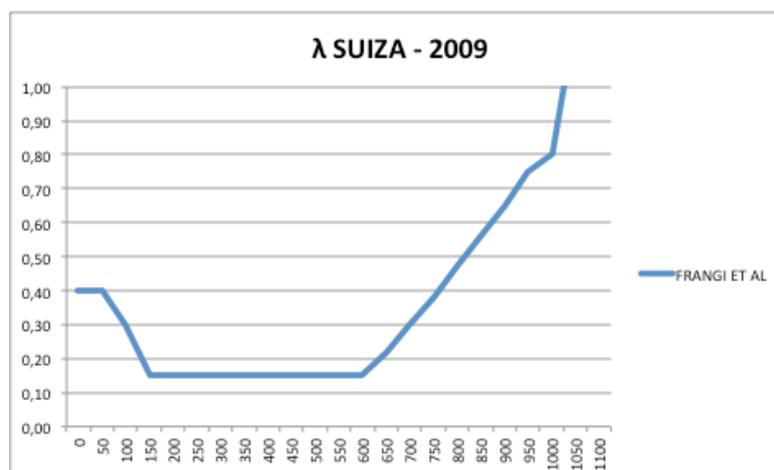
5.1.5 SUIZA - ETH

En el año 2009, en el *Institute of Structural Engineering* (ETH) de Zurich (Suiza), Andrea Frangi, Vanessa Schleifer y Mario Fontana llevaron a cabo 17 ensayos a pequeña escala (en horno de 1,00 x 0,80 m) para analizar diferentes parámetros del comportamiento térmico de revestimientos hechos con paneles de yeso laminado sobre estructuras ligeras de montantes de madera de acuerdo con el Anejo E del Eurocódigo 1995-1-2.

Se utilizaron paneles de yeso laminado de dos tipos y dos fabricantes: A (normal) y F (de núcleo reforzado con fibra de vidrio) y espesores 15 mm para los F y 10, 12,5, 15 y 25 para los A.

No obstante, para el procesamiento de los valores de conductividad térmica, se usaron valores que se encuentran en la literatura (Mehaffey et al, Benichou et al, Wakili et al) y se calibraron los resultados con los ensayos de placas simples de yeso laminado.

Los resultados obtenidos se procesaron, mediante ANSYS, por el Método de Elementos Finitos y se pueden observar en el siguiente gráfico:

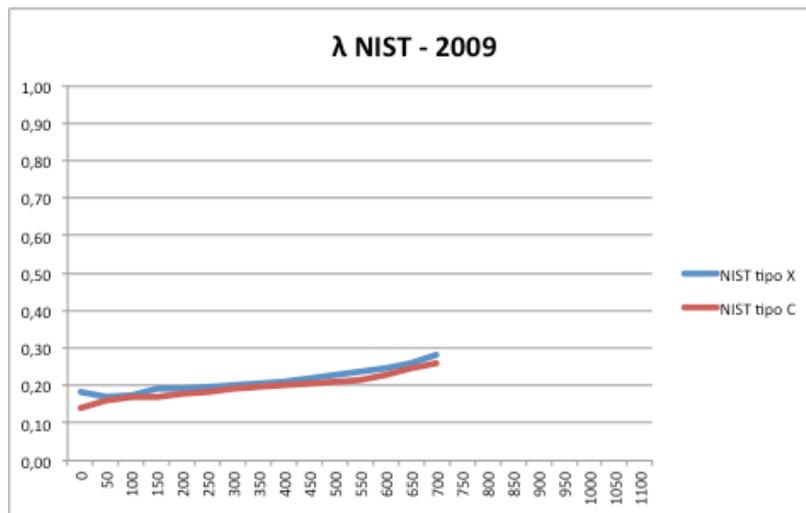


5.1.6 U.S.A. - NIST

EN el año 2009, en el *National Institute of Standards and Technology* (U.S.A.), Seul-Hyun Park, Samuel L. Manzello, Dale P. Bentz and Tensei Mizukami llevaron a cabo ensayos para analizar diferentes parámetros del comportamiento térmico de paneles de yeso laminado utilizándose paneles de yeso laminado de Japón (tipos R y F) y de Estados Unidos (tipos X y C) con y sin el papel de recubrimiento y espesores de 15 mm.

Se utilizó un Analizador de Constantes Térmicas de “*Hot Disk*” TPS 2500 para determinar la conductividad térmica a temperatura ambiente y un “*slug calorimeter*” para su determinación en función de la variación de la temperatura que llega únicamente a 750°.

Los resultados de los ensayos se pueden apreciar en el siguiente gráfico:



5.2 CONCLUSIONES

De los datos reseñados anteriormente, los mas homogéneos en cuanto a espesor y tipo de placa son los de tipo 4 del NRC (2005), La placa tipo C del NIST, la Universidad de Suiza, el FORINTEK y el NRC (1996), cuyos valores expresados en forma numérica y gráfica resultan ser:

T ^a gas	NRC tipo 4	MEHAFFY ET AL	NIST tipo C	SULTAN ET AL	FRANGI ET AL
0	0,24	0,25	0,14	0,27	0,40
50	0,23	0,25	0,16	0,27	0,40
100	0,18	0,20	0,17	0,15	0,30
150	0,14	0,13	0,17	0,15	0,15
200	0,12	0,13	0,18	0,17	0,15
250	0,12	0,13	0,19	0,17	0,15
300	0,12	0,13	0,19	0,17	0,15
350	0,13	0,14	0,20	0,17	0,15
400	0,13	0,14	0,20	0,17	0,15
450	0,14	0,15	0,21	0,17	0,15
500	0,14	0,15	0,21	0,25	0,15
550	0,15	0,19	0,22	0,25	0,15
600	0,15	0,24	0,23	0,25	0,15
650	0,16	0,28	0,25	0,25	0,22
700	0,17	0,32	0,26	0,45	0,30
750	0,17	0,36		0,45	0,38
800	0,17	0,41		0,45	0,47
850	0,21	0,46		0,45	0,56
900	0,26	0,50		0,45	0,65
950		0,55		0,45	0,75
1000		0,60		0,45	0,80
1050		0,66		0,45	1,20
1100		0,73		0,45	1,60

Tabla V.2 – Resumen de datos numéricos de los estudios internacionales sobre evolución de la conductividad térmica en las placas de yeso laminado en muestras homogéneas.

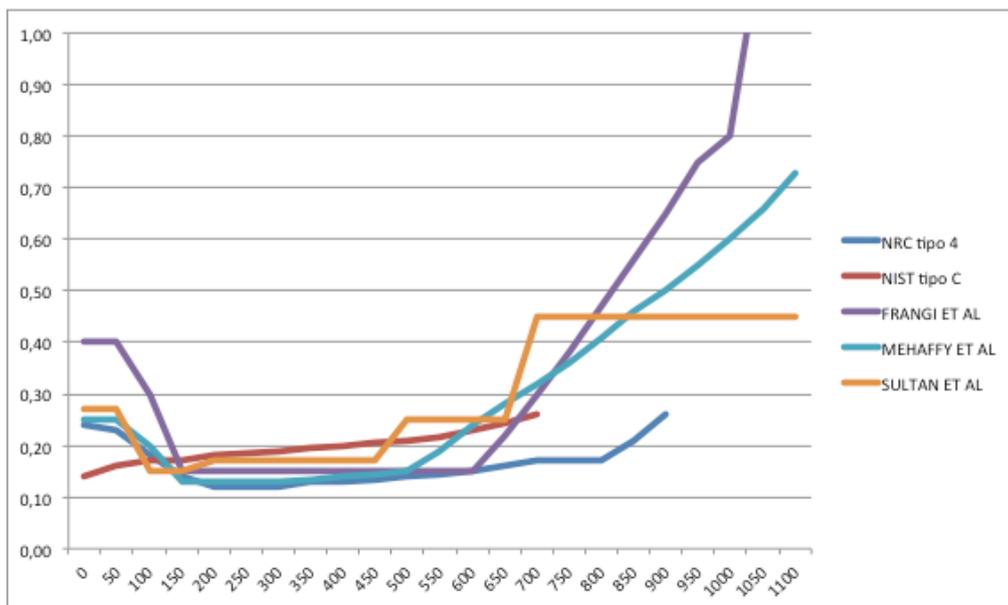


Gráfico V.2 – Gráfica de los datos numéricos de los estudios internacionales sobre evolución de la conductividad térmica en las placas de yeso laminado en muestras homogéneas.

Aun siendo estudios sobre conductividad térmica del material (no la efectiva a la que se refiere esta Tesis) en todos ellos podemos apreciar características comunes

En la siguiente gráfica (que representa la mediana de los valores del Gráfico V.2)

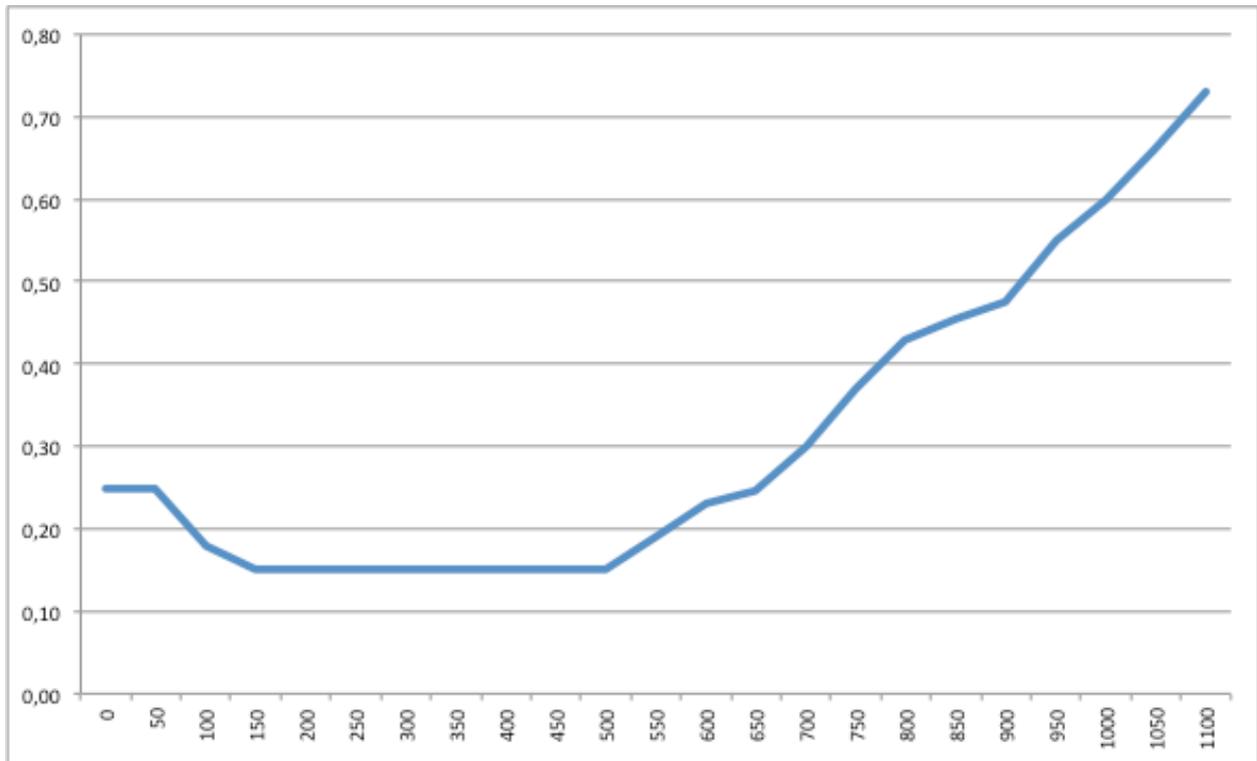


Gráfico V.3 – Valor mediana de los datos numéricos de los estudios internacionales sobre evolución de la conductividad térmica en las placas de yeso laminado en muestras homogéneas.

podemos observar que:

- El valor de conductividad térmica habitualmente declarado a temperatura ambiente para este tipo de material comienza a decrecer a los 50° de temperatura del gas hasta estabilizarse sobre los 150°
- Desde ese momento, el valor de la conductividad es sensiblemente horizontal, y con un valor inferior al declarado a temperatura ambiente (en el entorno de 0,25 como se ha indicado en el Capítulo anterior), hasta alcanzarse una temperatura del gas entre los 500° y 600°
- A partir de esa zona, el valor de la conductividad comienza a subir bruscamente.

Diversos estudiosos señalan que la dispersión de valores observada es debida a que la conductividad térmica es muy sensible a la microestructura del material y esta muy influenciada por diversos factores tales como la composición mineral, el grado de cristalización, las impurezas en la estructura cristalina, el tamaño y orientación del grano o la porosidad.

Otra de las razones es la naturaleza de su formación, en materiales cristalinos la conductividad térmica a temperatura ambiente es alta y decrece con el aumento del temperatura. Por el contrarios, en materiales de naturaleza amorfa la conductividad térmica a temperatura ambiente es baja y aumenta levemente con el aumento del temperatura.

Así pues, se puede concluir en líneas generales que la conductividad térmica decrece de forma prácticamente lineal hasta los 100-200°, tiene a incrementar ligeramente su valor hasta los 600° y luego se incrementa bruscamente.

6 DATOS DE DISTRIBUIDORES NACIONALES DE PLACAS DE YESO LAMINADO

Con objeto de recopilar la mayor cantidad de datos posible relativos a la evolución de la temperatura del acero en función del material de protección se solicitaron, a través de la Asociación Técnica y Empresarial del Yeso (ATEDY) que facilitó las personas de contacto, a las tres casas miembros de la Asociación y comercializadoras de placas de yeso laminado del mercado nacional (PLADUR, PLACO y KNAUF) los resultados de los ensayos realizados con sus productos de acuerdo con la norma UNE ENV 13381-4 mediante el presente texto de correo electrónico (y posteriores llamadas telefónicas):

De acuerdo con la conversación telefónica mantenida esta mañana, le informo de la tesis doctoral que tengo planteada y que me encuentro desarrollando en estos momentos.

La tesis en cuestión trata de determinar la evolución de la conductividad térmica a altas temperaturas de las placas de yeso laminado con objeto de elaborar unas tablas de referencia del comportamiento de dicho parámetro para su posible inclusión en el DB SI del CTE.

La primera pregunta es si existen datos al respecto en su poder de las placas que comercializa.

En cuanto a la práctica de la tesis, tras una serie de validaciones de horno, placas de acero y probetas, la semana que viene lanzaré una campaña de ensayos a pequeña escala (horno eléctrico de mufla) con objeto de obtener la evolución de la conductividad térmica de las tres marcas comerciales nacionales.

Una vez obtenidos los resultados, entiendo que sería interesante para ambas partes cotejar los mismos con los que obren en su poder de los ensayos a gran escala en laboratorios acreditados para verificar si los datos son coherentes.

Resumiendo, necesitaría:

- *Tablas y datos numéricos de la evolución de la conductividad térmica de las placas (normales y mejoradas) al ser sometidas a altas temperaturas.*
- *Tablas y datos numéricos de los ensayos realizados en laboratorios acreditados para la determinación de la contribución a la resistencia al fuego de las estructuras de acero laminado de las placas (normales y mejoradas) de acuerdo con las especificaciones de la Norma Europea 13 381.*

Quedo a su disposición para mantener una conversación mas profunda al respecto si fuera necesario, por lo que le paso mis datos de contacto. En espera de su contestación, reciba un cordial saludo.

Tras reiterados intentos, solo una de las empresas ha entregado los resultados de los ensayos, habiéndose conseguido las dos restantes a través de instaladores del material.

Las tres casas fabrican placas NORMALES y MEJORADAS respecto a su contribución a la resistencia al fuego, si bien los ensayos recopilados de los fabricantes se refieren únicamente a placas MEJORADAS (PLADUR FOC, PLACO GLASROC y KNAUF DF)

Los resultados de los ensayos obtenidos se incluyen en el Apéndice 3 de la presente Tesis, siendo los espesores de revestimiento de las placas ensayadas por cada fabricante:

- FABRICANTE “A”
 - 13 mm
 - 13+15 mm (28 mm)
 - 15+15 mm (30 mm)
 - 15+15+15+15 mm (60 mm)
- FABRICANTE “B”
 - 15 mm
 - 25 mm
 - 15+25 mm (40 mm)

- FABRICANTE “C”
 - 15 mm
 - 15+15+15 mm (45 mm)
 - 25+25+25 mm (75 mm)

Y los perfiles ensayados:

- FABRICANTE “A”
 - IPE 160 / 200 / 400
 - HEA 200 / 300
 - HEB 450
- FABRICANTE “B”
 - IPE 160 / 200
 - HEA 200 / 300
 - HEM 280
 - HEB 300 / 400
- FABRICANTE “C”
 - IPE 160 / 200 / 400
 - HEA 300
 - HEM 280
 - HEB 300 / 450

Hay que hacer mención a que los ensayos de uno de los fabricantes no han podido ser utilizados ya que los datos obtenidos no incluyen las Tablas de temperaturas de acero en función del espesor del revestimiento protector, por lo que el análisis se ha hecho con los datos de los dos restantes.

Con estos últimos se han agrupado los valores de temperatura alcanzada por el acero (en función de la temperatura del horno de ensayo) en tablas para su posterior análisis y tratamiento.

El detalle de los datos numéricos obtenidos se pueden consultar en el Apéndice 3 de la presente Tesis.

6.1 DATOS DE ENSAYOS FABRICANTE “A”

6.1.1 ELEMENTOS ENSAYADOS

Los datos de los ensayos de este fabricante han sido realizados sobre los siguientes 10 tipos de elementos, perfil y revestimiento:

- VIGAS expuestas al fuego por sus tres caras inferiores
 - IPE 400 (Factor de sección: 116 m^{-1})
 - Sin carga
 - Luz=1,5 m
 - Revestida con una placa de 13 mm (espesor total:13 mm)
 - IPE 400 (Factor de sección: 116 m^{-1})
 - Con carga
 - Luz =4,5 m
 - Revestida con una placa de 13 mm (espesor total:13 mm)
 - IPE 400 (Factor de sección: 116 m^{-1})
 - Sin carga
 - Luz =1,5 m
 - Revestida con cuatro placas de 15 mm (espesor total:60 mm)
 - IPE 400 (Factor de sección: 116 m^{-1})

- Con carga
- Luz =4,5 m
- Revestida con cuatro placas de 15 mm (espesor total:60 mm)
- PILARES con carga expuestos al fuego por todas sus caras
 - IPE 160 (Factor de sección: 241 m⁻¹) revestido con dos placas de 13 mm y 15 mm (espesor total 28 mm)
 - IPE 200 (Factor de sección: 211 m⁻¹) revestido con dos placas de 15 mm (espesor total 30 mm)
 - IPE 200 (Factor de sección: 211 m⁻¹) revestido con cuatro placas de 15 mm (espesor total 60 mm)
 - HEA 200 (Factor de sección: 145 m⁻¹) revestido con cuatro placas de 15 mm (espesor total 60 mm)
 - HEA 300 (Factor de sección: 104 m⁻¹) revestido con cuatro placas de 15 mm (espesor total 60 mm)
 - HEB 450 (Factor de sección: 69 m⁻¹) revestido con cuatro placas de 15 mm (espesor total 60 mm)

6.1.2 VALORES OBTENIDOS

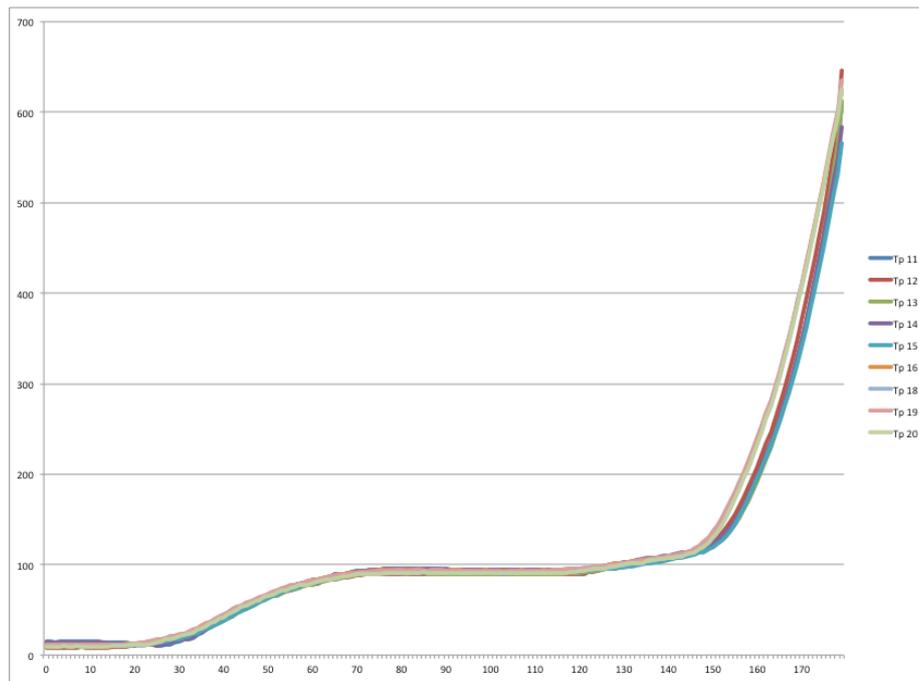
Para cada uno de los elementos, se han considerado las temperaturas de los distintos termopares y su valor medio, tal y como se expresa, a modo de ejemplo, en la siguiente Tabla para uno de ellos. Los resultados de todos pueden consultarse en el Apéndice 3 de la presente Tesis en forma numérica.

Los resultados fueron digitalizados para su posterior procesamiento numérico:

PILAR 1

T min	Tª med	Tp 11	Tp 12	Tp 13	Tp 14	Tp 15	Tp 16	Tp 18	Tp 19	Tp 20
0	11	15	8	9	14	10	11	10	12	9
1	11	15	8	9	14	9	11	10	12	9
2	11	14	8	9	14	10	11	10	12	9
3	11	15	8	9	14	10	12	10	12	9
4	11	15	8	9	14	9	11	10	12	10
5	11	15	8	9	14	10	11	10	12	9
6	11	15	8	9	14	10	11	10	12	9
7	11	15	8	9	14	9	11	10	12	10
8	11	15	9	9	14	10	11	10	11	9
9	11	15	8	9	14	9	11	10	11	9
10	11	15	8	9	14	10	11	10	11	9
11	11	15	8	9	14	9	11	10	11	9
12	11	15	8	9	14	10	11	11	12	9
13	11	14	8	9	14	10	11	10	12	9
14	11	14	8	10	13	10	12	10	12	9
15	11	14	9	10	13	10	11	10	12	10
16	11	14	9	10	13	10	11	10	12	10
17	11	14	9	10	13	10	12	11	12	10
18	11	14	9	10	13	10	13	11	12	10
19	11	13	10	10	13	10	12	10	13	11
20	11	13	10	11	12	11	13	11	13	11
21	12	13	11	11	12	12	13	10	14	11
22	12	12	11	11	12	12	14	10	14	12
23	12	12	11	12	11	12	15	11	15	12
24	12	11	12	12	11	13	15	13	16	13
25	12	10	13	13	10	14	16	15	17	14
26	12	10	14	14	12	14	17	17	18	15
27	12	11	14	15	13	15	18	19	19	17
28	12	12	15	15	14	16	19	21	20	17
29	13	14	16	17	15	17	21	21	21	19

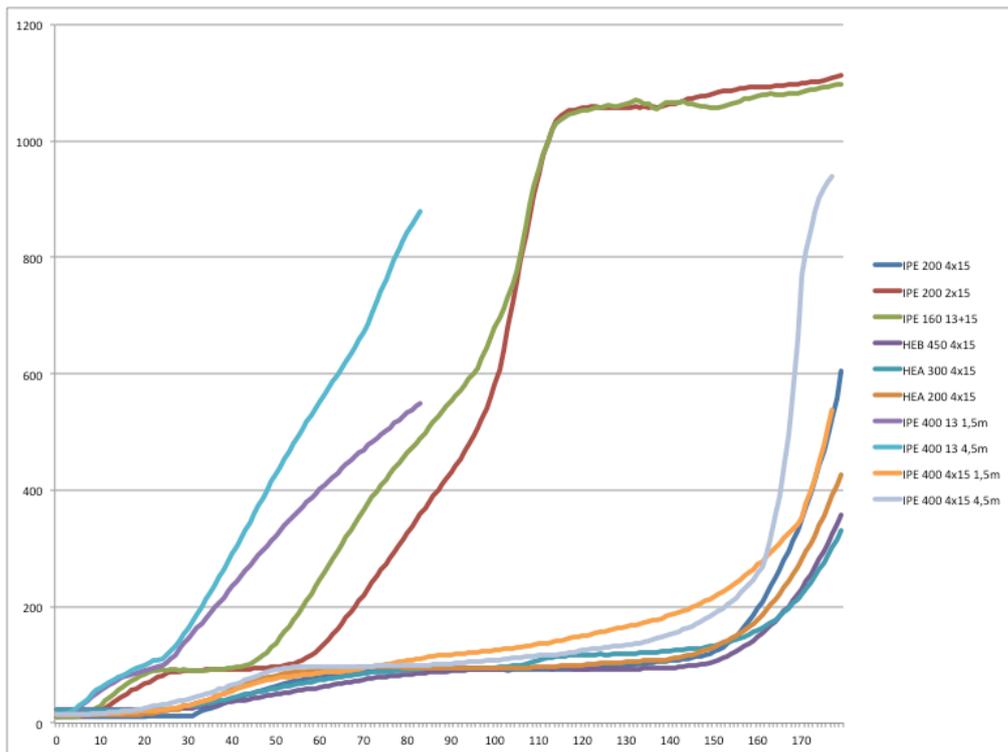
Y en forma de gráfica, en la que el eje de abscisas representa el tiempo en minutos de la curva estándar y el eje de ordenadas la temperatura alcanzada por el acero:



Los resultados se ordenaron de modo que se agruparon en un Tabla las temperaturas medias de los ensayos realizados en todos los elementos tanto numérica:

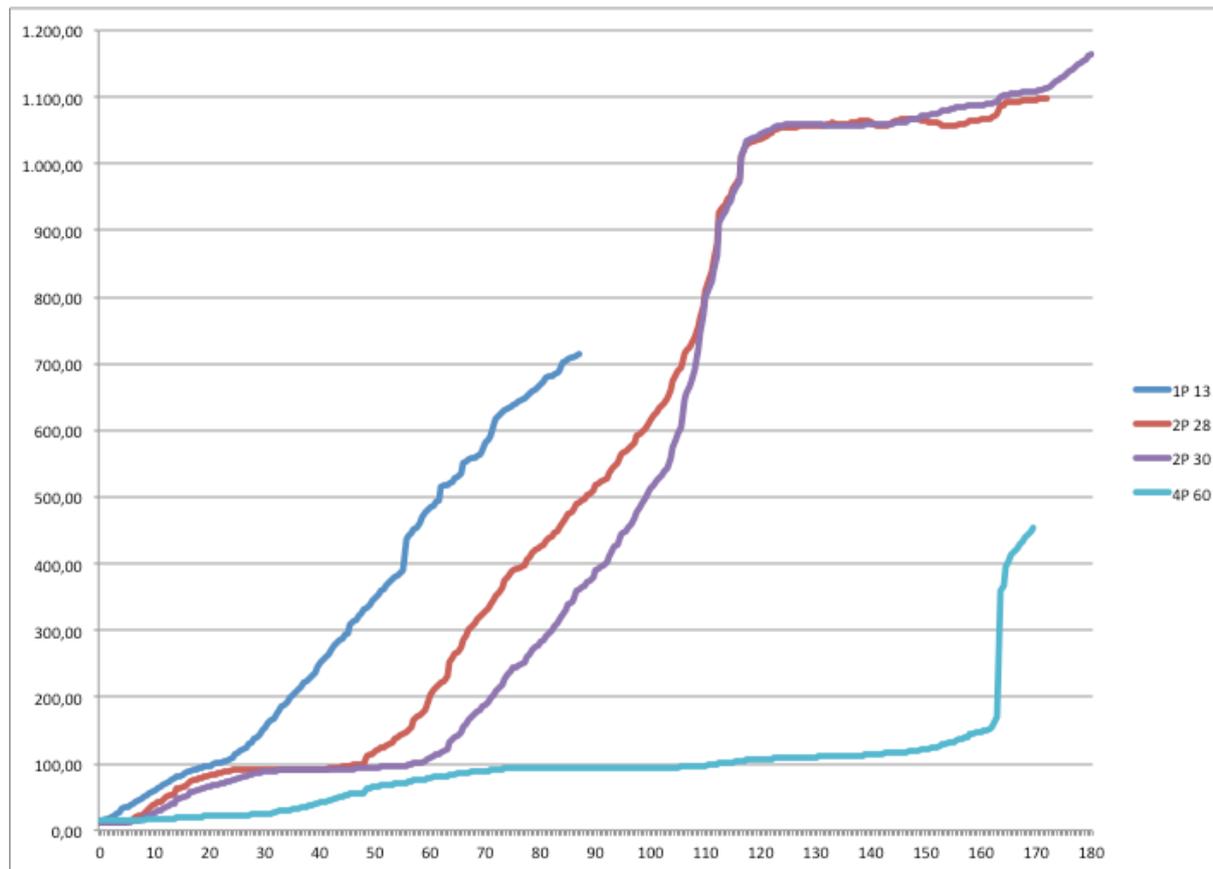
t (min)	Tª media (°C)	IPE 200 4x15	IPE 200 2x15	IPE 160 13x15	HEB 450 4x15	HEA 300 4x15	HEA 200 4x15	IPE 400 13 1,5m	IPE 400 13 4,5m	IPE 400 4x15 1,5m	IPE 400 4x15 4,5m
0	11	11	11	11	24	23	14	15	15	15	15
1	11	12	11	11	23	22	13	15	15	15	15
2	11	12	11	11	23	22	14	16	16	15	15
3	11	12	11	11	23	22	13	17	18	15	15
4	11	12	11	11	23	22	14	21	23	15	15
5	11	12	12	12	23	22	14	26	29	15	15
6	11	12	14	14	23	22	14	32	35	15	15
7	11	14	16	16	23	22	14	38	42	15	15
8	11	15	20	20	23	22	14	45	50	15	16
9	11	18	25	25	23	22	14	50	57	15	16
10	11	22	31	31	23	22	14	56	61	16	17
11	11	26	38	38	23	22	14	61	66	16	17
12	11	31	44	44	23	22	14	65	70	16	18
13	11	36	50	50	23	22	14	70	74	17	19
14	11	41	56	56	23	22	14	74	78	17	19
15	11	46	62	62	23	22	15	78	82	17	20
16	11	51	67	67	23	22	15	81	86	18	21
17	11	56	72	72	23	22	15	84	90	18	22
18	11	60	77	77	23	22	15	86	94	19	23
19	11	64	81	81	23	22	15	88	97	20	24
20	11	68	84	84	23	22	16	90	100	20	25
21	12	71	88	88	23	22	16	92	103	21	27
22	12	75	90	90	23	22	16	94	107	22	29
23	12	78	91	91	23	22	19	96	109	22	30
24	12	81	92	92	24	23	22	99	111	23	32
25	12	85	91	91	24	23	22	104	116	24	33
26	12	87	92	92	24	23	23	110	124	25	35
27	12	88	92	92	24	23	24	117	132	26	37
28	12	89	91	91	25	26	24	127	141	28	39
29	13	90	92	92	25	29	29	136	152	30	40
30	13	91	91	91	26	29	29	145	163	31	42
31	13	91	91	91	26	30	33	154	175	33	44
32	13	91	91	91	27	31	35	163	187	35	46
33	21	91	91	91	28	32	37	171	199	37	48
34	23	92	91	91	29	34	40	180	212	39	50
35	26	92	92	92	30	35	42	190	225	42	53
36	28	92	92	92	31	37	45	199	238	44	55
37	31	92	92	92	33	39	48	207	251	47	58
38	34	92	93	93	34	40	51	216	264	50	60
39	36	92	94	94	36	42	54	226	278	52	63
40	39	92	95	95	37	44	58	235	291	55	65
41	42	92	96	96	38	45	61	244	305	58	68
42	44	92	97	97	39	47	64	252	318	61	71
43	47	93	99	99	40	49	67	261	331	63	74
44	50	93	102	102	42	51	70	270	345	66	76
45	52	94	106	106	43	52	73	279	359	68	79
46	55	94	110	110	44	54	78	288	373	70	82
47	57	94	116	116	46	55	77	297	386	72	85
48	60	95	122	122	47	57	79	305	400	74	88
49	62	96	130	130	48	58	80	314	415	75	90
50	64	96	138	138	50	60	82	322	428	77	92
51	66	97	147	147	51	61	83	331	441	78	93
52	68	99	158	158	52	63	85	339	454	79	95
53	70	101	167	167	53	64	85	348	467	80	95
54	72	102	177	177	54	65	87	356	480	81	96
55	73	105	188	188	56	67	88	364	493	82	96
56	75	108	200	200	57	68	89	371	505	83	96
57	76	112	211	211	58	70	89	379	517	84	96
58	78	117	222	222	59	71	90	387	529	84	96
59	79	122	234	234	60	72	91	394	541	85	96
60	81	129	247	247	62	74	92	402	552	86	96

como gráficamente, en la que se pueden observar las tendencias de temperatura del acero en función de su protección mediante 1, 2 ó 4 placas:

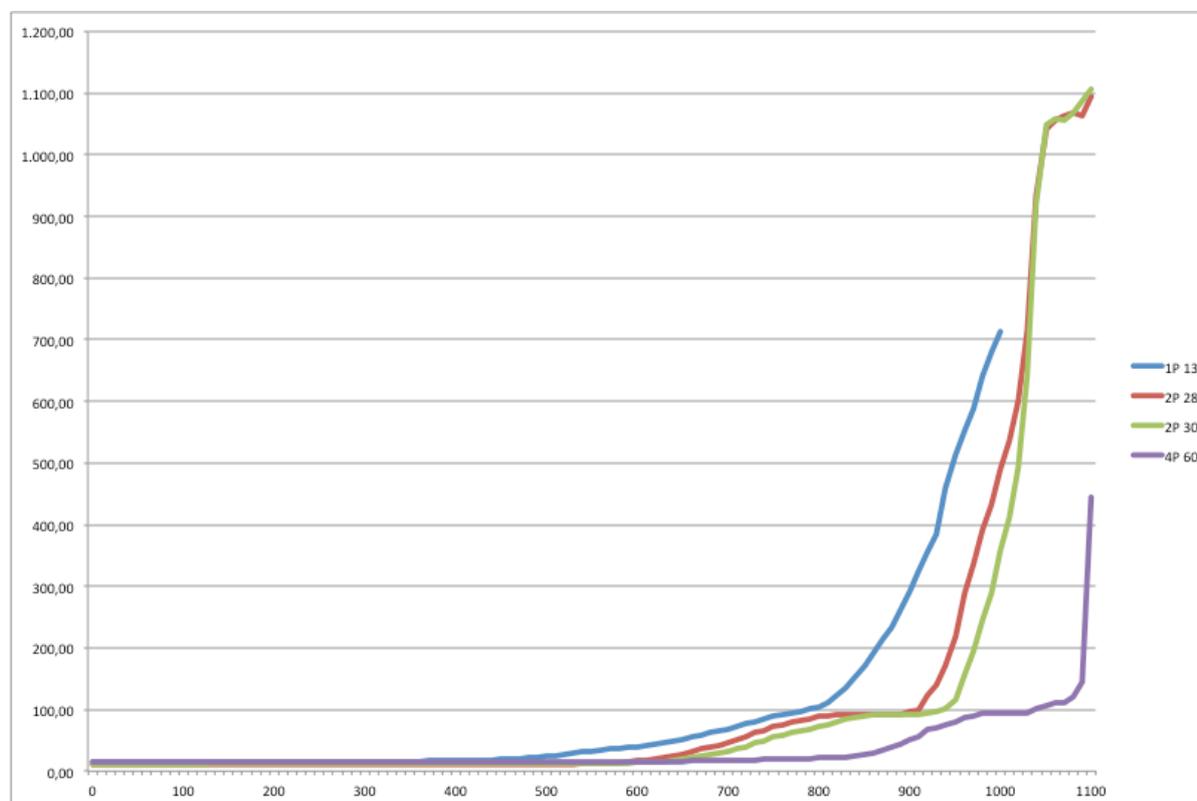


Para facilitar la interpretación de datos, se ha procedido a agrupar los valores correspondientes a los mismos espesores de aislamiento tomando el valor mediana de los mismos, según se expresa en la siguiente Tabla y Gráfica:

t (min)	1 P 13		Mediana 13	2 P 28		2 P 30		4 P 60				Mediana 60
	IPE 400 13 1,5m	IPE 400 13 4,5m		IPE 160 13+15	IPE 200 2x15	IPE 200 4x15	HEB 450 4x15	HEA 300 4x15	HEA 200 4x15	IPE 400 4x15 1,5m	IPE 400 4x15 4,5m	
0	15	15	15	11	11	11	24	23	14	15	15	15
1	15	15	15	11	12	11	23	22	13	15	15	15
2	16	16	16	11	12	11	23	22	14	15	15	15
3	17	18	18	11	12	11	23	22	13	15	15	15
4	21	23	22	11	12	11	23	22	14	15	15	15
5	26	29	28	12	12	11	23	22	14	15	15	15
6	32	35	34	14	12	11	23	22	14	15	15	15
7	38	42	40	16	14	11	23	22	14	15	15	15
8	45	50	48	20	15	11	23	22	14	15	16	16
9	50	57	54	25	18	11	23	22	14	15	16	16
10	56	61	59	31	22	11	23	22	14	16	17	17
11	61	66	64	38	26	11	23	22	14	16	17	17
12	65	70	68	44	31	11	23	22	14	16	18	17
13	70	74	72	50	36	11	23	22	14	17	19	18
14	74	78	76	56	41	11	23	22	14	17	19	18
15	78	82	80	62	46	11	23	22	15	17	20	19
16	81	86	84	67	51	11	23	22	15	18	21	20
17	84	90	87	72	56	11	23	22	15	18	22	20
18	86	94	90	77	60	11	23	22	15	19	23	21
19	88	97	93	81	64	11	23	22	15	20	24	21
20	90	100	95	84	68	11	23	22	16	20	25	21
21	92	103	98	88	71	12	23	22	16	21	27	22
22	94	107	101	90	75	12	23	22	16	22	29	22
23	96	109	103	91	78	12	23	22	19	22	30	22
24	99	111	105	92	81	12	24	23	22	23	32	23
25	104	116	110	91	85	12	24	23	22	24	33	24
26	110	124	117	92	87	12	24	23	23	25	35	24
27	117	132	125	92	88	12	24	23	24	26	37	24
28	127	141	134	91	89	12	25	26	24	28	39	26
29	136	152	144	92	90	13	25	29	29	30	40	29
30	145	163	154	91	91	13	26	29	29	31	42	29



En la que, después de interpolar linealmente los valores facilitados en incrementos de temperatura del gas ambiente de 10° para facilitar su comparación con los obtenidos en la campaña de ensayos:



6.2 DATOS DE ENSAYOS FABRICANTE “B”

6.2.1 ELEMENTOS ENSAYADOS

Los datos de los ensayos de este fabricante han sido realizados sobre 11 pilares cortos de 1 m de luz, expuestos al fuego por sus cuatro caras, de los siguientes tipos y revestimiento:

- HEA 300 revestido con una placa de 15 mm (espesor total 15 mm)
- HEM 280 revestido con una placa de 15 mm (espesor total 15 mm)
- HEB 300 revestido con una placa de 15 mm (espesor total 15 mm)
- HEA 200 revestido con una placa de 15 mm (espesor total 15 mm)
- HEM 280 revestido con una placa de 25 mm (espesor total 25 mm)
- IPE 200 revestido con una placa de 25 mm (espesor total 25 mm)
- IPE 160 revestido con una placa de 25 mm (espesor total 25 mm)
- HEB 400 revestido con una placa de 25 mm y otra de 15 mm (espesor total 40 mm)
- HEA 300 revestido con una placa de 25 mm y otra de 15 mm (espesor total 40 mm)
- HEA 200 revestido con una placa de 25 mm y otra de 15 mm (espesor total 40 mm)
- IPE 200 revestido con una placa de 25 mm y otra de 15 mm (espesor total 40 mm)

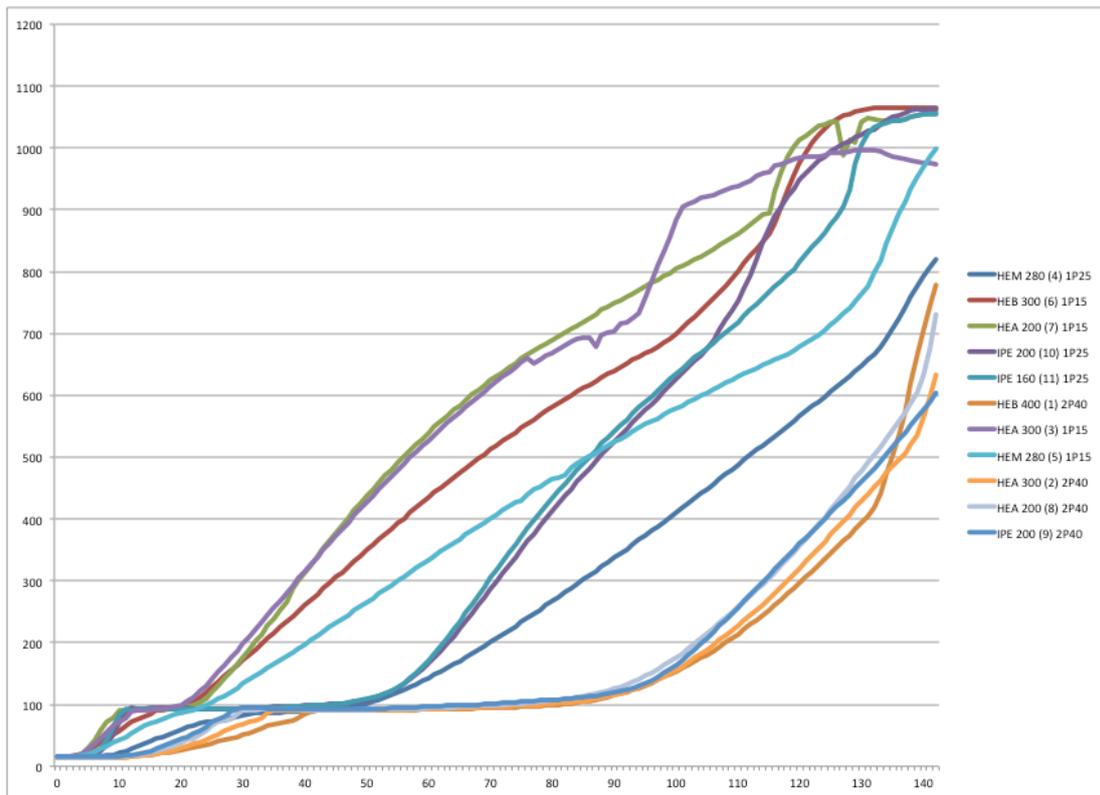
6.2.2 VALORES OBTENIDOS

El proceso de tratamiento de datos ha sido similar al explicado en el caso del fabricante “A”

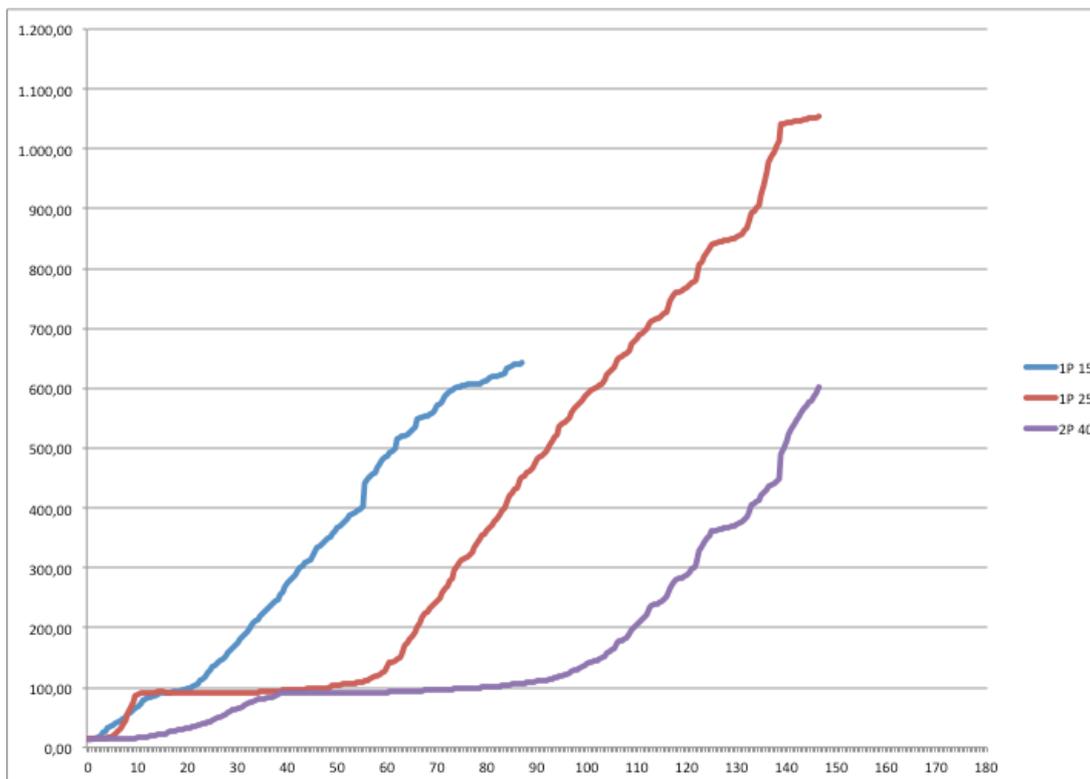
Los resultados fueron digitalizados y ordenados de modo que se agruparon en un Tabla las temperaturas medias de los ensayos realizados en todos los elementos:

t (min)	Tª media (°C)											
	1 PLACA 15				1 PLACA 25				2 PLACAS 25+15 = 40			
	HEA 300 (3) 1P15	HEM 280 (5) 1P15	HEB 300 (6) 1P15	HEA 200 (7) 1P15	HEM 280 (4) 1P25	IPE 200 (10) 1P25	IPE 160 (11) 1P25	HEB 400 (1) 2P40	HEA 300 (2) 2P40	HEA 200 (8) 2P40	IPE 200 (9) 2P40	
0	14	15	15	13	13	16	15	13	13	13	15	
1	14	15	15	13	13	16	15	13	13	13	15	
2	14	15	15	14	13	16	15	13	13	14	15	
3	16	16	17	15	13	16	15	13	13	14	15	
4	21	18	20	21	13	16	15	13	13	14	15	
5	28	21	26	30	13	17	16	13	13	14	15	
6	37	25	32	43	14	19	20	14	13	14	15	
7	46	29	39	58	15	24	29	14	13	14	15	
8	55	33	45	71	17	34	43	14	13	14	15	
9	65	38	52	79	19	51	64	14	14	14	16	
10	73	43	58	90	22	71	84	15	14	15	16	
11	79	48	65	91	25	89	92	15	14	16	17	
12	88	53	72	91	28	94	91	16	16	17	19	
13	91	60	76	91	32	93	92	17	16	19	20	
14	91	66	80	92	36	93	92	18	18	21	23	
15	91	70	85	92	40	94	93	19	19	23	25	
16	92	73	90	92	44	94	92	20	21	25	28	
17	92	77	91	92	47	94	92	22	23	28	32	
18	94	80	92	93	51	94	92	23	25	31	36	
19	96	84	94	93	56	94	92	25	27	34	40	
20	99	86	97	94	59	94	92	27	30	38	44	
21	105	88	100	96	63	94	92	29	33	42	48	
22	112	91	106	99	66	93	92	30	36	46	53	
23	121	94	112	103	69	93	92	33	39	51	58	
24	131	98	119	110	71	93	92	35	43	58	63	
25	141	104	128	120	72	93	92	37	47	66	72	
26	152	109	137	130	74	93	92	40	51	71	77	
27	164	114	146	142	75	93	92	42	57	74	80	
28	175	120	155	154	78	93	92	45	62	76	88	
29	186	127	164	165	80	93	92	48	66	84	93	
30	198	134	172	175	83	94	92	51	68	91	94	
31	210	140	181	189	85	94	93	54	71	91	94	
32	221	146	189	202	86	94	93	58	74	91	94	
33	233	152	198	214	86	95	94	62	78	92	94	
34	245	159	207	227	87	95	94	65	87	92	93	
35	257	165	216	239	87	96	95	68	90	92	93	
36	268	172	225	252	87	96	95	70	90	92	93	
37	280	178	233	266	88	96	96	72	90	92	93	
38	292	184	242	287	88	97	96	75	90	92	93	
39	304	191	251	300	88	97	97	79	90	92	93	
40	315	197	260	313	88	98	97	85	90	91	93	
41	327	204	269	326	89	99	98	88	90	91	93	
42	338	211	278	339	90	99	98	90	90	91	93	
43	350	218	287	352	91	100	99	90	90	91	93	
44	361	225	296	365	92	101	100	90	90	91	93	

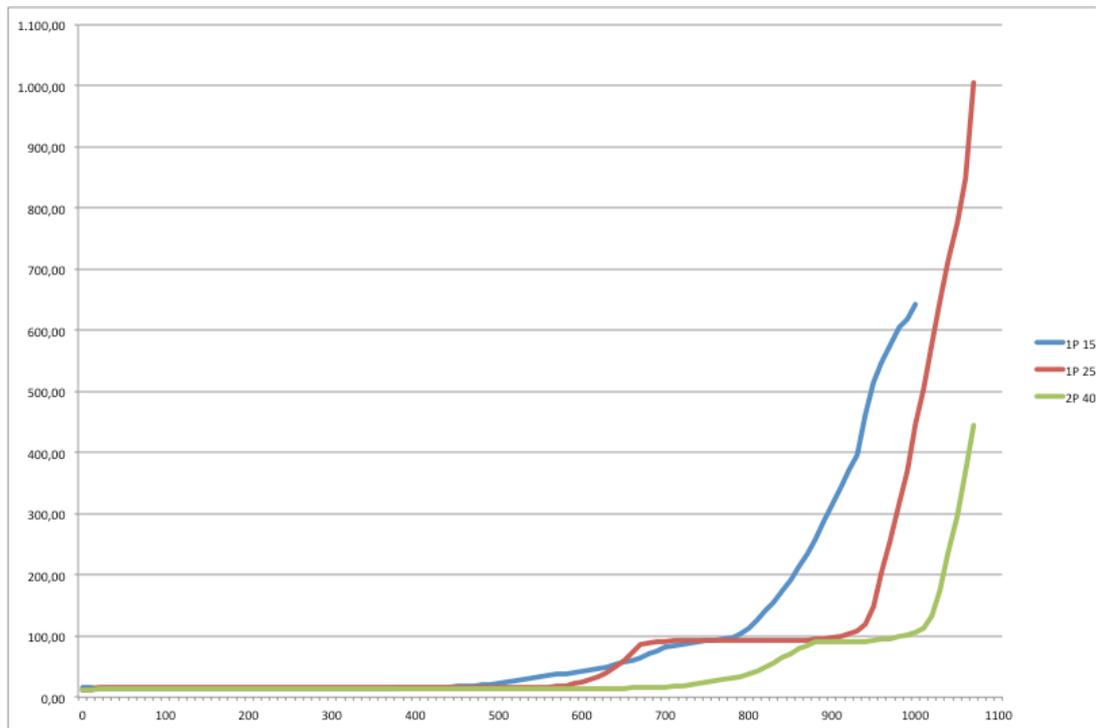
y gráficamente, en la que se pueden observar las tendencias de temperatura del acero en función del espesor de su protección:



Para facilitar la interpretación de datos, se ha procedido a agrupar los valores correspondientes a los mismos espesores de aislamiento tomando el valor mediana de los mismos, según se expresa en la siguiente Gráfica:



En la que, después de interpolar linealmente los valores facilitados en incrementos de temperatura del gas ambiente de 10° para facilitar su comparación con los obtenidos en la campaña de ensayos:



6.3 DATOS DE ENSAYOS FABRICANTE “C”

6.3.1 ELEMENTOS ENSAYADOS

Los datos de los ensayos de este fabricante han sido realizados sobre los siguientes tipos de elementos, perfil y revestimiento:

- VIGAS expuestas al fuego por sus tres caras inferiores
 - IPE 400 (Factor de sección: 116 m⁻¹)
 - Sin carga
 - Luz=1,5 m
 - Revestida con una placa de 15 mm (espesor total:15 mm)
 - IPE 400 (Factor de sección: 116 m⁻¹)
 - Con carga
 - Luz=1,5 m
 - Revestida con tres placas de 25 mm (espesor total:75 mm)
 - IPE 400 (Factor de sección: 116 m⁻¹)
 - Sin carga
 - Luz =4,5 m
 - Revestida con una placa de 15 mm (espesor total:15 mm)
 - IPE 400 (Factor de sección: 116 m⁻¹)
 - Con carga
 - Luz =4,5 m
 - Revestida con tres placas de 25 mm (espesor total:75 mm)
- PILARES sin carga expuestos al fuego por todas sus caras

- IPE 160 (Factor de sección: 241 m^{-1}) revestido con una placa de 15 mm (espesor total 15 mm)
- IPE 160 (Factor de sección: 241 m^{-1}) revestido con tres placas de 25 mm (espesor total:75 mm)
- IPE 200 (Factor de sección: 211 m^{-1}) revestido con una placa de 15 mm (espesor total 15 mm)
- IPE 200 (Factor de sección: 211 m^{-1}) revestido con tres placas de 25 mm (espesor total:75 mm)
- HEA 200 (Factor de sección: 145 m^{-1}) revestido con una placa de 15 mm (espesor total 15 mm)
- HEA 200 (Factor de sección: 145 m^{-1}) revestido con tres placas de 25 mm (espesor total:75 mm)
- HEA 300 (Factor de sección: 104 m^{-1}) revestido con una placa de 15 mm (espesor total 15 mm)
- HEA 300 (Factor de sección: 104 m^{-1}) revestido con dos placas de 20 y 25 mm (espesor total 45 mm)
- HEA 300 (Factor de sección: 104 m^{-1}) revestido con tres placas de 25 mm (espesor total:75 mm)
- HEB 300 (Factor de sección: 80 m^{-1}) revestido con una placa de 15 mm (espesor total 15 mm)
- HEB 300 (Factor de sección: 80 m^{-1}) revestido con dos placas de 20 y 25 mm (espesor total 45 mm)
- HEB 450 (Factor de sección: 69 m^{-1}) revestido con tres placas de 25 mm (espesor total:75 mm)
- HEM 280 (Factor de sección: 50 m^{-1}) revestido con una placa de 15 mm (espesor total 15 mm)
- HEM 280 (Factor de sección: 50 m^{-1}) revestido con dos placas de 20 y 25 mm (espesor total 45 mm)
- HEM 280 (Factor de sección: 50 m^{-1}) revestido con tres placas de 25 mm (espesor total:75 mm)

6.3.2 VALORES OBTENIDOS

Lamentablemente, los resultados de los ensayos no ofrecen valores de temperatura alcanzada por el acero, por lo que únicamente han podido ser aprovechadas las tablas de espesores relacionadas con el factor de sección y la temperatura crítica correspondiente que se pueden consultar en el Apéndice 3 de la presente Tesis.

6.4 ANÁLISIS DE LOS DATOS

6.4.1 DISPERSIÓN DE VALORES DE LOS TERMOPARES

En todos los datos analizados se produce un fenómeno de dispersión de valores de la temperatura del acero a partir de determinados tiempos de la curva nominal estándar tal y como se puede apreciar, a modo de ejemplo, en las siguientes gráficas que presentan en el eje de abscisas el tiempo transcurrido (que genera una temperatura de los gases de acuerdo con la curva nominal estándar) y en el eje de ordenadas la temperatura que alcanza el acero de la pieza ensayada.

En ambas gráficas se puede observar las medidas de la temperatura del acero de los diversos termopares situados en las piezas ensayadas protegidas con dos placas de 13+15 mm de espesor (con un total de 28 mm) y dos placas de 15+15 mm de espesor (con un total de 30 mm), apreciándose un comportamiento homogéneo hasta los 45 minutos en el primer caso y hasta los 55 minutos en el segundo, aproximadamente, momento en el que los valores de la temperatura del acero comienzan a sufrir una dispersión motivada, con toda probabilidad, por la rotura de las placas de protección.

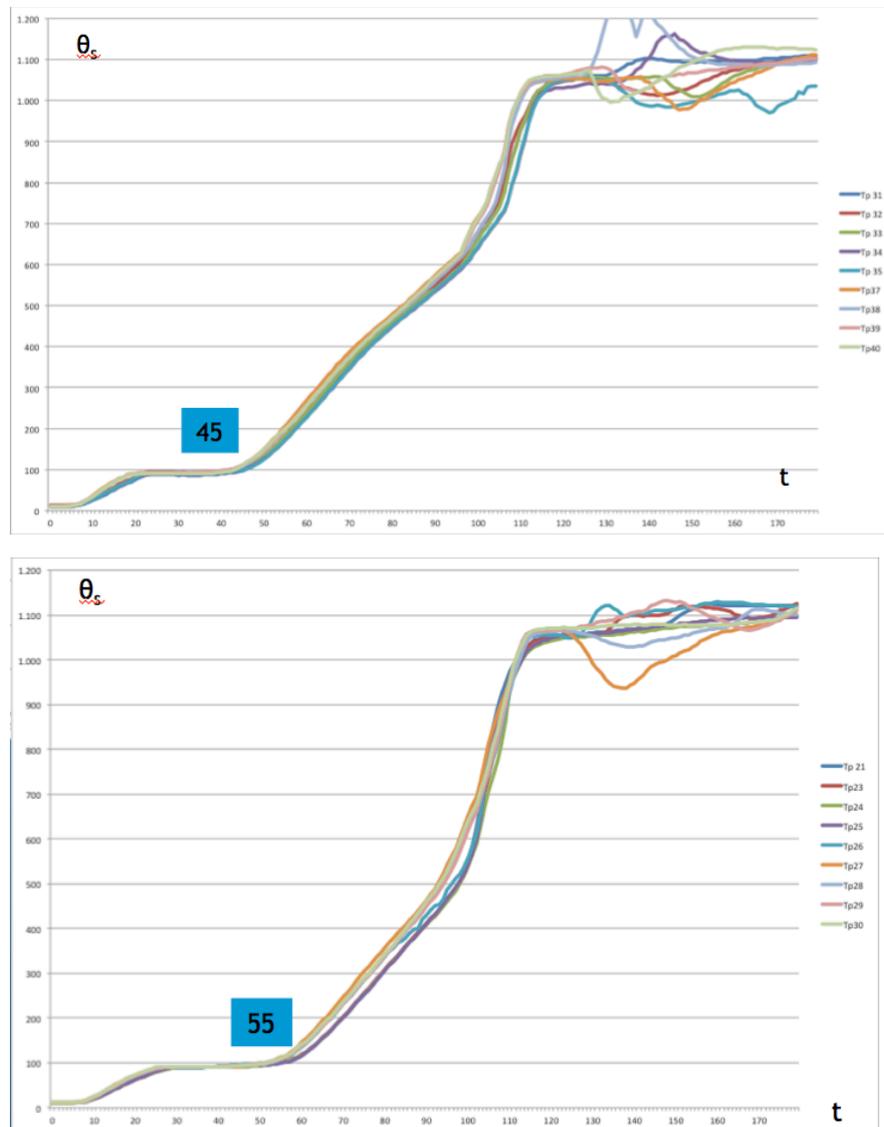


Gráfico VI.1 – Dispersión de los valores registrados en los termopares en los datos de los ensayos de los fabricantes

6.4.2 ANÁLISIS VALORES FABRICANTE “A”

En la siguiente gráfica pueden observarse la mediana de las temperaturas de los termopares para cada una de las piezas ensayadas indicándose en cada línea el espesor de la protección.

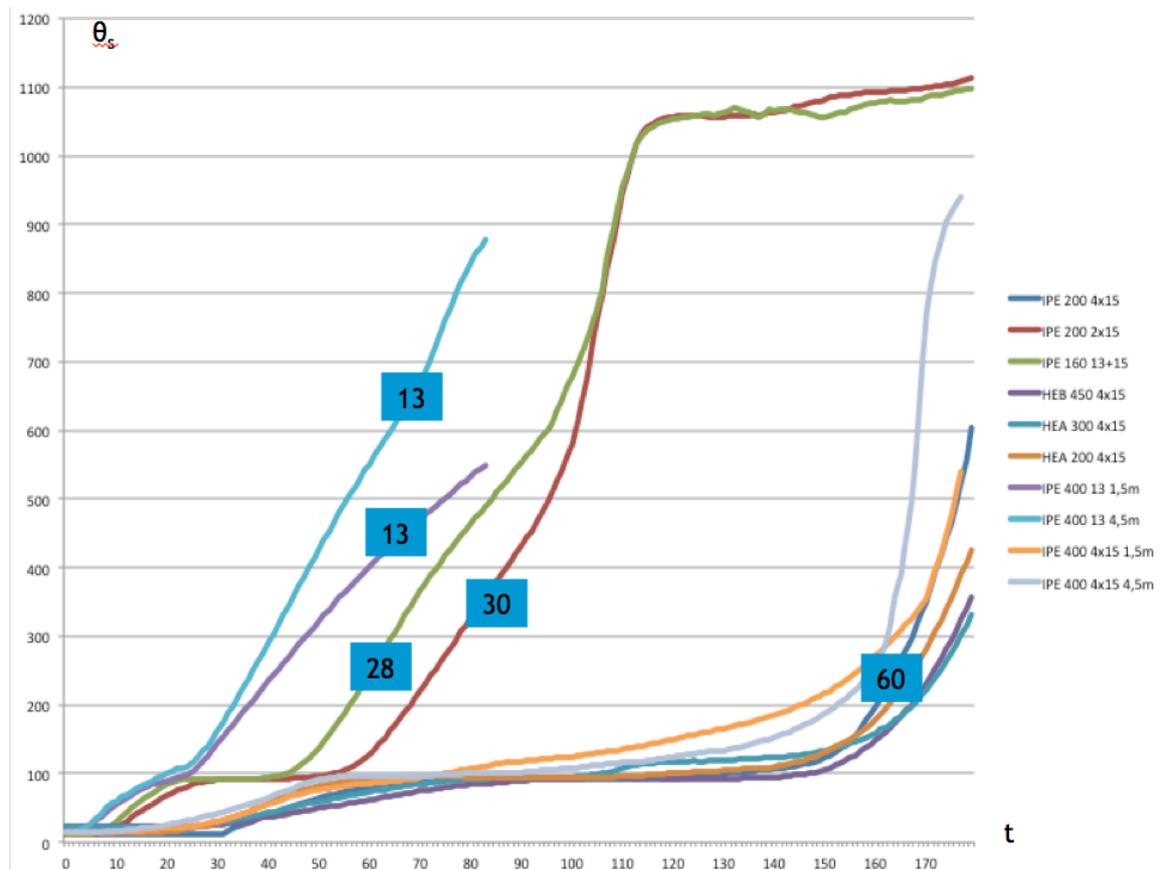


Gráfico VI.2 – Dispersión de los valores mediana registrados en los termopares en los datos de los ensayos de los fabricantes en función del espesor de revestimiento de material de protección. Fabricante “A”

Puede destacarse el hecho de la desviación que se produce en las medidas de las dos piezas protegidas con un placa de 13 mm a partir de los 20 minutos.

Asimismo, es reseñable la meseta horizontal de los 20 a los 50 minutos (aproximadamente) que presentan las piezas con espesores de protección entre 28 y 30 mm.

Por último, se aprecia el inicio de la dispersión de valores a partir de los 60 minutos en las piezas con espesores de protección de 60 mm.

En la siguiente gráfica se indican en el eje de abscisas las temperaturas que alcanza el gas y en el de ordenadas las que alcanza el acero (valores mediana de los ensayos)

Para obtener estos valores se ha empleado un proceso de interpolación utilizando los valores tiempo de la curva ISO-temperatura del acero anteriormente analizados y haciéndolos corresponder con las temperaturas del gas que indica la curva nominal estándar mediante su ecuación de desarrollo.

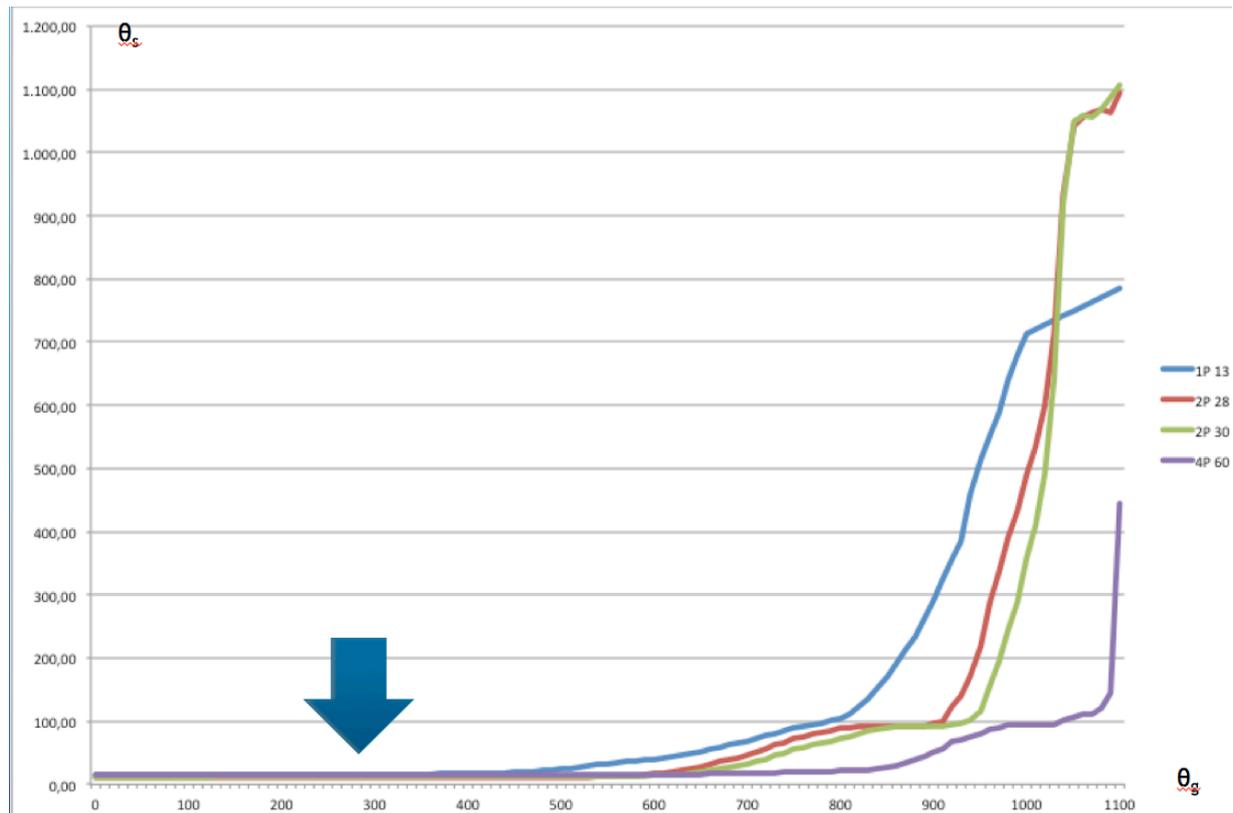


Gráfico VI.3 – Meseta horizontal de los valores mediana registrados en los termopares en los datos de los ensayos de los fabricantes en función del espesor de revestimiento de material de protección. Fabricante “A”

Cabe destacar la gran meseta horizontal hasta los 500°, en el caso del revestimiento de 13 mm, hasta los 650°, en el caso del de 28 y 30 mm y hasta los 800° en el caso de los 60 mm.

Cabría suponer que estas líneas deberían presentar una ligera pendiente ya que no parece razonable que, incrementándose la temperatura del gas ambiente hasta esos valores, la temperatura del acero permanezca prácticamente inalterada.

6.4.3 ANÁLISIS VALORES FABRICANTE “B”

En la siguiente gráfica pueden observarse la mediana de las temperaturas de los termopares para cada una de las piezas ensayadas indicándose en cada línea el espesor de la protección.

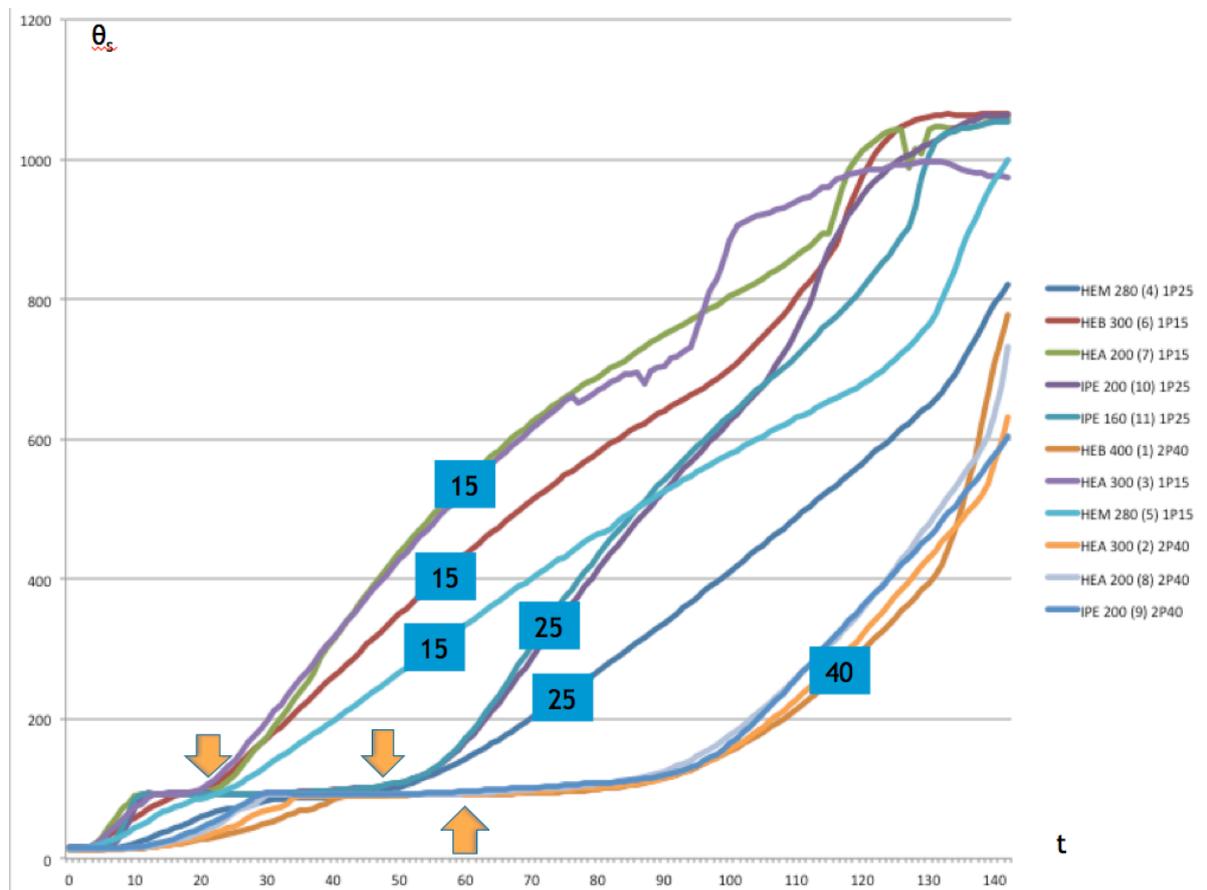


Gráfico VI.4 – Dispersión de los valores mediana registrados en los termopares en los datos de los ensayos de los fabricantes en función del espesor de revestimiento de material de protección. Fabricante “B”

Puede destacarse el hecho de la desviación que se produce en las medidas de las piezas protegidas con un placa de 15 mm a partir de los 20 minutos.

Asimismo, es reseñable la meseta horizontal de los 10 a los 50 minutos (aproximadamente) que presentan las piezas con espesores de protección de 25 mm.

Por último, se aprecia el inicio de la dispersión de valores a partir de los 60 minutos en las piezas con espesores de protección de 40 mm.

En la siguiente gráfica se indican en el eje de abscisas las temperaturas que alcanza el gas y en el de ordenadas las que alcanza el acero (valores mediana de los ensayos)

Para obtener estos valores se ha empleado un proceso de interpolación utilizando los valores tiempo de la curva ISO-temperatura del acero anteriormente analizados y haciéndolos corresponder con las temperaturas del gas que indica la curva nominal estándar mediante su ecuación de desarrollo.

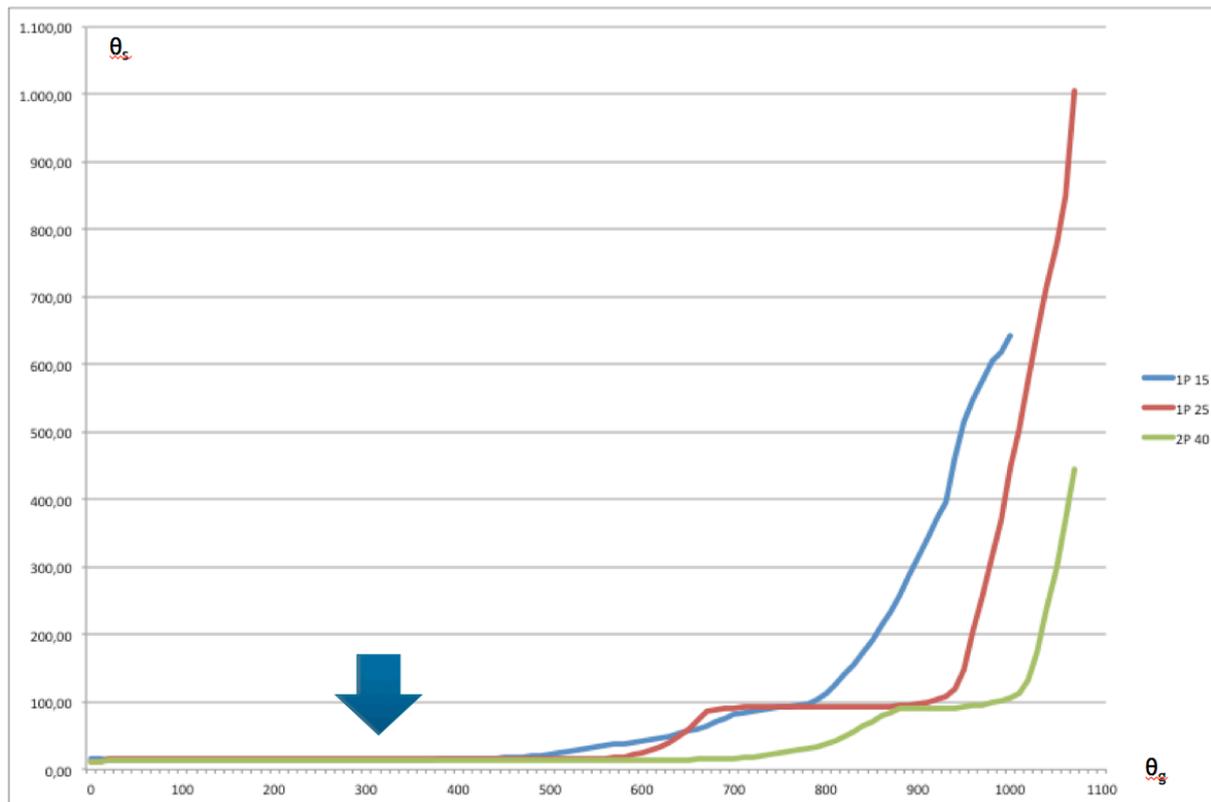


Gráfico VI.5 – Meseta horizontal de los valores mediana registrados en los termopares en los datos de los ensayos de los fabricantes en función del espesor de revestimiento de material de protección. Fabricante “B”

Es de destacar la gran meseta horizontal hasta los 500°, en el caso del revestimiento de 15 mm, hasta los 600°, en el caso del de 25mm y hasta los 700° en el caso de los 40 mm.

Cabría suponer que estas líneas deberían presentar una ligera pendiente ya que no parece razonable que, incrementándose la temperatura del gas ambiente hasta esos valores, la temperatura del acero permanezca prácticamente inalterada.

6.4.4 TABLA DE TEMPERATURAS

En la siguiente Tabla puede apreciarse, a modo de resumen, a que temperaturas del gas (y su correspondencia con el tiempo de la curva estándar) se inicia el ascenso brusco de la temperatura del acero así como a que temperaturas del gas (y su tiempo ISO correspondiente) se alcanzan los 700° en el acero (tomándose este valor como una temperatura crítica usual)

Pueden observarse las analogías entre los valores de los fabricantes “A” y “B” en los revestimientos de espesor similar.

	Inicia ascenso brusco de temperatura del acero a la temperatura del gas de	Alcanza una temperatura del acero de 700° a la temperatura del gas de
Fabricante "A"		
13 mm	800° (23 min ISO)	1000° (87 min ISO)
28 mm	900° (45 min ISO)	1020° (99 min ISO)
30 mm	940° (58 min ISO)	1040° (113 min ISO)
60 mm	1080° (148 min ISO)	>1100° (169 min ISO)
Fabricante "B"		
15 mm	800° (23 min ISO)	1010° (93 min ISO)
25 mm	920° (51 min ISO)	1040° (113 min ISO)
40 mm	1000° (87 min ISO)	≈1100° (169 min ISO)

Tabla VI.1 – Tabla comparativa temperaturas alcanzadas por el acero en función del espesor de material de protección.

6.4.5 DISCREPANCIAS EN LOS ESPESORES

Analizando los valores de espesores de revestimiento necesarios para una temperatura crítica del acero de 500° de los tres fabricantes se aprecian discrepancias entre ellos tal y como se puede observar tanto en la siguiente Tabla comparativa como en los gráficos que se incluyen a continuación:

TABLA DE ESPESORES DE PROTECCIÓN DE PLACAS DE YESO LAMINADO																
Factor sección	Temperatura crítica del acero 500°															
	30 minutos			60 minutos			90 minutos			120 minutos			180 minutos			
	"A"	"B"	"C"	"A"	"B"	"C"	"A"	"B"	"C"	"A"	"B"	"C"	"A"	"B"	"C"	
40	14	13	15	14	13	15	14	13	25	20	13	35	33	38	50	
50	14	13	15	14	13	15	15	13	25	21	25	35	35	38	50	
60	14	13	15	14	13	20	17	13	30	25	25	40	39	38	55	
70	14	13	15	14	13	20	20	13	30	27	25	40	42	38	55	
80	14	13	15	14	13	20	21	25	30	29	25	40	45	38	55	
90	14	13	15	15	13	25	23	25	35	31	25	45	47		60	
100	14	13	15	16	13	25	24	25	35	32	25	45	49		60	
110	14	13	15	17	13	25	25	25	35	34	25	45	51		60	
120	14	13	15	17	13	25	26	25	35	35	38	45	52		60	
130	14	13	15	18	13	25	27	25	35	36	38	45	53		60	
140	14	13	15	19	13	25	28	25	35	36	38	45	54		60	
150	14	13	15	19	25	25	28	25	35	37	38	50	55		60	
160	14	13	15	20	25	25	29	25	35	38	38	50	56		60	
170	14	13	15	20	25	25	29	25	40	38	38	50	57		60	
180	14	13	15	21	25	25	30	25	40	39	38	50	57		60	
190	14	13	15	21	25	30	30	25	40	39	38	50	58		60	
200	14	13	15	21	25	30	31	25	40	40	38	50	59		60	
210	14	13	15	21	25	30	31	25	40	40	38	50	59		65	
220	14	13	15	22	25	30	31	25	40	41	38	50	60		65	
230	14	13	20	22	25	30	32	25	40	41	38	50	60		65	
240	14	13	20	22	25	30	32	25	40	41	38	50	61		65	
250	14	13	20	22	25	30	32	25	40	42	38	50	61		65	
260	14	13	20	23	25	30	32	25	40	42	38	50	61		65	
270		13	20		25	30		25	40		38	50			65	
280		13	20		25	30		25	40		38	50			65	
290		13	20		25	30		25	40		38	50			65	
300		13	20		25	30		25	40		38	50			65	
310			20			30			40			50			65	
320			20			30			40			50			65	
330			20			30			40			50			65	
340			20			30			40			50			65	
350			20			30			40			50			70	
360			20			30			40			50			70	
370			20			30			40			50			70	
380			20			30			40			50			70	
390			20			30			40			50			70	
400			20			30			40			50			70	
Valores obtenidos por extrapolación																

Tabla VI.2 – Tabla comparativa de los espesores de protección indicados por los fabricantes para distintos factores de sección y para una temperatura crítica del acero de 500°.

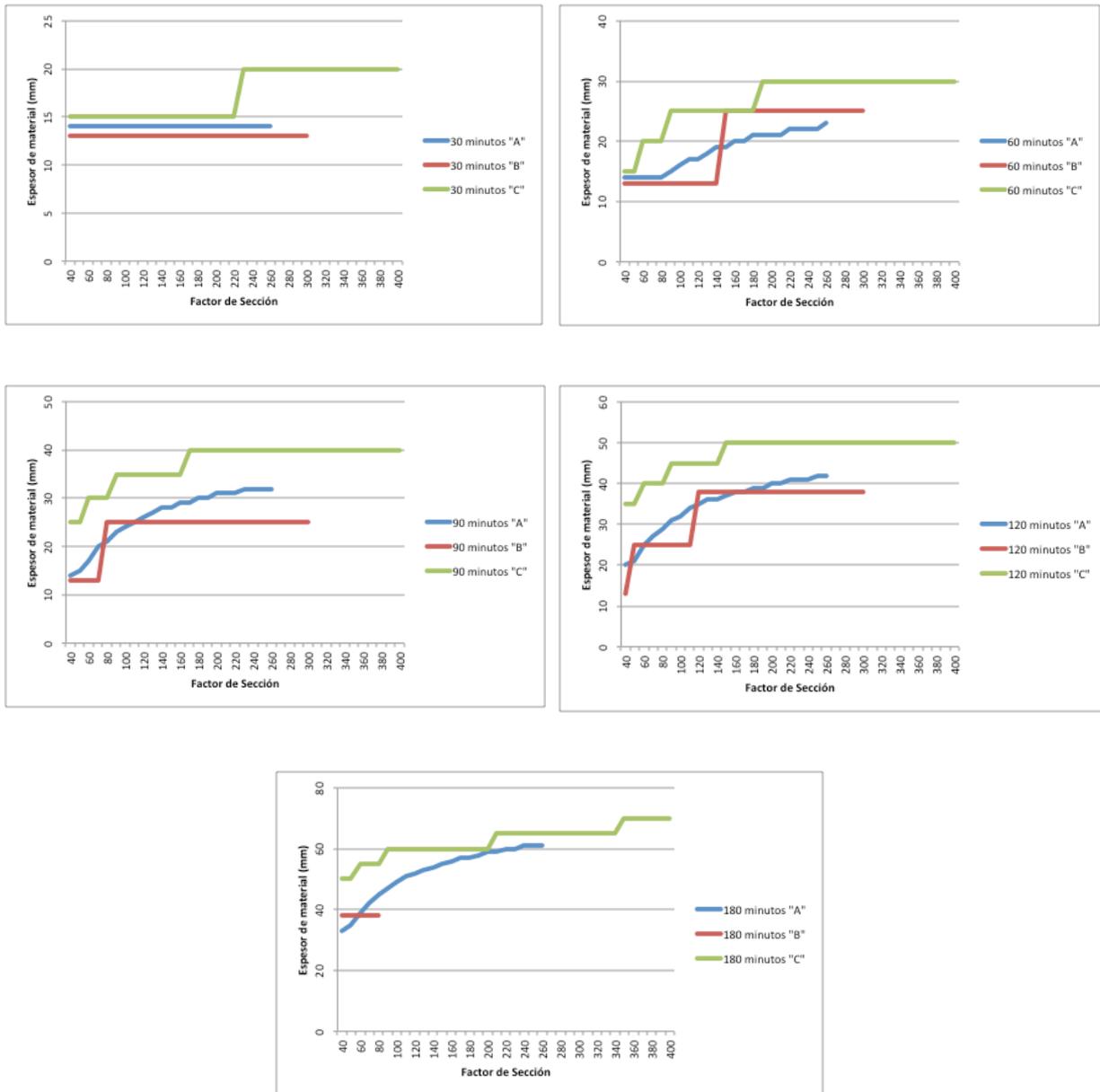


Gráfico VI.6 – Gráficas de los espesores de protección indicados por los fabricantes para distintos tiempos de resistencia al fuego y para una temperatura crítica del acero de 500°

6.5 CONCLUSIONES

- Se aprecia un comportamiento homogéneo de los valores de temperatura registrados por los termopares hasta determinado tiempo en el que los valores de la temperatura del acero comienzan a sufrir una dispersión motivada, con toda probabilidad, por la rotura de las placas de protección.
- No existe homogeneidad en las temperaturas del acero registradas para idénticos espesores de material de protección del mismo fabricante.
- En los datos deducidos de los ensayos de los fabricantes nacionales no se ha observado el incremento brusco de la temperatura del acero a partir del entorno de los 600° que se indica en los diversos estudios no nacionales indicados con anterioridad.⁴⁴
- Asimismo, en los casos analizados, es de destacar que la temperatura del acero se mantiene estable hasta el entorno de los 600° de temperatura del gas y cabría suponer que estas líneas deberían presentar una ligera pendiente ascendente, ya que no parece razonable que, incrementándose la temperatura del gas ambiente hasta esos valores, la temperatura del acero permanezca prácticamente inalterada⁴⁵.
- Al no haber tenido acceso a los ensayos completos no se ha podido comprobar la existencia de las correcciones que, sobre la temperatura del acero, indica la norma UNE ENV 13381-4 así como la determinación del valor de conductividad térmica efectiva del revestimiento (limitándose a proponer tablas de espesores en función del factor de forma del elemento estructural) ni el estudio en los diferentes rangos de temperaturas críticas que se indican en la citada Norma, incluyéndose tablas únicamente para una Temperatura crítica del acero de 500°.
- Como se puede apreciar en el estudio comparativo de los valores incluidos en las citadas tablas, existen discrepancias notables entre los espesores de material de protección que indica cada fabricante para una temperatura crítica del acero de 500°⁴⁶.

⁴⁴ Lo que puede ser debido a la diferencia de procedimiento de ensayo (tamaños y composición de probeta y horno) entre los estudios internacionales y los realizados de acuerdo a la Norma UNE ENV 13 381.

⁴⁵ Se puede apuntar como posible causa de este comportamiento irregular el hecho de que, en un horno grande, no se alcance la temperatura programada según la curva ISO tan rápidamente como en un horno pequeño ya que la distribución de temperaturas en el interior del horno se realiza de forma diferente en ambos casos.

⁴⁶ Estas discrepancias entre ensayos están, en la actualidad, siendo analizadas por diversos Organismos. Eeen un reciente informe realizado por el Instituto Europeo para la Protección ante el Fuego (www.eifp.eu), se han puesto en evidencia grandes diferencias entre los resultados de los ensayos realizados por Laboratorios de distintos países (observándose diferencias de hasta el 100% en el espesor de protección entre dos países). Asimismo, la Organización Europea que agrupa a los Laboratorios de Fuego (www.egolf.org.uk) se encuentra realizando diversos análisis estadísticos comparativos para determinar las variaciones que existen, con el mismo procedimiento de ensayo, entre los diferentes Laboratorios, habiéndose apreciado desviaciones notables.

7 CAMPAÑA DE ENSAYOS

Tras la recogida de datos relativos a placas de yeso laminado de los estudios internacionales y los distribuidores nacionales se procedió a realizar la campaña de ensayos que se describe a continuación.

Desde el 21 de marzo de 2011 hasta el 11 de abril de 2011 se realizaron diversas pruebas dirigidas a comprobar la validez de los recursos disponibles en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Politécnica Superior de la USP-CEU para la realización de la campaña de ensayos que se describe a continuación y fijar la forma de realización de los mismos.

Las acciones preliminares se orientaron a verificar los comportamientos del horno, los termopares, el dispositivo de lectura de temperaturas, la muestra de acero y la probeta.

7.1 CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL UTILIZADO

7.1.1 Horno eléctrico

Las características técnicas del horno eléctrico NABERTHERM Program Controller C19/S19 Modelo M20/HR utilizado pueden consultarse en el Apéndice 4 de la presente Tesis.

7.1.2 Termopares

Las primeras pruebas se realizaron con los Termopares existentes en el Laboratorio de Materiales de la USP-CEU compuestos por los siguientes tipos:

- Termopar tipo K RS ref. 397-1236 de $\varnothing 1,5$ y 150 mm de longitud.
- Termopar tipo K RS ref. 397-1264 de $\varnothing 3$ y 150 mm de longitud.
- Termopar tipo K RS ref. 397-1258 de $\varnothing 1,5$ y 250 mm de longitud

Tras diferentes pruebas se detectó que la vaina del cable conductor de los Termopares RS con los que se estaba realizando el ensayo no aguantaba las altas temperaturas y se fundía, por lo que hubo que cambiar a termopares de mayor longitud y del tipo “grounded” (medición de temperatura en la punta) revestidos con vaina de Inconel⁴⁷ utilizándose los siguientes tipos (en función del tamaño de la probeta ensayada):

- Termopar tipo K TC ref. 405-077 de $\varnothing 3$ y 2.000 mm de longitud con revestimiento de inconel.
- Termopar tipo K TC ref. 405-059 de $\varnothing 3$ y 1.000 mm de longitud con revestimiento de inconel.

7.1.3 Datalogger

Las características técnicas del Datalogger PICO TC-08 utilizado pueden consultarse en el Apéndice 4 de la presente Tesis. Para la conexión de los Termopares tipo K al Datalogger se utilizaron conectores macho en línea de la casa RS y referencia 455-9764.

⁴⁷ Superaleación austenítica de base níquel-cromo. Este tipo de Termopar se eligió tras haber detectado que los revestidos con vaina de acero inoxidable y de pyrosil arrojaban fallos de lectura a determinados rangos de temperaturas.

7.1.4 Acero laminado

Las características técnicas del acero laminado S 275 JR utilizado para la realización de las probetas pueden consultarse en el Apéndice 4 de la presente Tesis.

7.1.5 Placas de yeso laminado

Las características técnicas de las placas de yeso laminado utilizado para la realización de las probetas pueden consultarse en el Apéndice 4 de la presente Tesis.

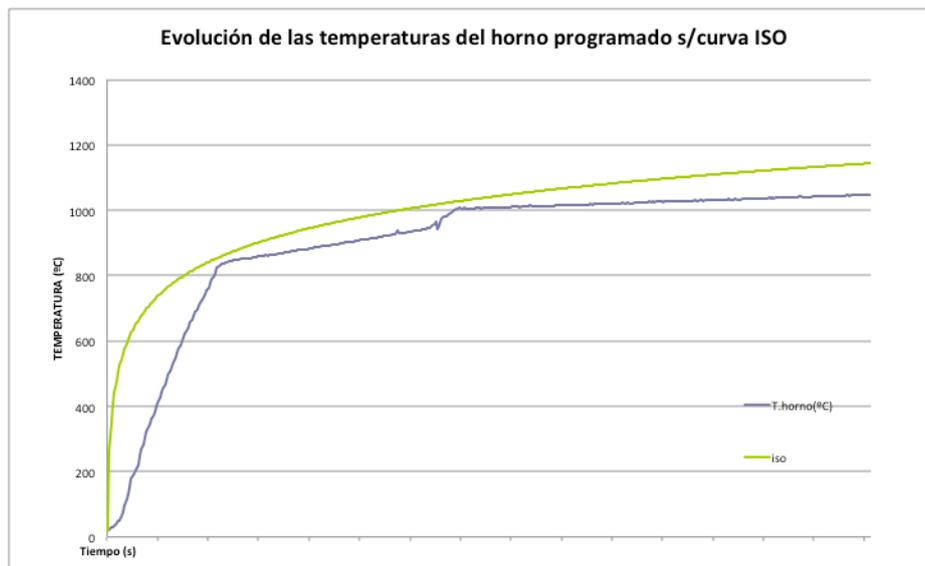
7.2 PRUEBAS DE VALIDACIÓN

7.2.1 Validación del horno

En una primera fase (del 23 de marzo al 6 de abril) se realizaron pruebas sobre la temperatura real que alcanzaba el horno eléctrico disponible (NABERTHERM C19/S19) al ser programado de acuerdo con la formulación de la curva ISO normalizada: $\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) [^\circ]$

Como comprobación, se midió la temperatura interior del horno anotando los valores que marca la pantalla de cristal líquido del mismo y que registra la sonda interna del horno.

Tal y como se observa en el siguiente gráfico, la curva así obtenida (color azul), no se adaptaba a la curva ISO normalizada (color verde).



Con objeto de aproximar lo más posible la curva de temperaturas interiores del horno a las de la curva estándar se optó por programar una curva “forzada” cuya forma y comportamiento se asemeja mas a la estándar y que es la que se ha utilizado para la realización de los ensayos (teniendo en cuenta que lo relevante es el comportamiento de la conductividad térmica del material de protección en función de las temperaturas del horno y el acero).

Esta curva “forzada” (color negro) responde a los siguientes parámetros de programación y arroja la siguiente forma gráfica:

Tiempo	Temperatura programada
15'	841°
30'	946°
60'	1005°
90'	1049°
120'	1102°
180'	1200°

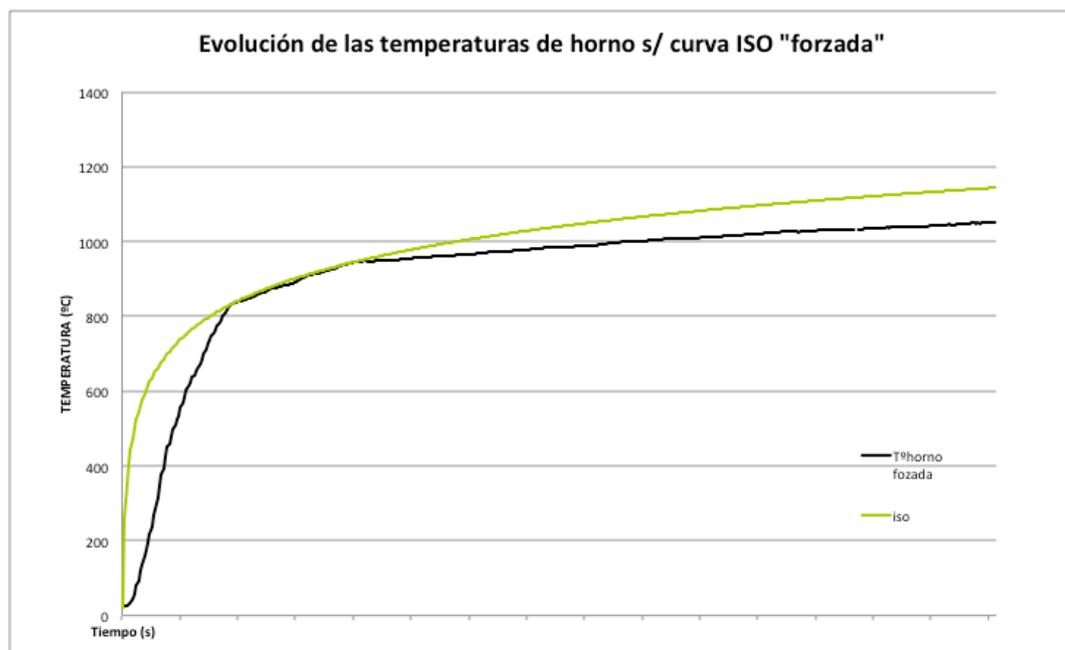


Gráfico VII.1 – Curva de incendio del horno de ensayo.

7.2.2 Validación de la probeta de acero

Las siguientes pruebas, que se realizaron durante los días 4 y 5 de abril y tuvieron como objetivo determinar si la temperatura del acero variaba en función del espesor del mismo.

La primera de ellas fue la comprobación de las mediciones arrojadas por los termopares en una placa de acero de 15 mm de espesor situando tres termopares a diferentes profundidades (5, 7.5 y 13 mm) según puede apreciarse en la fotografía.

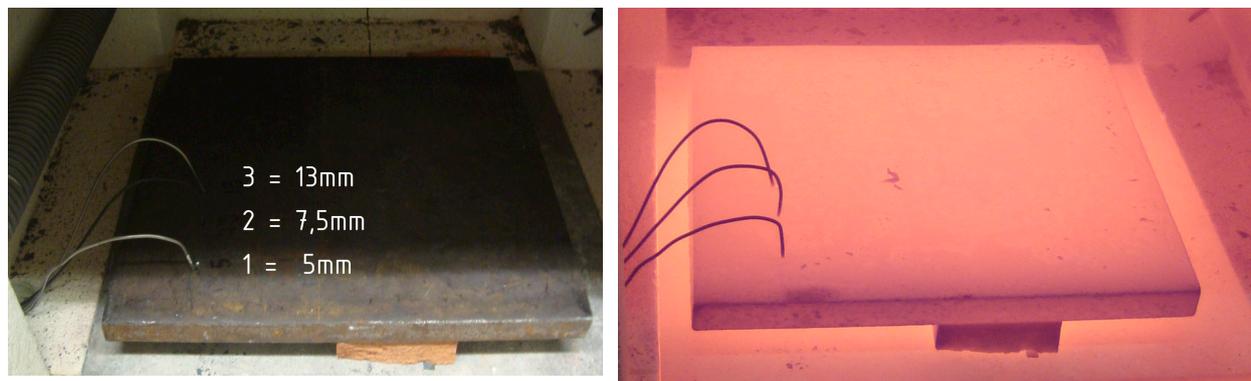


Imagen VII.1 – Validación de la probeta de acero. Colocación de los termopares de registro.

Los resultados muestran unas temperaturas similares prácticamente independientes de la profundidad de penetración del termopar en la probeta de acero.

Las mediciones realizadas ofrecieron resultados similares, (incluso mediciones erráticas en el entorno de los 60-90 minutos, lo que indica posibles movimientos de los termopares y consiguiente falta de contacto adecuado que, posteriormente, se homogeneizan).

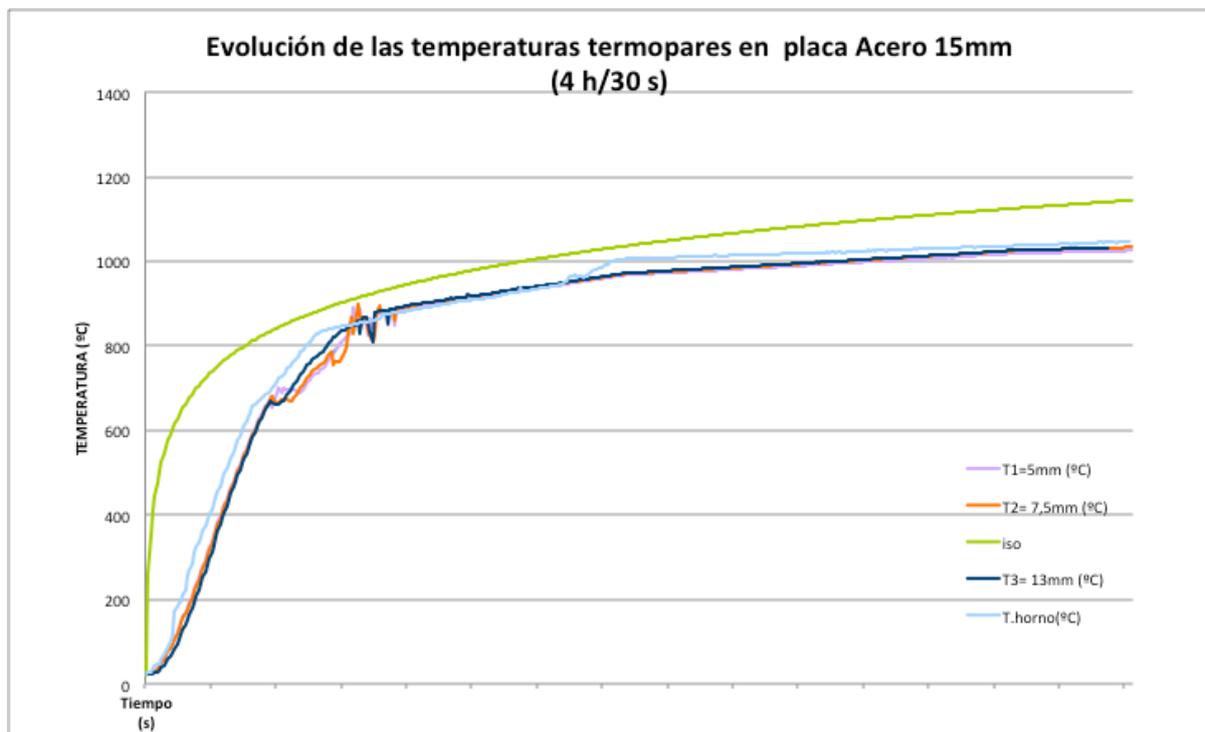
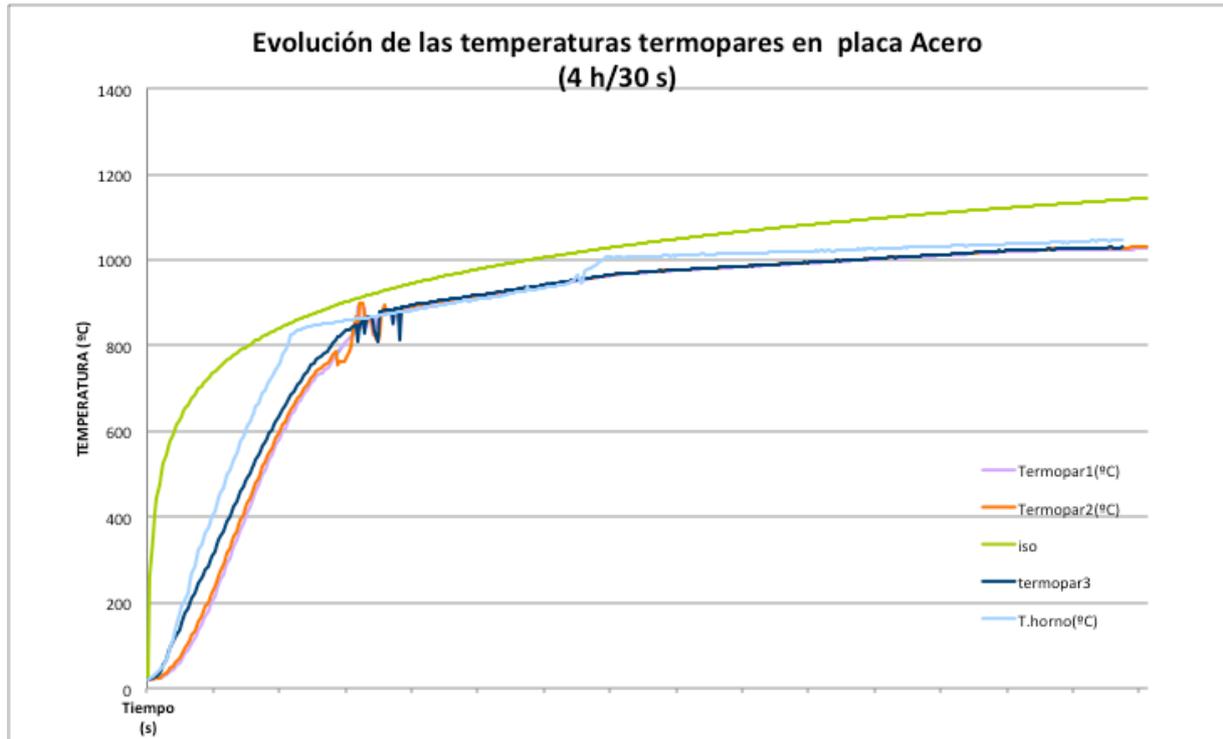


Gráfico VII.2 – Validación de la probeta de acero. Valores de los termopares de registro.

No obstante, el objetivo de analizar si la temperatura del acero varía en función de la profundidad del termopar quedó determinado ya que se puede apreciar que no influye, por lo que se dedujo que, para la realización de los ensayos, bastaría con tomar la temperatura del acero en cualquier punto del mismo.

7.2.3 Validación de toma de temperaturas en las placas de yeso laminado

Se realizaron varias mediciones tomando la temperatura superficial de placas de yeso laminado.

Durante estas pruebas se pudo comprobar que el cable de revestimiento de los conductores de los termopares de los que se disponía no resistía las altas temperaturas y que era necesario introducir los mismos por el orificio situado en la esquina inferior izquierda delantera del mismo.

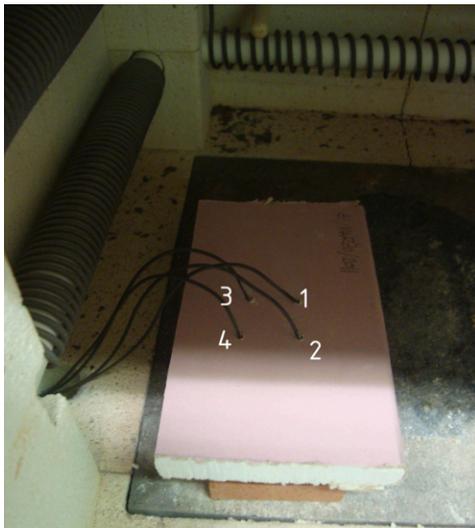
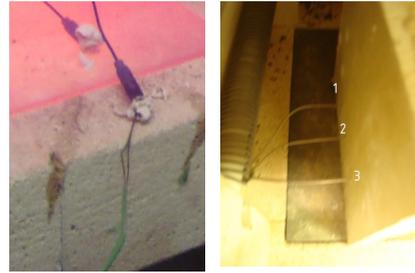


Imagen VII.2 – Validación de toma de temperaturas en las placas de yeso laminado.

En las fotografías inferiores se puede apreciar el estado de las placas de yeso laminado concluido el ensayo.

En la siguiente gráfica se puede observar la diferencia entre las temperaturas registradas en el interior del horno y la curva nominal estándar.

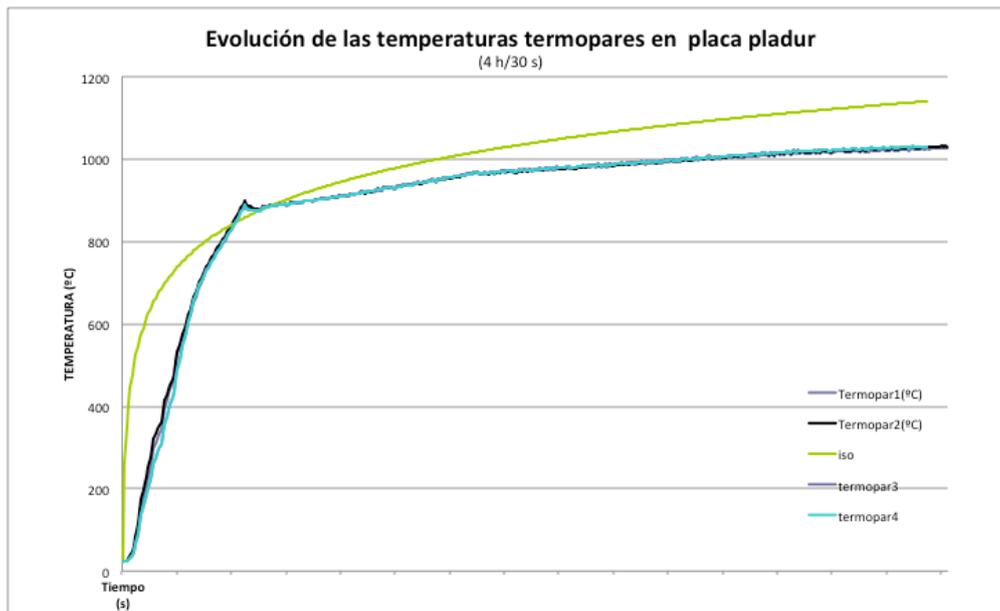


Gráfico VII.3 – Validación de toma de temperaturas en las placas de yeso laminado. Valores de los termopares de registro.

7.2.4 Validación de la probeta de ensayo

Por último, durante los días 8 y 11 de abril, se realizaron pruebas con dos probetas consistentes en una placa de acero de 10 mm de espesor revestida por ambos lados con una placa de yeso laminado de 15 mm de espesor y sellada por los bordes con escayola colocándose dos termopares por probeta (medida y control) para tomar las temperaturas que se producen en el acero.

Siendo el aspecto de la probeta antes y después del ensayo el siguiente:

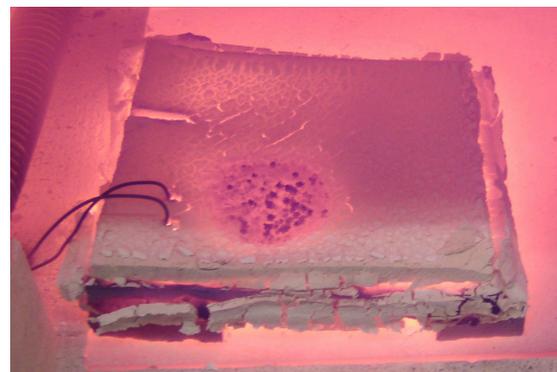
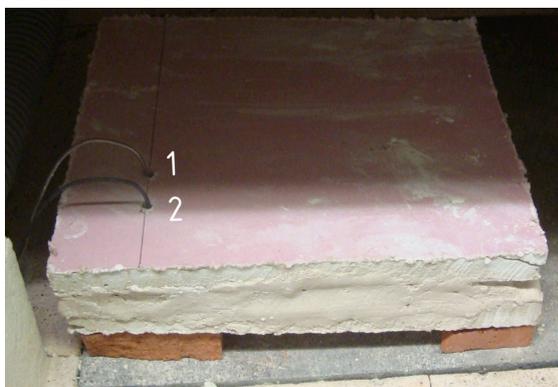


Imagen VII.3 – Validación la probeta de ensayo.

Se probaron diversos materiales para el sellado perimetral, desde el sellado con yeso (como se puede apreciar la fotografía) hasta material sintético de sellado de juntas a alta temperatura.

No obstante, siendo el objeto de la presente prueba determinar si las mediciones de los termopares eran homogéneas se comprobó que así era tal y como se puede observar en la evolución de la temperatura del acero la que se refleja en los siguientes gráficos:

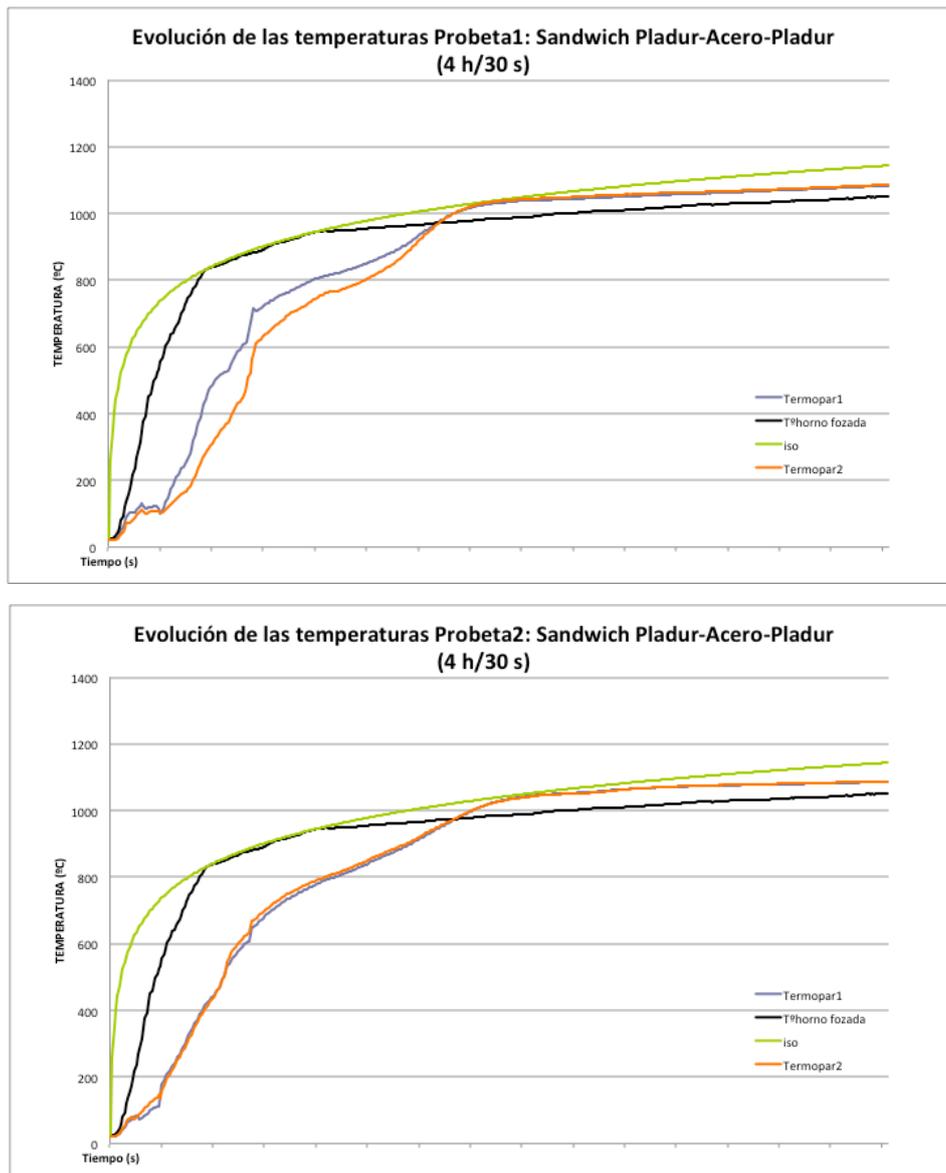


Gráfico VII.4 – Validación de la probeta de ensayo. Valores de los termopares de registro.

7.2.5 Validación del apoyo de la probeta de ensayo

Una vez decidido que el cierre perimetral de la probeta se haría con el mismo tipo de material (placas de yeso laminado atornilladas) se realizaron pruebas de apoyo de la probeta en el horno (directamente apoyada sobre la placa de acero situada sobre las resistencias inferiores, sobre calzos de ladrillo o sobre calzos del mismo material)



Imagen VII.4 – Validación del apoyo de la probeta de ensayo.

Los resultados de las mediciones arrojaron como resultados mas desfavorables el apoyo sobre calzos del mismo material, que fue el procedimiento elegido para la realización de los ensayos por ser el que arrojaba resultados mas conservadores.

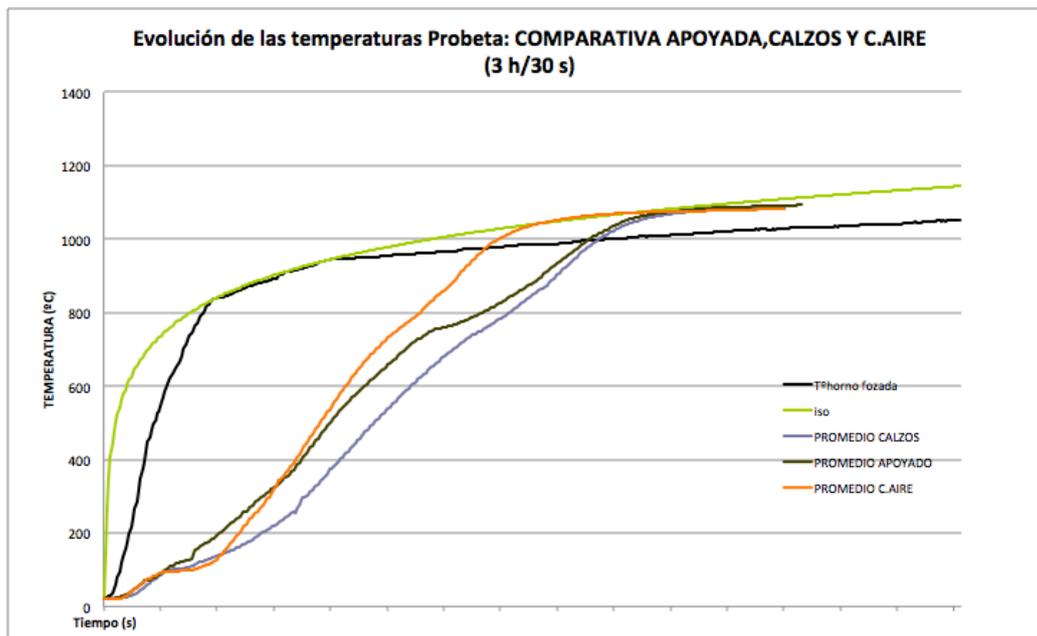


Gráfico VII.5 – Validación del apoyo de la probeta de ensayo. Valores de los termopares de registro.

7.2.6 Determinaciones

A la vista de los resultados de las pruebas realizadas se adoptaron las siguientes determinaciones para la realización de la campaña de ensayos:

1. Utilizar como curva tiempo-temperatura para la realización de los ensayos la programada como curva “forzada” que se adapta suficientemente a la curva normalizada.
2. Emplear como Termopares los RS tipo K TC de $\varnothing 3$ y 1.000 / 2.000 mm de longitud con revestimiento de iniconel. La longitud de los termopares permite su introducción por el orificio apropiado en el horno eléctrico y llega holgadamente al centro de la misma.
3. Fijar el tamaño de en placas de acero de 100x100x15 mm. Colocando dos termopares por probeta en el centro de la misma (medida y control). De este modo, el espesor de la placa de acero coincide con el de las placas de yeso laminado, lo que facilita el montaje de la probeta.
4. Establecer como posición de la probeta la horizontal y calzada con tacos del mismo material para evitar desprendimientos de los revestimientos de material protector (que se observaron al hacer pruebas con probetas situadas en posición vertical)

7.3 RESULTADOS DE LA CAMPAÑA DE ENSAYOS

Con las anteriores premisas se realizaron ensayos de probetas formadas por placas de acero de 100x100x15 mm revestidas con placas de yeso-laminado, tanto normales como con fibras de vidrio incorporadas (mejoradas en su resistencia al fuego)

Para ello se utilizaron materiales de los tres distribuidores del mercado nacional (PLADUR, KNAUF y PLACO) comprados en el mercado nacional, realizándose revestimientos con espesores de placa sencilla, doble, triple y cuádruple (15 mm, 30 mm, 45 mm y 60 mm).

Las características indicadas en el material comprado (a efectos de trazabilidad de su fecha y hora de fabricación) son las siguientes:

- PLACO ESTANDAR 11/05/11-11:15
- PLACOFLAM 13/04/11-07:09
- PLADUR N BORDE AFINADO 03/04/11-13:55
- PLADUR FOC, BORDE AFINADO 12/44/48-12:05
- KNAUF A STD 15.0 17/03/11-15:13
- KNAUF DF 15.0 17/03/11-24:27

Esto implicó la realización de 6 tipos de material x 4 revestimientos = 24 ensayos (que al tener dos termopares por ensayo arrojan 48 lecturas de temperatura)

7.3.1 FORMACIÓN DE LAS PROBETAS

Una vez comprobado el procedimiento de ensayo se procedió a realizar una toma de datos consistente en obtener los valores de la temperatura del acero situado en el interior de una probeta revestida con una, dos, tres y cuatro placas de yeso laminado (normal y mejorado) de cada una de las tres casas comerciales de yeso laminado (PLADUR, PLACO y KNAUF).

Las probetas se formaron revistiendo la placa de acero de 100x100x15 mm con los diferentes tipos de espesor a analizar:

15 mm

- Fileteado perimetral 15 mm.
- Placas superiores e inferiores: 115x115 mm.
- Termopares centrados al eje con una separación entre ellos de 50 mm. Profundidad de penetración en la placa de acero de 7,5 mm.
- Atornillado en sus cuatro esquinas.



30 mm

- Fileteado perimetral 30 mm.
- Placas superiores e inferiores: 130x130 mm.
- Termopares centrados al eje con una separación entre ellos de 50 mm. Profundidad de penetración en la placa de acero de 7,5 mm.
- Atornillado en sus cuatro esquinas.



45 mm

- Fileteado perimetral 45 mm.
- Placas superiores e inferiores: 145x145 mm.
- Termopares centrados al eje con una separación entre ellos de 50 mm. Profundidad de penetración en la placa de acero de 7,5 mm.
- Atornillado en sus cuatro esquinas.



60 mm

- Fileteado perimetral 60 mm.
- Placas superiores e inferiores: 160x160 mm.
- Termopares centrados al eje con una separación entre ellos de 50 mm. Profundidad de penetración en la placa de acero de 7,5 mm.
- Atornillado en sus cuatro esquinas.



Como puede apreciarse en las anteriores fotografías, la fabricación de la probeta incluyó el montaje previo de la misma para la creación de orificios (con objeto de introducir los termopares posteriormente) mediante un taladro.

Con este taladro (con broca de 3 mm), se marcaba el punto de penetración de los termopares en la placa de acero para, posteriormente, desmontar la probeta y efectuar con un taladro de precisión el orificio de 7,5 mm para el termopar.

Una vez realizado esto se procedía a montar la probeta completa de nuevo para introducirla en el horno y allí colocar los termopares hasta su contacto total con la placa de acero. El encaje producido entre el orificio y el termopar (al tratarse del mismo diámetro) garantizó, durante el procedimiento de ensayo, unas lecturas fiables ya que, además, al aumentar la temperatura a lo largo del ensayo, se producía una dilatación del acero que atrapaba el termopar impidiendo su movimiento.



7.3.2 ESTUDIO FOTOGRÁFICO DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

7.3.2.1 REVESTIMIENTO DE 15 mm

7.3.2.1.1 Placa normal

PLACO



KNAUF

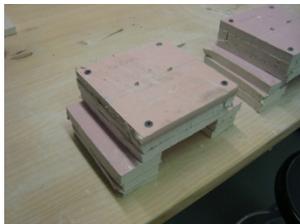


PLADUR



7.3.2.1.2 Placa mejorada

PLACO



KNAUF



PLADUR



7.3.2.2 REVESTIMIENTO DE 30 mm

7.3.2.2.1 Placa normal

PLACO



KNAUF



PLADUR

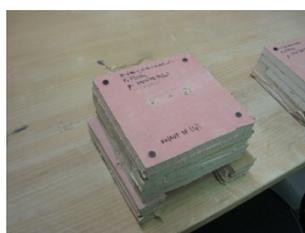


7.3.2.2.2 Placa mejorada

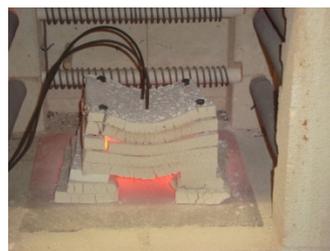
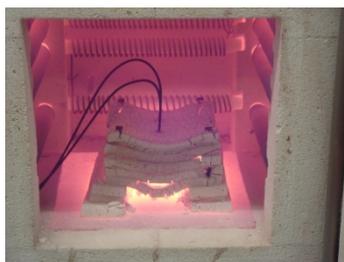
PLACO



KNAUF



PLADUR



7.3.2.3 REVESTIMIENTO DE 45 mm

7.3.2.3.1 Placa normal

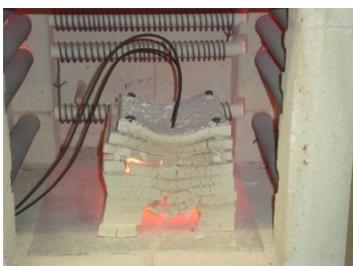
PLACO



KNAUF



PLADUR



7.3.2.3.2 Placa mejorada

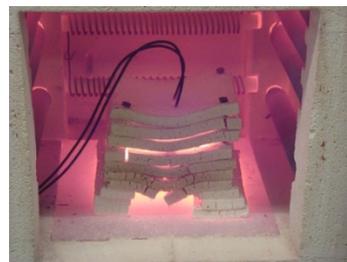
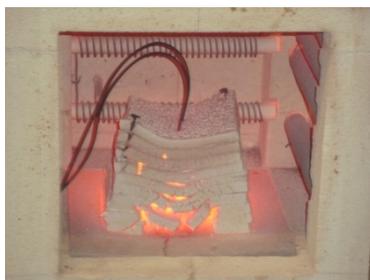
PLACO



KNAUF



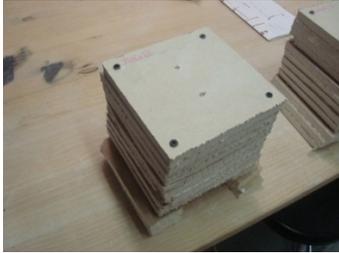
PLADUR



7.3.2.4 REVESTIMIENTO DE 60 mm

7.3.2.4.1 Placa normal

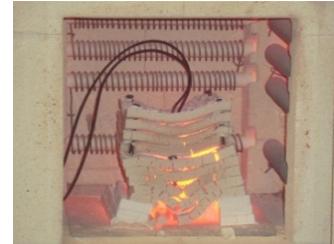
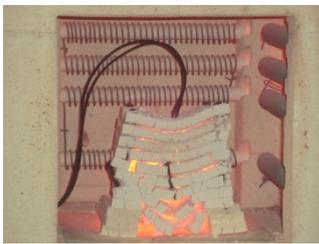
PLACO



KNAUF



PLADUR

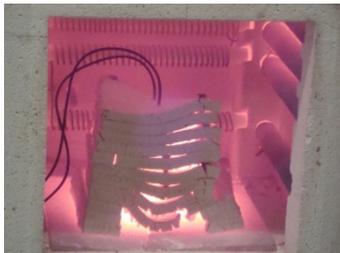
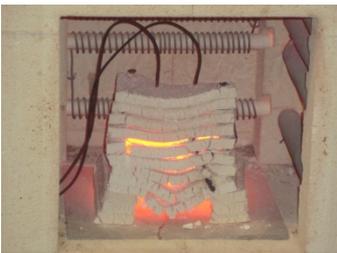
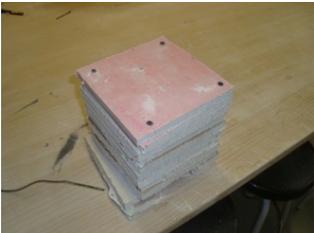


7.3.2.4.2 Placa mejorada

PLACO

KNAUF

PLADUR



7.3.3 TRATAMIENTO DE LOS DATOS

En cada probeta se colocaron dos termopares (medida y control) con lo que, para cada tipo de espesor revestimiento, se obtuvieron seis valores de la temperatura del acero que, tabulados, presentan el siguiente aspecto:

Tºhorno	t1. placo simple	t2. placo simple	t1. pladur simple	t2. pladur simple	t1. knaufsimple	t2. knaufsimple
20	21,58	21,52	23,4	23,37	22,65	21,85
25	21,57	21,52	23,39	23,37	22,65	21,84
27	21,7	21,63	23,47	23,48	23,33	22,18
29	22,3	22,09	23,75	23,81	25,22	22,92
35	23,77	23,24	24,35	24,53	29,21	24,41
47	26,47	25,42	25,37	25,73	35,88	26,85
58	30,51	28,72	26,82	27,38	45,02	30,11
80	35,38	32,93	28,56	29,38	56,04	33,89
93	40,73	37,67	30,52	31,69	68,43	37,92
118	46,4	42,79	32,66	34	81,57	42,04
134	52,15	48,03	34,53	35,41	94,07	45,84
158	57,63	53,11	35,62	36,89	106,07	49,56
173	62,32	57,9	37,05	39	117,32	53,15
195	57,3	62,45	39,77	41,67	127,85	56,44
215	59,86	66,2	42,78	44,56	137,38	60,26
237	64,66	70,47	46,35	47,98	145,5	64,22
267	73,59	75,44	50,42	51,83	150,84	68,46
285	81,19	80,17	55,02	56,26	154,48	67,41
316	87,49	85,89	59,94	60,78	128,05	71,07
346	91,75	92,2	64,96	65,71	130,02	75,95
375	98,57	98	69,9	72,12	135,36	80,78
393	98,07	104,49	74,95	77,67	141,03	85,9
422	103,83	110,65	79,91	80,95	146,31	91,04
449	109,69	116,94	84,78	85	148,32	95,99
460	115,52	123,61	89,56	89,55	151,79	100,6
480	122,85	124,87	94,25	93,96	155,88	104,81
496	128,03	128,56	96,71	98,16	155,65	108,64
509	133,98	133,42	102,02	102,19	156,22	112,08
526	139,75	138,09	107,93	98,84	157	115
532	144,61	142,57	110,55	102,95	160,94	117,23
558	151,53	146,52	118,6	105,08	165,42	118,84
568	157,89	148,77	122,74	106,16	171,43	120,07
584	163,33	155,9	125,3	116,38	182,05	130,9
604	168,48	161,42	128,01	125,78	198,51	139,01
616	174,82	168,62	129,83	131,15	217,52	143,89
623	178,62	176,45	131,39	133,67	236	148,24
637	180,87	178,66	132,98	135,68	253,41	152,15
643	185,14	185,82	134,65	137,81	268,99	155,66

Correspondiendo las lecturas a los termopares 1 y 2 de cada una de las probetas de cada casa comercial.

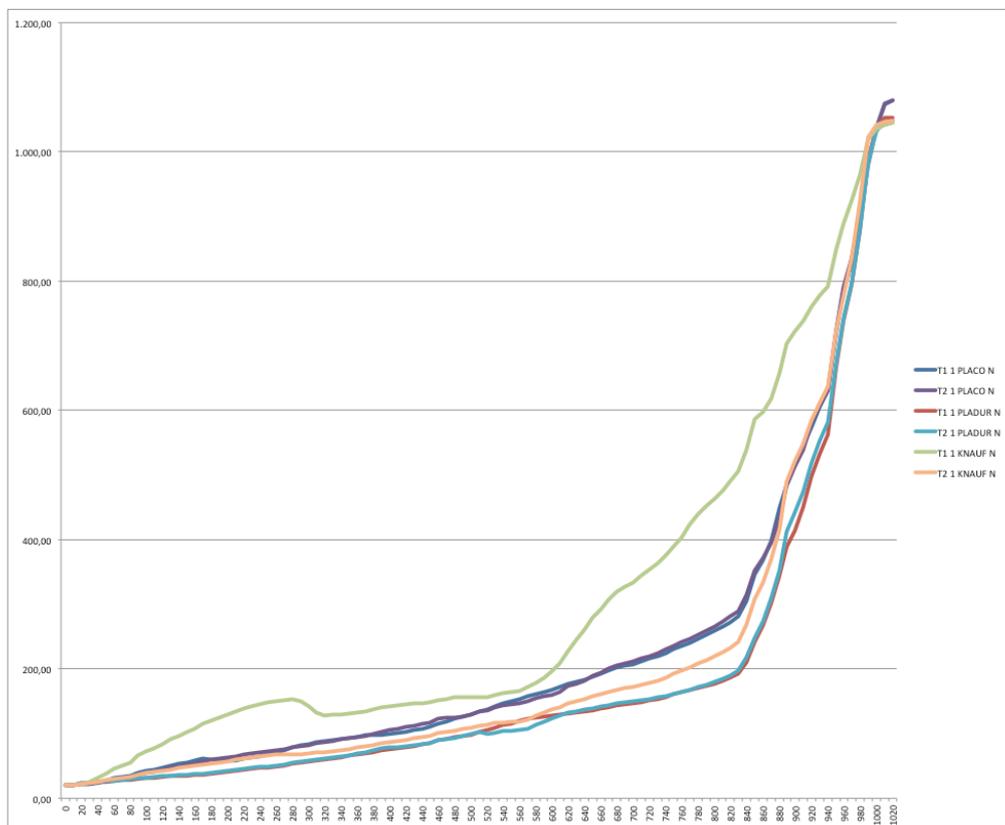
Con objeto de obtener unas gráficas y una colección de datos que permitieran la posterior comparación y validación de datos con otros experimentos, se procedió a transformar estos datos de modo que las temperaturas del horno se conformaran en intervalos crecientes de 10°.

Para ello se utilizó una interpolación mediante regresión lineal a partir de los datos obtenidos en los ensayos (ayudándose de la función PRONOSTICO de EXCEL) obteniéndose la siguiente tabla⁴⁸:

⁴⁸ Las dos primeras filas, resaltadas en color amarillo, tienen introducidos manualmente los valores de 20° al no haber datos para el rango de temperaturas de 0° a 20° en el ensayo

Tºhorno	T1 1 PLACO N	T2 1 PLACO N	T1 PLADUR	T2 PLADUR	T1 1 KNAUF	T2 1 KNAUF
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
10	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
20	21,58	21,52	23,40	23,37	22,65	21,85
30	22,55	22,28	23,85	23,93	25,89	23,17
40	24,90	24,15	24,78	25,03	31,99	25,43
50	27,57	26,32	25,77	26,18	38,37	27,74
60	30,95	29,10	26,98	27,56	46,02	30,45
70	33,17	31,02	27,77	28,47	51,03	32,17
80	35,38	32,93	28,56	29,38	56,04	33,89
90	39,50	36,58	30,07	31,16	65,57	36,99
100	42,32	39,10	31,12	32,34	72,11	39,07
110	44,59	41,15	31,98	33,26	77,37	40,72
120	47,12	43,45	32,89	34,18	83,13	42,52
130	50,71	46,72	34,06	35,06	90,95	44,89
140	53,52	49,30	34,80	35,78	97,07	46,77
150	55,80	51,42	35,26	36,40	102,07	48,32
160	58,26	53,75	35,81	37,17	107,57	50,04
170	61,38	56,94	36,76	38,58	115,07	52,43
180	60,72	59,35	37,92	39,85	120,67	54,20
190	58,44	61,42	39,15	41,06	125,46	55,69
200	57,94	63,39	40,52	42,39	130,23	57,40
210	59,22	65,26	42,03	43,84	135,00	59,31
220	60,95	67,17	43,59	45,34	139,23	61,16
230	63,13	69,11	45,21	46,89	142,92	62,96
240	65,55	70,97	46,76	48,37	146,03	64,64
250	68,53	72,62	48,11	49,65	147,81	66,06

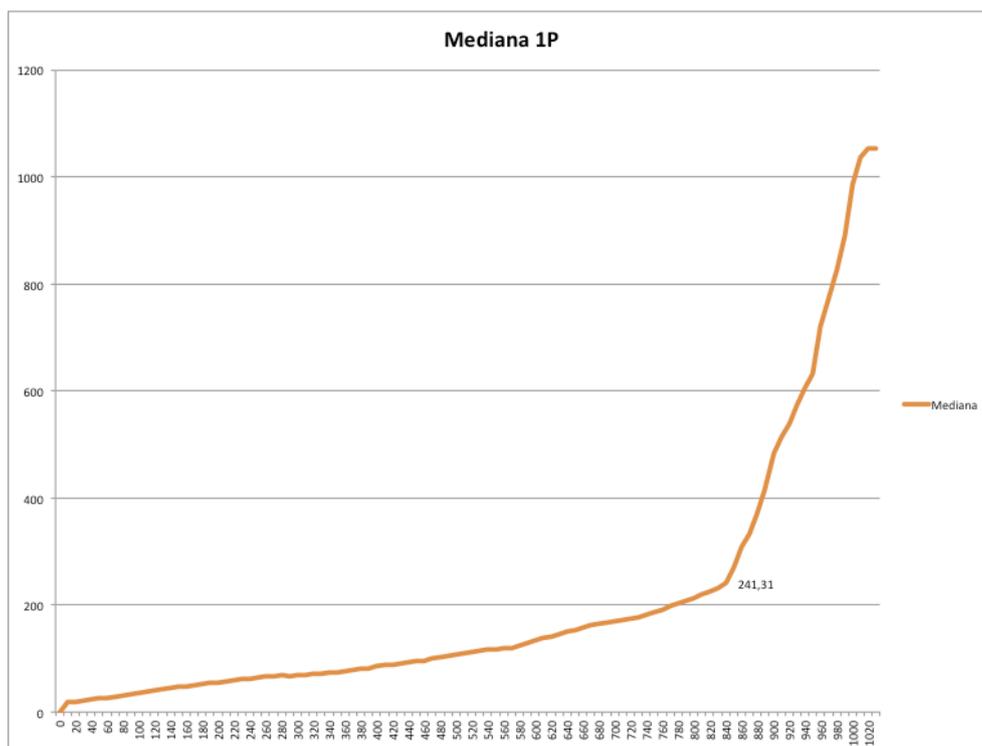
A modo de ejemplo, en la siguiente gráfica puede observarse que los resultados de todos los termopares son similares con excepción del T1 de la probeta revestida con KNAUF.



Con objeto de tomar un valor de referencia para posteriores cálculos se procedió a tomar como evolución de la temperatura el acero el valor mediana de los obtenidos sin tener en cuenta el o los termopares que presentaran una gran desviación. Para ello se agruparon los valores de lectura de todos los termopares y se calculó el valor mediana de los mismos:

Tºhorno	T1 1 PLACO N	T2 1 PLACO N	T1 1 PLADUR N	T2 1 PLADUR N	T1 1 KNAUF N	T2 1 KNAUF N	T1 1 PLACO F	T2 1 PLACO F	T1 1 PLADUR F	T2 1 PLADUR F	T1 1 KNAUF F	T2 1 KNAUF F	Mediana 1 PLACA
0	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
10	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
20	21,58	21,52	23,40	23,37	22,65	21,85	23,17	23,25	20,19	26,88	22,10	22,14	22,14
30	22,55	22,28	23,85	23,93	25,89	23,17	23,84	24,54	20,76	27,17	22,13	22,42	23,17
40	24,90	24,15	24,78	25,03	31,99	25,43	25,22	27,20	22,35	28,76	22,26	23,40	24,90
50	27,57	26,32	25,77	26,18	38,37	27,74	26,79	30,09	24,08	30,86	22,46	24,71	26,32
60	30,95	29,10	26,98	27,56	46,02	30,45	28,76	33,67	26,12	33,66	22,77	26,50	28,76
70	33,17	31,02	27,77	28,47	51,03	32,17	30,10	36,00	27,46	35,63	23,00	27,77	30,10
80	35,38	32,93	28,56	29,38	56,04	33,89	31,44	38,33	28,80	37,60	23,23	29,04	31,44
90	39,50	36,58	30,07	31,16	65,57	36,99	34,05	42,74	31,28	41,45	23,74	31,54	34,05
100	42,32	39,10	31,12	32,34	72,11	39,07	35,87	45,78	32,97	44,13	24,11	33,32	35,87
110	44,59	41,15	31,98	33,26	77,37	40,72	37,37	48,24	34,31	46,31	24,43	34,79	37,37
120	47,12	43,45	32,89	34,18	83,13	42,52	39,02	51,00	35,74	48,71	24,82	36,45	39,02
130	50,71	46,72	34,06	35,06	90,95	44,89	41,30	54,94	37,49	51,99	25,45	38,88	41,30
140	53,52	49,30	34,80	35,78	97,07	46,77	43,00	57,96	38,06	54,14	26,02	40,77	43,00
150	55,80	51,42	35,26	36,40	102,07	48,32	44,32	60,38	37,84	55,53	26,55	42,30	44,32
160	58,26	53,75	35,81	37,17	107,57	50,04	45,76	63,08	37,70	56,75	27,18	43,97	45,76
170	61,38	56,94	36,76	38,58	115,07	52,43	47,70	66,90	37,88	57,31	28,23	46,22	47,70
180	60,72	59,35	37,92	39,85	120,67	54,20	49,11	69,81	38,77	58,14	29,09	46,35	49,11
190	58,44	61,42	39,15	41,06	125,46	55,69	50,29	72,33	39,97	59,09	29,87	45,57	50,29
200	57,94	63,39	40,52	42,39	130,23	57,40	51,23	74,88	41,31	60,40	30,73	44,84	51,23
210	59,22	65,26	42,03	43,84	135,00	59,31	51,92	77,45	42,79	62,09	31,67	44,17	51,92
220	60,95	67,17	43,59	45,34	139,23	61,16	52,63	79,75	44,28	63,73	32,68	43,22	52,63
230	63,13	69,11	45,21	46,89	142,92	62,96	53,35	81,77	45,79	65,34	33,75	42,00	53,35
240	65,55	70,97	46,76	48,37	146,03	64,64	54,08	83,55	47,24	66,91	34,78	41,25	54,08
250	68,53	72,62	48,11	49,65	147,81	66,06	54,84	84,75	48,54	68,37	35,70	41,58	54,84
260	71,51	74,28	49,47	50,93	149,59	67,47	55,61	85,94	49,85	69,83	36,62	41,91	55,61
270	74,86	76,23	51,19	52,57	151,45	68,29	56,80	87,57	51,48	71,79	37,79	42,47	56,80
280	79,08	78,86	53,74	55,03	153,47	67,70	58,99	90,21	53,89	74,93	39,56	43,57	58,99
290	82,21	81,09	55,81	56,99	150,22	68,00	60,78	92,26	55,88	77,44	41,04	44,72	60,78
300	84,24	82,94	57,40	58,45	141,69	69,18	62,19	93,71	57,44	79,33	42,23	45,93	62,19
310	86,27	84,78	58,99	59,91	133,17	70,36	63,60	95,17	59,00	81,22	43,42	47,14	63,60
320	88,06	86,73	60,61	61,44	128,31	71,72	65,07	96,74	60,62	83,16	44,71	49,22	65,07
330	89,48	88,83	62,28	63,08	128,97	73,35	66,64	98,49	62,35	85,19	46,15	52,63	66,64
340	90,90	90,94	63,96	64,72	129,63	74,97	68,22	100,25	64,07	87,22	47,58	56,04	68,22
350	92,69	93,00	65,64	66,59	130,76	76,62	69,82	102,24	65,97	89,27	49,08	58,91	69,82
360	95,04	95,00	67,34	68,80	132,60	78,28	71,48	104,58	68,11	91,35	50,67	61,00	71,48
370	97,39	97,00	69,05	71,01	134,44	79,95	73,14	106,92	70,26	93,43	52,26	63,08	73,14
380	98,43	99,80	71,30	73,66	136,94	82,20	75,23	110,08	72,55	96,11	54,44	65,91	75,23
390	98,15	103,41	74,11	76,75	140,09	85,05	77,76	114,07	75,00	99,38	57,19	69,49	77,76
400	99,46	105,98	76,15	78,46	142,30	87,14	79,71	116,87	76,97	101,76	59,12	72,05	79,71

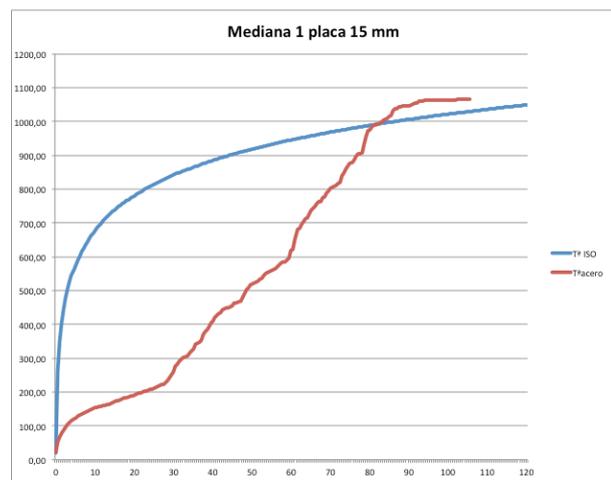
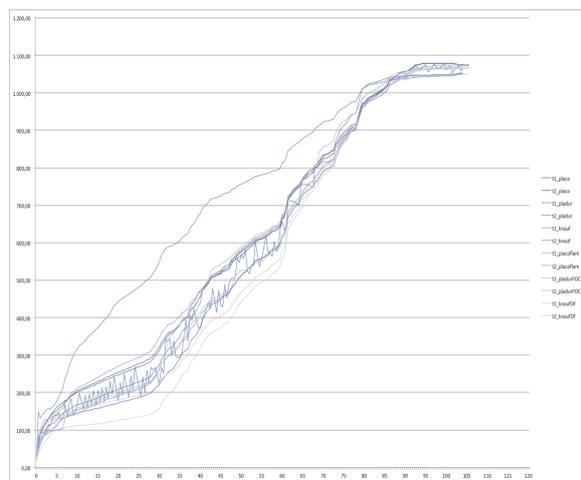
Obteniéndose, a modo de ejemplo, en el siguiente gráfico una evolución cuasi-lineal hasta los 840° de temperatura, en el que el acero alcanza un temperatura de 241,31° y asciende de forma rápida a continuación.



Posteriormente, los valores obtenidos se interpolaron (mediante la función PRONOSTICO) a los tiempos en minutos de la curva nominal estándar con el fin de obtener unas lecturas de temperaturas de los termopares comparables a las de los ensayos de los distribuidores nacionales:

t (min)	T ^o ISO	T ^o acero	t1_placa	t2_placa	t1_pladur	t2_pladur	t1_knauf	t2_knauf	t1_placofian	t2_placofian	t1_pladurFC	t2_pladurFC	t1_knaufFC	t2_knaufFC
0	20,00	22,12	21,58	21,52	23,40	23,37	22,65	21,85	23,17	23,25	20,19	26,88	22,10	22,14
0,5	261,14	53,34	71,70	74,39	54,65	51,02	149,71	67,56	55,66	86,02	49,93	69,92	36,68	41,93
1	349,21	68,00	92,44	92,79	89,94	66,36	130,56	76,44	69,65	101,99	65,74	89,05	48,91	58,69
1,5	404,31	79,61	100,18	106,75	95,46	78,87	142,97	87,79	80,34	117,72	77,61	102,49	59,70	72,83
2	444,50	86,41	108,64	115,81	89,42	84,27	147,96	95,10	87,68	127,52	85,13	110,83	65,69	83,94
2,5	476,17	95,01	121,37	124,62	100,19	93,07	155,05	103,96	87,58	127,83	95,89	120,90	73,88	88,99
3	502,29	102,34	130,84	130,86	116,01	100,07	155,92	110,27	91,86	129,75	104,61	120,56	81,40	94,97
3,5	524,53	110,30	139,22	137,66	110,25	99,15	156,93	114,73	95,40	129,69	113,19	124,85	87,72	99,65
4	543,89	115,99	147,63	144,29	132,13	103,88	162,89	117,93	97,76	135,47	126,46	126,68	93,57	102,96
4,5	561,03	119,51	153,41	147,19	139,48	105,40	167,20	119,20	99,08	138,57	132,22	127,82	96,47	108,64
5	576,41	124,36	160,68	152,42	136,75	111,40	176,87	125,62	100,35	144,15	138,11	128,76	100,11	117,81
5,5	590,36	128,41	164,89	157,58	147,43	119,23	187,05	133,36	101,17	149,36	140,96	129,42	102,20	126,18
6	603,12	131,06	168,24	161,16	129,32	125,34	197,74	138,63	102,00	154,15	143,17	130,23	103,68	131,80
6,5	614,88	134,12	174,20	167,92	132,90	130,63	215,67	143,42	103,37	159,54	145,17	131,34	105,04	136,90
7	625,78	137,41	179,05	176,87	168,15	134,05	239,33	148,99	133,74	172,87	147,22	133,74	106,62	140,22
7,5	635,94	139,99	180,69	178,49	136,42	135,52	252,03	151,84	138,08	181,41	148,40	134,11	107,44	141,81
8	645,46	144,08	186,24	187,11	174,02	138,37	272,47	156,46	143,44	191,19	150,69	136,62	108,90	144,72
8,5	654,40	146,71	190,33	191,92	184,09	140,47	285,40	159,47	146,49	196,78	152,53	137,87	109,89	146,92
9	662,85	149,17	194,13	196,43	139,96	142,56	296,99	162,24	149,37	201,99	154,43	139,90	110,79	148,98
9,5	670,84	151,72	198,13	201,18	149,19	144,78	308,56	165,14	152,27	207,50	156,55	140,53	111,63	151,16
10	678,43	153,81	201,45	204,97	169,01	146,51	317,65	167,49	154,62	211,90	158,39	140,86	112,23	152,99
10,5	685,65	155,47	204,10	207,94	199,35	147,86	324,75	169,34	156,48	215,33	159,94	142,71	112,69	154,46
11	692,54	156,55	205,83	209,80	178,13	148,72	329,20	170,53	157,68	217,50	161,07	147,21	112,97	155,42
11,5	699,13	157,63	207,56	211,65	156,91	149,57	333,65	171,72	158,88	219,66	162,19	151,70	113,25	156,38
12	705,44	159,09	209,82	214,06	193,44	150,68	339,43	173,33	160,50	222,48	163,89	155,48	113,61	157,67
12,5	711,49	160,85	212,51	216,92	158,80	151,99	346,31	175,28	162,48	225,86	166,07	158,67	114,06	159,23
13	717,31	162,65	214,76	219,34	196,67	153,10	351,74	177,03	164,18	228,75	168,08	161,03	114,47	160,57
13,5	722,91	164,46	216,85	221,62	168,48	154,14	356,67	178,72	165,79	231,47	170,03	163,09	114,87	161,84
14	728,31	166,57	219,25	224,22	205,87	155,35	362,20	180,80	167,68	234,61	172,34	165,46	115,39	163,33
14,5	733,52	169,07	222,06	227,26	166,47	156,79	368,50	183,40	169,93	238,30	175,10	168,22	116,06	165,11
15	738,56	171,18	224,39	229,76	206,33	158,17	374,25	185,85	171,83	241,36	177,36	170,53	116,67	166,61
15,5	743,43	173,13	226,53	232,04	175,62	159,53	379,78	188,23	173,59	244,16	179,42	172,66	117,24	168,00
16	748,15	175,34	228,98	234,61	214,51	161,01	386,06	190,91	175,60	247,30	181,68	175,07	117,98	169,56
16,5	752,73	177,86	231,79	237,52	173,74	162,63	393,24	193,93	177,92	250,83	184,19	177,81	118,92	171,32
17	757,17	179,96	234,13	239,91	215,67	164,01	399,30	196,26	179,85	253,73	186,22	180,08	119,88	172,78
17,5	761,48	181,89	236,28	242,10	184,04	165,30	404,93	198,33	181,63	256,38	188,05	182,15	120,85	174,11
18	765,67	183,87	238,50	244,37	229,76	166,64	412,40	200,43	183,45	259,07	189,93	184,28	121,85	175,46
18,5	769,75	185,92	240,82	246,77	195,82	168,05	422,62	202,58	185,35	261,83	191,87	186,49	122,88	176,84
19	773,72	187,96	243,11	249,17	242,71	169,46	431,90	204,70	187,24	264,57	193,82	188,68	123,90	178,19
19,5	777,59	189,95	245,32	251,55	209,79	170,85	436,97	206,75	189,09	267,19	195,77	190,81	124,89	179,42
20	781,35	191,94	247,53	253,93	176,87	172,24	442,04	208,79	190,94	269,81	197,72	192,95	125,89	180,66
20,5	785,03	193,92	249,68	256,19	227,99	173,67	446,26	210,77	192,79	272,36	199,62	195,05	126,84	181,88
21	788,62	195,89	251,82	258,43	196,10	175,11	450,31	212,73	194,64	274,90	201,50	197,14	127,79	183,10
21,5	792,13	197,85	253,94	260,67	249,93	176,54	454,30	214,69	196,49	277,39	203,40	199,21	128,72	184,31
22	795,55	199,80	256,02	262,93	219,01	177,96	458,14	216,63	198,34	279,80	205,30	201,26	129,60	185,52
22,5	798,90	201,75	258,11	265,19	188,10	179,39	461,99	218,57	200,18	282,22	207,20	203,31	130,48	186,74
23	802,17	203,82	260,34	267,62	243,34	180,92	465,96	220,64	202,19	284,76	209,25	205,45	131,40	188,01
23,5	805,38	205,95	262,64	270,15	209,42	182,51	470,00	222,77	204,27	287,38	211,39	207,64	132,36	189,31
24	808,52	208,02	264,85	272,57	267,87	184,05	473,97	224,83	206,28	289,90	213,44	209,75	133,28	190,56
24,5	811,59	209,73	266,61	274,47	241,50	185,38	477,67	226,51	207,94	291,91	215,07	211,52	134,03	191,58
25	814,60	211,44	268,37	276,38	215,14	186,70	481,36	228,19	209,60	293,93	216,70	213,29	134,79	192,60

De los anteriores datos se pueden deducir dos gráficas, la del comportamiento de los termopares y la evolución del valor mediana de la temperatura del acero (ambos respecto a los tiempos de la curva nominal estándar):



7.3.3.1 PROBETA REVESTIDA CON UNA PLACA DE 15 mm

7.3.3.1.1 Fechas de ensayos

Los ensayos de probeta revestida con una placa de 15 mm de yeso laminado se realizaron en las siguientes fechas:

PLACO	PLADUR	KNAUF	PLACOFLAM	PLADUR FOC	KNAUF DF
17/6	10/06/11	13/06/11	14/06/11	28/06	20/06/11

7.3.3.1.2 Datos obtenidos con revestimiento de placa normal

Arrojando, para placas normales, los resultados numéricos expresados en el Apéndice 4, y que, de acuerdo con el procedimiento anteriormente descrito se agrupan de forma gráfica en:

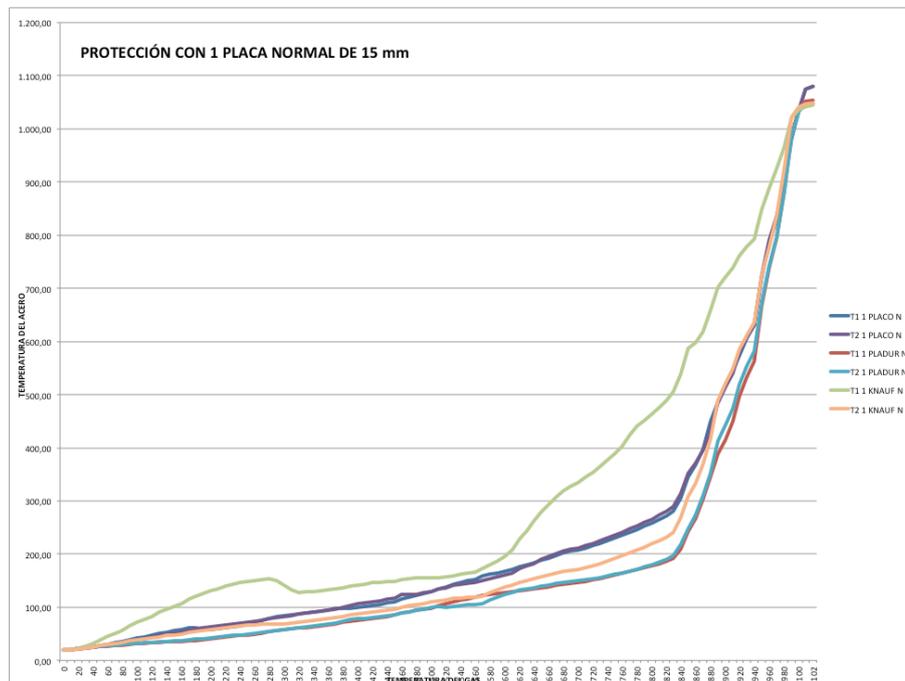


Gráfico VII.6 – Valores de temperaturas del acero registradas en los termopares en función de la temperatura del horno para un revestimiento de 15 mm de placa normal.

Puede apreciarse que la lectura de los termopares es muy parecida con la excepción del Termopar 1 del revestimiento de KNAUF, representándose gráficamente el valor mediana de los obtenidos sin tener en cuenta el termopar desviado.

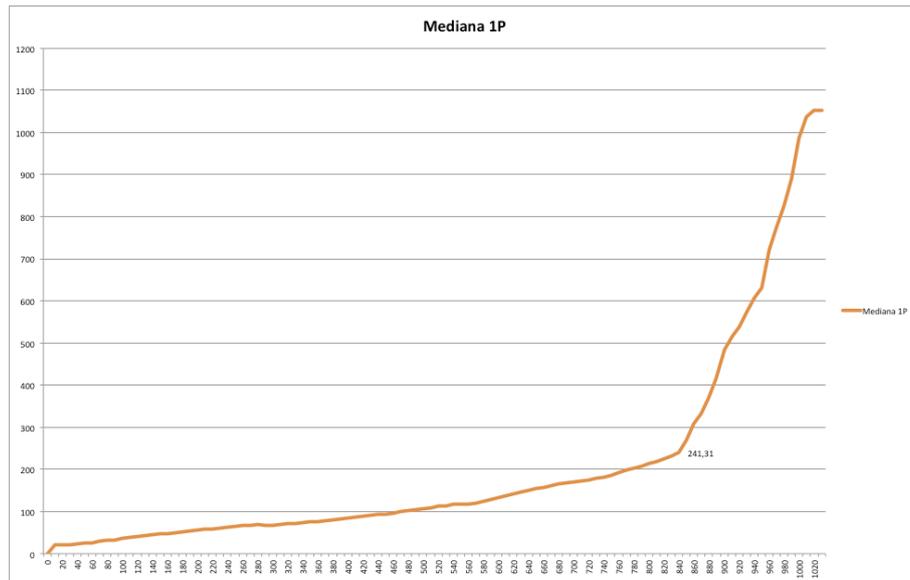


Gráfico VII.7 – Valor mediano de temperaturas del acero registradas en los termopares en función de la temperatura del horno para un revestimiento de 15 mm de placa normal.

7.3.3.1.3 Datos obtenidos con revestimiento de placa mejorada

Para placas mejoradas, los resultados numéricos expresados en el Apéndice 4, se expresan de forma gráfica en:

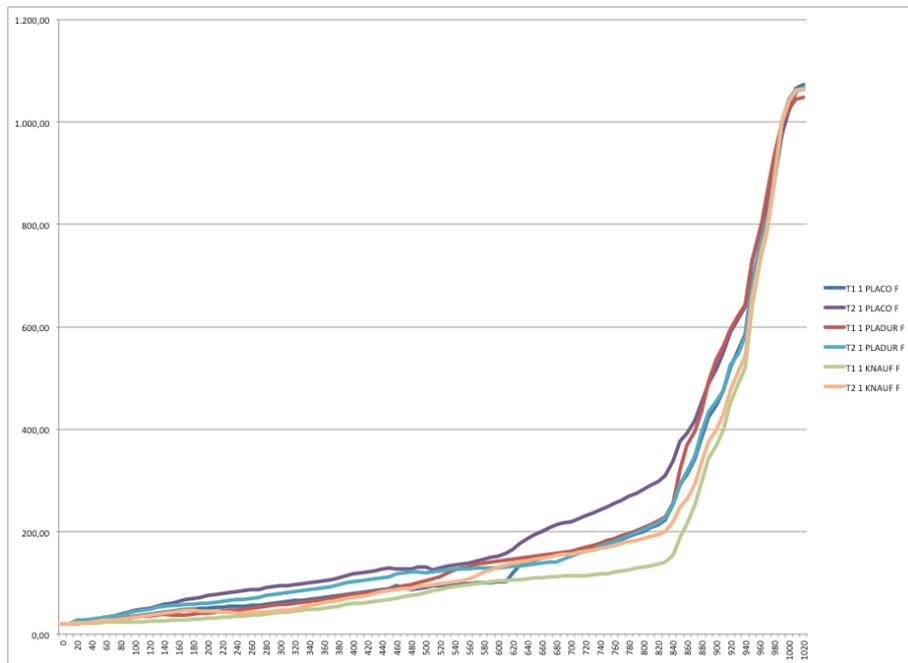


Gráfico VII.8 – Valores de temperaturas del acero registradas en los termopares en función de la temperatura del horno para un revestimiento de 15 mm de placa mejorada.

Puede apreciarse que la lectura de los termopares es muy parecida con la excepción del Termopar 1 del revestimiento de KNAUF DF y del Termopar 2 de PLACOFLAM, siendo el valor la mediana de los obtenidos.

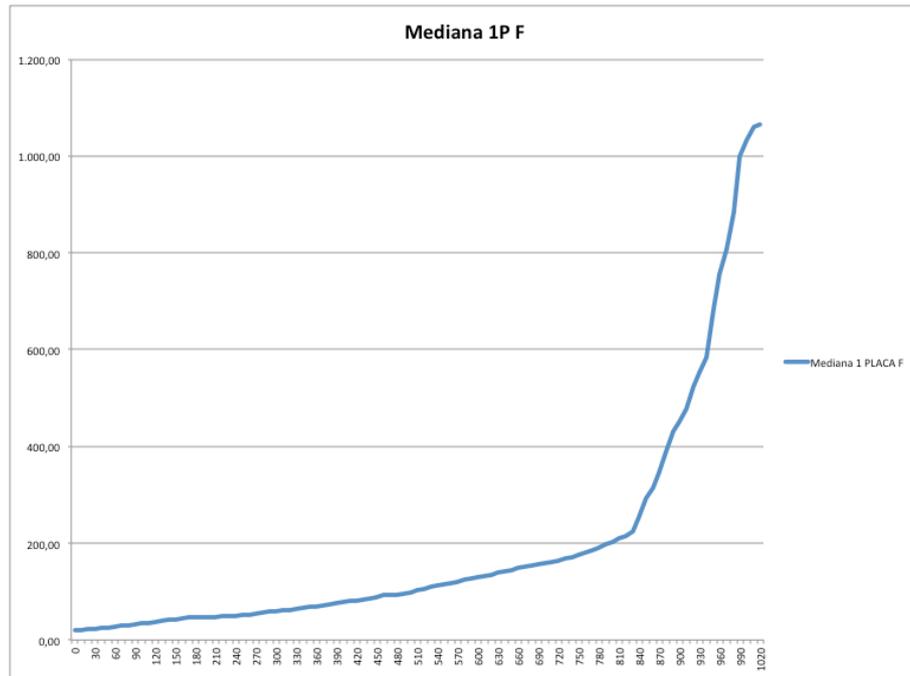


Gráfico VII.9 – Valor mediana de temperaturas del acero acero registradas en los termopares en función de la temperatura del horno para un revestimiento de 15 mm de placa mejorada.

7.3.3.1.4 Comparación de datos obtenidos placa normal / mejorada

Si analizamos las gráficas de las medianas de los valores obtenidos (con placa normal y con placa mejorada) y las comparamos, podemos apreciar que son prácticamente coincidentes:

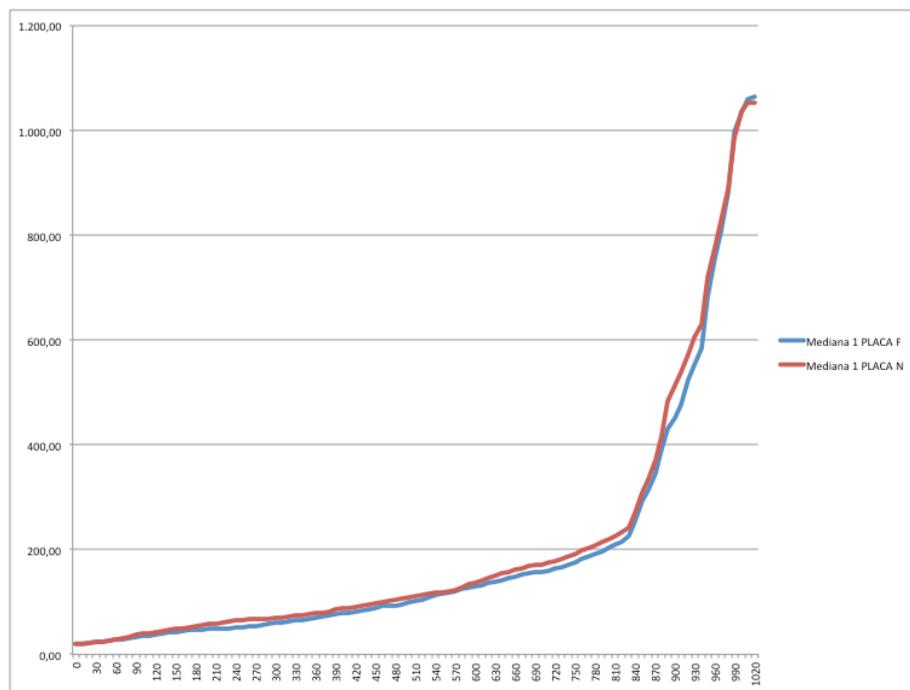


Gráfico VII.10 – Comparación entre los valores mediana de las placas normales y las placas mejoradas.

Lo que vendría a indicar que la conductividad térmica de las placas de yeso laminado normales y mejoradas es prácticamente igual.

También puede apreciarse esto en la gráfica que representa la toma de temperaturas en el acero de todos los termopares en relación con el tiempo en minutos de la curva nominal estándar:

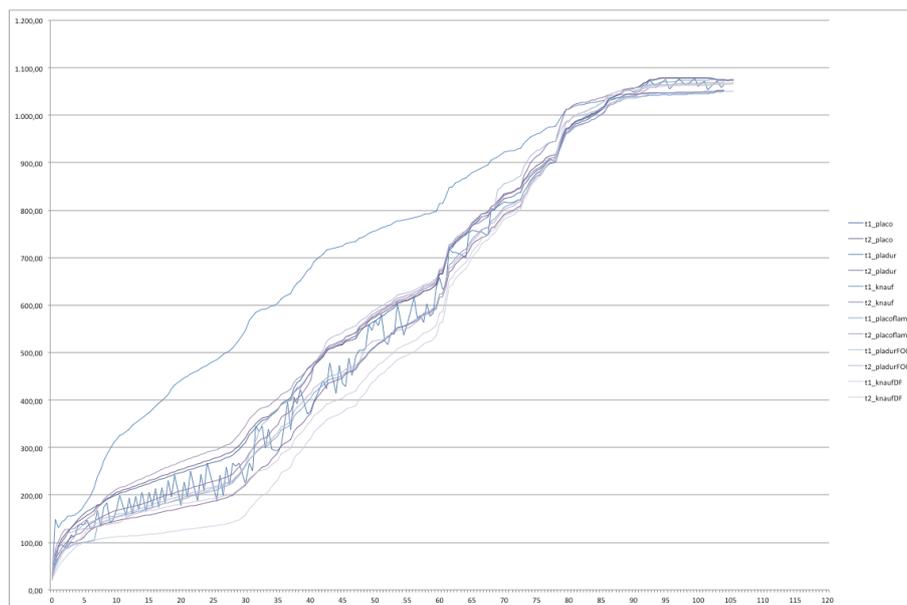


Gráfico VII.11 – Valores de temperaturas del acero registradas en los termopares en función del tiempo de la curva nominal estándar para un revestimiento de 15 mm.

7.3.3.1.5 Valor mediana

Por este motivo, para los cálculos posteriores, se ha tomado como temperatura del acero el valor mediana de los 12 termopares (eliminando las lecturas que se desvían de la tendencia normal cuyos valores numéricos pueden consultarse numéricamente en el Anexo correspondiente) pudiendo, esencialmente, obtener dos gráficas representativas:

La correspondiente a la evolución de la temperatura del acero (eje de ordenadas) en función de la temperatura del horno (eje de abscisas)

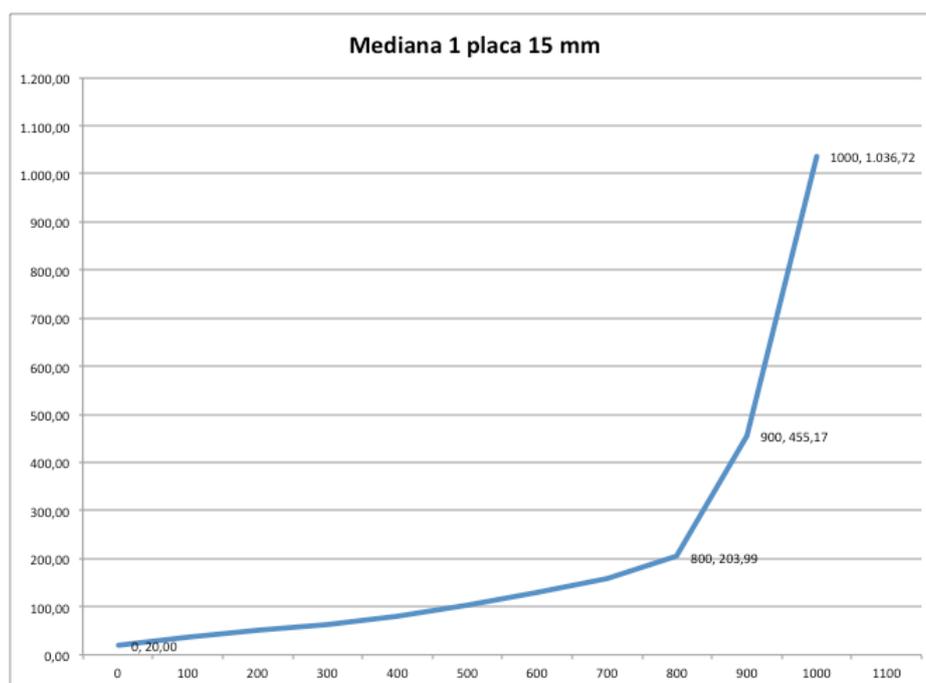


Gráfico VII.12 – Valor mediana de las temperaturas del acero registradas en los termopares en función de la temperatura del horno para un revestimiento de 15 mm.

Y la correspondiente a la evolución de la temperatura del acero (eje de ordenadas) en función del tiempo en minutos de la curva nominal estándar (eje de abscisas)

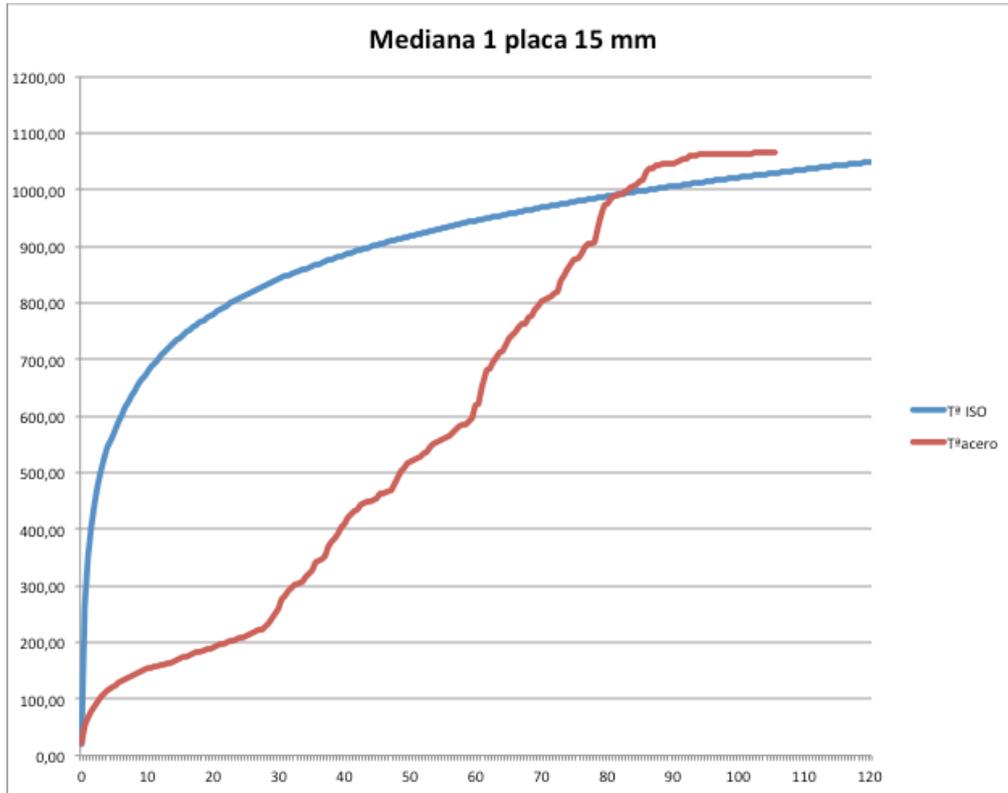


Gráfico VII.13 – Valor mediana de las temperaturas del acero registradas en los termopares en función del tiempo de la curva nominal estándar para un revestimiento de 15 mm.

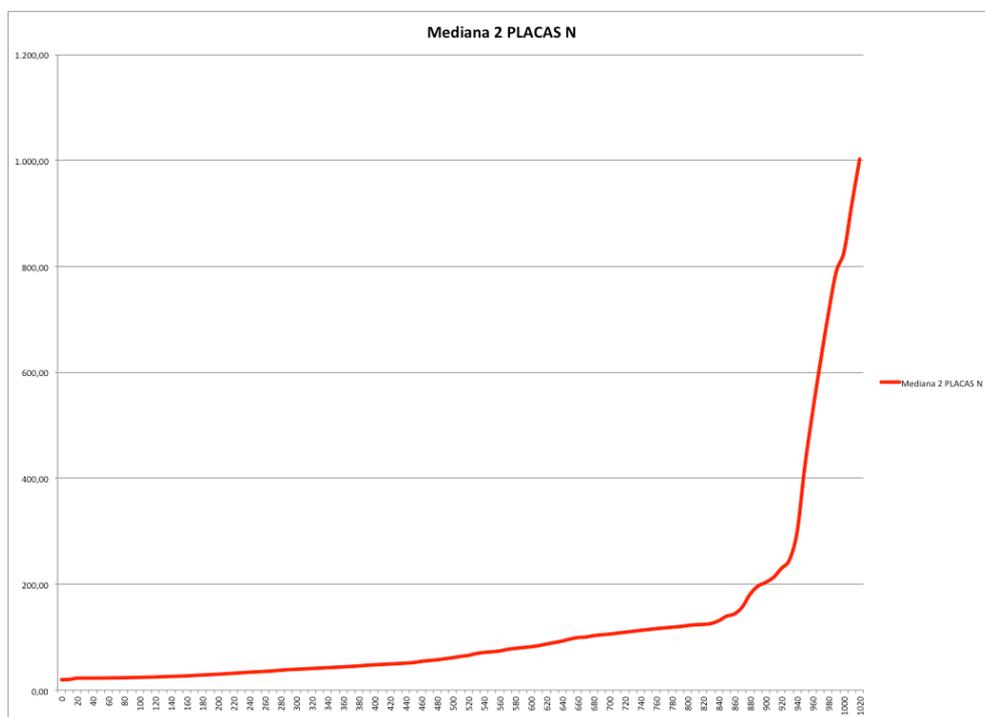
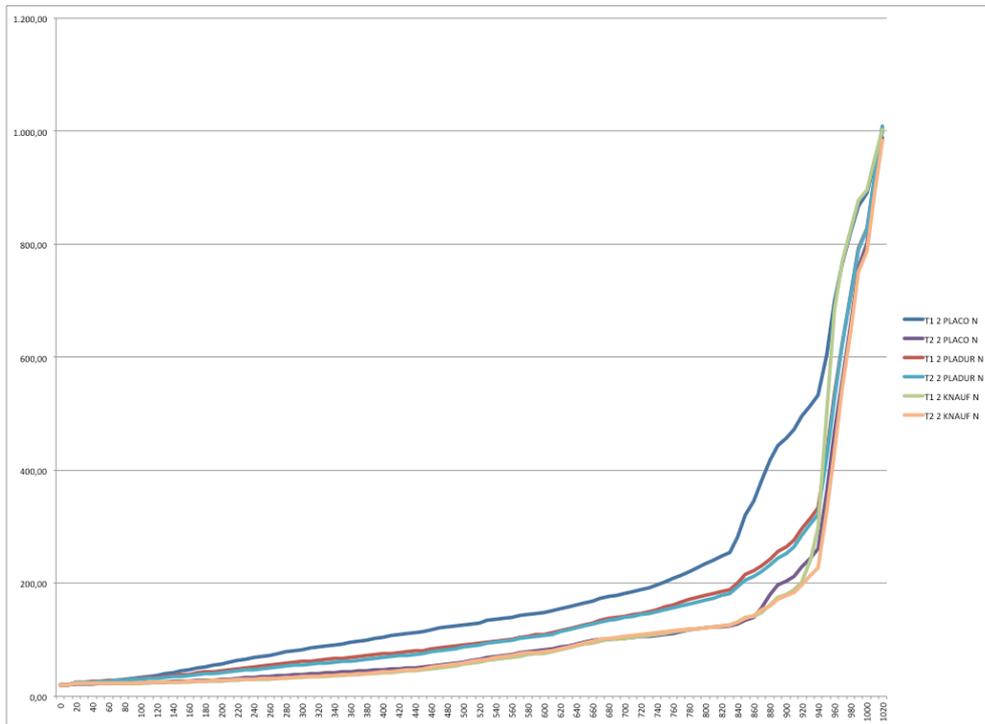
7.3.3.2 PROBETA REVESTIDA CON DOS PLACAS DE 15 mm

7.3.3.2.1 Fechas de ensayos

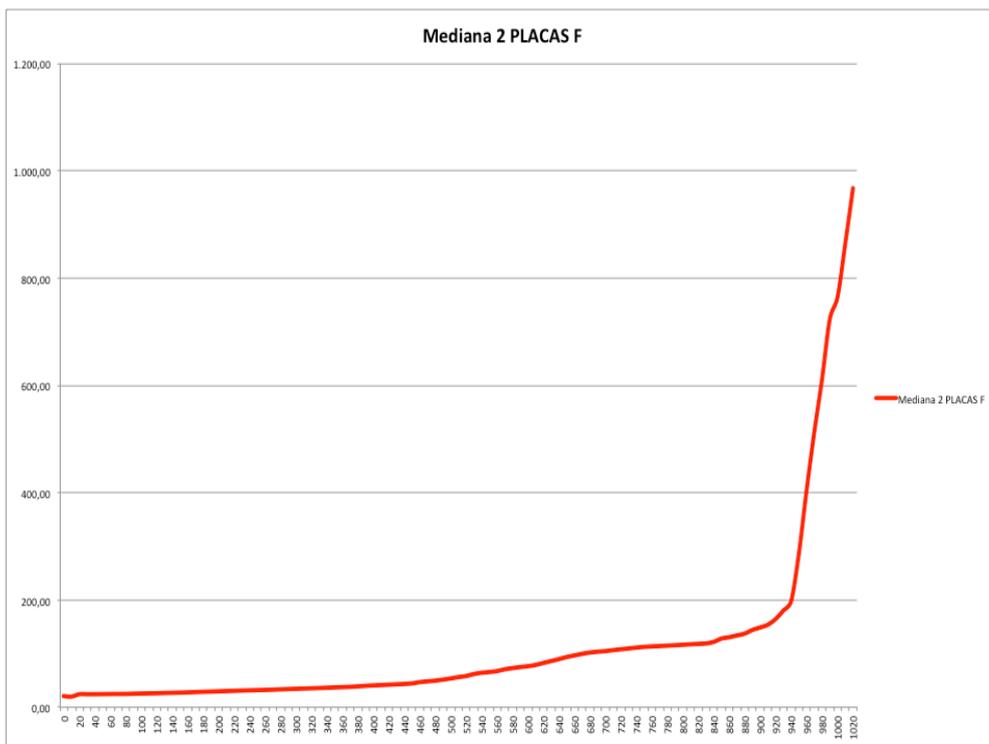
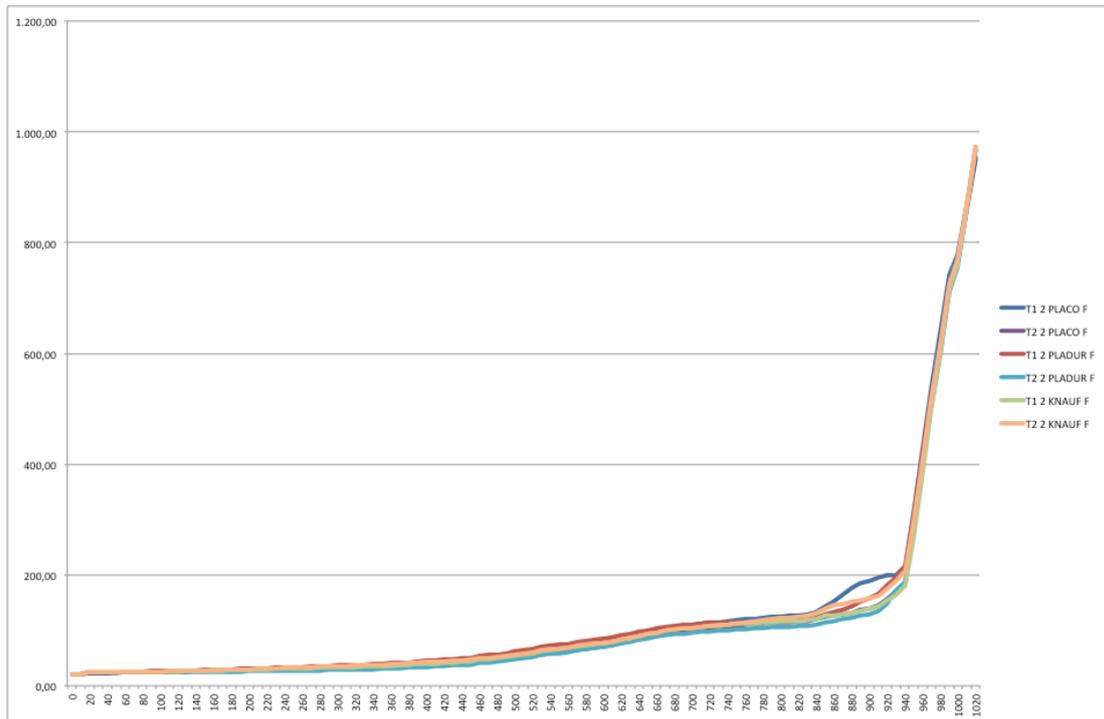
Los ensayos de probeta revestida con dos placas de 15 mm de yeso laminado se realizaron en las siguientes fechas:

PLACO	PLADUR	KNAUF	PLACOFLAM	PLADUR FOC	KNAUF DF
21/06/11	22/06/11	24/06/11	29/06/11	30/06/11	01/07/11

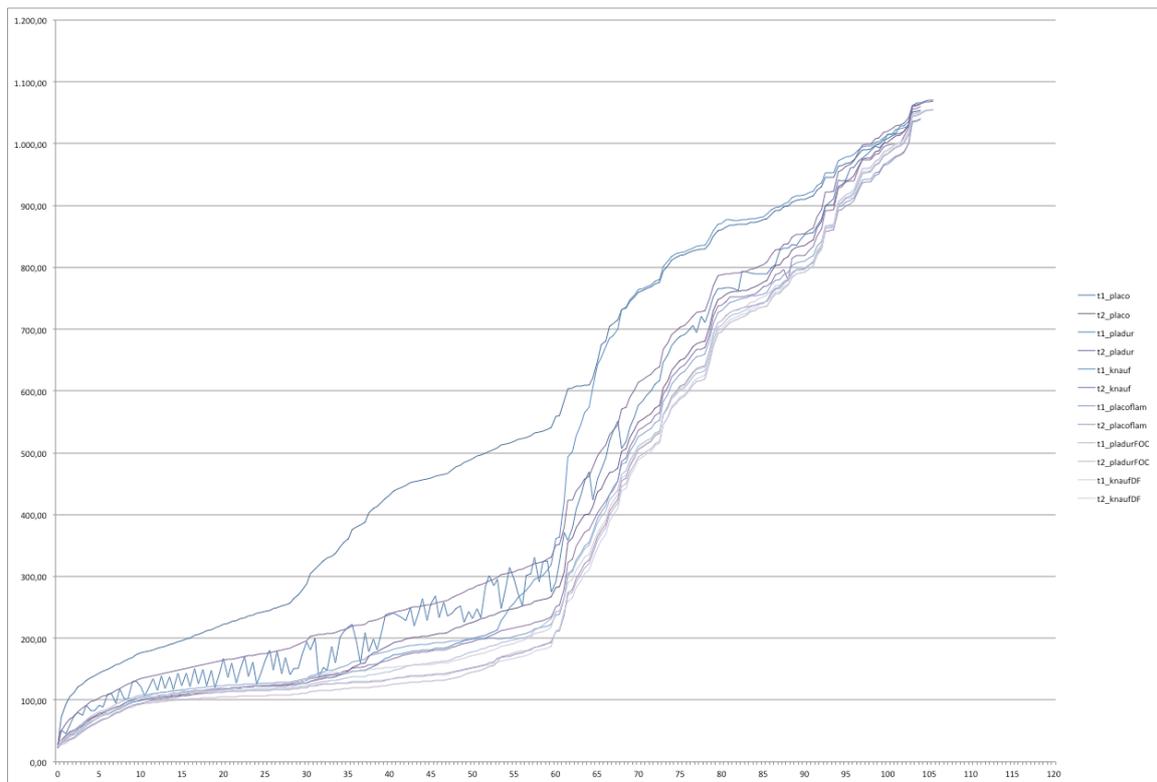
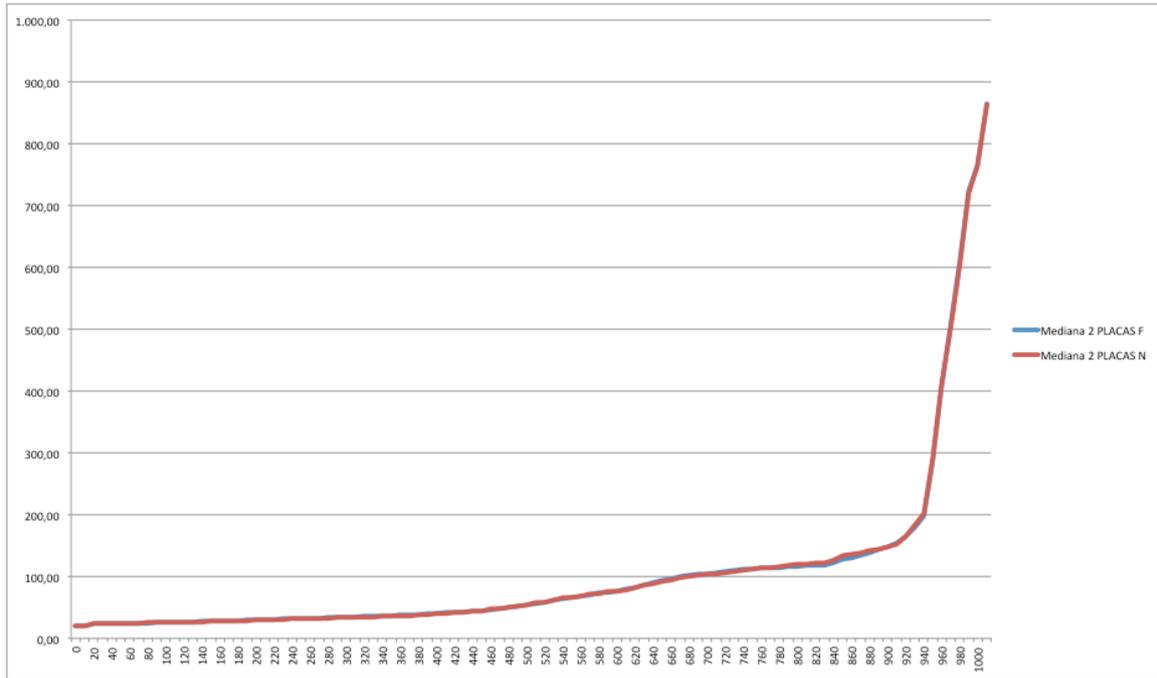
7.3.3.2.2 Datos obtenidos con revestimiento de placa normal



7.3.3.2.3 Datos obtenidos con revestimiento de placa mejorada



7.3.3.2.4 Comparación de datos obtenidos placa normal / mejorada



7.3.3.2.5 Valor mediana

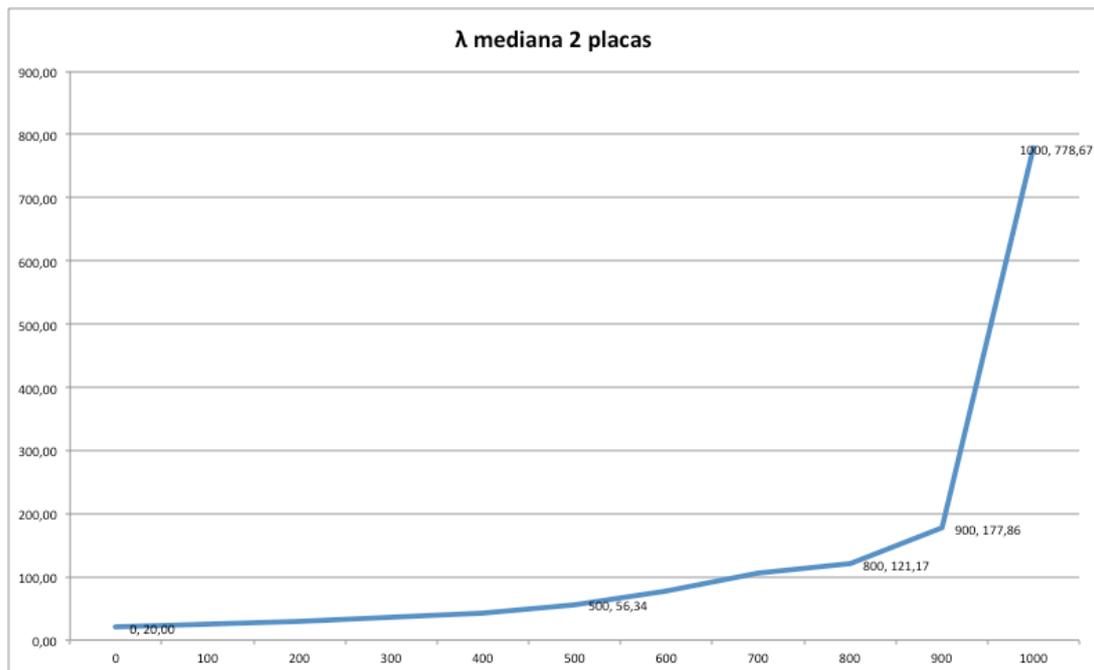


Gráfico VII.14 – Valor mediana de las temperaturas del acero registradas en los termopares en función de la temperatura del horno para un revestimiento de 30 mm..

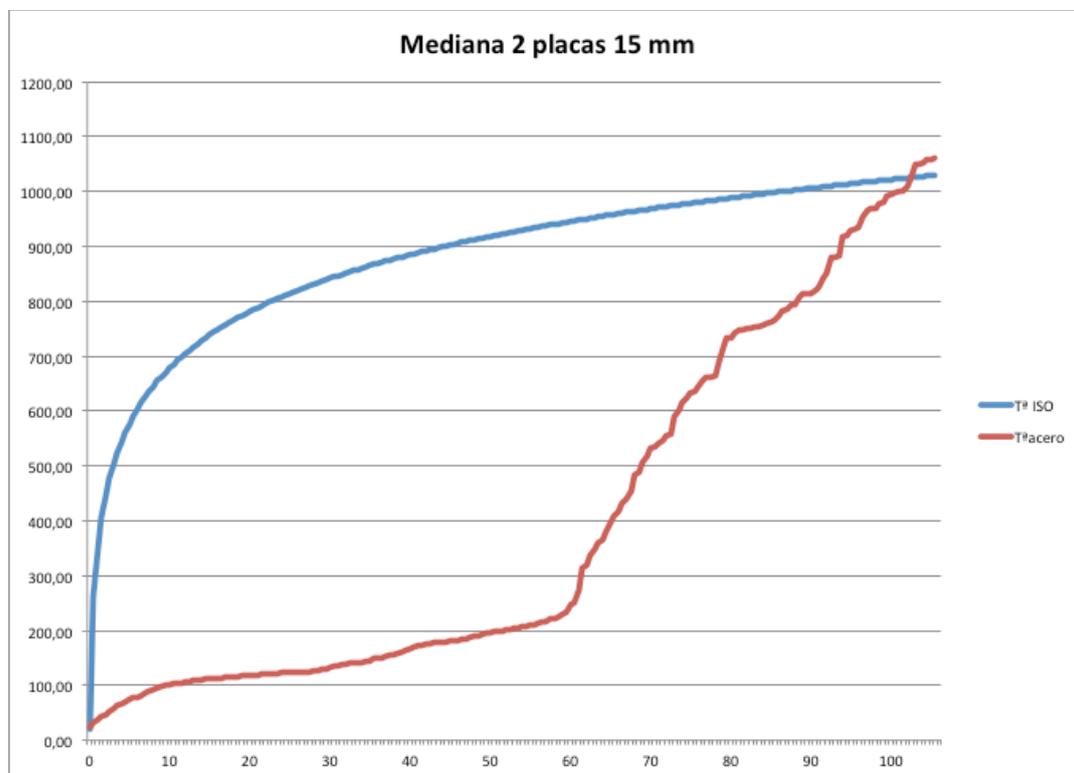


Gráfico VII.15 – Valor mediana de las temperaturas del acero registradas en los termopares en función del tiempo de la curva nominal estándar para un revestimiento de 30 mm.

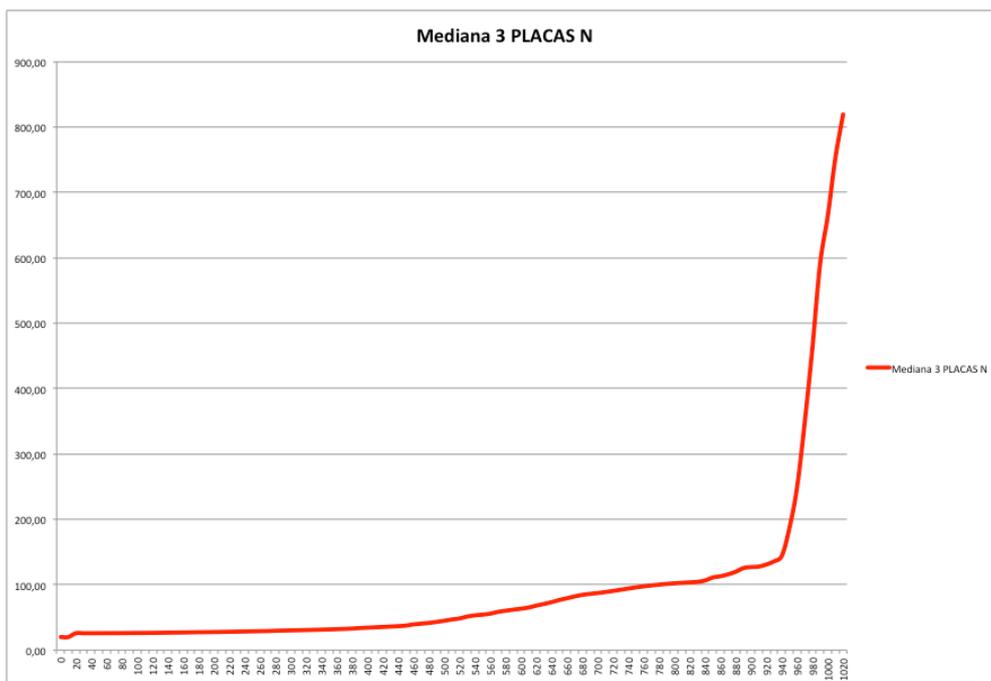
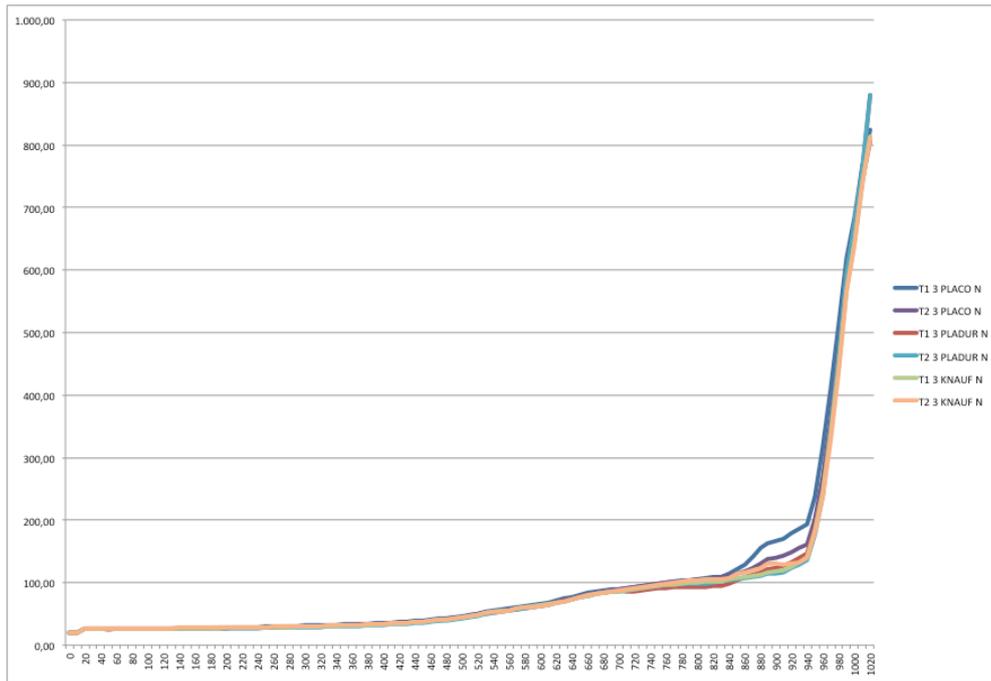
7.3.3.3 PROBETA REVESTIDA CON TRES PLACAS DE 15 mm

7.3.3.3.1 Fechas de ensayos

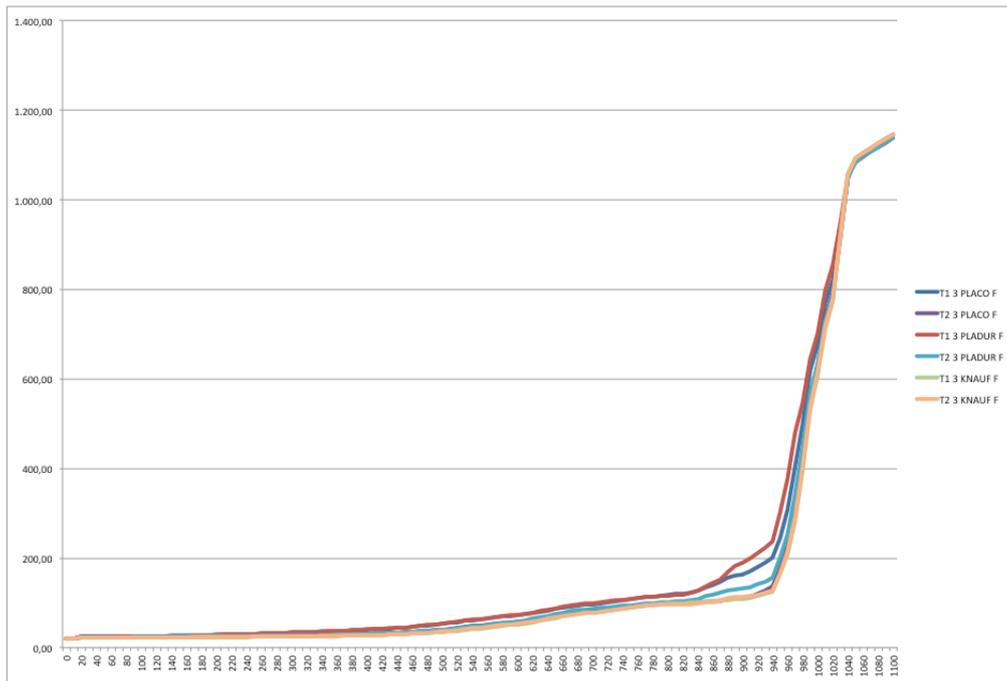
Los ensayos de probeta revestida con tres placas de 15 mm de yeso laminado se realizaron en las siguientes fechas:

PLACO	PLADUR	KNAUF	PLACOFLAM	PLADUR FOC	KNAUF DF
04/07/11	05/07/11	06/07/11	07/07/11	14/07/11	15/07/11

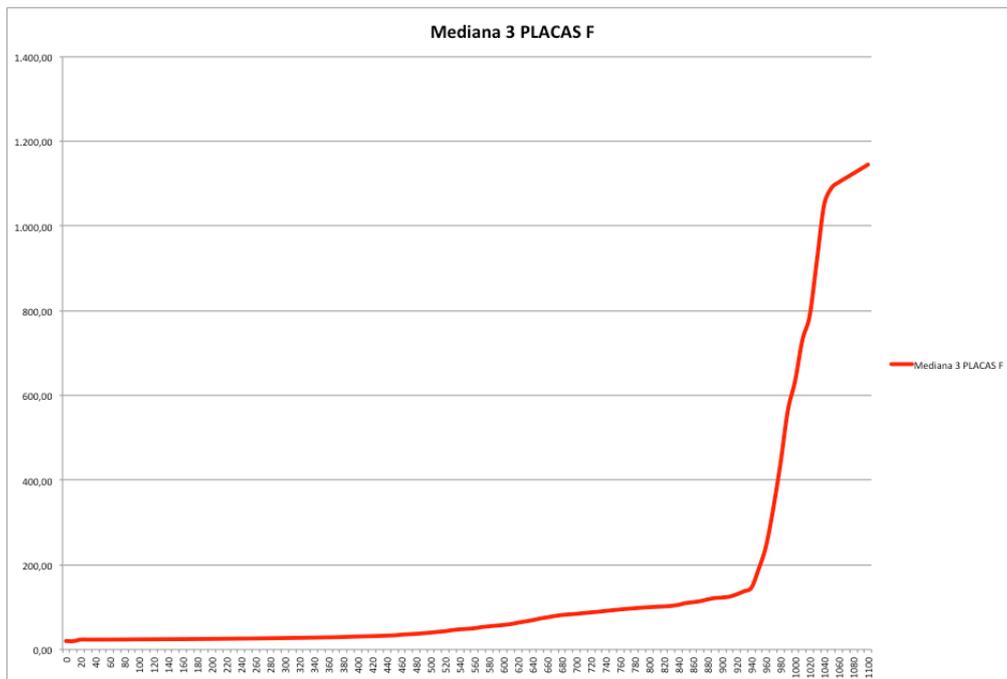
7.3.3.3.2 Datos obtenidos con revestimiento de placa normal



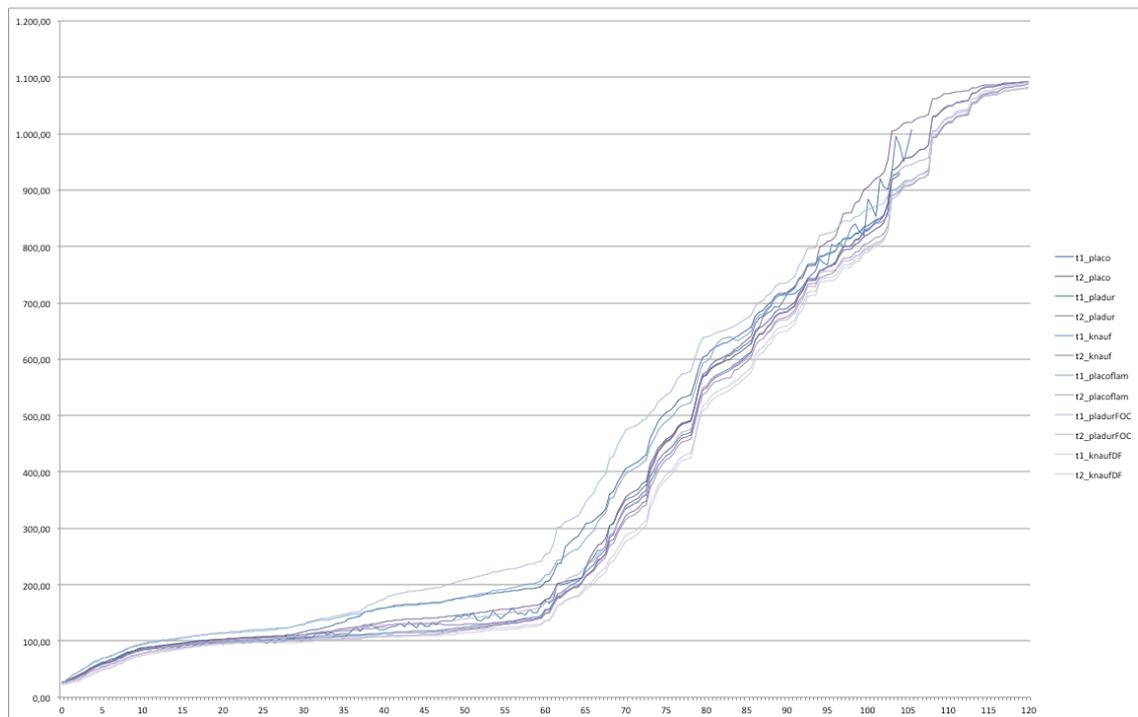
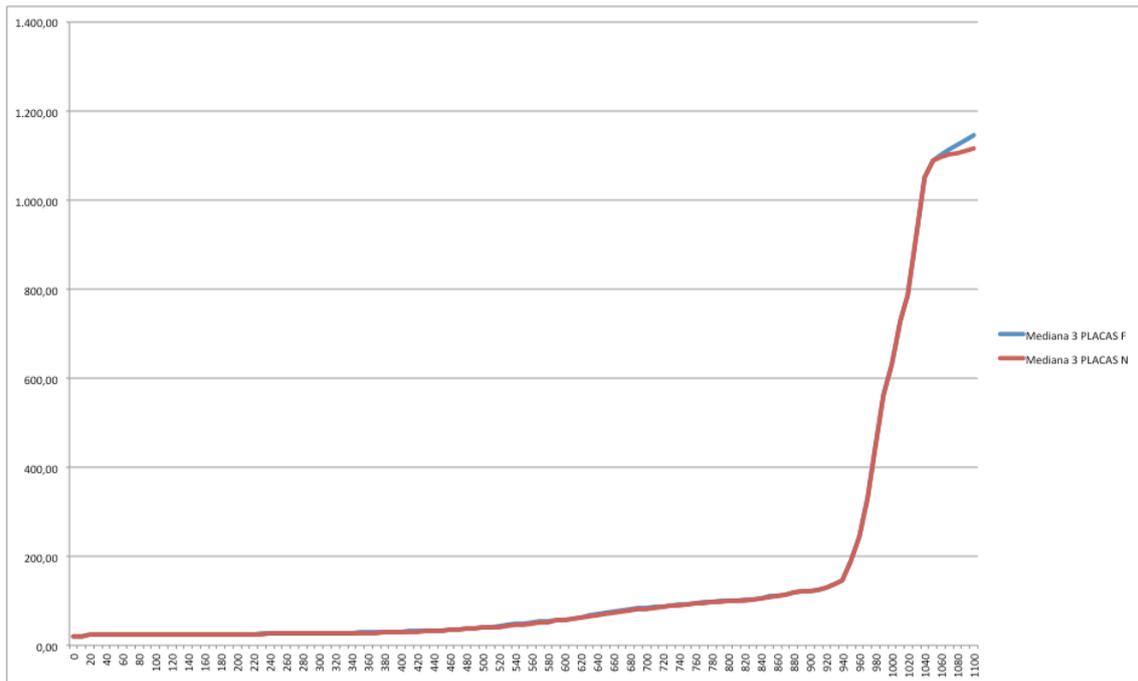
7.3.3.3.3 Datos obtenidos con revestimiento de placa mejorada



Siendo el valor mediana de los obtenidos.



7.3.3.3.4 Comparación de datos obtenidos placa normal / mejorada



7.3.3.3.5 Valor mediana

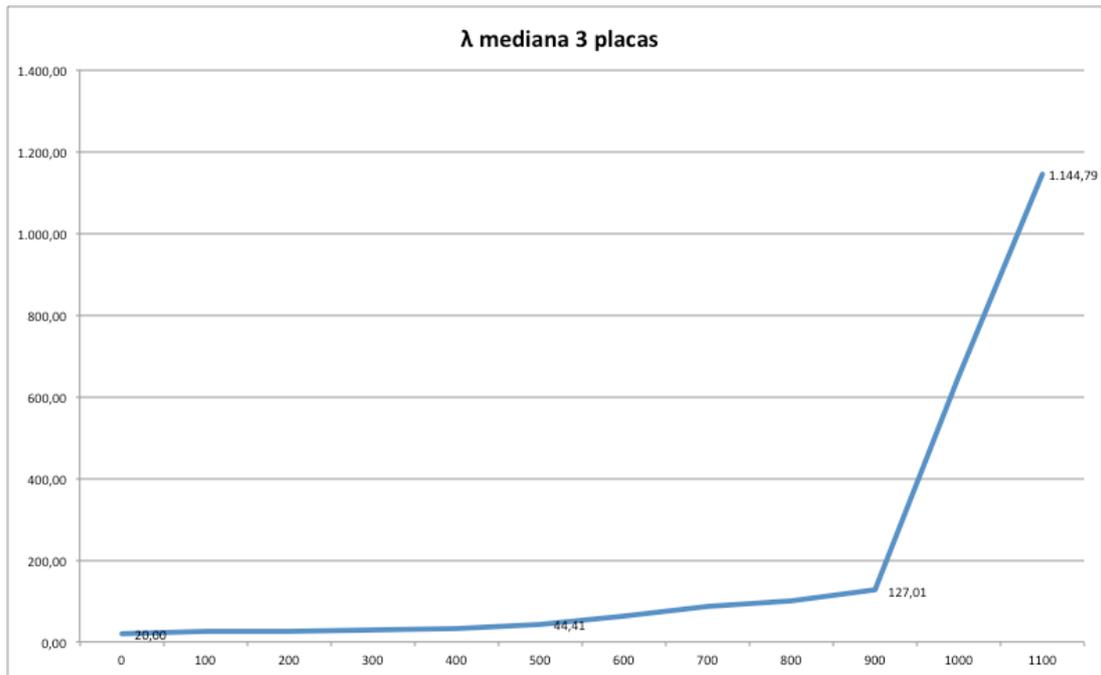


Gráfico VII.16 – Valor mediana de las temperaturas del acero registradas en los termopares en función de la temperatura del horno para un revestimiento de 45 mm.

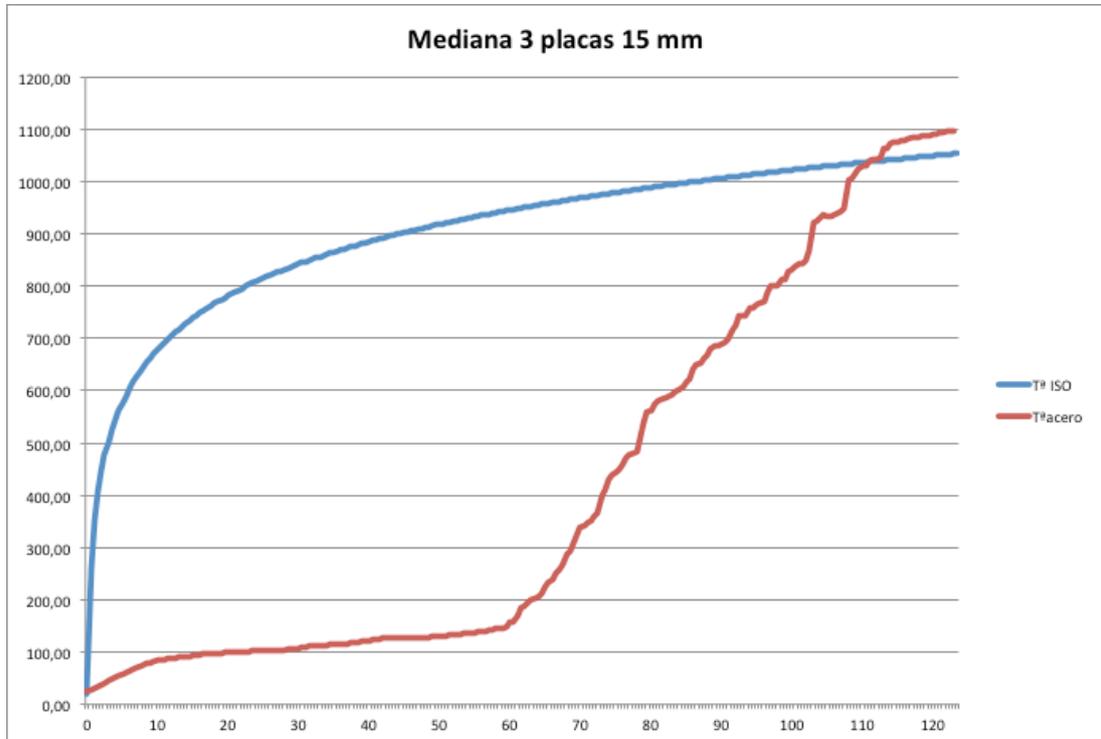


Gráfico VII.17 – Valor mediana de las temperaturas del acero registradas en los termopares en función del tiempo de la curva nominal estándar para un revestimiento de 45 mm

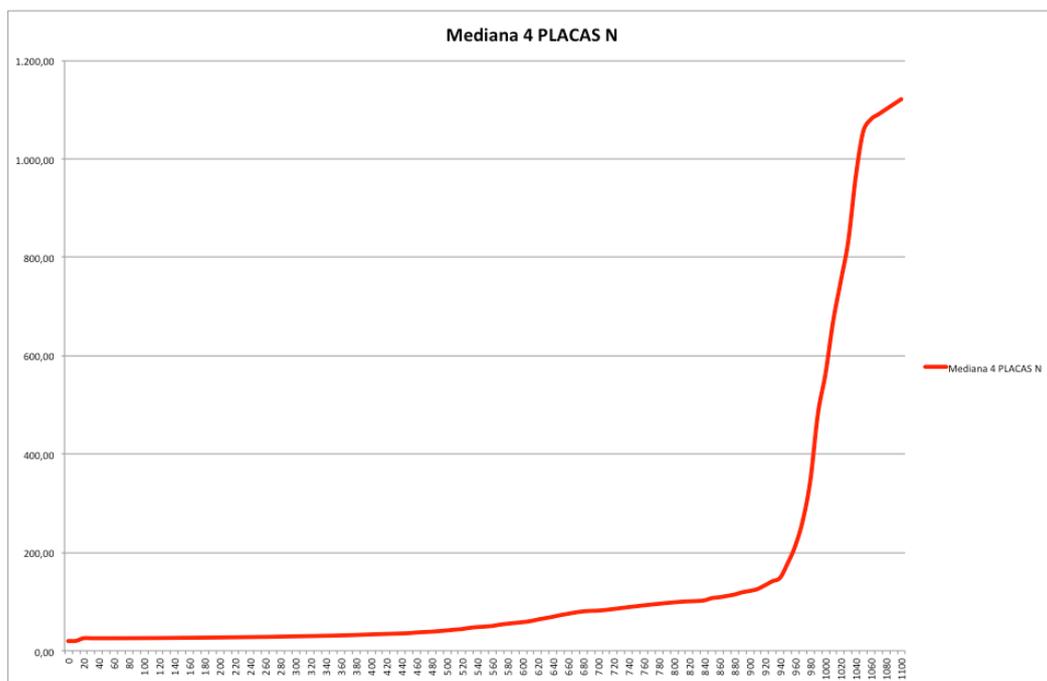
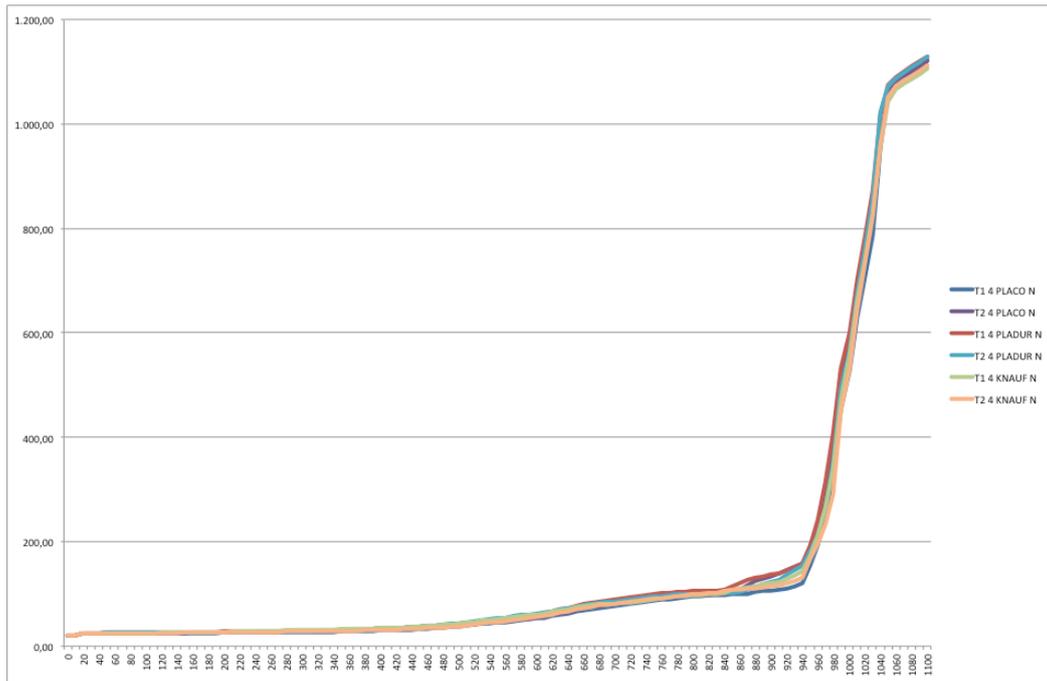
7.3.3.4 PROBETA REVESTIDA CON CUATRO PLACAS DE 15 mm

7.3.3.4.1 Fechas de ensayos

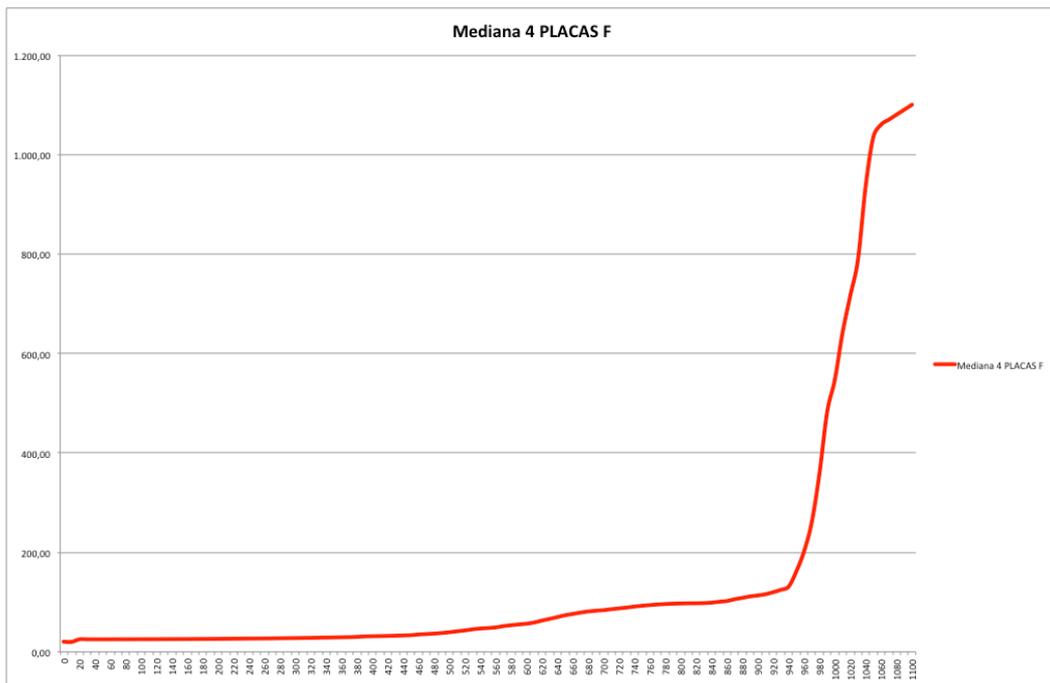
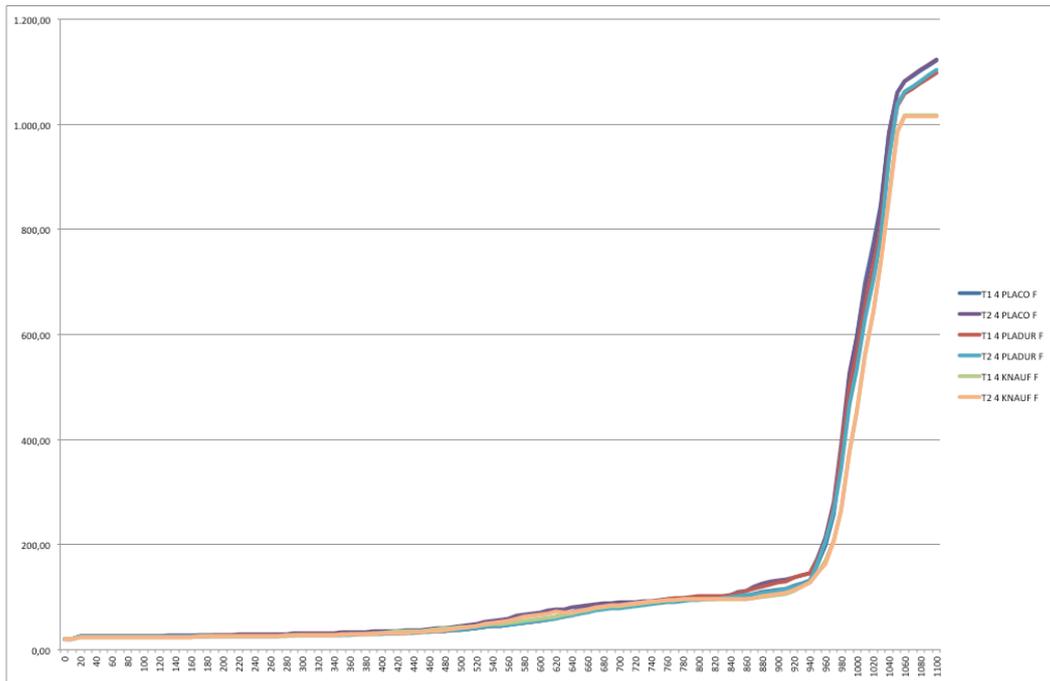
Los ensayos de probeta revestida con cuatro placas de 15 mm de yeso laminado se realizaron en las siguientes fechas:

PLACO	PLADUR	KNAUF	PLACOFLAM	PLADUR FOC	KNAUF DF
18/07/11	19/07/11	21/07/11	22/07/11	26/07/11	27/07/11

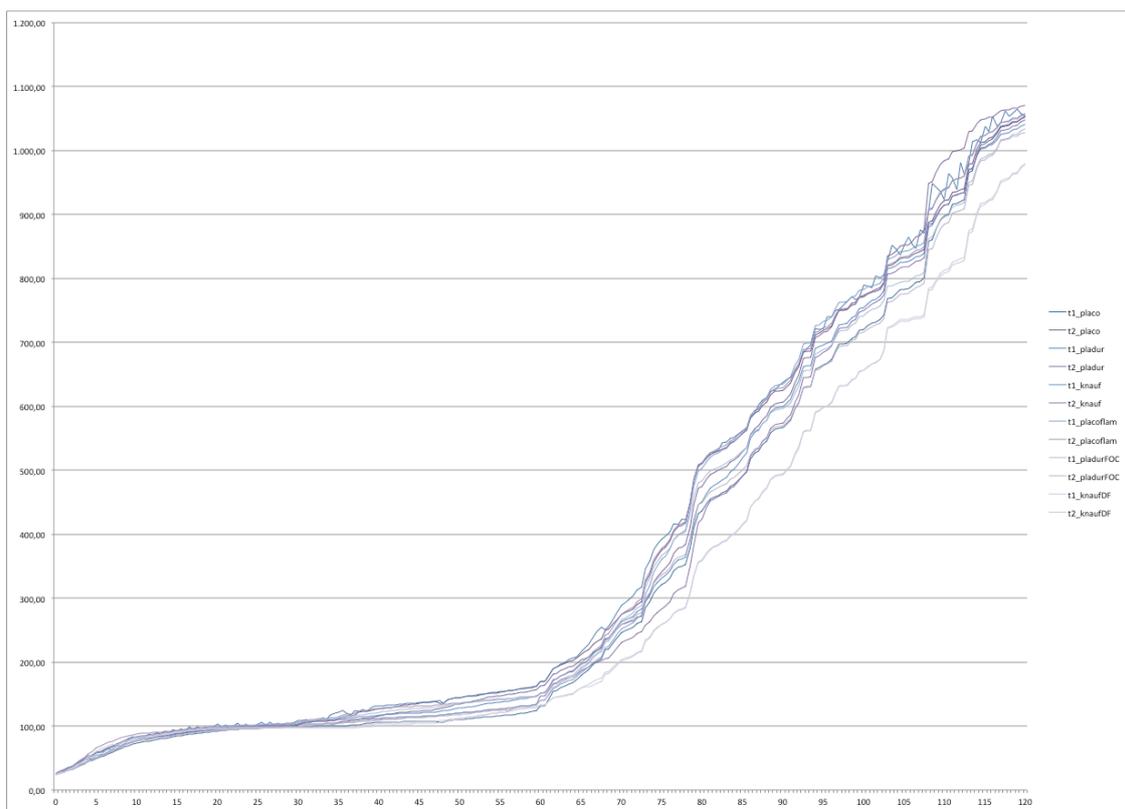
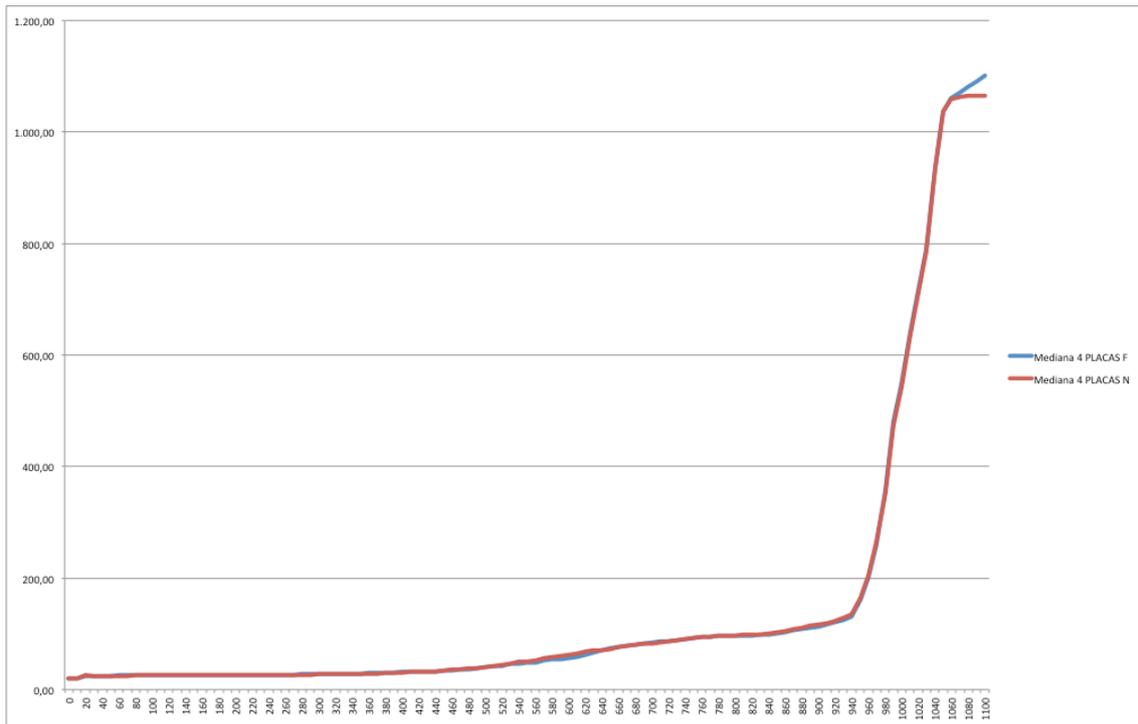
7.3.3.4.2 Datos obtenidos con revestimiento de placa normal



7.3.3.4.3 Datos obtenidos con revestimiento de placa mejorada



7.3.3.4.4 Comparación de datos obtenidos placa normal / mejorada



7.3.3.4.5 Valor mediana

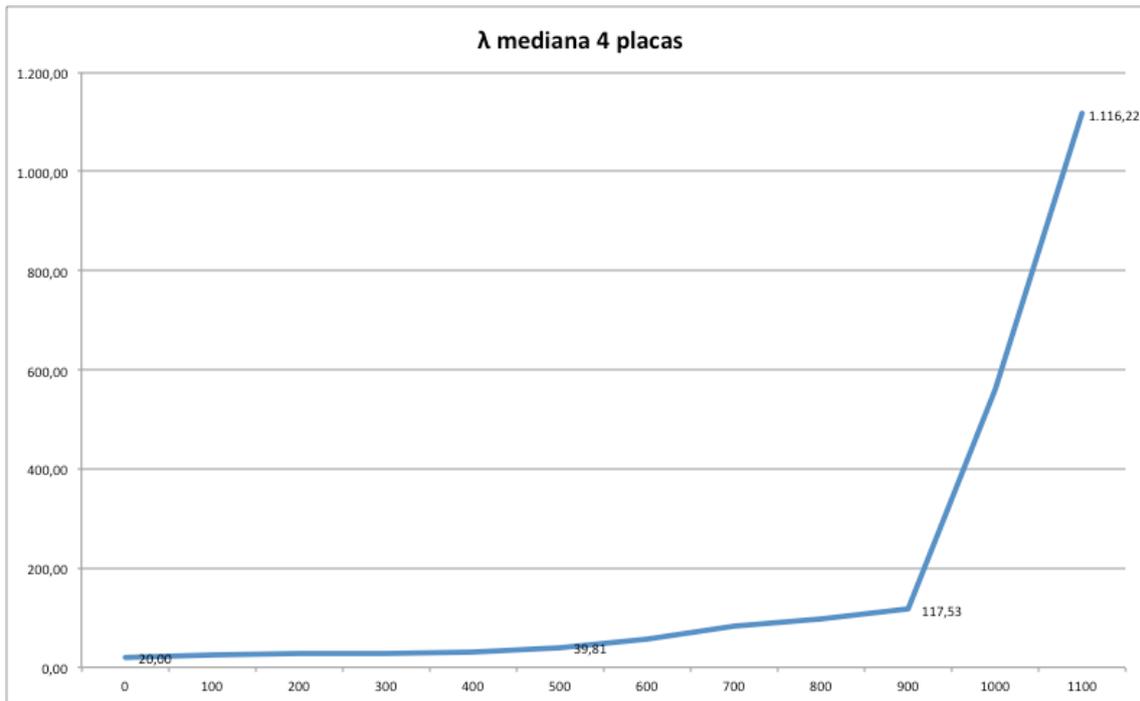


Gráfico VII.18 – Valor mediano de las temperaturas del acero registradas en los termopares en función de la temperatura del horno para un revestimiento de 60 mm

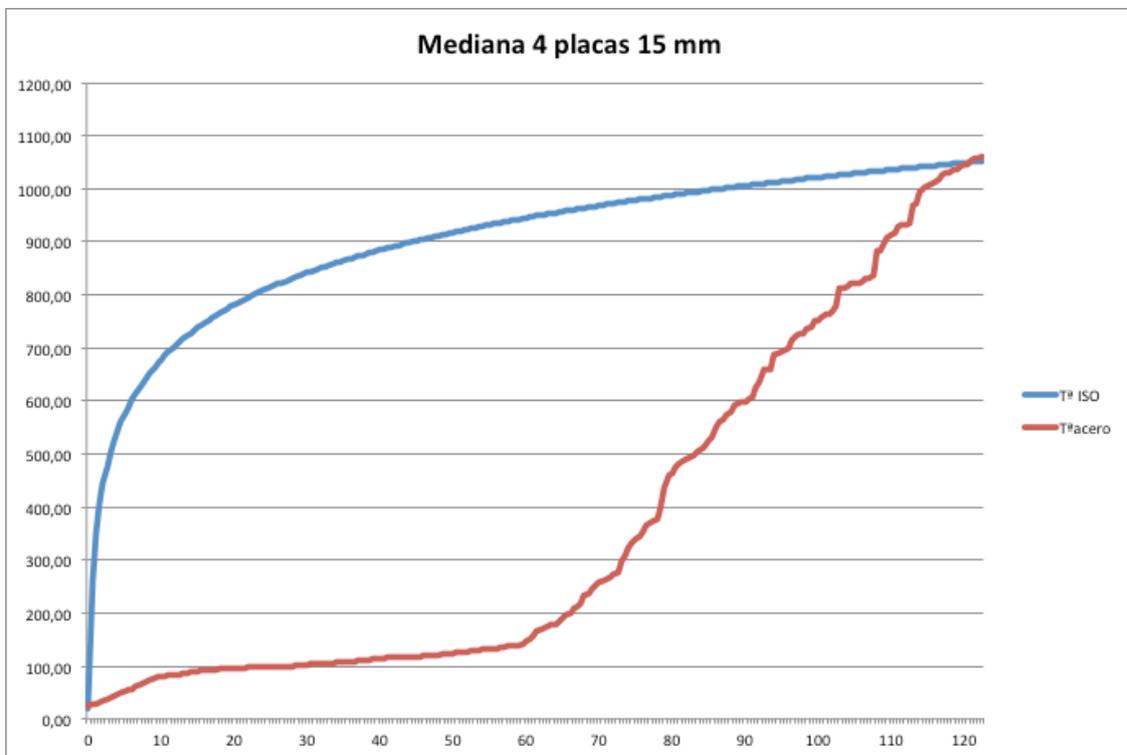


Gráfico VII.19 – Valor mediano de las temperaturas del acero registradas en los termopares en función del tiempo de la curva nominal estándar para un revestimiento de 60 mm

7.4 CONCLUSIONES

Los valores mediana de temperatura de acero obtenidos con placa normal y con placa mejorada son prácticamente coincidentes, lo que viene a indicar que, a efectos de cálculo, la conductividad térmica de las placas de yeso laminado normales y puede considerarse igual.

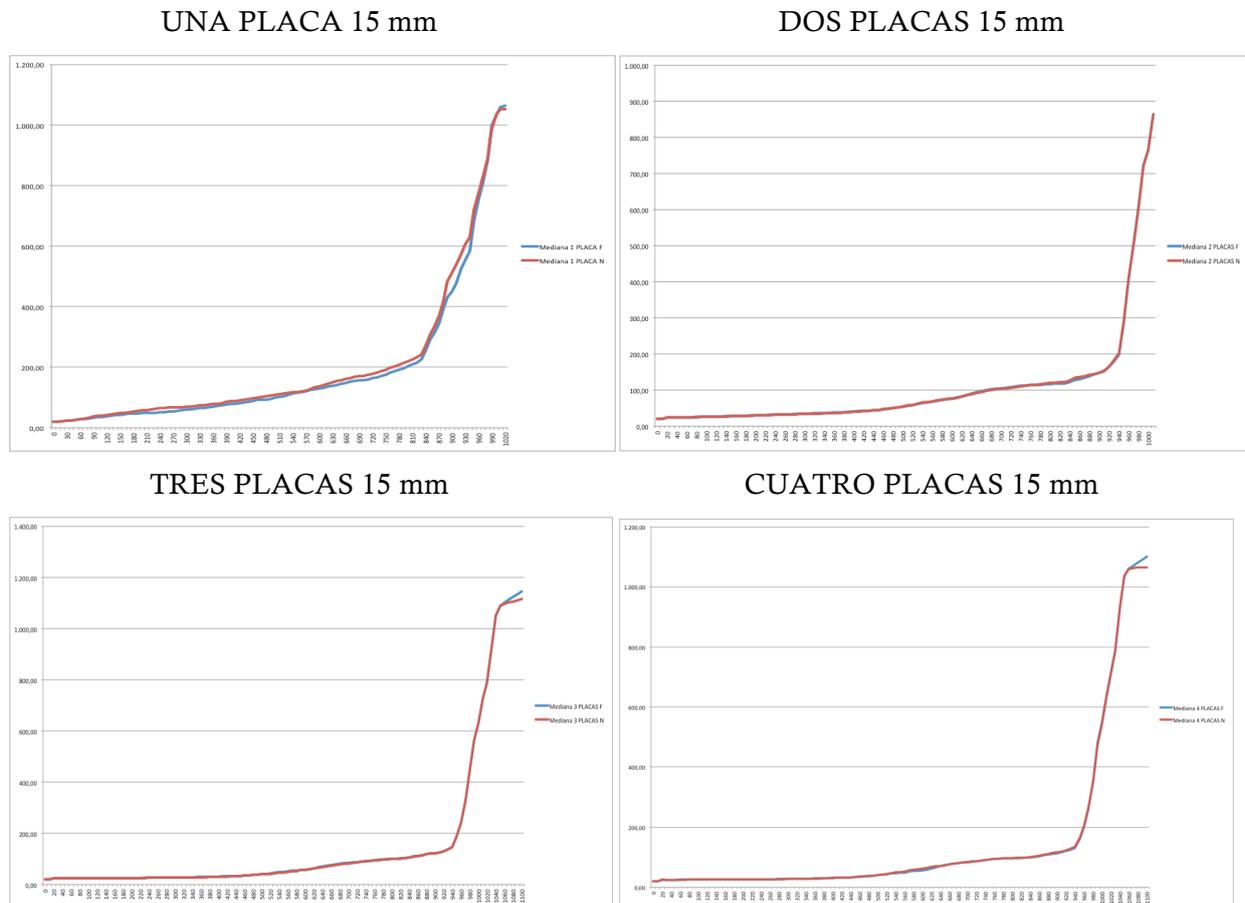


Gráfico VII.20 – Comparativo de los valores mediana de las temperaturas del acero registradas en los termopares en función de la temperatura del horno.

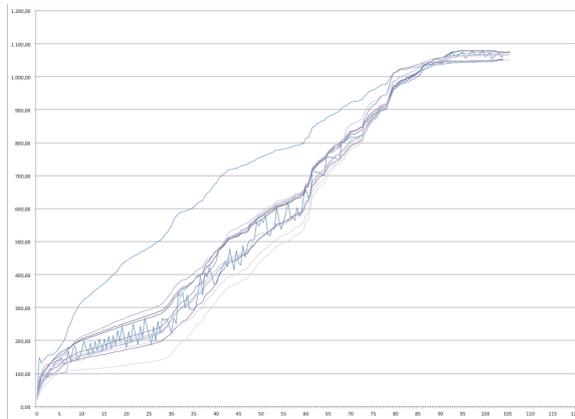
Es de reseñar que la temperatura del acero va ascendiendo en ligera pendiente, al contrario de lo que sucedía en los ensayos de los distribuidores nacionales (pendiente prácticamente horizontal) hasta que se produce el ascenso brusco de la temperatura del acero.

Esta subida brusca parece guardar una relación directa con la rotura del material a la que se refieren, también, los estudios internacionales pero que no ha podido apreciarse en los ensayos de los distribuidores nacionales realizados según la Norma UNE ENV 13 381-4.

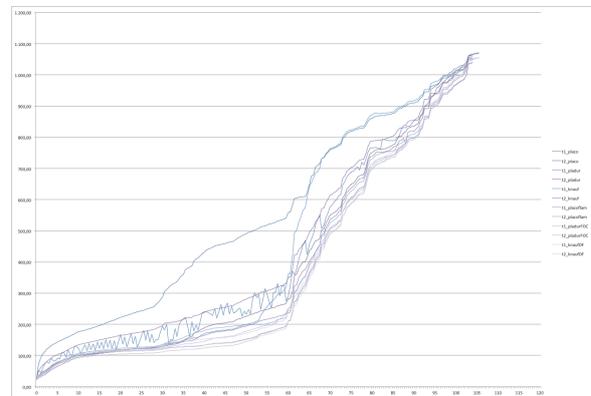


Se puede observar un comportamiento errático de las lecturas de los termopares a partir de ciertos tiempos que se pueden atribuir a procesos de fractura del material de protección al alcanzarse determinadas temperaturas.

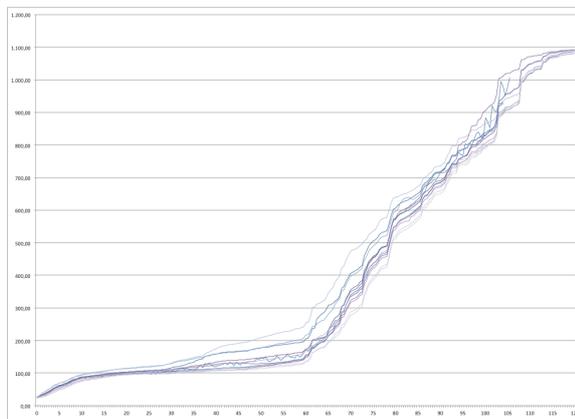
UNA PLACA 15 mm



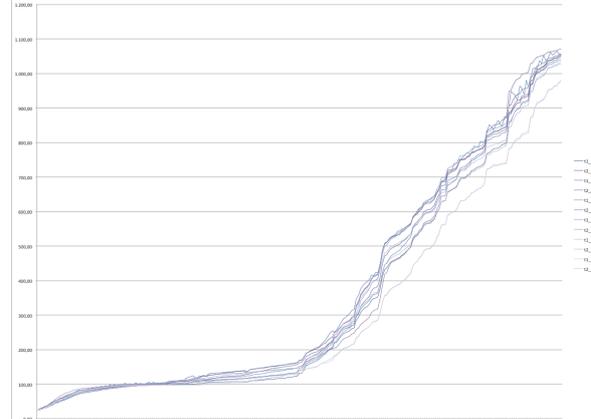
DOS PLACAS 15 mm



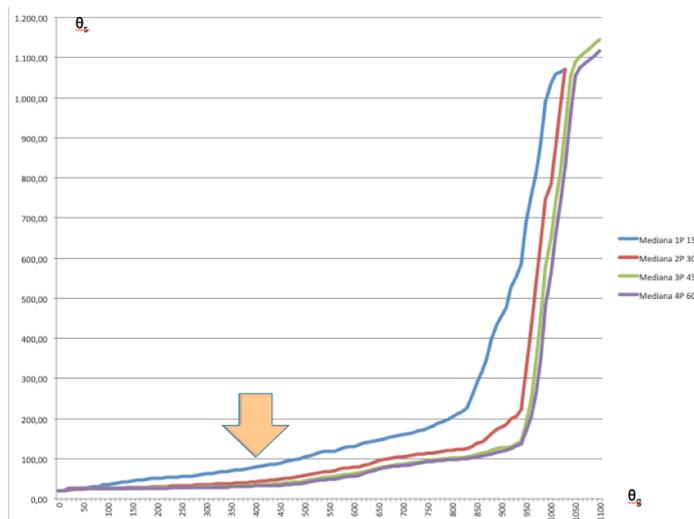
TRES PLACAS 15 mm



CUATRO PLACAS 15 mm



En la siguiente gráfica se representan las medianas de los cuatro tipos de revestimiento y, como se ha indicado anteriormente, puede apreciarse que la temperatura del acero sube en ligera pendiente. También es destacable que las temperaturas del acero para el revestimiento con tres o cuatro placas son prácticamente similares así que, a partir de determinadas temperaturas del gas, la temperatura del acero se eleva bruscamente, lo que indica que el revestimiento protector ha perdido toda su eficacia.



En las siguientes gráficas se representan los valores mediana deducidos de los anteriores datos en relación con la curva nominal estándar.

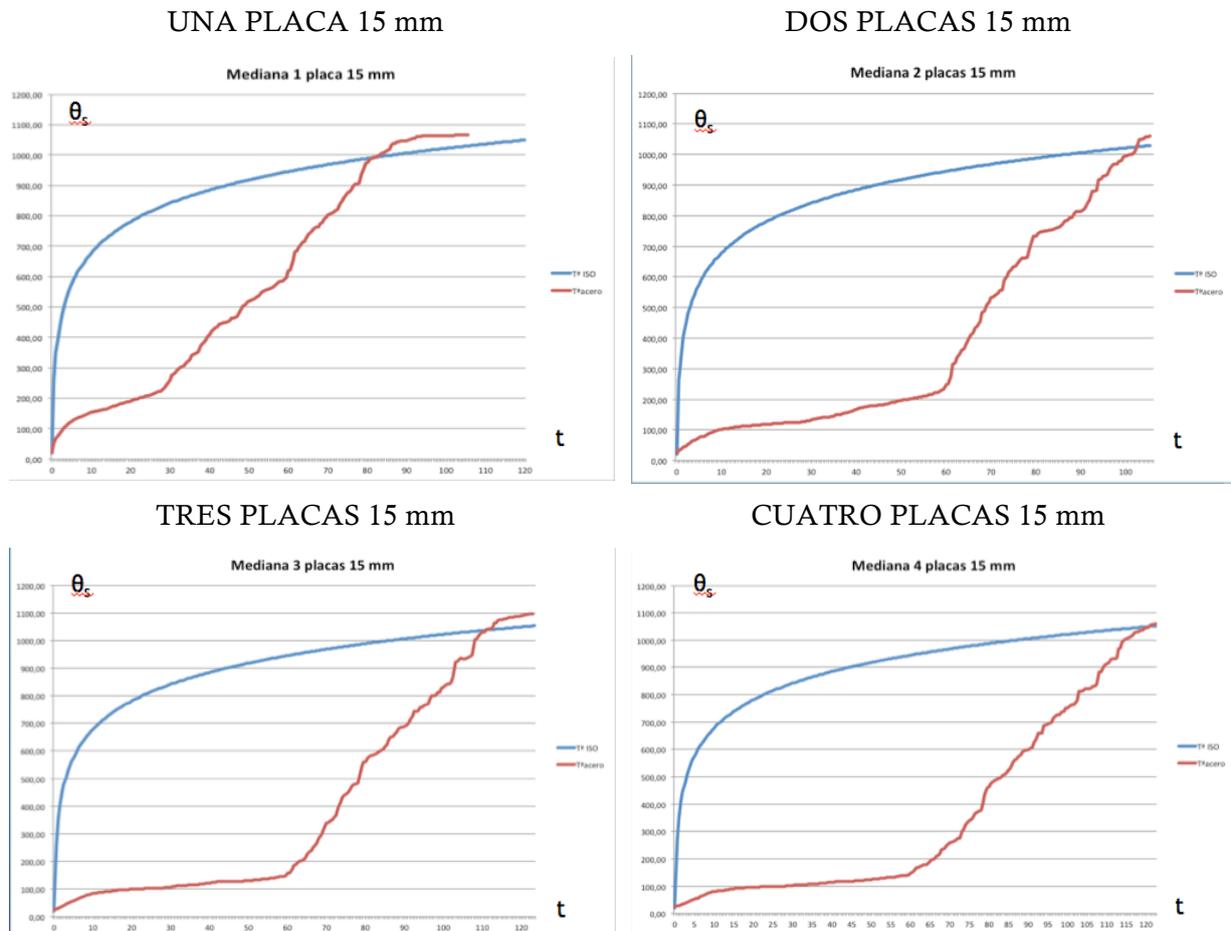


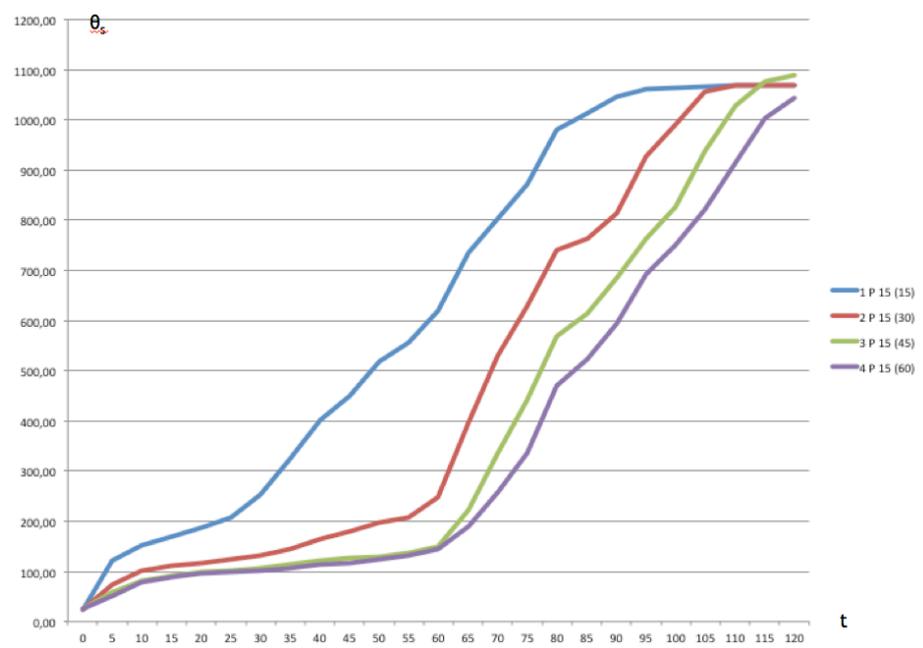
Gráfico VII.21 – Comparativo de los valores mediana de las temperaturas del acero registradas en los termopares en función del tiempo de la curva nominal estándar.

Puede apreciarse que los valores presentan una cierta homogeneidad hasta los 30 minutos en el caso del revestimiento con una placa, y hasta los 60 minutos en el resto de los casos (dos, tres y cuatro placas) a partir de los cuales se denota en la gráfica una cierta dispersión.

En particular, los resultados de placas triples y cuádruples son prácticamente coincidentes y se aproximan al de las placas dobles y, en los tres casos, a partir de los 940°C de temperatura del gas ambiente, la temperatura del acero se dispara. El valor que se aleja de los anteriores es el de revestimiento con una sola placa en el que el citado incremento se produce sobre los 830°C y, posteriormente a los 950°C.

Obviamente, las pendientes de estos tramos homogéneos en forma de meseta cuasi horizontal son de diferente pendiente excepto en el caso del revestimiento con tres y cuatro placas que es prácticamente coincidente.

En la siguiente gráfica se representan los valores mediana de cada uno de los revestimientos, en la que se puede apreciar la diferencia de pendientes de los tramos meseta.



En la siguiente Tabla se pueden observar las diferencias y coincidencias con los datos obtenidos de los ensayos de los fabricantes.

Los datos son coincidentes en el caso de espesores de revestimiento de 15 y 30 mm y se aprecian diferencias en los revestimientos de 45 y 60 mm.

	Inicia ascenso brusco de temperatura del acero a la temperatura del gas de	Alcanza una temperatura del acero de 700° a la temperatura del gas de
Fabricante "A"		
13 mm	800° (23 min ISO)	1000° (87 min ISO)
28 mm	900° (45 min ISO)	1020° (99 min ISO)
30 mm	940° (58 min ISO)	1040° (113 min ISO)
60 mm	1080° (148 min ISO)	>1100° (169 min ISO)
Fabricante "B"		
15 mm	800° (23 min ISO)	1010° (93 min ISO)
25 mm	920° (51 min ISO)	1040° (113 min ISO)
40 mm	1000° (87 min ISO)	≈1100° (169 min ISO)
Ensayos Tesis		
15 mm	820° (26 min ISO)	950° (62 min ISO)
30 mm	930° (54 min ISO)	990° (81 min ISO)
45 mm	940° (58 min ISO)	1010° (93 min ISO)
60 mm	940° (58 min ISO)	1020° (99 min ISO)

Tabla VII.1 – Comparativo de temperaturas registradas en función del espesor del material de protección.

El motivo de estas diferencias puede ser debido al tamaño de la probeta y el horno utilizado en los ensayos de las fabricantes de acuerdo con la norma UNE ENV 13381-4 totalmente diferente en tamaño y composición al usado en los ensayos. Ha de tenerse en cuenta, igualmente, que la distribución de temperaturas del gas en el interior del horno no son coincidentes en el caso del

utilizado en los ensayos de la Tesis (eléctrico y de reducidas dimensiones) y de los fabricantes (combustible líquido y de grandes dimensiones).⁴⁹

⁴⁹ Este párrafo es una mera suposición del autor que no se han confrontado exhaustivamente, ya que se necesitaría conocer con detalle el desarrollo de los ensayos en horno a gran escala según la norma UNE ENV 13381-4 para poder establecer hipótesis al respecto. (apoyándose, entre otros aspectos, en reportajes fotográficos y videográficos)

8 OBTENCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EFECTIVA

8.1 PROCESO DE CÁLCULO

8.1.1 FUNDAMENTO MATEMÁTICO

Una vez obtenidos los valores de temperatura del acero en las diferentes situaciones de revestimiento, se han obtenido los valores de la λ_p conductividad térmica de los diferentes tipos de revestimiento despejando dicho parámetro en la ecuación diferencial:

$$\Delta\theta_{s.t} = \frac{\lambda_p}{d_p c_s \rho_s} \frac{A_p}{V} \left(\frac{1}{1 + \varphi/3} \right) (\theta_{g.t} - \theta_{s.t}) \Delta t - (e^{\varphi/10} - 1) \Delta\theta_{g.t} \geq 0$$

a través del siguiente desarrollo de formulación cuyo resultado final se recoge en el Anejo F de la Norma UNE ENV 13 381-4:

$$\Delta\theta_{s.t} = \frac{\lambda_p}{d_p c_s \rho_s} \frac{A_p}{V} \left(\frac{1}{1 + \varphi/3} \right) (\theta_{g.t} - \theta_{s.t}) \Delta t - (e^{\varphi/10} - 1) \Delta\theta_{g.t} \geq 0$$

$$\Delta\theta_{s.t} + (e^{\varphi/10} - 1) \Delta\theta_{g.t} = \frac{\lambda_p}{d_p c_s \rho_s} \frac{A_p}{V} \left(\frac{1}{1 + \varphi/3} \right) (\theta_{g.t} - \theta_{s.t}) \Delta t$$

$$\Delta\theta_{s.t} + (e^{\varphi/10} - 1) \Delta\theta_{g.t} = \lambda_p \frac{1}{d_p c_s \rho_s} \frac{A_p}{V} \left(\frac{1}{1 + \varphi/3} \right) (\theta_{g.t} - \theta_{s.t}) \Delta t$$

$$\lambda_p \frac{1}{d_p c_s \rho_s} \frac{A_p}{V} \left(\frac{1}{1 + \varphi/3} \right) (\theta_{g.t} - \theta_{s.t}) \Delta t = \Delta\theta_{s.t} + (e^{\varphi/10} - 1) \Delta\theta_{g.t}$$

$$\lambda_p = \left[\Delta\theta_{s.t} + (e^{\varphi/10} - 1) \Delta\theta_{g.t} \right] \left[d_p c_s \rho_s \frac{V}{A_p} \right] \left[1 + \varphi/3 \right] \left[\frac{1}{(\theta_{g.t} - \theta_{s.t}) \Delta t} \right]$$

Esta fórmula puede sufrir una importante simplificación si se tiene en cuenta la influencia del factor φ (que indica el grado de protección del revestimiento de las piezas) ya que, cuando este es inferior a 0,50 (lo que indica un escaso grado de protección) se admite una simplificación de la ecuación en la que:

- El valor de retardo por absorción de calor del material protector se hace igual a cero.

$$\left[(e^{\varphi/10} - 1) = 0 \right]$$

- El incremento de resistencia al paso del calor se iguala a la unidad.

$$[(1 + \varphi / 3) = 1]$$

Con lo que la ecuación se simplificaría de la siguiente manera:

$$\lambda_p = [\Delta\theta_{gt}] \left[d_p c_s \rho_s \frac{V}{A_p} \right] \left[\frac{1}{(\theta_{g,t} - \theta_{s,t}) \Delta t} \right]$$

Para determinar si utilizar para el cálculo de la conductividad térmica efectiva la fórmula completa o la simplificada se realizó un estudio del factor φ en las piezas ensayadas, resultando ser en prácticamente en todos los casos superior a 0,5 (tal y como se indica en la tabla adjunta), por lo que se ha utilizado la ecuación diferencial en su forma completa.

TESIS		FABRICANTE "A"		FABRICANTE "B"	
15 mm	$\varphi = 0,664$	13 mm	$\varphi = 0,435$	15 mm	$\varphi = 0,452$
30 mm	$\varphi = 1,328$	28 mm	$\varphi = 1,947$	25 mm	$\varphi = 1,520$
45 mm	$\varphi = 1,992$	30 mm	$\varphi = 1,824$	40 mm	$\varphi = 1,206$
60 mm	$\varphi = 2,656$	60 mm	$\varphi = 2,009$		

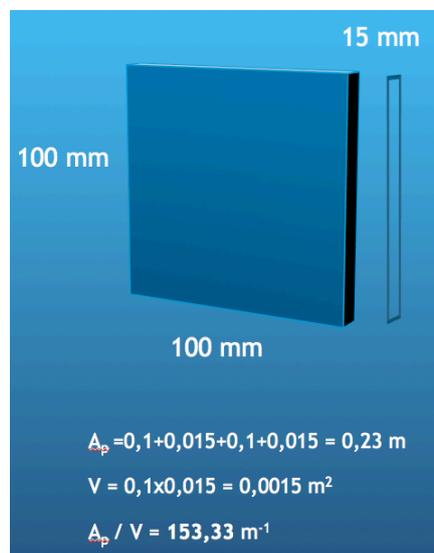
8.1.2 DATOS DE CÁLCULO

Aprovechando la XLS desarrollada previamente e introduciendo en ella los cambios adecuados, podemos despejar el valor de la conductividad térmica en función de las temperaturas del acero obtenidas en los ensayos.

Se han tomado como valores constantes:

A_p : el área de la superficie interna del material de protección frente al fuego, por unidad de longitud del elemento, [m^2/m] calculado como 0,23 en función de las características de la probeta.

V : el volumen del elemento por unidad de longitud [m^3/m] calculado como 0,015 en función de las características de la probeta.



d_p : el espesor del material frente al fuego, [m]. 0,015 m para una placa, 0,030 m para dos placas, 0,045 m para tres placas y 0,060 m para cuatro placas.

ρ_s : la densidad del acero [Kg/m³] tomándose 7.850

$\Delta\theta_{g,t}$: el incremento de la temperatura ambiente en intervalos de 10° .

c_p : el calor específico del material de protección frente al fuego [J/kgK] tomándose 1.700.

ρ_p : la densidad del material de protección frente al fuego [kg/m³] tomándose 800

y como valores variables:

$\Delta\theta_{s,t}$: el incremento de la temperatura del acero obtenido en los ensayos. Se toma la mediana de los valores de revestimiento con 1, 2, 3 y 4 placas .

$\theta_{g,t}$: la temperatura del gas en el instante t.

$\theta_{s,t}$: la temperatura del acero en el instante t.

Δt : el intervalo de tiempo [segundos]. Para obtener este valor se ha tenido que efectuar un proceso de interpolación entre los valores de la temperatura del horno (tomados en intervalos de 30 segundos tal y como especifica la Norma) y los correspondientes a saltos de temperatura de 10°.

Tºhorno fozada	Tiempo min	θ_g [°C]	celda	t inf	t sup	T inf	T sup	t (s)	Δt (s)
20	0	20	4	20	25	0	30	0,00	0
25	0,5	20	4	20	25	0	30	0,00	0
27	1	20	4	20	25	0	30	0,00	0
29	1,5	30	7	29	35	90	120	95,00	95
35	2	40	8	35	47	120	150	132,50	38
47	2,5	50	9	47	58	150	180	158,18	26
58	3	60	10	58	80	180	210	182,73	25
80	3,5	70	10	58	80	180	210	196,36	14
93	4	80	11	80	93	210	240	210,00	14
118	4,5	90	11	80	93	210	240	233,08	23
134	5	100	12	93	118	240	270	248,40	15
158	5,5	110	12	93	118	240	270	260,40	12
173	6	120	13	118	134	270	300	273,75	13
195	6,5	130	13	118	134	270	300	292,50	19
215	7	140	14	134	158	300	330	307,50	15
237	7,5	150	14	134	158	300	330	320,00	13
267	8	160	15	158	173	330	360	334,00	14
285	8,5	170	15	158	173	330	360	354,00	20
316	9	180	16	173	195	360	390	369,55	16
346	9,5	190	16	173	195	360	390	383,18	14
375	10	200	17	195	215	390	420	397,50	14
393	10,5	210	17	195	215	390	420	412,50	15
422	11	220	18	215	237	420	450	426,82	14
449	11,5	230	18	215	237	420	450	440,45	14
460	12	240	19	237	267	450	480	453,00	13
480	12,5	250	19	237	267	450	480	463,00	10
496	13	260	19	237	267	450	480	473,00	10
509	13,5	270	20	267	285	480	510	485,00	12

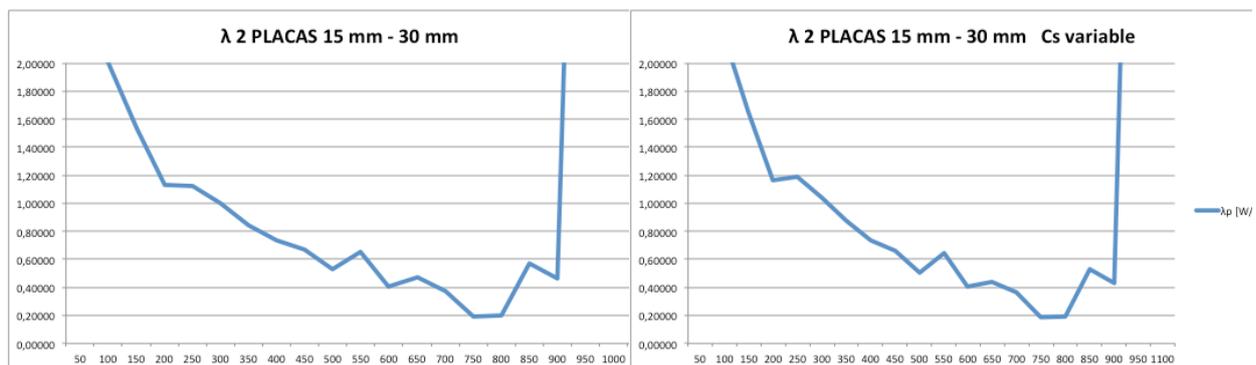
c_s : el calor específico del acero [J/kgK] tomándose 600 tras la comprobación que se detalla a continuación,

El valor del calor específico del acero a altas temperaturas se ha detallado según las siguientes ecuaciones:

$20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 600^{\circ}\text{C}$	$c_a=425+7,73 \times 10^{-1} \theta_a-1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2+2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3$ J/kg°K
$600^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 735^{\circ}\text{C}$	$c_a=666 + \frac{13002}{738 - \theta_a}$ J/kg°K
$735^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 900^{\circ}\text{C}$	$c_a=545 + \frac{17820}{\theta_a - 731}$ J/kg°K
$900^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C}$	$c_a=650$ J/kg°K

Como el valor del calor específico del acero es función de su temperatura, resulta ser un parámetro variable se realizaron pruebas de cálculo para determinar si esta variación tenía una influencia apreciable en el valor final de la conductividad.

A modo de ejemplo, se adjuntan dos gráficas (la de la derecha considerando un valor fijo de 600 y la de la izquierda un valor variable según la tabla):



Pudiéndose observar que los valores son prácticamente iguales, por lo que para el proceso de cálculo se tomó como parámetro del calor específico del acero el valor de 600 que propone el EC-3 para los métodos de cálculo simplificados.

8.1.3 PROCESO DE CÁLCULO

Con los valores anteriormente citados, se procede al cálculo de $\lambda_{p,ef}$, mediante la introducción de la formulación y valores descritos en los anteriores apartados en una hoja de cálculo.

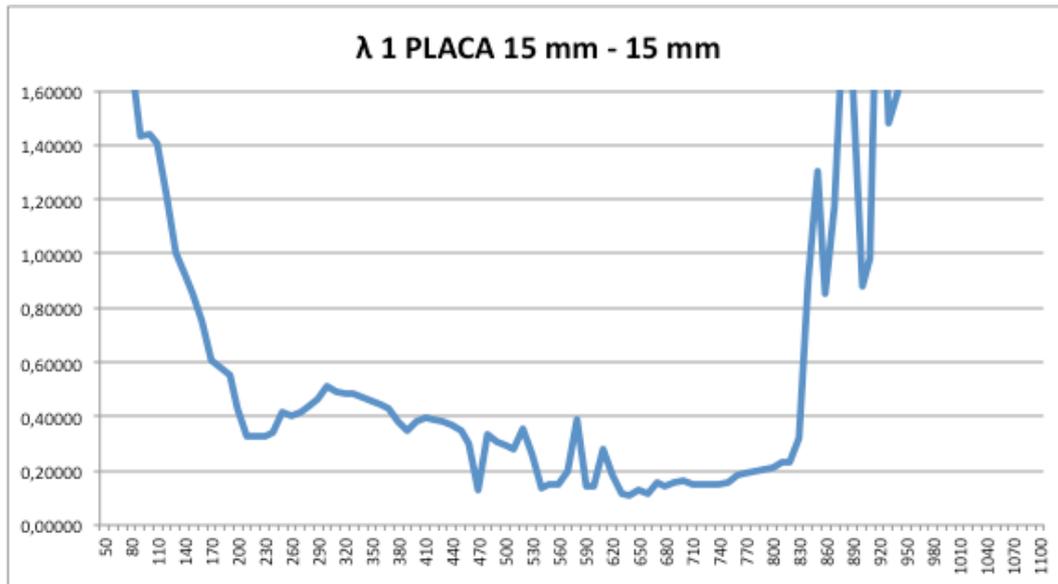
Los valores numéricos pueden consultarse en el Apéndice 5 de la presente Tesis, reflejándose a continuación su representación gráfica.

8.2 RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EFECTIVA

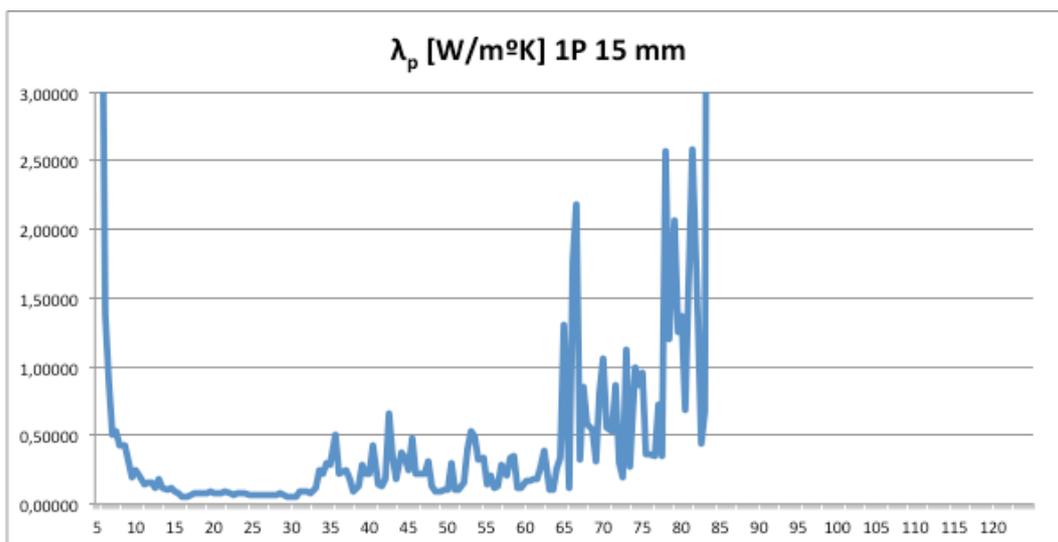
8.2.1 ENSAYOS TESIS

8.2.1.1 PROTECCIÓN CON UNA PLACA DE 15 mm

En la siguiente gráfica se representa en el eje de abscisas la Temperatura en el interior del horno y en el eje de ordenadas los valores de cálculo de la conductividad térmica efectiva.

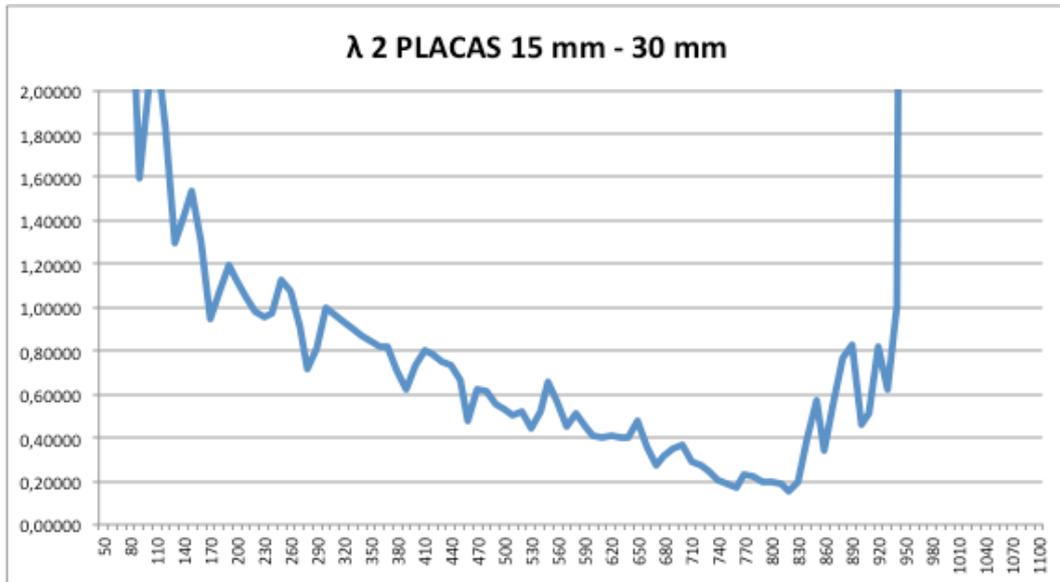


Y en la siguiente gráfica se representa en el eje de abscisas el tiempo en minutos respecto a la curva nominal estándar y en el eje de ordenadas los valores de cálculo de la conductividad térmica efectiva.

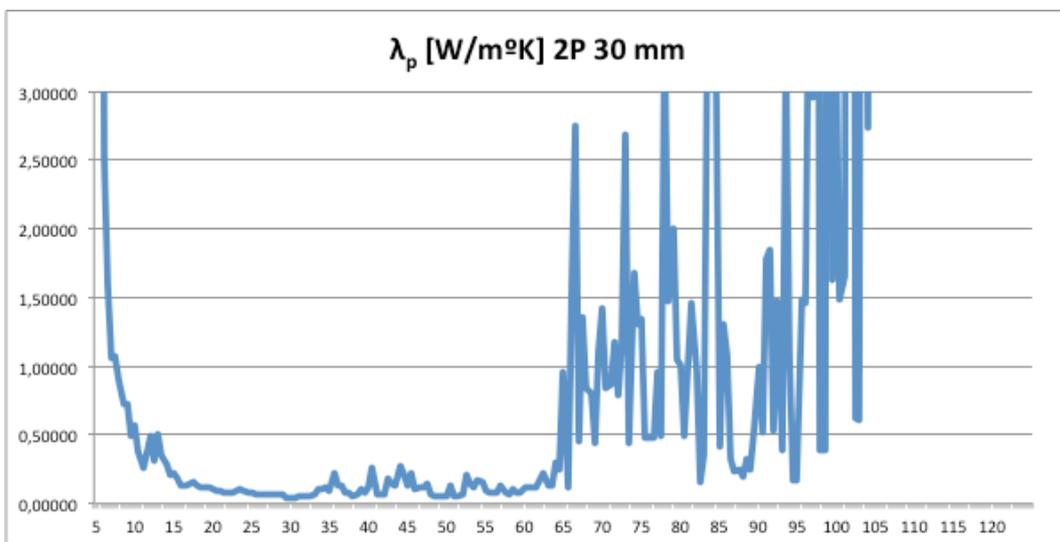


8.2.1.2 PROTECCIÓN CON DOS PLACAS DE 15 mm

En la siguiente gráfica se representa en el eje de abscisas la Temperatura en el interior del horno y en el eje de ordenadas los valores de cálculo de la conductividad térmica efectiva.

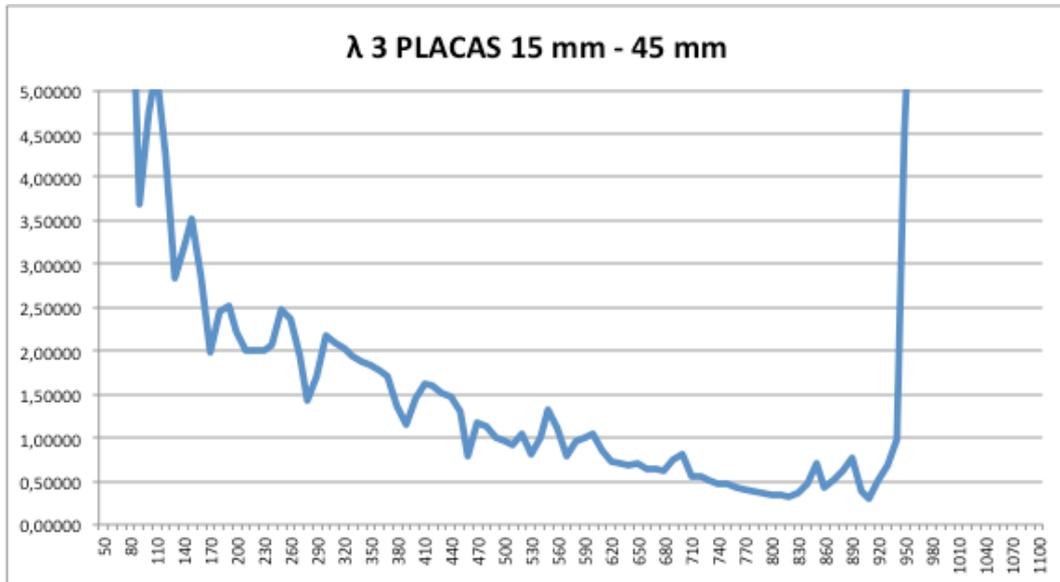


Y en la siguiente gráfica se representa en el eje de abscisas el tiempo en minutos respecto a la curva nominal estándar y en el eje de ordenadas los valores de cálculo de la conductividad térmica efectiva.

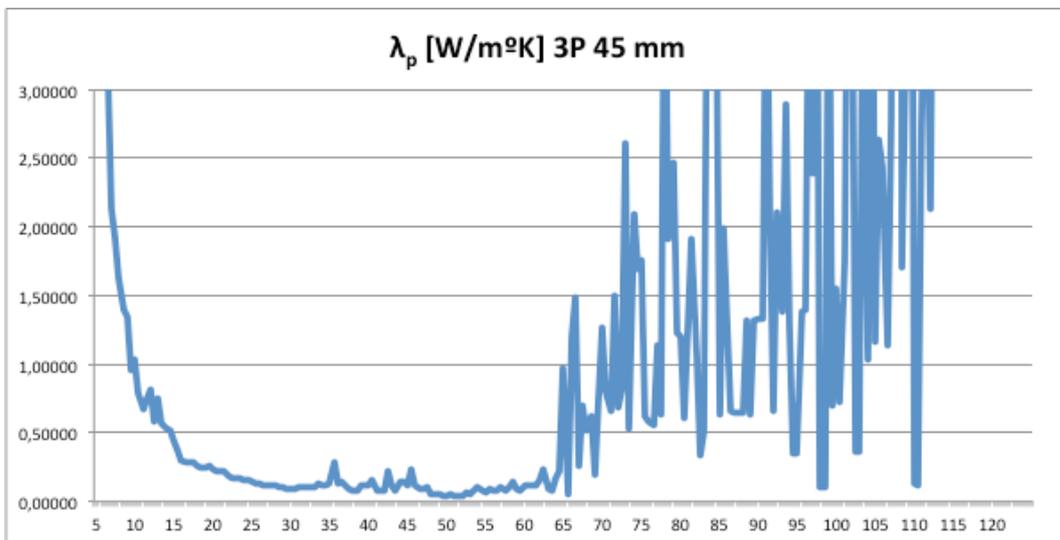


8.2.1.3 PROTECCIÓN CON TRES PLACAS DE 15 mm

En la siguiente gráfica se representa en el eje de abscisas la Temperatura en el interior del horno y en el eje de ordenadas los valores de cálculo de la conductividad térmica efectiva.

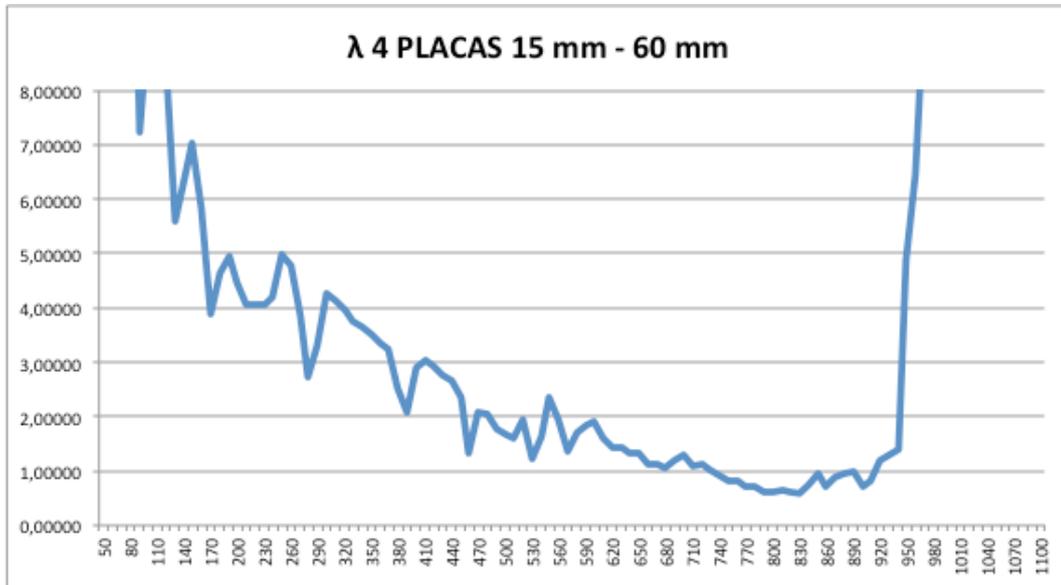


Y en la siguiente gráfica se representa en el eje de abscisas el tiempo en minutos respecto a la curva nominal estándar y en el eje de ordenadas los valores de cálculo de la conductividad térmica efectiva.

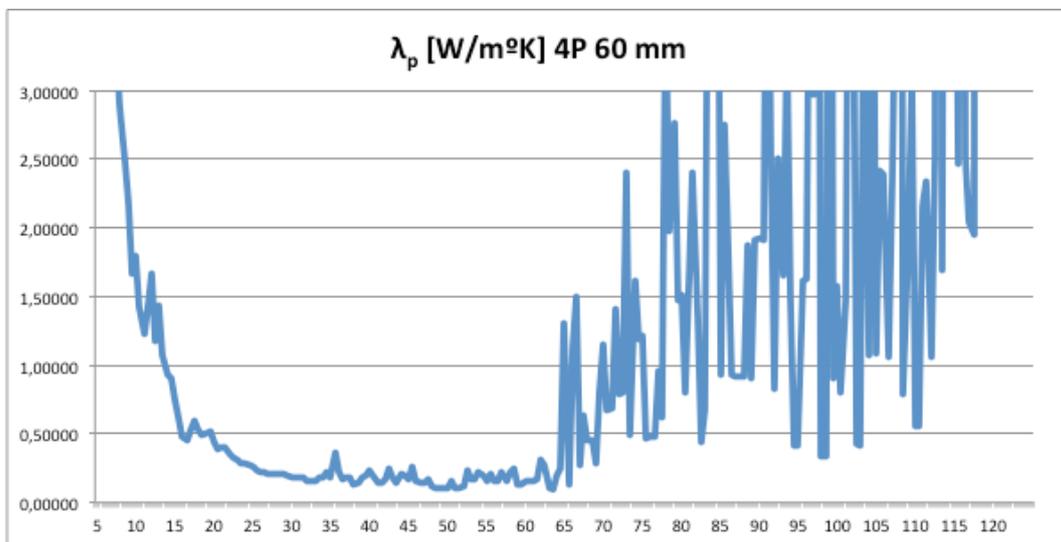


8.2.1.4 PROTECCIÓN CON CUATRO PLACAS DE 15 mm

En la siguiente gráfica se representa en el eje de abscisas la Temperatura en el interior del horno y en el eje de ordenadas los valores de cálculo de la conductividad térmica efectiva.



Y en la siguiente gráfica se representa en el eje de abscisas el tiempo en minutos respecto a la curva nominal estándar y en el eje de ordenadas los valores de cálculo de la conductividad térmica efectiva.



8.2.1.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

8.2.1.5.1 En relación con la temperatura del horno

En las gráficas en las que se representa en el eje de abscisas la Temperatura en el interior del horno y en el eje de ordenadas los valores de cálculo de la conductividad térmica efectiva pueden observarse unas tendencias homogéneas en todas ellas:

- Una fase inicial de descenso acusado hasta los 200° aproximadamente
- Una tendencia a la estabilización en una línea con pendiente menos tendida hasta los 800-950° en función del espesor del material de protección.
- Un brusco ascenso del valor de la conductividad calculada partir de esas temperaturas del gas.

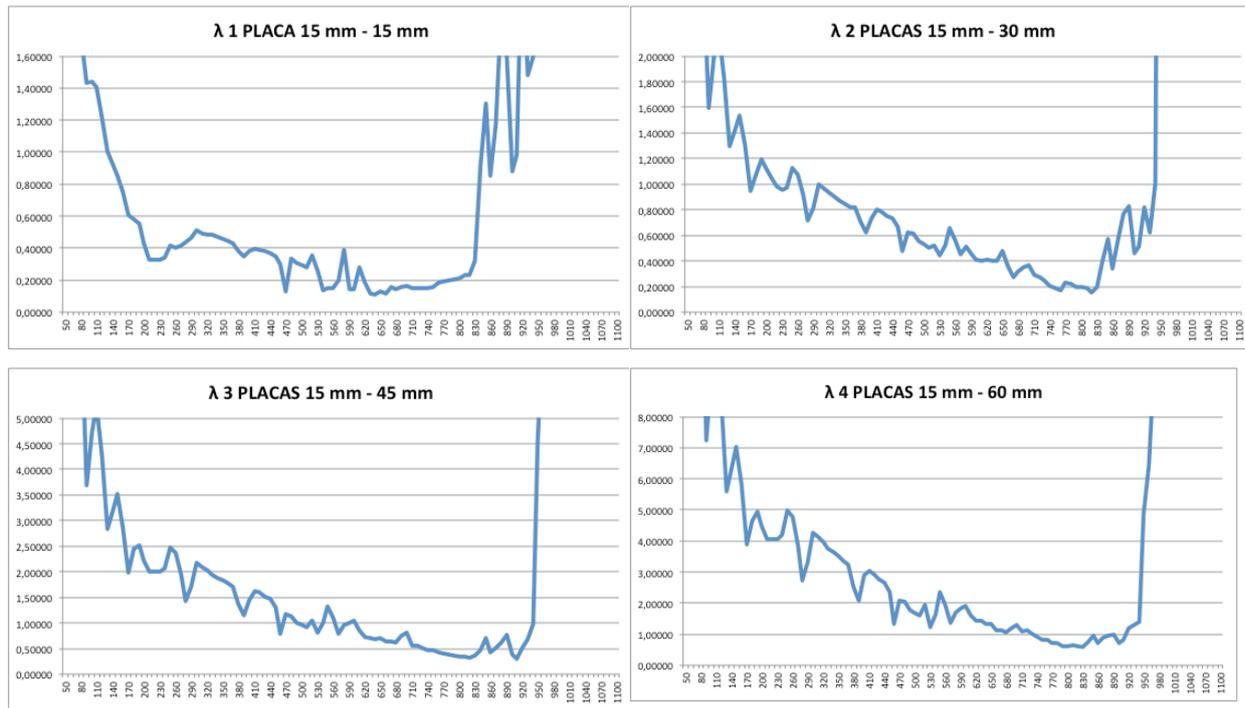


Gráfico VI.22 – Comparativa de los valores de conductividad térmica efectiva calculada para distintos espesores de material de protección en función de la temperatura del gas en el horno.

También se aprecia la existencia de picos irregulares a determinadas temperaturas.

	1 PLACA	2 PLACAS	3 PLACAS	4 PLACAS
90		↓		
130		↓		
170		↓	↓	↓
250			↑	↑
280		↓	↓	↓
390	↓	↓	↓	↓
470	↓	↓	↓	↓
540	↓			↓
560		↑	↑	↑
580	↑			
590		↑	↑	↑
610	↑			
690			↑	↑
900	↑			

Que pueden ser debidos a los cambios que se producen en la estructura interna del yeso, sobre todo entre los 100° y los 400°, como se indica a continuación:

- Entre los 100° y los 120° el sulfato cálcico dihidrato se convierte en semihidrato:
 - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{Q} \leftrightarrow \text{CaSO}_4 \cdot (1/2)\text{H}_2\text{O} + (3/2)\text{H}_2\text{O}$
- Entre los 210° y los 300° el sulfato cálcico semihidrato se convierte en sulfato cálcico anhidro:
 - $\text{CaSO}_4 \cdot (1/2)\text{H}_2\text{O} + \text{Q} \leftrightarrow \text{CaSO}_4 + (3/2)\text{H}_2\text{O}$
- Las coberturas de papel-cartón de las placas se queman sobre los 300°
- Sobre los 400° la estructura molecular de los cristales solubles se reorganiza en una estructura insoluble:
 - $\text{CaSO}_4(\text{sol}) \rightarrow \text{CaSO}_4(\text{insol}) + \text{Q}$

La siguiente gráfica agrupa los valores de conductividad calculada de los cuatro tipos de revestimientos (habiéndose representado únicamente los valores en intervalos de 50° para simplificar las líneas) en función de la temperatura del horno.

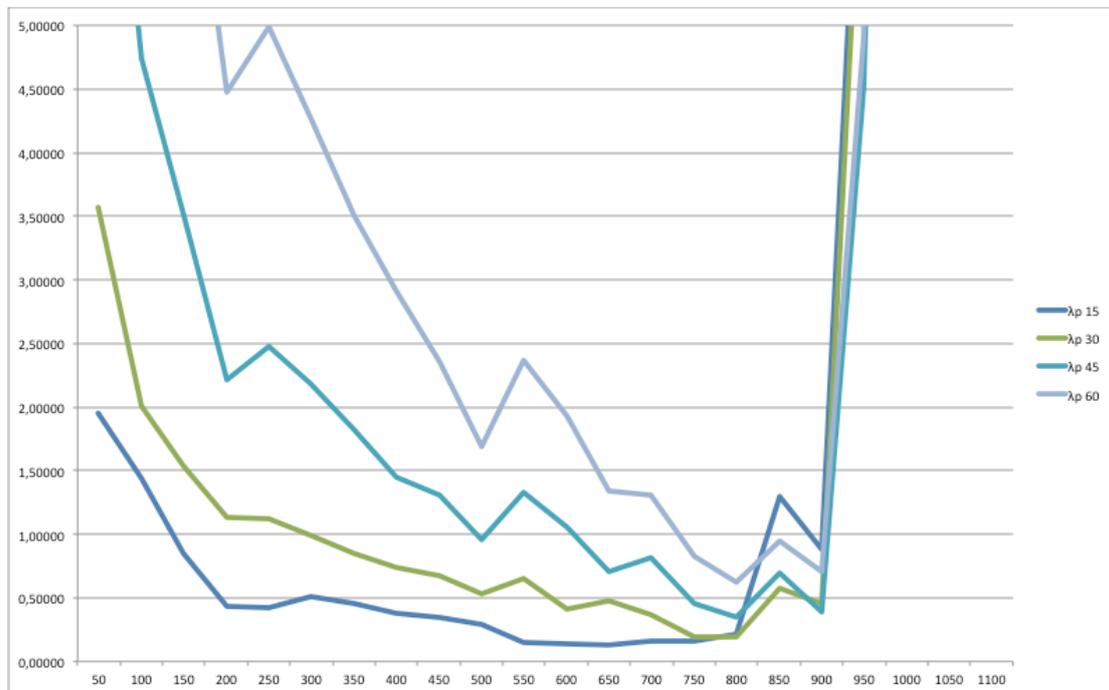


Gráfico VI.23 – Comparativa conjunta de los valores de conductividad térmica efectiva calculada para distintos espesores de material de protección en función de la temperatura del gas en el horno.

8.2.1.5.2 En relación con el tiempo de la curva de incendio estándar

En las gráficas en las que se representa en el eje de abscisas el tiempo en minutos de la curva nominal estándar y en el eje de ordenadas los valores de cálculo de la conductividad térmica efectiva pueden apreciarse, también ciertas tendencias:

- Una fase inicial de descenso acusado hasta los 15-30 minutos en función del espesor de protección.
- Una línea en meseta horizontal y con un valor inferior a la conductividad a temperatura ambiente con pendiente hasta los 30 minutos(en el caso de una placa) y hasta los 60 minutos en el resto de espesores.
- Un brusco ascenso y comportamiento errático del valor a partir de esos tiempos.

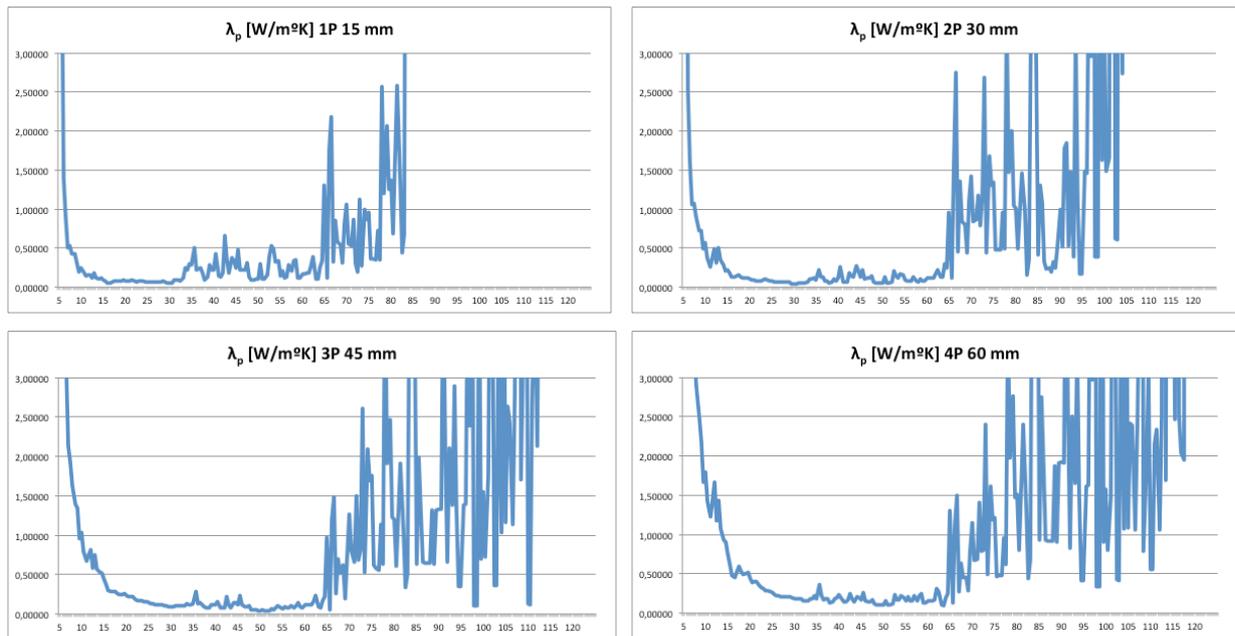


Gráfico VI.24 – Comparativa de los valores de conductividad térmica efectiva calculada para distintos espesores de material de protección en función del tiempo de la curva estándar.

Esto puede interpretarse como un sostenimiento del valor de la conductividad efectiva del material hasta determinados tiempos en los que por rotura o descomposición del mismo no se puede establecer un comportamiento determinado quedando una etapa de “resistencia residual” de la protección.

La siguiente gráfica agrupa los valores de conductividad calculada de los cuatro tipos de revestimientos (habiéndose representado únicamente los valores en intervalos de 50° para simplificar las líneas) en función del tiempo de la curva nominal estándar.

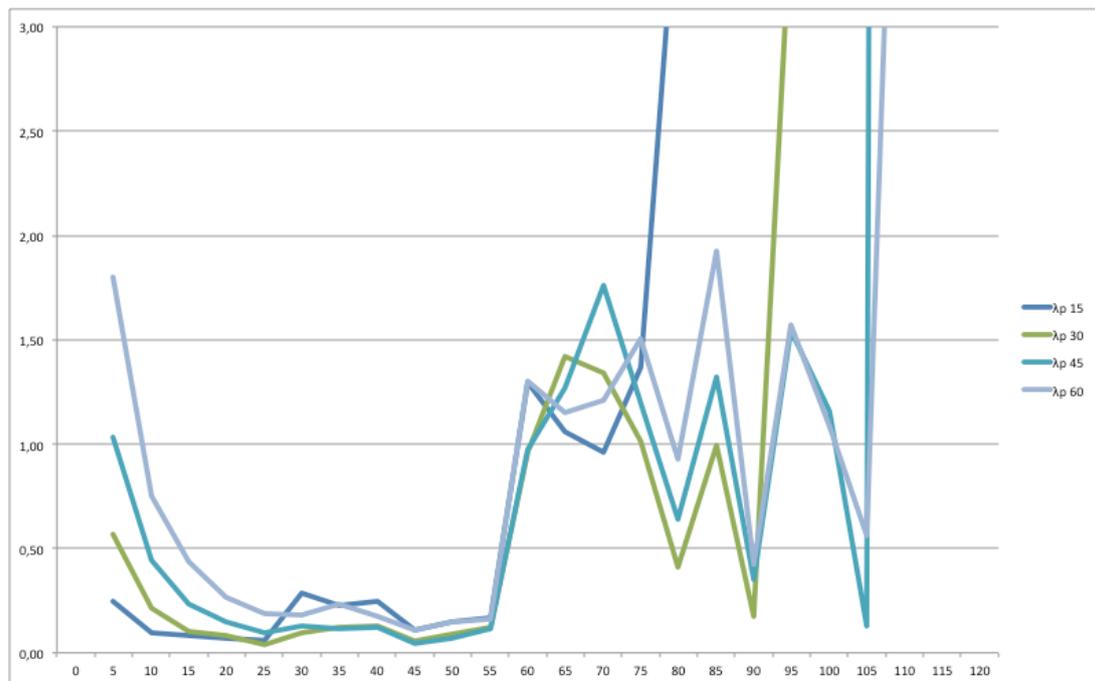
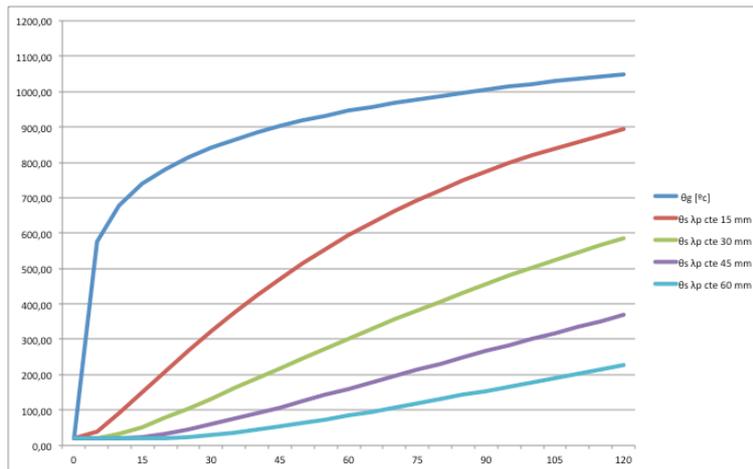


Gráfico VI.25 – Comparativa conjunta de los valores de conductividad térmica efectiva calculada para distintos espesores de material de protección en función del tiempo de la curva estándar.

8.2.1.5.3 Diferencias de la temperatura del acero calculada con conductividad térmica constante o variable

A continuación se va a analizar la diferencia entre la evolución de la temperatura del acero cuando se considera una conductividad térmica efectiva constante (tal y como se incluye en la Instrucción EAE o en el DB SI del CTE) y una conductividad térmica efectiva variable que representa la variación real de la temperatura del acero obtenida en los ensayos.

Antes de iniciar esa comparación, en la presente gráfica se puede apreciar la evolución de la temperatura del acero con $\lambda_{p,ef}$ constante.



Las líneas presentan un tendencia de pendiente casi constante motivado porque los factores que intervienen son, asimismo, parámetros constantes con la excepción de la temperatura del gas (que se obtienen de la ecuación logarítmica de la curva nominal estándar) y el factor de reducción del tiempo de calentamiento (afectado por el número e)

En la siguiente gráfica (correspondiente a la temperatura del acero revestido con una placa de 15 mm) se puede apreciar un comportamiento razonable hasta los 25-30 minutos (en los que el acero alcanza los 200°) comenzando una brusca subida.

Sobre los 55-60 minutos, las divergencias entre las temperaturas del acero calculadas con conductividad constante y variable son muy pronunciadas.

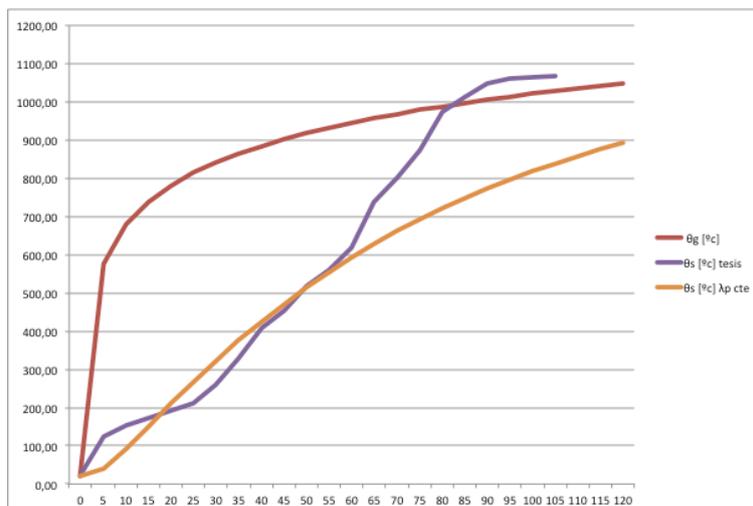


Gráfico VI.26 – Comparativa de los valores de temperatura del acero calculada con conductividad térmica constante o variable para un espesor de revestimiento de 15 mm.

En la siguiente gráfica (correspondiente a la temperatura del acero revestido con dos placas de 15 mm con un total de 30 mm) se puede apreciar un comportamiento razonable hasta los 60 minutos (en los que el acero alcanza los 250°) comenzando una brusca subida.

Sobre los 60 minutos, las divergencias entre las temperaturas del acero calculadas con conductividad constante y variable son muy pronunciadas.

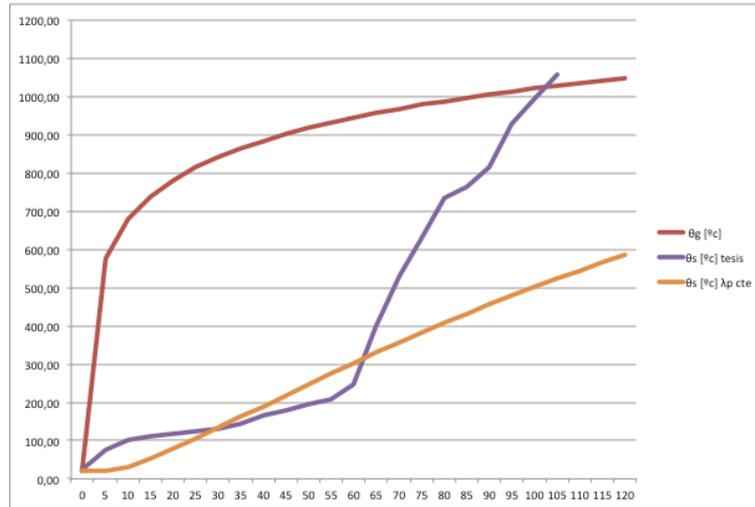


Gráfico VI.27 – Comparativa de los valores de temperatura del acero calculada con conductividad térmica constante o variable para un espesor de revestimiento de 30 mm.

En la siguiente gráfica (correspondiente a la temperatura del acero revestido con tres placas de 15 mm con un total de 45 mm) se puede apreciar un comportamiento razonable hasta los 60 minutos (en los que el acero alcanza los 150°) comenzando una brusca subida.

Sobre los 60 minutos, las divergencias entre las temperaturas del acero calculadas con conductividad constante y variable son muy pronunciadas.

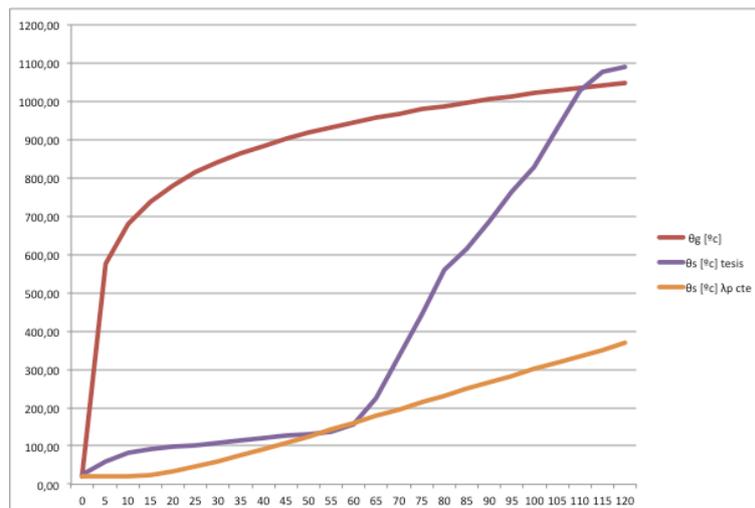


Gráfico VI.28 – Comparativa de los valores de temperatura del acero calculada con conductividad térmica constante o variable para un espesor de revestimiento de 45 mm.

En la siguiente gráfica (correspondiente a la temperatura del **acero revestido con cuatro placas de 15 mm** con un total de 60 mm) se puede apreciar un comportamiento razonable hasta los 60 minutos (en los que el acero alcanza los 150°) comenzando una brusca subida.

Sobre los 60 minutos, las divergencias entre las temperaturas del acero calculadas con conductividad constante y variable son muy pronunciadas.

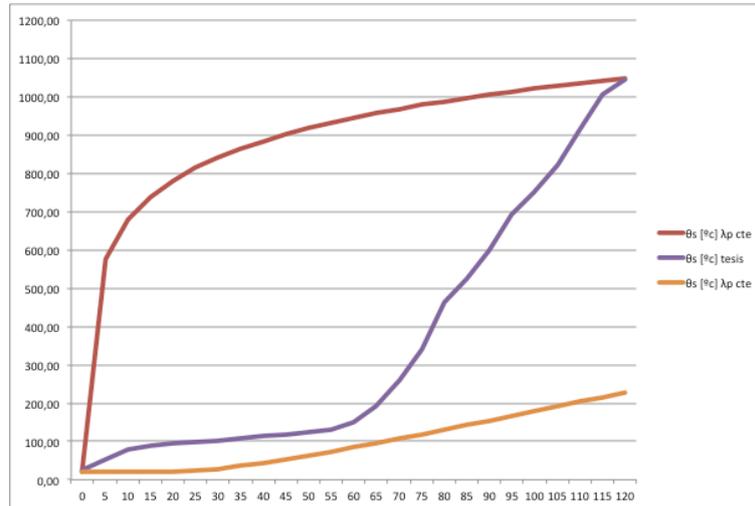


Gráfico VI.29 – Comparativa de los valores de temperatura del acero calculada con conductividad térmica constante o variable para un espesor de revestimiento de 60 mm.

En conclusión, excepto en el caso del revestimiento con una sola placa de 15 mm, que mantiene una evolución razonable hasta el entorno de los 30 minutos, la temperatura del acero presenta un comportamiento lógico (con una ligera pendiente ascendente) hasta los 60 minutos, iniciándose a continuación un brusco ascenso de la temperatura.

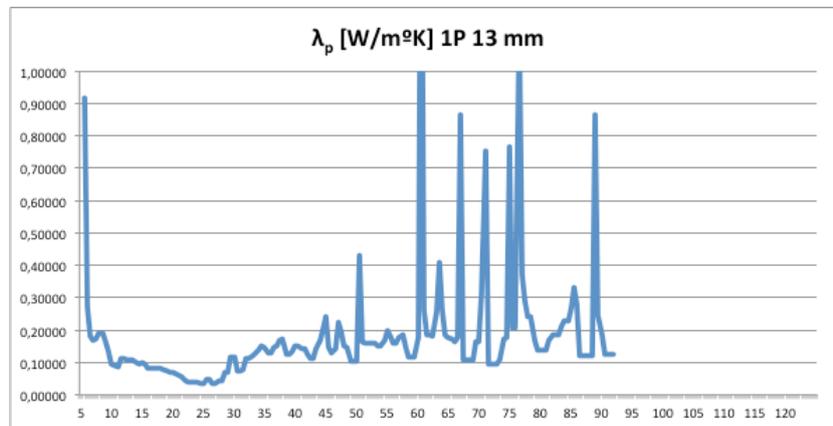
En todos los casos resulta evidente la diferencia que se aprecia en la temperatura del acero al considerar la conductividad térmica del material de protección como un valor constante o variable.

8.2.2 ENSAYOS FABRICANTE “A”

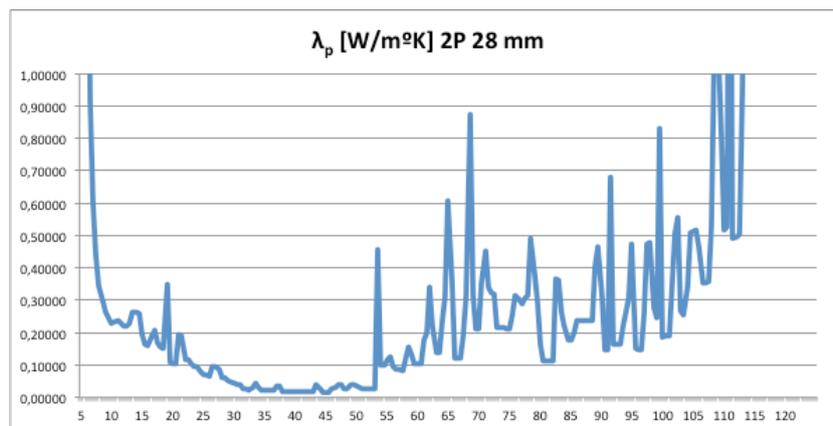
En las siguiente gráficas se representan en el eje de abscisas el tiempo en minutos respecto a la curva nominal estándar y en el eje de ordenadas los valores de cálculo de la conductividad térmica efectiva.

Los valores numéricos pueden consultarse en el Apéndice 5 de la presente Tesis.

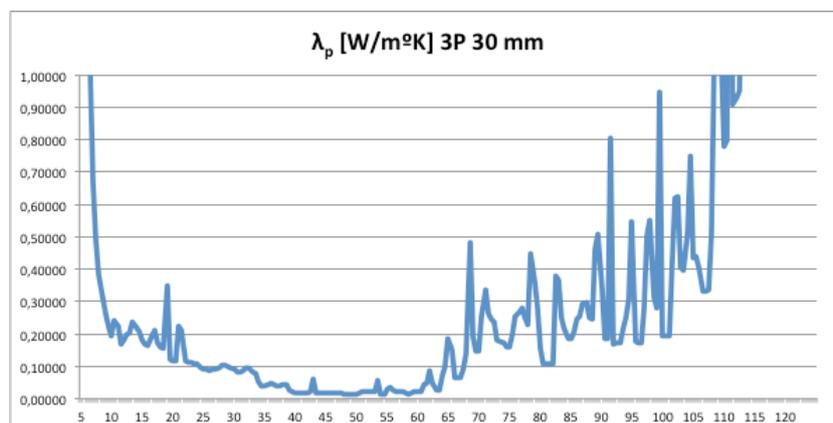
8.2.2.1 PROTECCIÓN CON UNA PLACA DE 13 mm



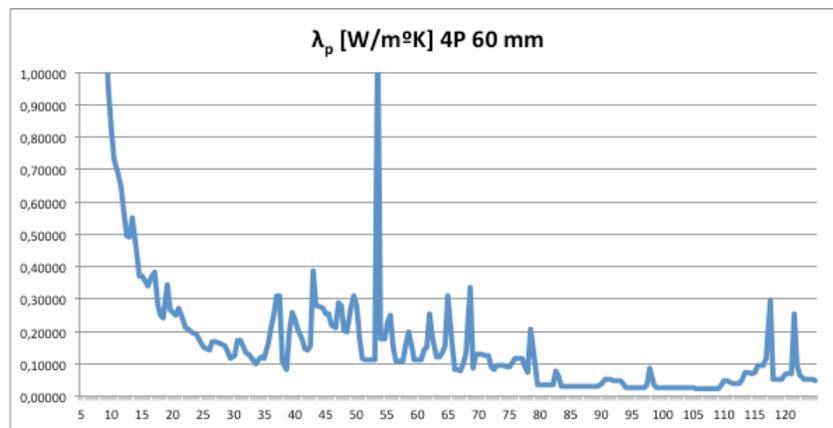
8.2.2.2 PROTECCIÓN CON UNA PLACA DE 13 mm + UNA PLACA DE 15 mm



8.2.2.3 PROTECCIÓN CON DOS PLACAS DE 15 mm



8.2.2.4 PROTECCIÓN CON CUATRO PLACAS DE 15 mm



8.2.2.5 ANÁLISIS COMPARATIVO

La siguiente gráfica representa, comparativamente, los valores de la conductividad térmica calculada según los datos del fabricante “A” observándose una acusada incoherencia en los mismos comparada con los obtenidos a partir de los ensayos realizados en la presente Tesis.

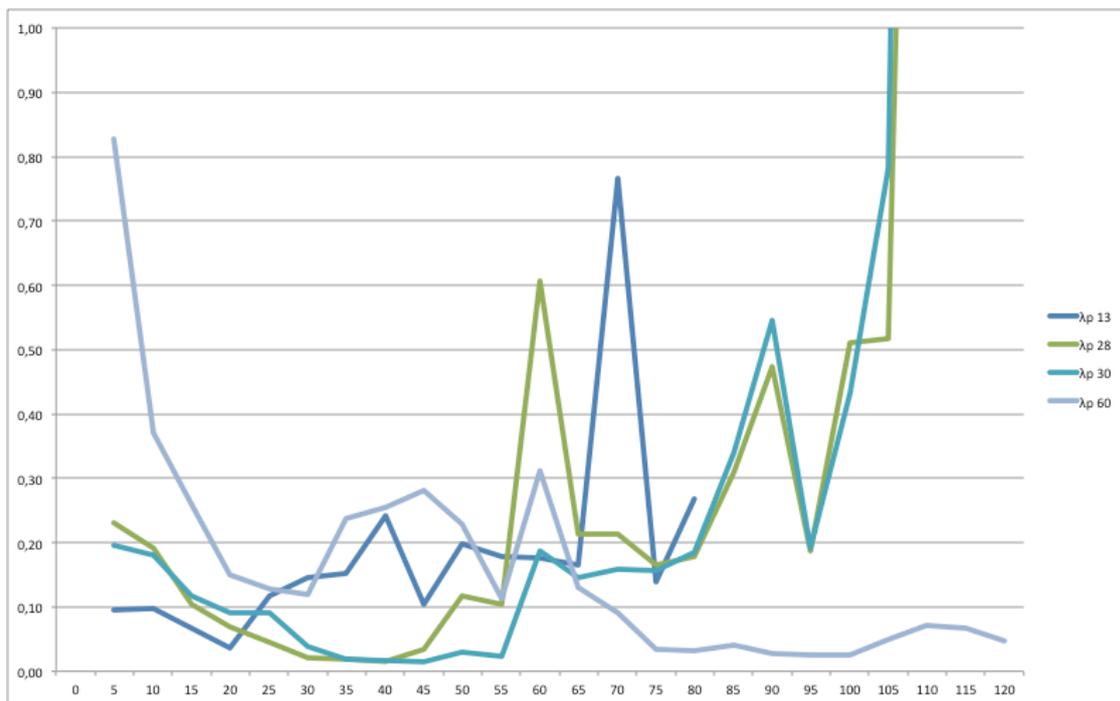


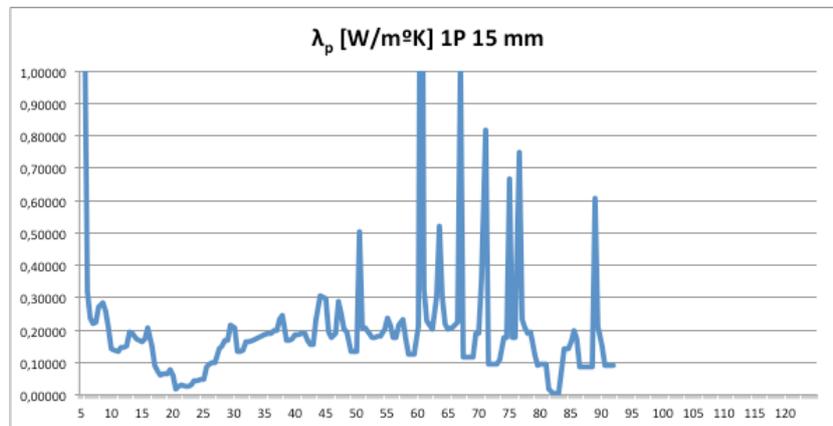
Gráfico VI.30– Comparativa conjunta de los valores de conductividad térmica efectiva calculada para distintos espesores de material de protección del fabricante “A” en función del tiempo de la curva estándar.

8.2.3 ENSAYOS FABRICANTE “B”

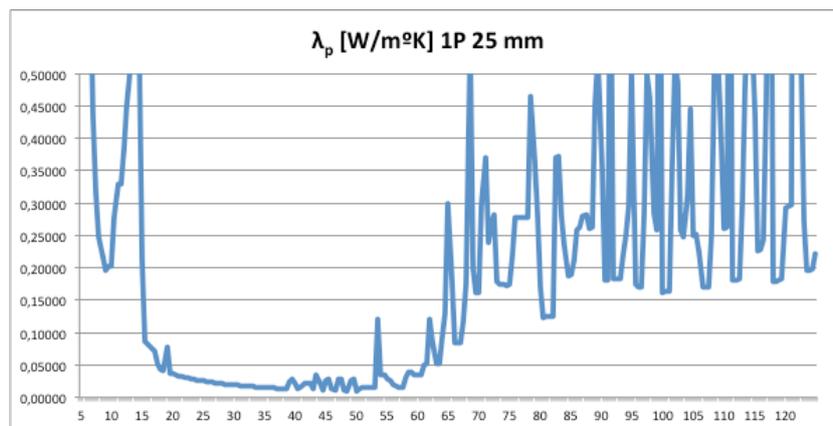
En las siguiente gráficas se representan en el eje de abscisas el tiempo en minutos respecto a la curva nominal estándar y en el eje de ordenadas los valores de cálculo de la conductividad térmica efectiva.

Los valores numéricos pueden consultarse en el Apéndice 5 de la presente Tesis.

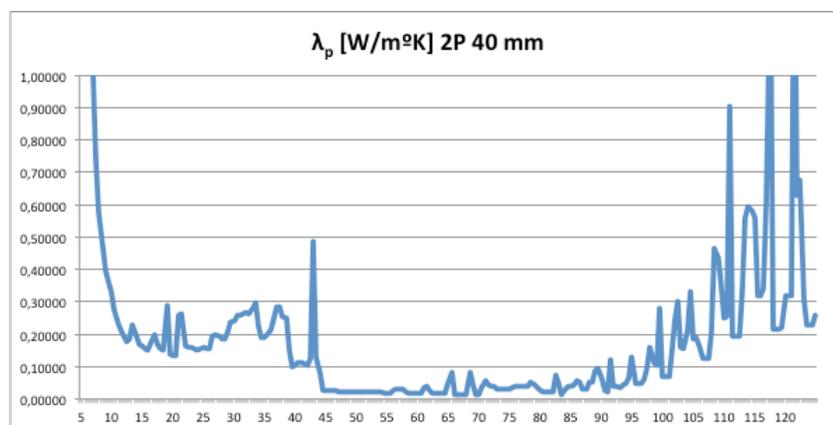
8.2.3.1 PROTECCIÓN CON UNA PLACA DE 15 mm



8.2.3.2 PROTECCIÓN CON UNA PLACA DE 25 mm



8.2.3.3 PROTECCIÓN CON UNA PLACA DE 15 mm + UNA PLACA DE 25 mm



8.2.3.4 ANÁLISIS COMPARATIVO

La siguiente gráfica representa, comparativamente, los valores de la conductividad térmica calculada según los datos del fabricante “B” observándose una acusada incoherencia en los mismos comparada con los obtenidos a partir de los ensayos realizados en la presente Tesis.

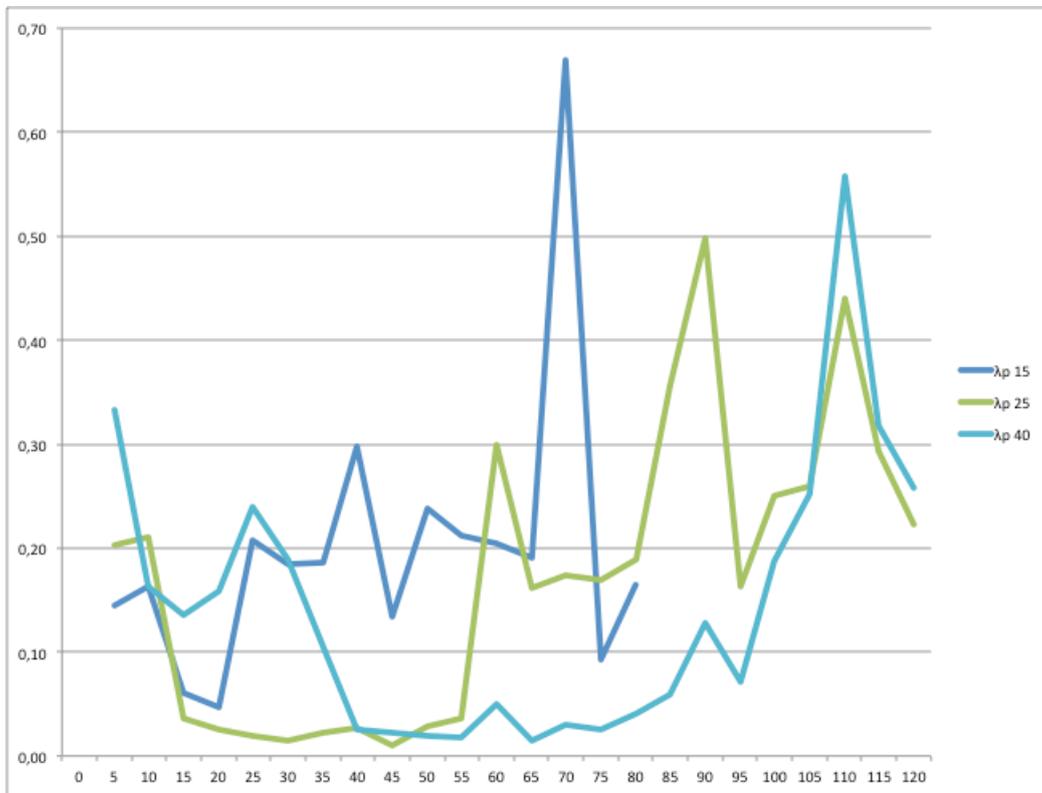


Gráfico VI.31– Comparativa conjunta de los valores de conductividad térmica efectiva calculada para distintos espesores de material de protección del fabricante “B” en función del tiempo de la curva estándar.

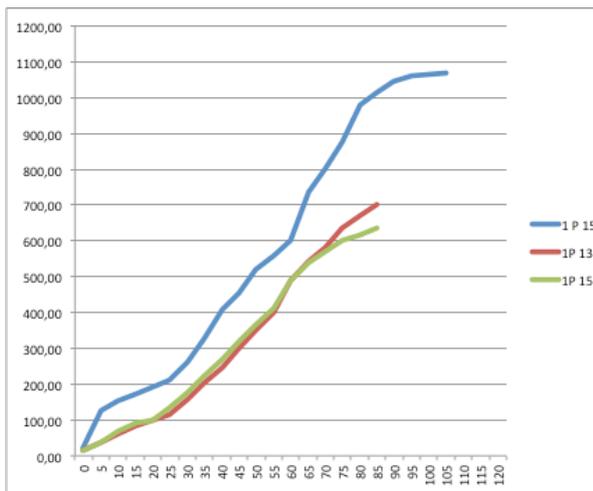
8.3 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE TIPOS DE ENSAYOS

8.3.1 TEMPERATURA DEL ACERO

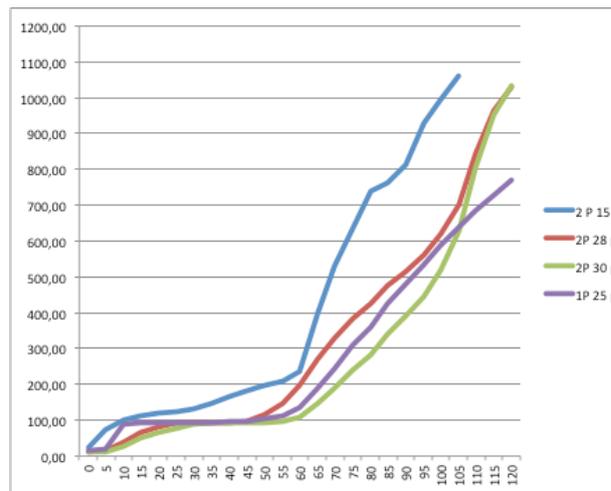
En las siguientes gráficas puede compararse las diferencias entre las temperaturas del acero registradas en función del espesor de revestimiento y los datos obtenidos en los ensayos de la presente Tesis y (color azul) los de los ensayos realizados por los fabricantes (resto de colores).

Puede observarse que existe cierta similitud entre los resultados de los ensayos de los fabricantes y que se apartan, fundamentalmente, de los datos obtenidos en la presente Tesis a partir de los 60 minutos.

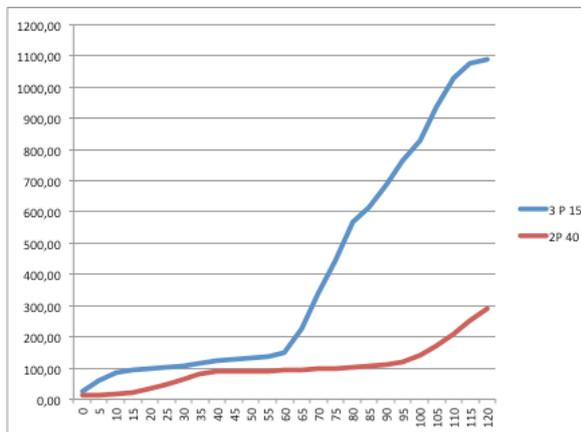
ENTORNO 15 mm



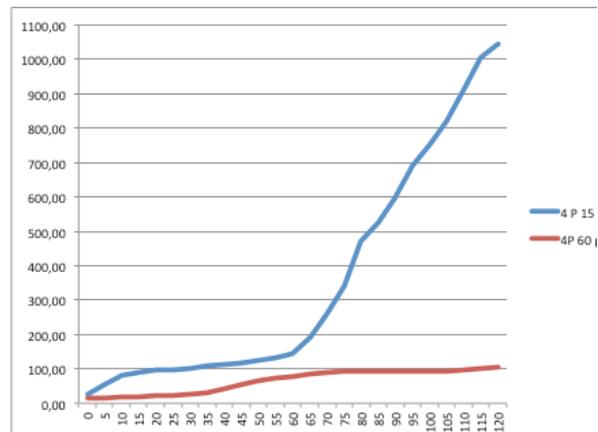
ENTORNO 30 mm



ENTORNO 45 mm



ENTORNO 60 mm

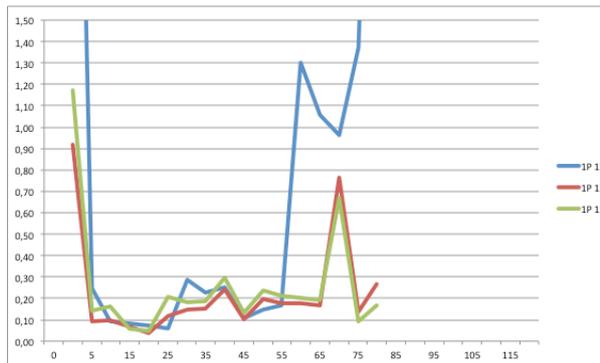


8.3.2 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

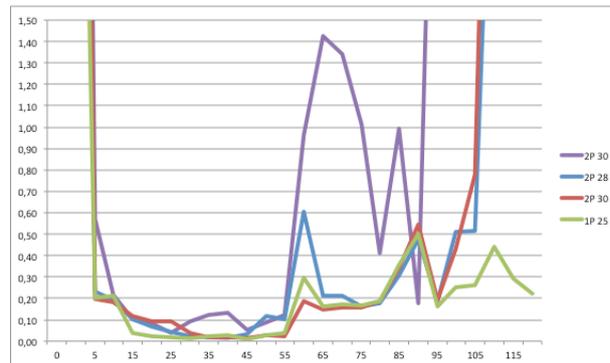
En las siguientes gráficas puede compararse las diferencias entre los valores de conductividad térmica calculada en función del espesor de revestimiento y los datos obtenidos en los ensayos de la presente Tesis y los de los ensayos realizados por los fabricantes.

Puede observarse que existe cierta similitud entre los resultados de los ensayos de los fabricantes y que se apartan, fundamentalmente, de los datos obtenidos en la presente Tesis a partir de los 60 minutos.

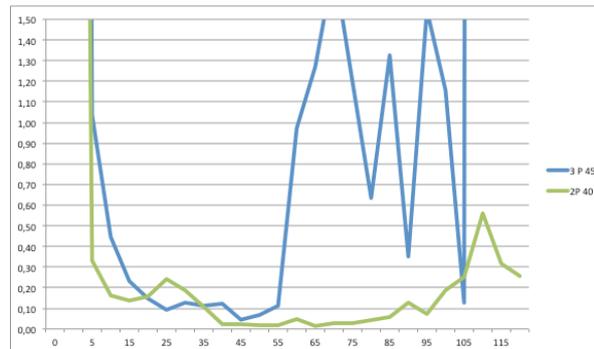
ENTORNO 15 mm



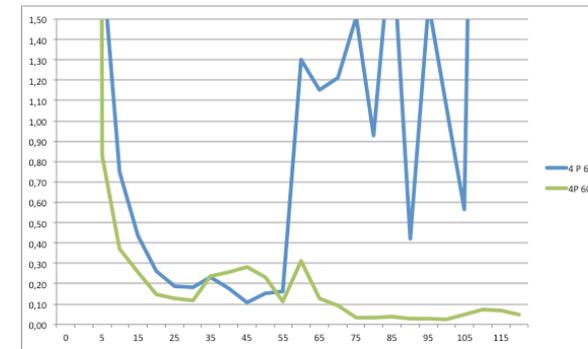
ENTORNO 30 mm



ENTORNO 45 mm



ENTORNO 60 mm



9 PROPUESTA DE VALORES PARA LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EFECTIVA

Como se ha visto anteriormente, existe una apreciable diferencia en el valor de la temperatura del acero entre considerar el valor de la conductividad térmica efectiva del material de protección como un valor constante (como propone la reglamentación nacional) o variable (como propone la presente Tesis).

En el presente apartado de la Tesis se establece un procedimiento para determinar unos valores de la conductividad térmica efectiva que se puedan ajustar a una formulación matemática para su utilización en la ecuación diferencial.

9.1 CORRECCIÓN DEL VALOR

9.1.1 FUNDAMENTO

En la tabla que se presenta a continuación se puede observarse que, al aplicar en la ecuación diferencial los valores de conductividad térmica efectiva (tercera columna) obtenidos a partir de la temperatura del acero registrada en los ensayos (segunda columna) se obtienen unos valores de temperatura del acero (cuarta columna) que difieren de los realmente registrados (segunda columna)

t (min)	θ_s [°C] ensayo	$\lambda_{p,ef}$ [W/m²K] fi	θ_s [°C] $\lambda_{p,ef}$ var
0	22,12		22,12
0,5	53,34	4,3126	61,00
1	68,00	1,3819	79,20
1,5	79,61	0,8888	93,63
2	86,41	0,5011	102,20
2,5	95,01	0,5303	112,86
3	102,34	0,4276	121,96
3,5	110,30	0,4297	131,80
4	115,99	0,3080	138,88
4,5	119,51	0,1996	143,29
5	124,36	0,2448	149,23

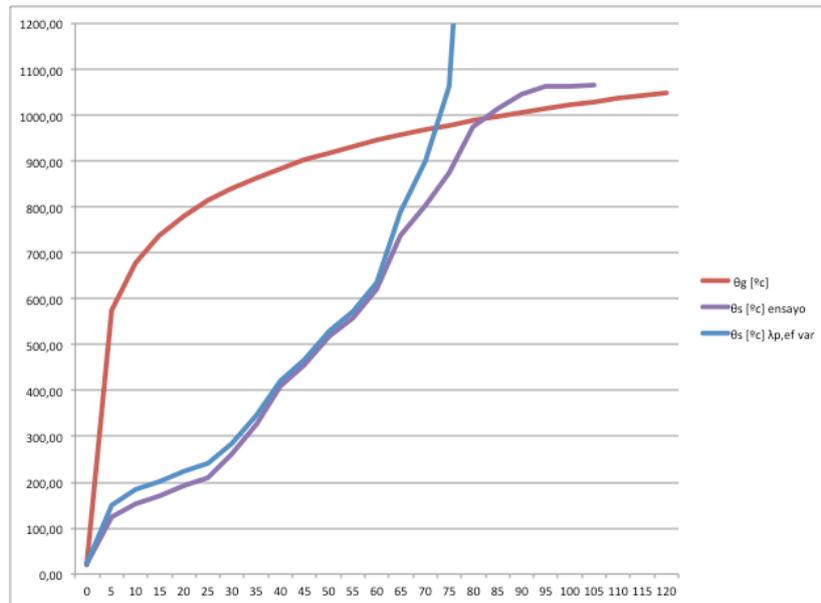
Esto es debido a las diferencias en el cálculo que se producen al aplicar el incremento de 30 segundos fijado en un sentido u otro de la ecuación.

$$\Delta\theta_{s,t} = \frac{\lambda_p}{d_p c_s \rho_s} \frac{A_p}{V} \left(\frac{1}{1 + \phi/3} \right) (\theta_{g,t} - \theta_{s,t}) \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \geq 0$$



$$\lambda_p = \left[\Delta\theta_{s,t} + (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \right] \left[d_p c_s \rho_s \frac{V}{A_p} \right] \left[1 + \phi/3 \right] \left[\frac{1}{(\theta_{g,t} - \theta_{s,t}) \Delta t} \right]$$

En la siguiente gráfica se puede apreciar la diferencia entre los valores de temperatura del acero registrada en los ensayos (magenta) y los obtenidos aplicando la conductividad térmica efectiva calculada mediante despeje de su valor en la ecuación diferencial (color azul).



Para adecuar los valores a los reales se ha efectuado una corrección matemática (quinta columna) consistente en aplicar un coeficiente corrector al valor calculado de modo que, al aplicar los valores de conductividad térmica efectiva, las temperaturas del acero calculadas (sexta columna) coincidan con las registradas (segunda columna)

t (min)	θ_s [°C] ensayo	$\lambda_{p,ef}$ [W/m²K] fi	θ_s [°C] $\lambda_{p,ef}$ var	$\lambda_{p,ef}$ corr	θ_s [°C] $\lambda_{p,ef}$ var corr
0	22,12		22,12		22,12
0,5	53,34	4,3126	61,00	3,7164	53,34
1	68,00	1,3819	79,20	1,1804	68,00
1,5	79,61	0,8888	93,63	0,7509	79,61
2	86,41	0,5011	102,20	0,4230	86,41
2,5	95,01	0,5303	112,86	0,4451	95,01
3	102,34	0,4276	121,96	0,3582	102,34
3,5	110,30	0,4297	131,80	0,3585	110,30
4	115,99	0,3080	138,88	0,2574	115,99
4,5	119,51	0,1996	143,29	0,1678	119,51
5	124,36	0,2448	149,23	0,2065	124,36

9.1.2 VALORES CORREGIDOS

Tras las correspondientes operaciones, se resumen en la siguiente Tabla los valores corregidos para los diferentes espesores de material de protección analizados en la presente Tesis.

Tabla IX.1 – Valores numéricos de conductividad térmica efectiva corregida para distintos espesores de material de protección.

t (min)	$\lambda_{p,ef}$			
	15 mm	30 mm	45 mm	60 mm
0				
0,5	3,72	7,96	18,04	36,37
1	1,18	2,37	5,16	10,09
1,5	0,75	1,48	3,02	5,71
2	0,42	0,99	2,05	3,83
2,5	0,45	1,00	1,84	3,25
3	0,36	0,83	1,55	2,77
3,5	0,36	0,66	1,32	2,37
4	0,26	0,66	1,26	2,07
4,5	0,17	0,44	0,89	1,58
5	0,21	0,51	0,96	1,69
5,5	0,17	0,33	0,73	1,33
6	0,12	0,24	0,62	1,15
6,5	0,13	0,34	0,69	1,34
7	0,13	0,44	0,75	1,54
7,5	0,11	0,28	0,53	1,08
8	0,15	0,45	0,69	1,31
8,5	0,11	0,32	0,52	0,98
9	0,10	0,26	0,48	0,85
9,5	0,10	0,19	0,47	0,83
10	0,08	0,19	0,40	0,68
10,5	0,07	0,17	0,34	0,57
11	0,05	0,12	0,27	0,43
11,5	0,05	0,12	0,26	0,41
12	0,06	0,13	0,26	0,48
12,5	0,07	0,14	0,26	0,54
13	0,07	0,12	0,23	0,48
13,5	0,07	0,11	0,22	0,45
14	0,08	0,11	0,23	0,45
14,5	0,09	0,11	0,24	0,47
15	0,08	0,09	0,21	0,39
15,5	0,07	0,09	0,20	0,36
16	0,08	0,08	0,20	0,36
16,5	0,09	0,07	0,20	0,37
17	0,08	0,08	0,17	0,32
17,5	0,07	0,08	0,16	0,29
18	0,07	0,08	0,15	0,28
18,5	0,08	0,09	0,15	0,26
19	0,08	0,09	0,15	0,25

19,5	0,07	0,08	0,14	0,24
20	0,07	0,08	0,14	0,24
20,5	0,07	0,07	0,12	0,21
21	0,07	0,07	0,12	0,20
21,5	0,07	0,07	0,11	0,19
22	0,07	0,07	0,11	0,19
22,5	0,07	0,06	0,11	0,19
23	0,08	0,06	0,10	0,19
23,5	0,08	0,06	0,10	0,19
24	0,08	0,06	0,10	0,18
24,5	0,07	0,04	0,09	0,17
25	0,07	0,04	0,09	0,17
25,5	0,07	0,04	0,09	0,17
26	0,10	0,06	0,10	0,17
26,5	0,11	0,06	0,10	0,17
27	0,10	0,05	0,10	0,15
27,5	0,09	0,05	0,09	0,14
28	0,14	0,06	0,10	0,14
28,5	0,28	0,11	0,12	0,16
29	0,26	0,10	0,11	0,17
29,5	0,34	0,11	0,12	0,20
30	0,32	0,09	0,12	0,17
30,5	0,56	0,22	0,27	0,33
31	0,25	0,13	0,13	0,20
31,5	0,26	0,13	0,13	0,16
32	0,27	0,09	0,12	0,17
32,5	0,20	0,08	0,09	0,16
33	0,10	0,05	0,07	0,12
33,5	0,14	0,07	0,08	0,13
34	0,31	0,10	0,11	0,17
34,5	0,24	0,08	0,11	0,18
35	0,25	0,12	0,11	0,21
35,5	0,46	0,27	0,15	0,18
36	0,16	0,07	0,07	0,13
36,5	0,15	0,06	0,07	0,13
37	0,20	0,07	0,08	0,16
37,5	0,70	0,19	0,21	0,23
38	0,37	0,14	0,11	0,17
38,5	0,20	0,14	0,08	0,13
39	0,39	0,28	0,14	0,19
39,5	0,35	0,21	0,14	0,18
40	0,26	0,14	0,12	0,16
40,5	0,48	0,22	0,22	0,24
41	0,23	0,11	0,12	0,14
41,5	0,22	0,12	0,09	0,13
42	0,22	0,12	0,09	0,13

42,5	0,32	0,14	0,11	0,15
43	0,13	0,07	0,06	0,11
43,5	0,09	0,05	0,05	0,09
44	0,09	0,05	0,05	0,09
44,5	0,11	0,06	0,04	0,10
45	0,11	0,06	0,04	0,10
45,5	0,30	0,13	0,05	0,15
46	0,11	0,05	0,04	0,10
46,5	0,11	0,05	0,04	0,10
47	0,16	0,07	0,04	0,11
47,5	0,42	0,22	0,07	0,22
48	0,53	0,15	0,05	0,15
48,5	0,49	0,13	0,08	0,15
49	0,32	0,18	0,11	0,21
49,5	0,33	0,16	0,08	0,18
50	0,14	0,09	0,07	0,14
50,5	0,21	0,09	0,10	0,19
51	0,12	0,08	0,08	0,14
51,5	0,13	0,08	0,08	0,15
52	0,28	0,14	0,11	0,21
52,5	0,20	0,09	0,08	0,15
53	0,33	0,08	0,10	0,21
53,5	0,35	0,12	0,15	0,23
54	0,11	0,09	0,09	0,12
54,5	0,11	0,09	0,09	0,12
55	0,17	0,13	0,11	0,15
55,5	0,17	0,13	0,12	0,15
56	0,18	0,13	0,12	0,15
56,5	0,18	0,13	0,12	0,15
57	0,27	0,18	0,16	0,29
57,5	0,39	0,25	0,23	0,25
58	0,10	0,14	0,09	0,09
58,5	0,10	0,14	0,09	0,09
59	0,26	0,34	0,18	0,18
59,5	0,33	0,28	0,22	0,23
60	1,20	1,04	0,98	1,20
60,5	0,10	0,13	0,06	0,12
61	1,52	1,69	1,20	1,04
61,5	1,70	2,73	1,45	1,36
62	0,25	0,45	0,25	0,24
62,5	0,64	1,31	0,68	0,57
63	0,43	0,80	0,50	0,41
63,5	0,40	0,75	0,60	0,41
64	0,22	0,41	0,19	0,25
64,5	0,57	1,02	0,71	0,73
65	0,71	1,27	1,19	1,02

65,5	0,37	0,74	0,75	0,59
66	0,35	0,75	0,62	0,61
66,5	0,54	0,99	1,36	1,23
67	0,19	0,66	0,62	0,69
67,5	0,12	0,96	0,73	0,69
68	0,68	2,09	2,28	2,04
68,5	0,17	0,34	0,46	0,42
69	0,58	1,26	1,77	1,35
69,5	0,48	0,95	1,41	0,99
70	0,52	0,96	1,44	1,00
70,5	0,19	0,34	0,51	0,38
71	0,20	0,34	0,47	0,39
71,5	0,18	0,34	0,45	0,40
72	0,37	0,66	0,91	0,78
72,5	0,18	0,34	0,50	0,51
73	1,18	2,21	3,29	2,92
73,5	0,53	0,92	1,40	1,53
74	0,83	1,20	1,76	2,10
74,5	0,48	0,62	0,87	1,11
75	0,50	0,59	0,83	1,12
75,5	0,24	0,29	0,42	0,59
76	0,55	0,56	0,86	1,15
76,5	0,77	0,81	1,28	1,72
77	0,39	0,53	0,72	0,98
77,5	0,12	0,08	0,22	0,32
78	0,19	0,19	0,33	0,48
78,5	1,69	1,79	2,77	3,53
79	1,65	2,03	2,90	4,51
79,5	1,07	1,31	2,10	3,19
80	0,19	0,18	0,36	0,57
80,5	0,58	0,56	1,10	1,65
81	0,39	0,46	0,72	1,11
81,5	0,19	0,14	0,35	0,55
82	0,19	0,10	0,35	0,54
82,5	0,19	0,10	0,35	0,53
83	0,18	0,08	0,34	0,53
83,5	0,38	0,14	0,70	1,07
84	0,18	0,11	0,33	0,52
84,5	0,34	0,22	0,68	1,08
85	0,27	0,41	0,68	1,07
85,5	0,28	0,21	0,67	1,05
86	1,03	0,71	2,03	2,84
86,5	0,47	0,71	0,98	1,29
87	0,12	0,20	0,31	0,42
87,5	0,34	0,55	0,96	1,26
88	0,11	0,14	0,62	0,82

88,5	0,16	1,16	1,26	1,63
89	0,07	0,37	0,55	0,71
89,5	0,03	0,06	0,15	0,20
90	0,03	0,06	0,15	0,20
90,5	0,14	0,50	0,59	0,77
91	0,13	0,48	0,59	0,77
91,5	0,31	1,26	1,72	2,29
92	0,10	0,86	0,93	1,31
92,5	0,31	2,23	1,91	3,35
93	0,01	0,09	0,04	0,14
93,5	0,01	0,09	0,04	0,14
94	0,24	3,00	1,59	3,58
94,5	0,02	0,28	0,24	0,34
95	0,02	0,57	0,53	0,60
95,5	0,02	0,24	0,25	0,30
96	0,02	0,26	0,59	0,55
96,5	0,03	1,66	1,68	2,07
97	0,03	1,16	1,30	1,63
97,5	0,01	0,06	0,11	0,15
98	0,01	0,06	0,11	0,15
98,5	0,03	0,79	1,06	1,30
99	0,01	0,21	0,29	0,36
99,5	0,03	0,99	1,41	1,64
100	0,01	0,21	0,31	0,35
100,5	0,02	0,32	0,68	0,76
101	0,01	0,25	0,62	0,74
101,5	0,01	0,16	0,29	0,33
102	0,02	0,69	0,67	0,71
102,5	0,05	1,15	1,95	1,17
103	0,12	2,24	5,83	4,60
103,5	0,01	0,11	0,25	0,20
104	0,03	0,25	0,54	0,48
104,5	0,03	0,42	0,31	0,76
105	0,03	0,19	0,12	0,14
105,5	0,03		0,12	0,14
106			0,17	0,53
106,5			0,57	0,56
107			0,27	0,25
107,5			0,63	0,59
108			6,07	6,54
108,5			0,23	0,30
109			1,09	1,63
109,5			1,03	1,74
110			0,47	0,83
110,5			0,19	0,36
111			0,92	1,76

111,5			0,18	0,32
112			0,17	0,26
112,5			0,17	0,25
113			2,06	5,00
113,5			0,12	0,32
114			0,98	2,93
114,5			0,49	1,49
115			0,09	0,27
115,5			0,20	0,64
116			0,09	0,27
116,5			0,34	1,19
117			0,28	1,32
117,5			0,05	0,23
118			0,05	0,22
118,5			0,17	0,65
119			0,04	0,12
119,5			0,23	0,72
120			0,15	0,43

Cuya representación gráfica es la siguiente:

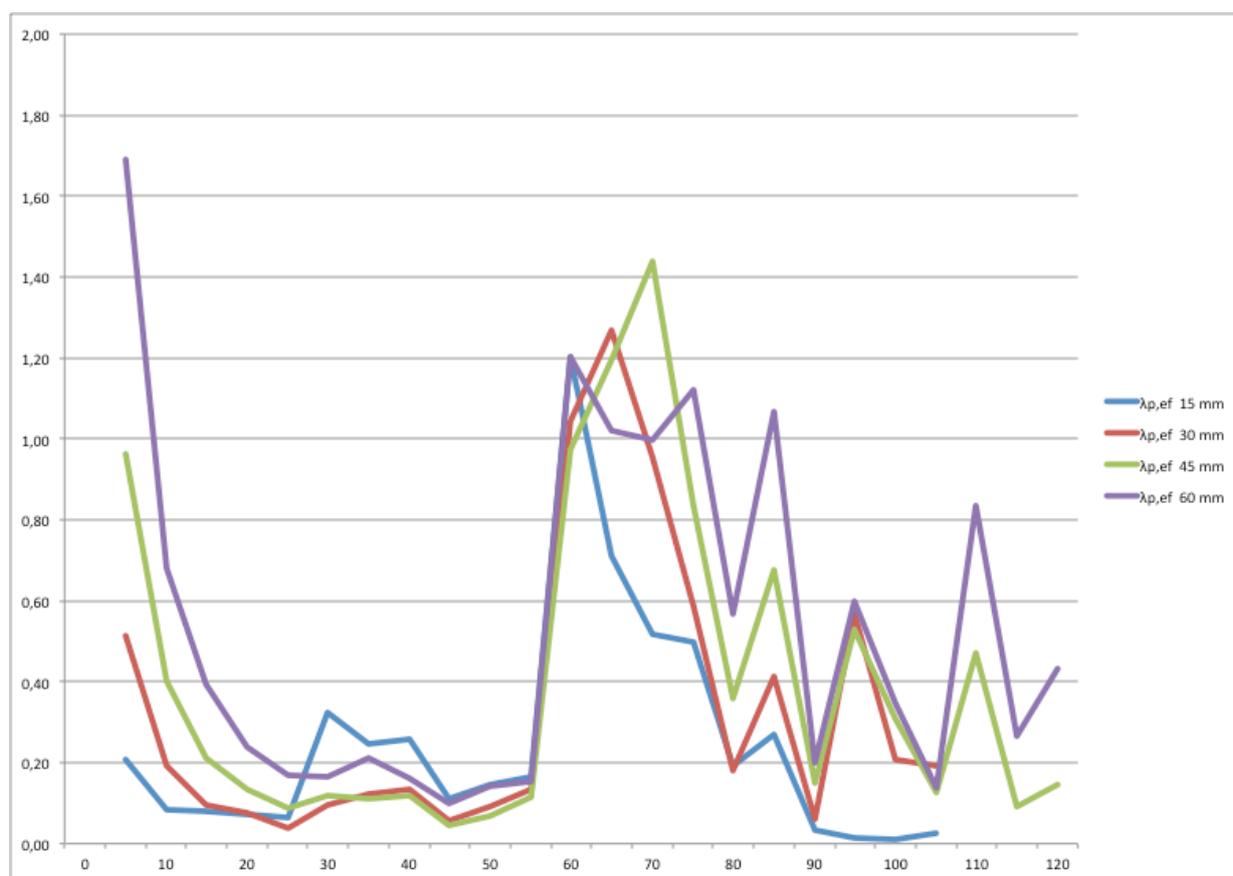


Gráfico IX.1 – Gráficas de conductividad térmica efectiva corregida para distintos espesores de material de protección.

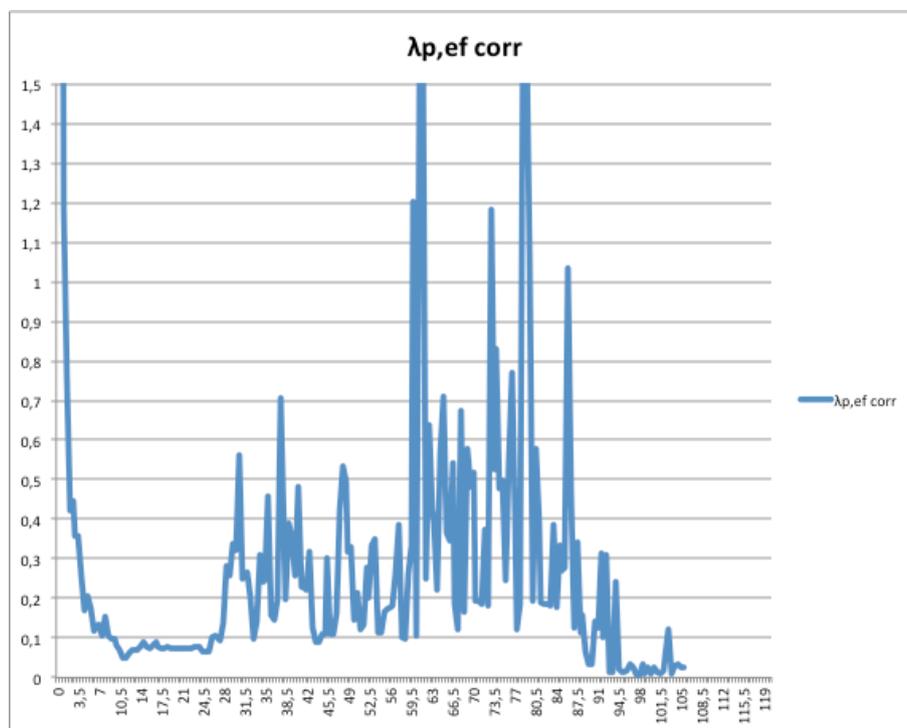
9.2 PROPUESTA DE ECUACIONES

Con los valores de conductividad térmica efectiva corregidos se ha procedido a adecuar los mismos a fórmulas matemáticas (exponenciales, potenciales, logarítmicas, lineales o polinómicas en función de cada caso) por tramos de tiempo.

Estas fórmulas se han obtenido mediante la aproximación a ecuaciones partiendo de una serie de datos que efectúa el programa EXCEL y, para lograr una formulación adecuada, se ha dividido la serie de datos en periodos de tiempo proporcionando, para cada uno de los tramos, la fórmula mas ajustada.

9.2.1 Revestimiento de una placa de 15 mm (15 mm)

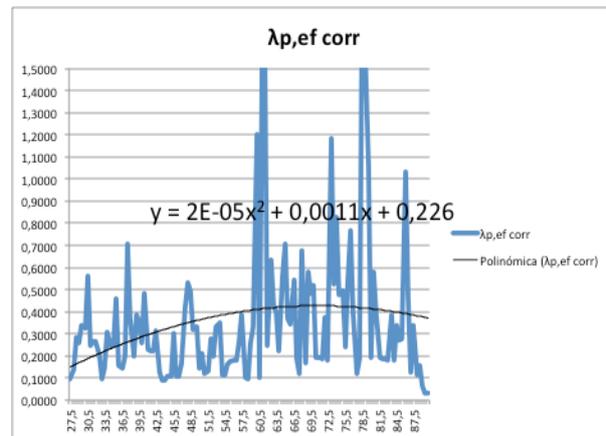
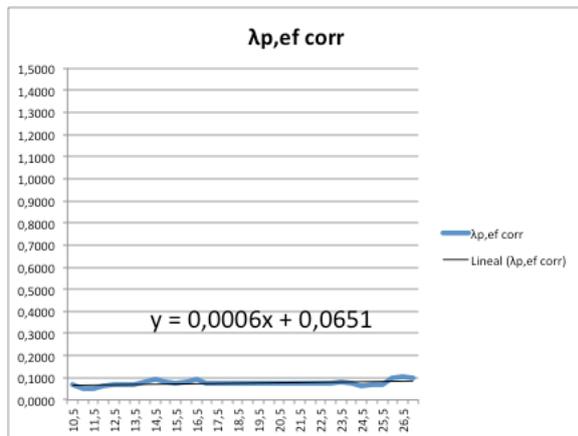
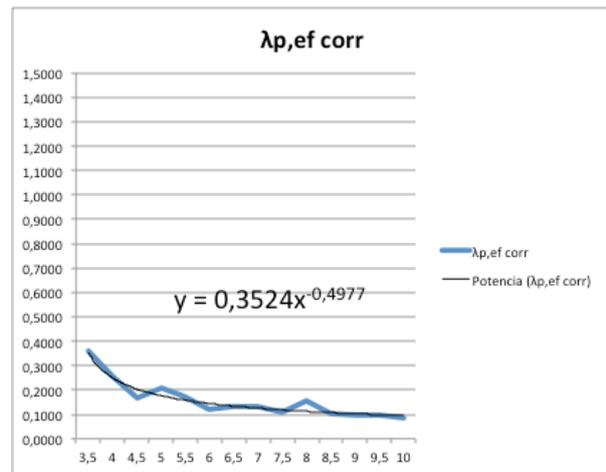
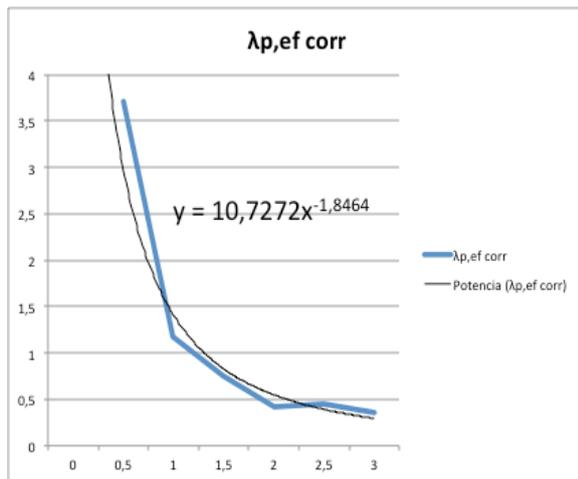
La representación gráfica de los valores calculados de conductividad (eje de ordenadas) respecto al tiempo en minutos de la curva nominal estándar (eje de abscisas) adoptan la siguiente forma:



Los tramos analizados son los siguientes:

- **Primer tramo (de 0 a 3 minutos):** Corresponde al descenso brusco de la conductividad motivado por la elevación de la temperatura del gas en la curva ISO desde los 0 a los 3,5 minutos.
- **Segundo tramo (de 3,5 a 10 minutos):** Corresponde a la estabilización del valor de la conductividad hacia una meseta cuasi horizontal.
- **Tercer tramo (de 10,5 a 27 minutos):** Corresponde a la meseta cuasi horizontal.
- **Cuarto tramo (de 27,5 minutos en adelante):** Corresponde a la fractura del aislamiento con un ascenso brusco de la conductividad a partir del cual se desarrolla en ascenso.

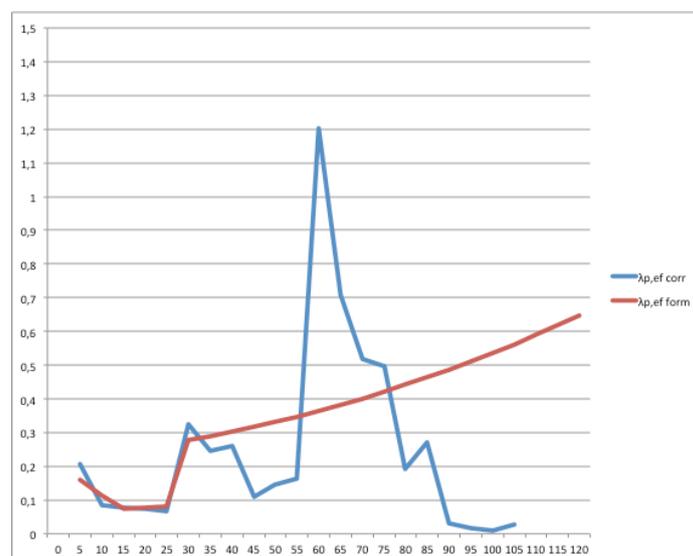
Y las fórmulas que se proponen para cada uno de los tramos son las siguientes:



Que se resumen en la siguiente Tabla:

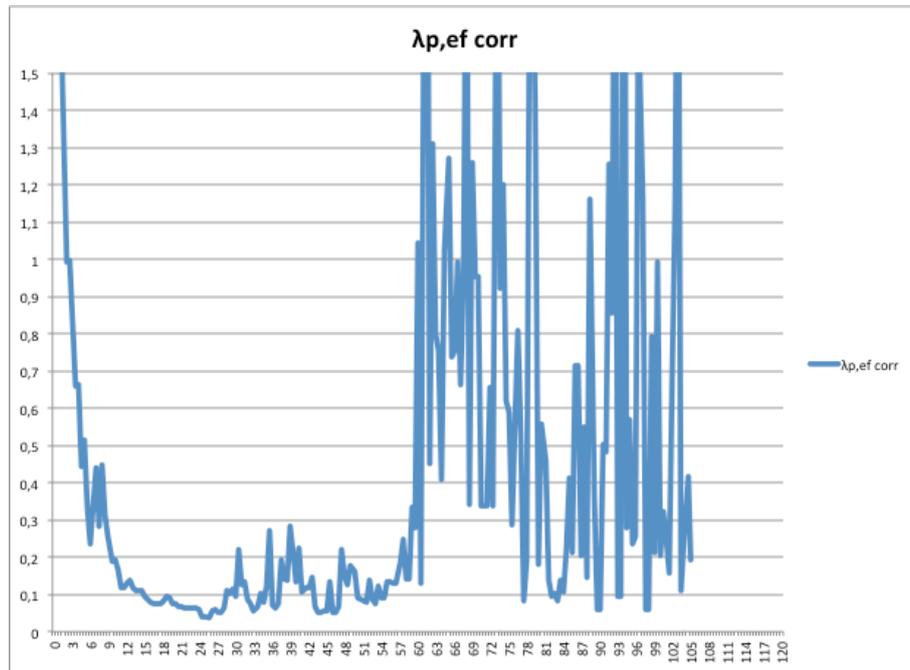
$t_{inicial}$ (min)	t_{final} (min)	Ecuación
0	3	$\lambda = 10,73 t^{-1,85}$
3,5	10	$\lambda = 0,35 t^{-0,50}$
10,5	27	$\lambda = 0,006 t + 0,065$
27,5	90	$\lambda = 0,00002 t^2 + 0,0011 t + 0,226$

Y cuya representación gráfica (en color rojo) comparada con los valores calculados (color azul) adopta la siguiente forma.



9.2.2 Revestimiento de dos placas de 15 mm (30 mm)

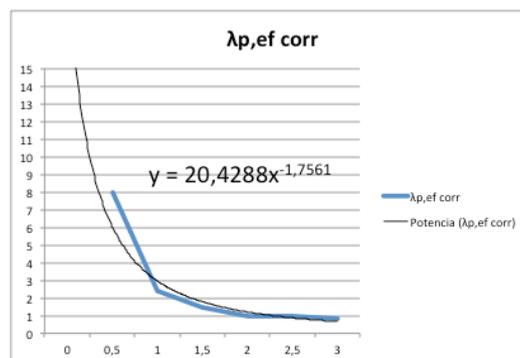
La representación gráfica de los valores calculados de conductividad (eje de ordenadas) respecto al tiempo en minutos de la curva nominal estándar (eje de abscisas) adoptan la siguiente forma:

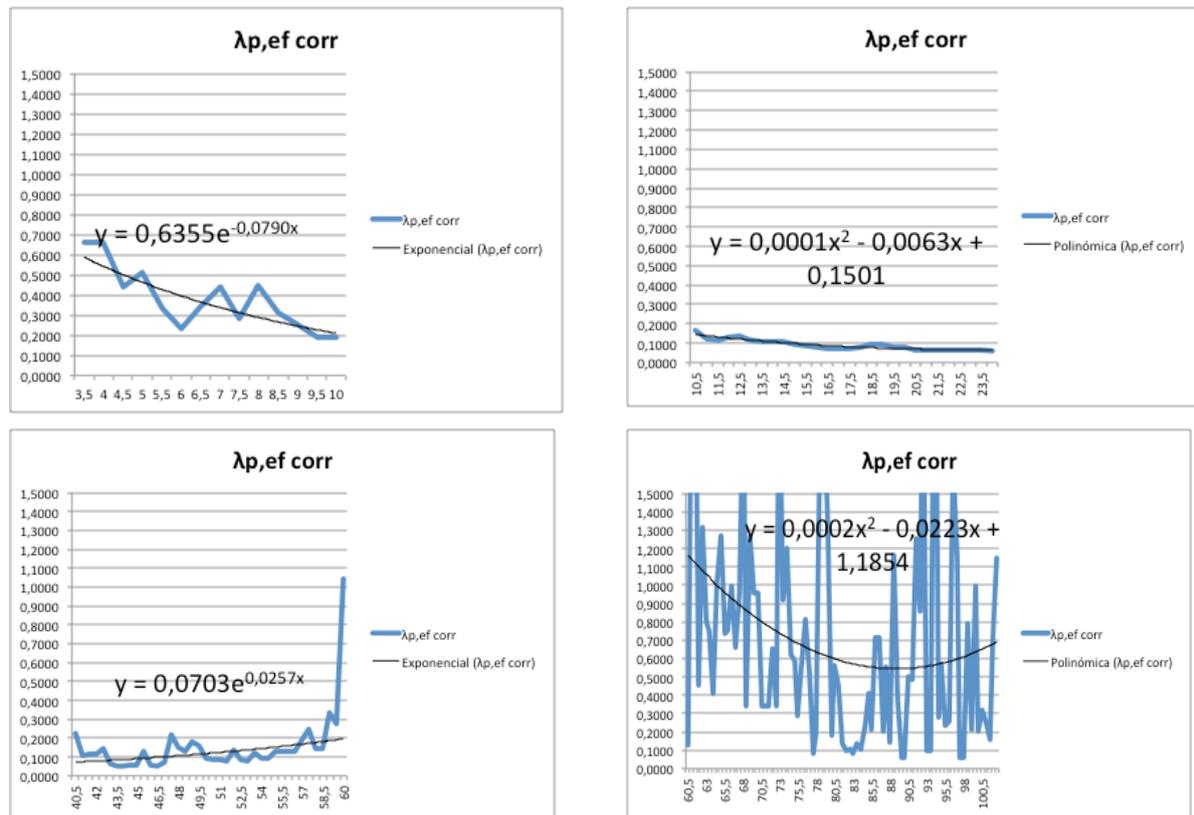


Los tramos analizados son los siguientes:

- **Primer tramo (de 0 a 3 minutos):** Corresponde al descenso brusco de la conductividad motivado por la elevación de la temperatura del gas en la curva ISO desde los 0 a los 3,5 minutos.
- **Segundo tramo (de 3,5 a 10 minutos):** Corresponde a la estabilización del valor de la conductividad hacia una meseta cuasi horizontal.
- **Tercer tramo (de 10,5 a 24 minutos):** Corresponde a un tramo cuasi horizontal.
- **Cuarto tramo (de 24,5 a 60 minutos):** Corresponde a un tramo cuasi horizontal con tendencia ascendente.
- **Quinto tramo (de 60 minutos en adelante):** Corresponde a la fractura del aislamiento con un ascenso brusco de la conductividad a partir del cual se desarrolla en ascenso.

Y las fórmulas que se proponen para cada uno de los tramos son las siguientes:

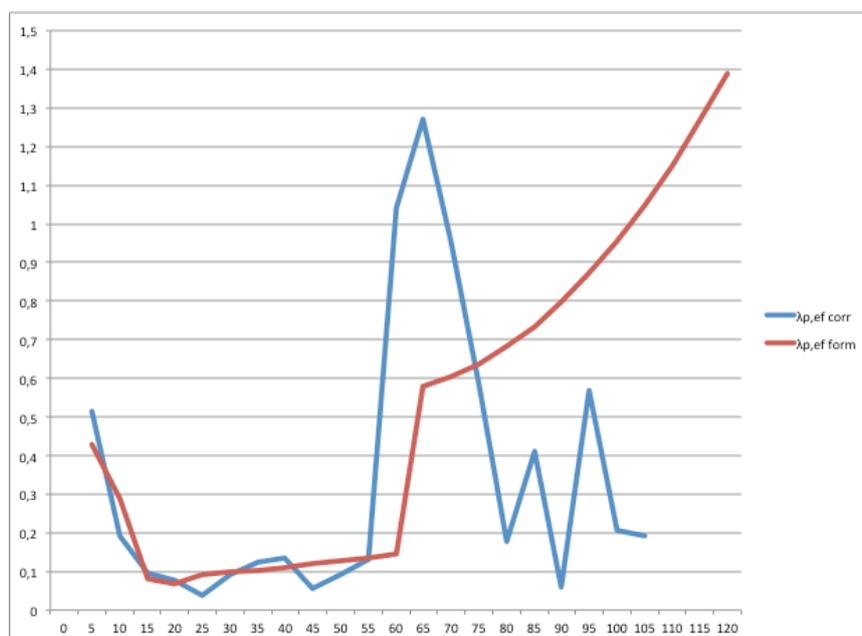




Que se resumen en la siguiente Tabla:

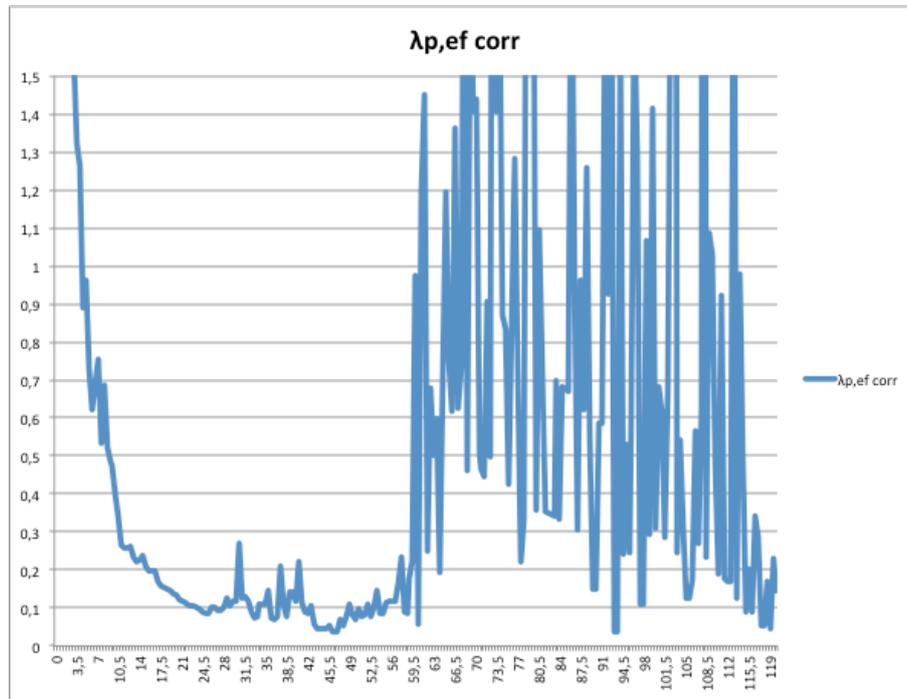
$t_{inicial}$ (min)	t_{final} (min)	Ecuación
0	3	$\lambda = 20,43 t^{-1,76}$
3,5	10	$\lambda = 0,64 e^{-0,08 t}$
10,5	24	$\lambda = 0,0001 t^2 - 0,0061 t + 0,15$
24,5	60	$\lambda = 0,066 e^{0,013 t}$
60,5	100	$\lambda = 0,0002 t^2 - 0,0223 t + 1,185$

Y cuya representación gráfica (en color rojo) comparada con los valores calculados (color azul) adopta la siguiente forma.



9.2.3 Revestimiento de tres placas de 15 mm (45 mm)

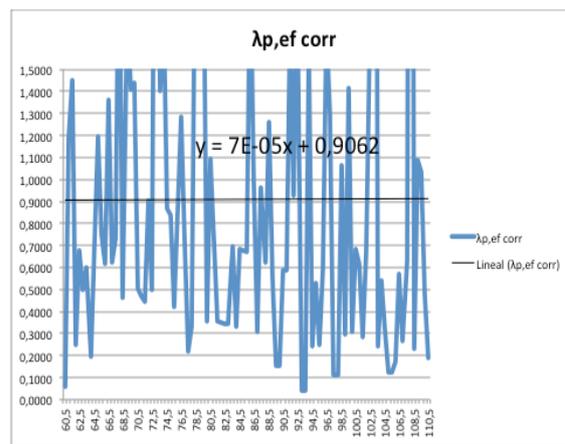
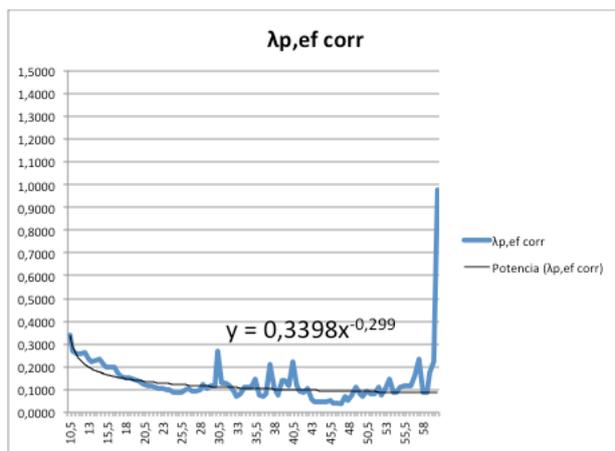
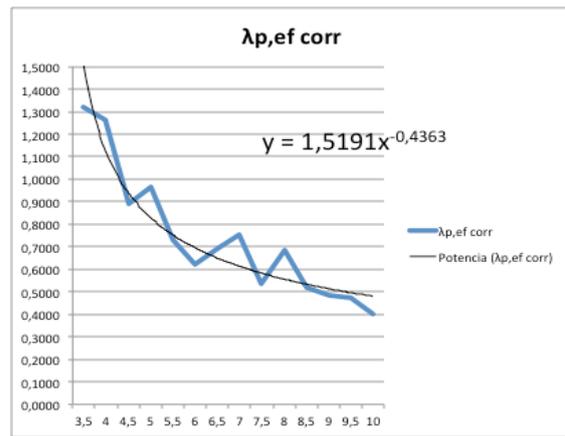
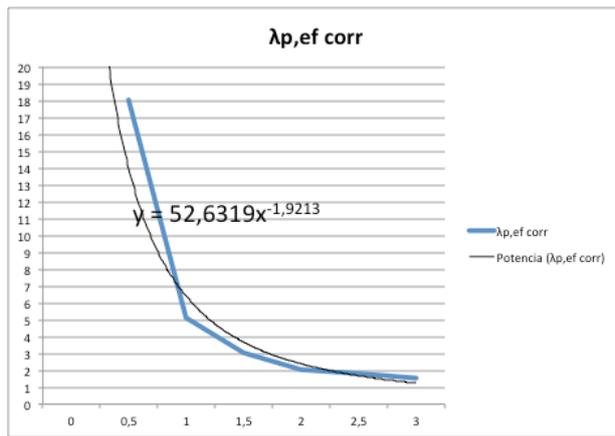
La representación gráfica de los valores calculados de conductividad (eje de ordenadas) respecto al tiempo en minutos de la curva nominal estándar (eje de abscisas) adoptan la siguiente forma:



Los tramos analizados son los siguientes:

- **Primer tramo (de 0 a 3 minutos):** Corresponde al descenso brusco de la conductividad motivado por la elevación de la temperatura del gas en la curva ISO desde los 0 a los 3,5 minutos.
- **Segundo tramo (de 3,5 a 10 minutos):** Corresponde a la estabilización del valor de la conductividad hacia una meseta cuasi horizontal.
- **Tercer tramo (de 10,5 a 60 minutos):** Corresponde a la meseta cuasi horizontal.
- **Cuarto tramo (de 60 minutos en adelante):** Corresponde a la fractura del aislamiento con un ascenso brusco de la conductividad a partir del cual se desarrolla en ascenso.

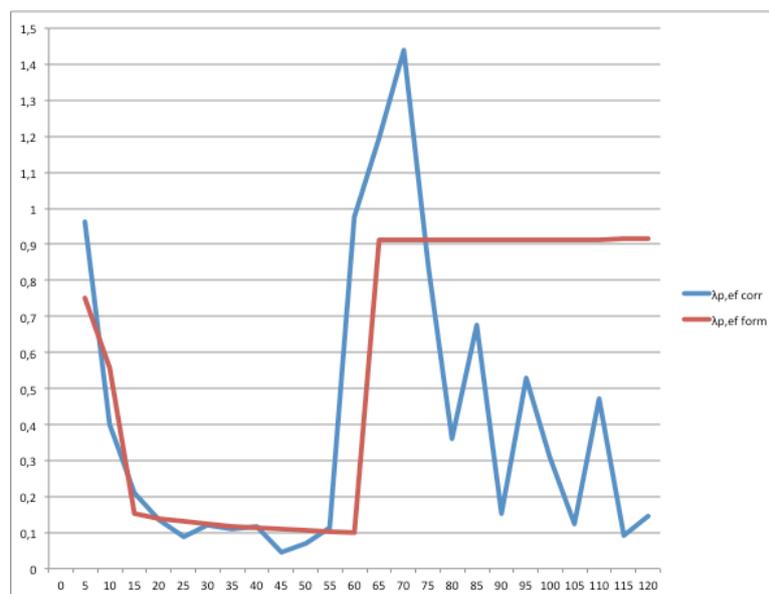
Y las fórmulas que se proponen para cada uno de los tramos son las siguientes:



Que se resumen en la siguiente Tabla:

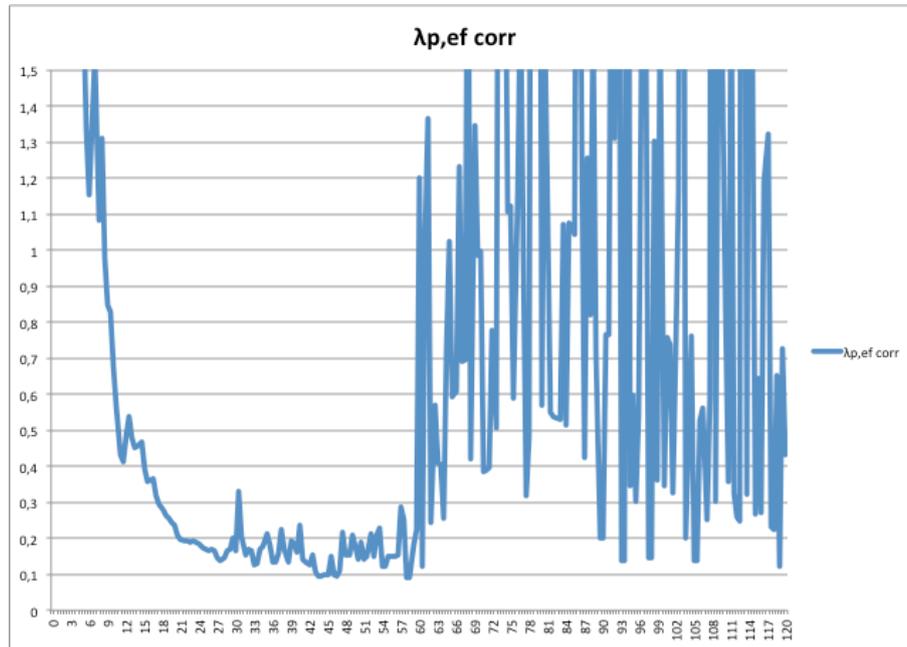
t_{inicial} (min)	t_{final} (min)	Ecuación
0	3	$\lambda = 52,63 t^{-1,92}$
3,5	10	$\lambda = 1,52 t^{-0,44}$
10,5	60	$\lambda = 0,34 t^{-0,30}$
60,5	110	$\lambda = 0,00007 t + 0,91$

Y cuya representación gráfica (en color rojo) comparada con los valores calculados (color azul) adopta la siguiente forma.



9.2.4 Revestimiento de cuatro placas de 15 mm (60 mm)

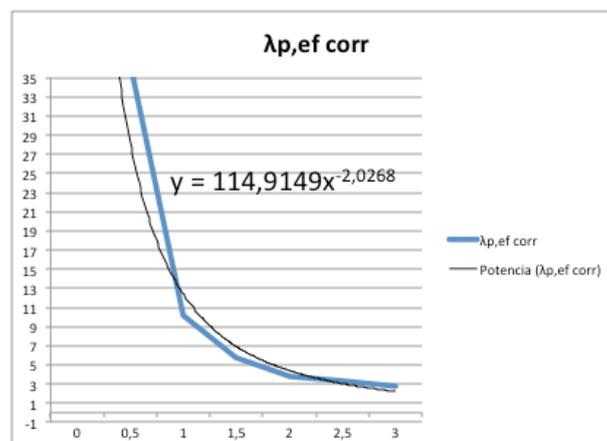
La representación gráfica de los valores calculados de conductividad (eje de ordenadas) respecto al tiempo en minutos de la curva nominal estándar (eje de abscisas) adoptan la siguiente forma:

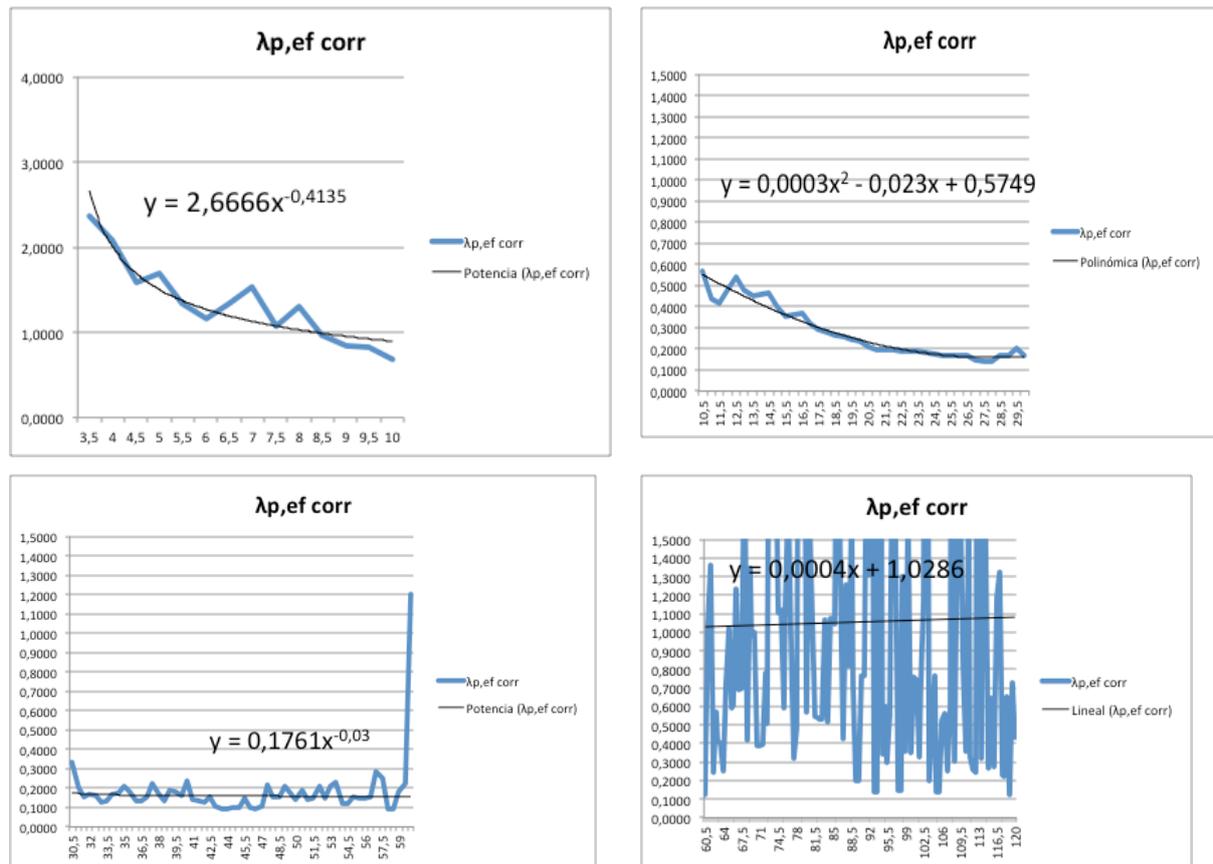


Los tramos analizados son los siguientes:

- **Primer tramo (de 0 a 3 minutos):** Corresponde al descenso brusco de la conductividad motivado por la elevación de la temperatura del gas en la curva ISO desde los 0 a los 3,5 minutos.
- **Segundo tramo (de 3,5 a 10 minutos):** Corresponde a la estabilización del valor de la conductividad hacia una meseta cuasi horizontal.
- **Tercer tramo (de 10,5 a 30 minutos):** Corresponde a la estabilización del valor de la conductividad hacia una meseta cuasi horizontal en un tramo menos tendido..
- **Cuarto tramo (de 30,5 a 60 minutos):** Corresponde a un tramo cuasi horizontal.
- **Quinto tramo (de 60 minutos en adelante):** Corresponde a la fractura del aislamiento con un ascenso brusco de la conductividad a partir del cual se desarrolla en ascenso.

Y las fórmulas que se proponen para cada uno de los tramos son las siguientes:

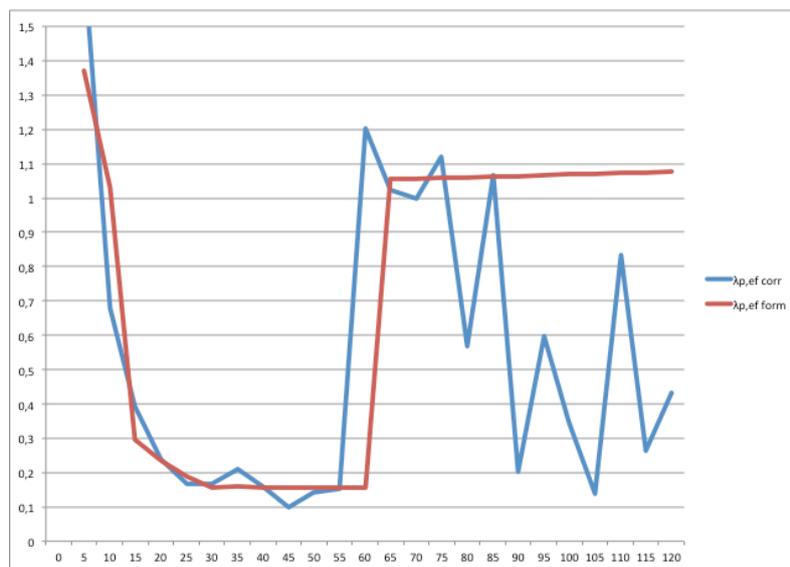




Que se resumen en la siguiente Tabla:

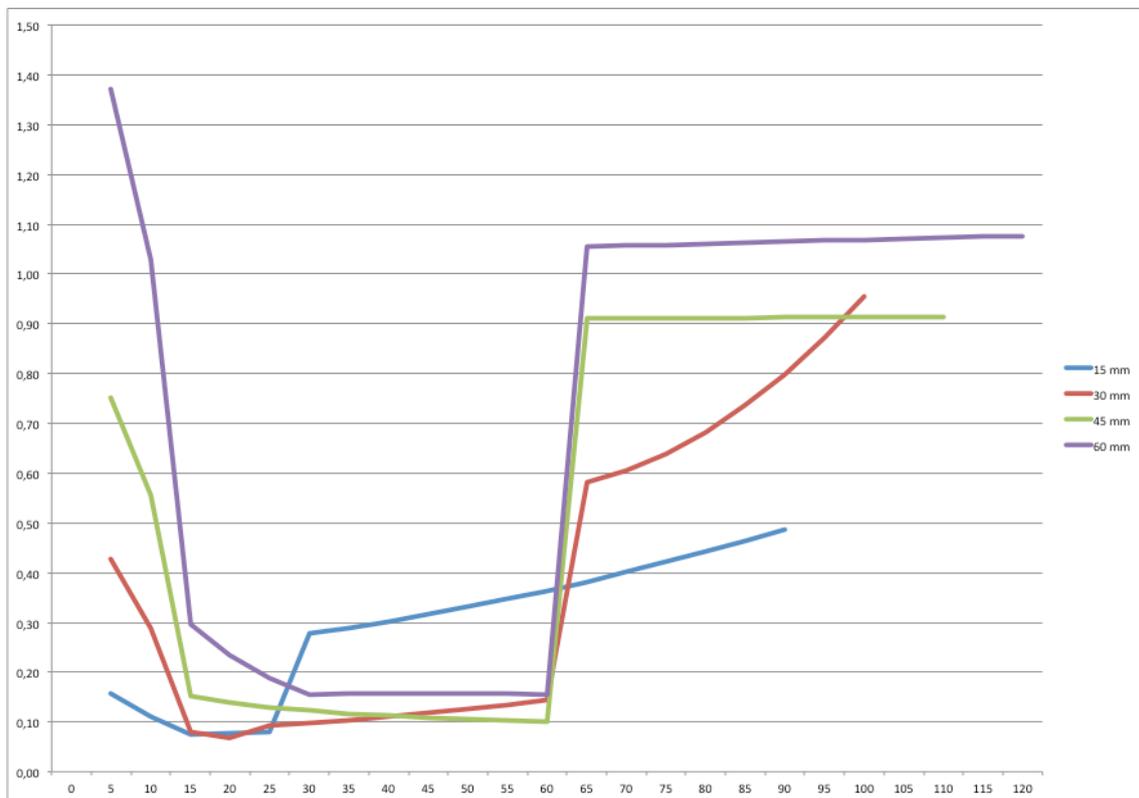
t _{inicial} (min)	t _{final} (min)	Ecuación
0	3	$\lambda = 114,91 t^{-2,03}$
3,5	10	$\lambda = 2,67 t^{-0,41}$
10,5	30	$\lambda = -0,0003 t^2 - 0,023 t + 0,5749$
30,5	60	$\lambda = 0,18 t^{-0,03}$
60,5	120	$\lambda = 0,0004 t + 1,03$

Y cuya representación gráfica (en color rojo) comparada con los valores calculados (color azul) adopta la siguiente forma.



9.2.5 Cuadro resumen

t _{inicial}	t _{final}	15 mm	30 mm	45 mm	60 mm
0	3	$\lambda = 10,73 t^{-1,85}$ (***)	$\lambda = 20,43 t^{-1,76}$ (***)	$\lambda = 52,63 t^{-1,92}$ (***)	$\lambda = 114,91 t^{-2,03}$ (***)
3,5	10	$\lambda = 0,35 t^{-0,50}$	$\lambda = 0,64 e^{-0,08 t}$	$\lambda = 1,52 t^{-0,44}$	$\lambda = 2,67 t^{-0,41}$
10,5	24	$\lambda = 0,006 t + 0,065$	$\lambda = 0,0001 t^2 - 0,0061 t + 0,15$	$\lambda = 0,34 t^{-0,30}$	$\lambda = -0,0003 t^2 - 0,023 t + 0,5749$
24,5	27		$\lambda = 0,066 e^{0,013 t}$		
27,5	60	$\lambda = 0,00002 t^2 + 0,0011 t + 0,226$	$\lambda = 0,0002 t^2 - 0,0223 t + 1,185$	$\lambda = 0,00007 t + 0,91$	$\lambda = 0,18 t^{-0,03}$
60,5	→			$\lambda = 0,0004 t + 1,03$	



9.3 VALIDACIÓN DE LOS VALORES FORMULADOS

Con objeto de validar las fórmulas propuestas respecto a los resultados reales obtenidos en los ensayos se han introducido los valores simplificados en la herramienta de cálculo para analizar las diferencias entre la temperatura real que alcanza el acero y la calculada con estos valores.

En general, y para todos los casos, la primera de las ecuaciones (de los 0 a los 3 minutos) no proporciona unos valores de conductividad térmica efectiva que produzcan unos valores de temperatura del acero aproximada a la realidad, por lo que se ha procedido a introducirlos manualmente ya que, de otra manera, los resultados se distorsionan notablemente.

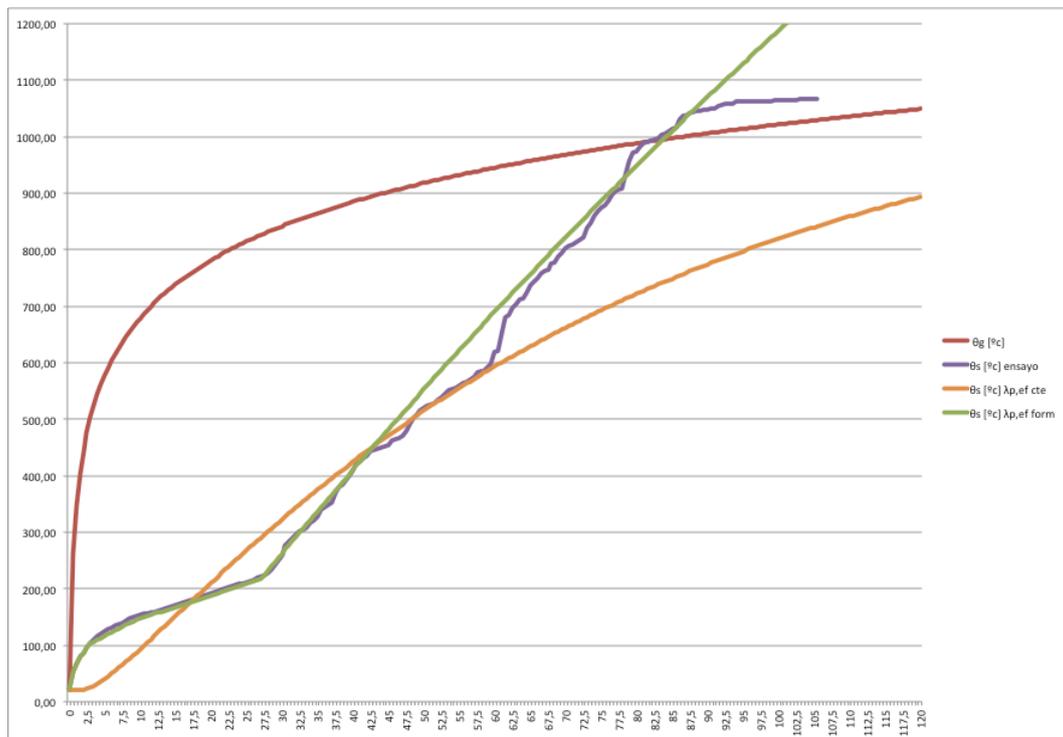
En las siguientes gráficas puede apreciarse que los valores calculados con los valores formulados (color verde) coinciden con los reales obtenidos en los ensayos (color añil) sobre todo en la primera parte (hasta los 30 minutos) en los que se inicia la dispersión de valores registrados por los termopares debido a la rotura del material.

A partir de ese tiempo la temperatura calculada se aproxima de forma lineal continua a la pendiente de la realmente obtenida.

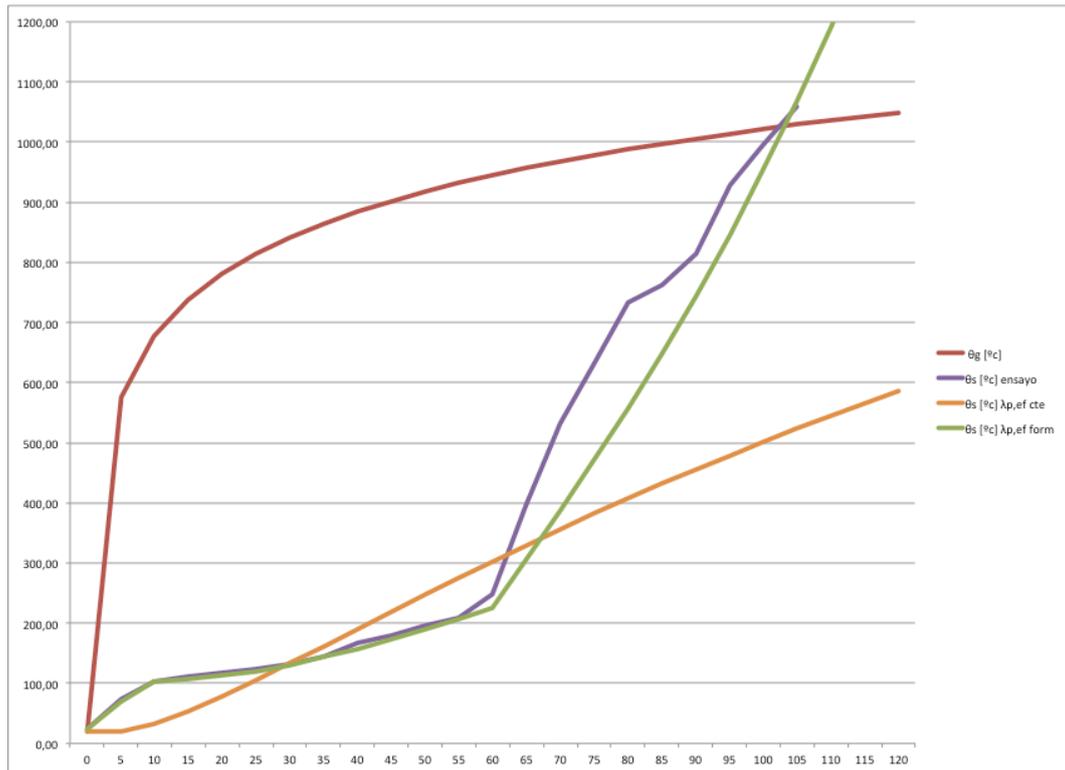
Cabe reseñar el comportamiento diferente del aislamiento de 15 mm de espesor (en el que la rotura del material se produce sobre los 30 minutos) respecto a los otros espesores, en los que aparece sobre los 60 minutos.

En las gráficas también pueden observarse la curva estándar (color rojo) y los valores de temperatura del acero calculados con una conductividad térmica del material de protección constante (color naranja)

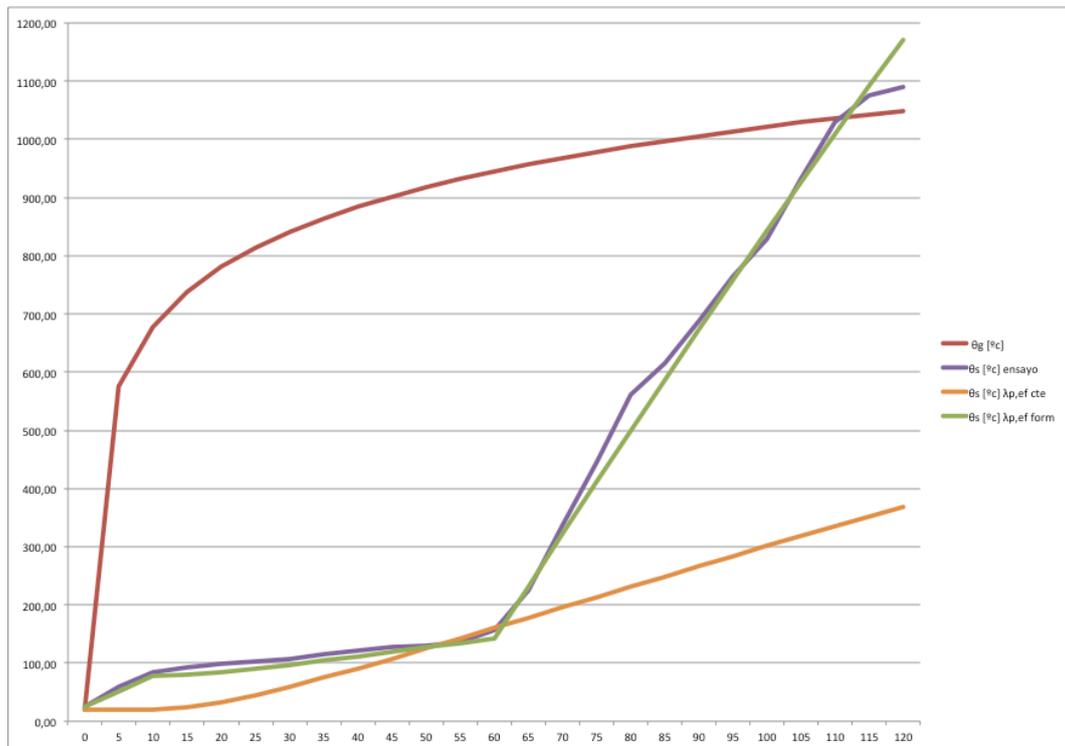
9.3.1 Revestimiento de una placa de 15 mm (15 mm)



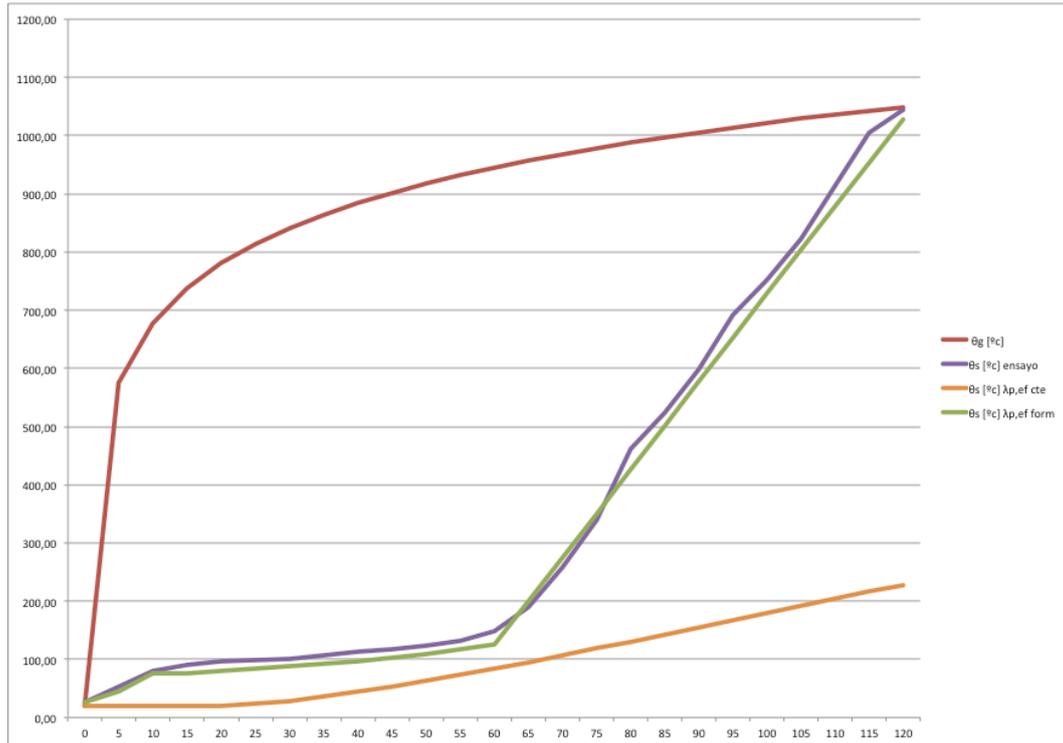
9.3.2 Revestimiento de dos placas de 15 mm (30 mm)



9.3.3 Revestimiento de tres placas de 15 mm (45 mm)



9.3.4 Revestimiento de cuatro placas de 15 mm (60 mm)



9.4 PROPUESTA DE VALORES SIMPLIFICADOS

Con objeto de simplificar y homogeneizar las anteriores ecuaciones se ha realizado un estudio analítico proponiéndose valores más elementales siempre y cuando los resultados obtenidos con estos valores se aproximen a los obtenidos realmente.

En la siguiente Tabla se presentan las ecuaciones descritas en el anterior apartado.

t _{inicial}	t _{final}	15 mm	30 mm	45 mm	60 mm
0	3	$\lambda = 10,73 t^{-1,85}$ (***)	$\lambda = 20,43 t^{-1,76}$ (***)	$\lambda = 52,63 t^{-1,92}$ (***)	$\lambda = 114,91 t^{-2,03}$ (***)
3,5	10	$\lambda = 0,35 t^{-0,50}$	$\lambda = 0,64 e^{-0,08 t}$	$\lambda = 1,52 t^{-0,44}$	$\lambda = 2,67 t^{-0,41}$
10,5	24	$\lambda = 0,006 t + 0,065$	$\lambda = 0,0001 t^2 - 0,0061 t + 0,15$	$\lambda = 0,34 t^{-0,30}$	$\lambda = -0,0003 t^2 - 0,023 t + 0,5749$
24,5	27		$\lambda = 0,066 e^{0,013 t}$		
27,5	60	$\lambda = 0,00002 t^2 + 0,0011 t + 0,226$		$\lambda = 0,0002 t^2 - 0,0223 t + 1,185$	$\lambda = 0,18 t^{-0,05}$
60,5	→		$\lambda = 0,0007 t + 0,91$		

Como los valores de la conductividad térmica efectiva que reproducen la temperatura que alcanza realmente el acero en el periodo de tiempo comprendido entre los 0 y los 10 minutos resultan ser valores que difieren exageradamente de la propia magnitud de la conductividad térmica (recuérdese que los fabricantes declaran valores entre 0,20 y 0,25 a temperatura ambiente) se efectúa una propuesta que, como se puede observar en las siguientes gráficas, reproduce con la suficiente aproximación los valores de temperatura del acero obtenidos en los ensayos para los diversos espesores de aislamiento.

t_{inicial}	t_{final}	15 mm	30 mm	45 mm	60 mm
0,0	0,5	$\lambda = 3,7164$	$\lambda = 7,9612$	$\lambda = 18,0442$	$\lambda = 36,3711$
0,5	1	$\lambda = 1,1804$	$\lambda = 2,3682$	$\lambda = 5,1573$	$\lambda = 10,091$
1,0	1,5	$\lambda = 0,7506$	$\lambda = 1,4822$	$\lambda = 3,0216$	$\lambda = 5,7126$
1,5	2,0	$\lambda = 0,4230$	$\lambda = 0,9919$	$\lambda = 2,0451$	$\lambda = 3,8265$
2,0	2,5	$\lambda = 0,4451$	$\lambda = 0,9961$	$\lambda = 1,8368$	$\lambda = 3,2493$
2,5	3,0	$\lambda = 0,3582$	$\lambda = 0,8290$	$\lambda = 1,5497$	$\lambda = 2,7670$
3,5	10	$\lambda = 0,35 t^{-0,50}$	$\lambda = 0,64 e^{-0,08 t}$	$\lambda = -2,46 t^{-0,77}$	$\lambda = -5,57 t^{-0,88}$

Con tal fin, se propone comenzar el uso de la ecuación diferencial a partir de los 10 minutos y tomando como valores de la temperatura del acero a ese tiempo los obtenidos en los ensayos, que resultan ser:

- Para el revestimiento de una placa de 15 mm: 150°
- Para el revestimiento de dos placas con un total de 30 mm: 100°
- Para el revestimiento de dos placas con un total de 45 mm: 85°
- Para el revestimiento de dos placas con un total de 60 mm: 80°

A partir de esa fila (resaltada en gris claro) se proponen unos valores constantes (excepto en el caso del revestimiento de 15 mm que, desde los 27,5 en adelante queda conformado por una ecuación lineal)

9.4.1 Revestimiento de una placa de 15 mm (15 mm)

t_{inicial}	t_{final}	15 mm
0,0	10,0	$\Theta_s : 150^\circ$ a los 10 min
10,5	27,0	$\lambda = 0,075$
27,5	60,0	$\lambda = 0,0035 t + 0,1732$
60,5	→	

9.4.2 Revestimiento de dos placas de 15 mm (30 mm)

t_{inicial}	t_{final}	30 mm
0,0	10,0	$\Theta_s : 100^\circ$ a los 10 min
10,5	27,0	$\lambda = 0,105$
27,5	60,0	
60,5	→	$\lambda = 0,75$

9.4.3 Revestimiento de tres placas de 15 mm (45 mm)

t_{inicial}	t_{final}	45 mm
0,0	10,0	$\Theta_s : 85^\circ$ a los 10 min
10,5	27,0	$\lambda = 0,133$
27,5	60,0	
60,5	→	$\lambda = 0,91$

9.4.4 Revestimiento de cuatro placas de 15 mm (60 mm)

t_{inicial}	t_{final}	60 mm
0,0	10,0	$\Theta_s : 80^\circ$ a los 10 min
10,5	27,0	$\lambda = 0,1625$
27,5	60,0	
60,5	→	$\lambda = 1,06$

9.4.5 Tabla resumen

t_{inicial}	t_{final}	15 mm	30 mm	45 mm	60 mm
0,0	10,0	$\Theta_s : 150^\circ$ a los 10'	$\Theta_s : 100^\circ$ a los 10'	$\Theta_s : 85^\circ$ a los 10'	$\Theta_s : 80^\circ$ a los 10'
10,5	27,0	$\lambda = 0,075$	$\lambda = 0,105$	$\lambda = 0,133$	$\lambda = 0,1625$
27,5	60,0	$\lambda = 0,0035 t + 0,1732$			
60,5	→		$\lambda = 0,75$	$\lambda = 0,91$	$\lambda = 1,06$

Tabla IX.2 – Propuesta de valores de conductividad térmica efectiva simplificada.

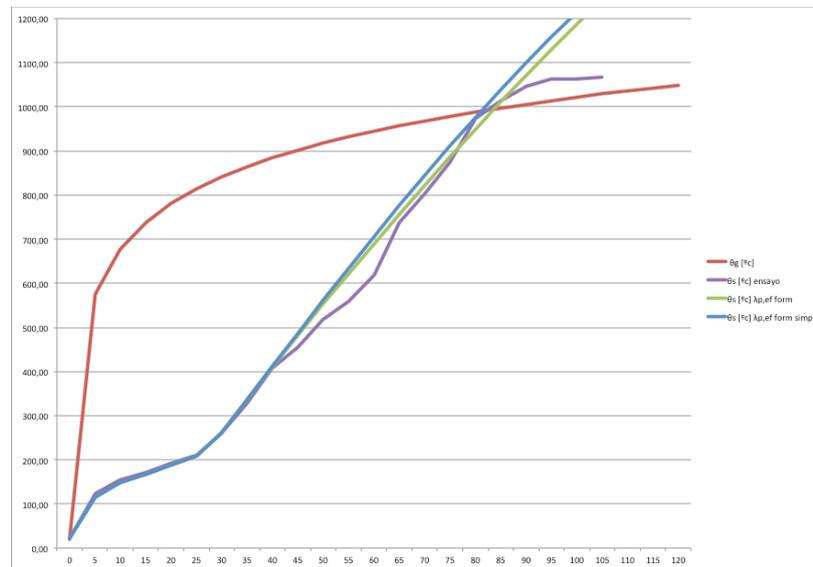
9.5 VALIDACIÓN DE LOS VALORES SIMPLIFICADOS

Con objeto de validar las fórmulas propuestas respecto a los resultados reales se han introducido los valores que se indican en la tablas en la herramienta de cálculo.

En las siguientes gráficas puede apreciarse que los valores calculados con los valores simplificados de las ecuaciones de conductividad térmica efectiva (color azul) coinciden sensiblemente con los formulados (color verde) y con los reales obtenidos en los ensayos (color magenta) sobre todo hasta que se inicia la dispersión de valores registrados por los termopares debido a la rotura del material.

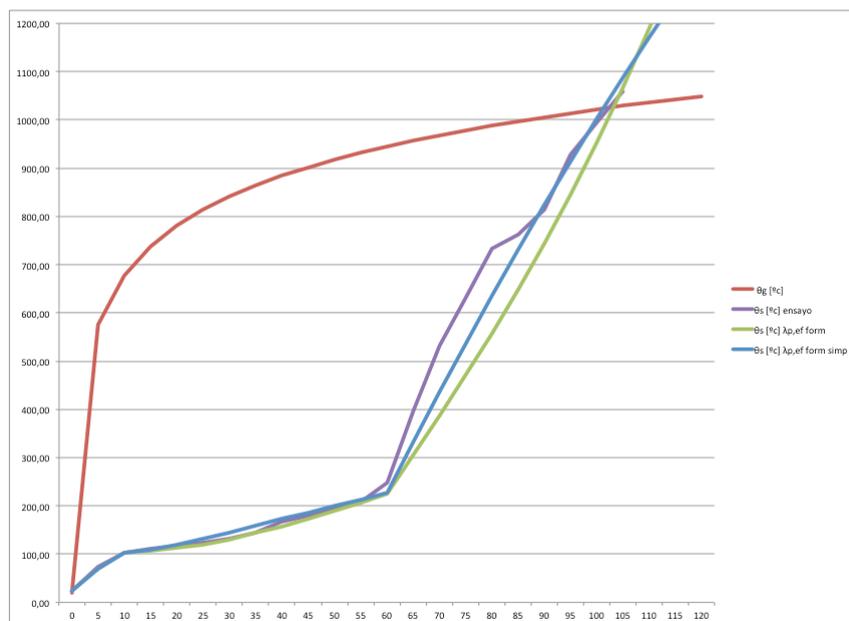
9.5.1 Revestimiento de una placa de 15 mm (15 mm)

t _{inicial}	t _{final}	15 mm
0,0	10,0	$\Theta_s : 150^\circ$ a los 10'
10,5	27,0	$\lambda = 0,075$
27,5	60,0	$\lambda = 0,0035 t +$
60,5	→	0,1732



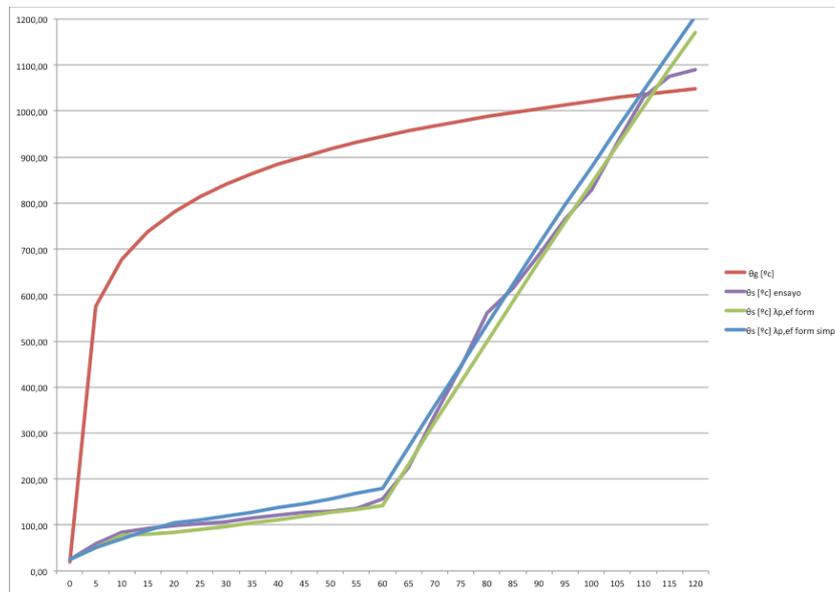
9.5.2 Revestimiento de dos placas de 15 mm (30 mm)

t _{inicial}	t _{final}	30 mm
0,0	10,0	$\Theta_s : 100^\circ$ a los 10'
10,5	27,0	$\lambda = 0,105$
27,5	60,0	
60,5	→	$\lambda = 0,75$



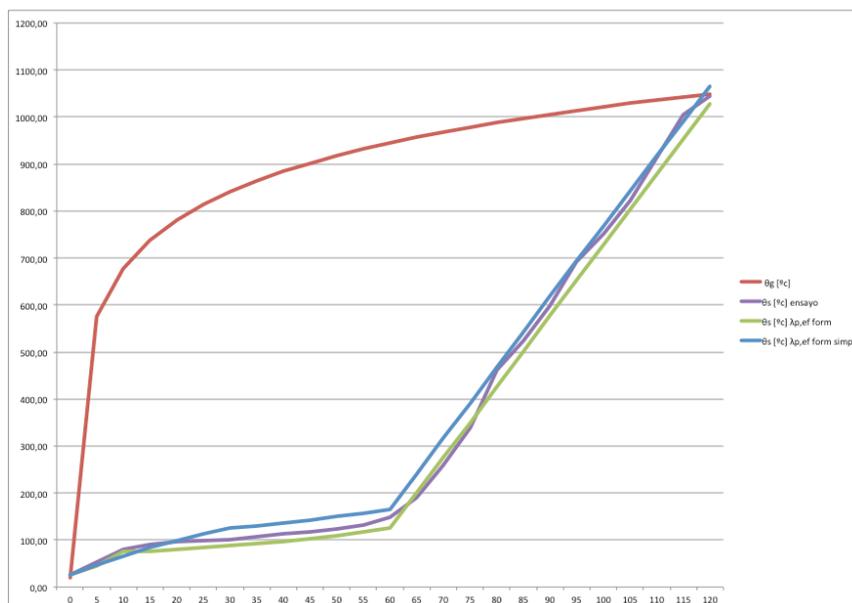
9.5.3 Revestimiento de tres placas de 15 mm (45 mm)

t _{inicial}	t _{final}	45 mm
0,0	10,0	Θ _s :85° a los 10'
10,5	27,0	λ = 0,133
27,5	60,0	
60,5	→	λ = 0,91



9.5.4 Revestimiento de cuatro placas de 15 mm (60 mm)

t _{inicial}	t _{final}	60 mm
0,0	10,0	Θ _s :80° a los 10'
10,5	27,0	λ = 0,1625
27,5	60,0	
60,5	→	λ = 1,06



9.5.5 Cuadro resumen

En las siguientes tabla y gráfica se reflejan los valores de conductividad térmica efectiva para los distintos espesores que se proponen en la presente Tesis.

t inicial	t final	15 mm	30 mm	45 mm	60 mm
0,0	10,0	$\lambda_s : 150^\circ$ a los 10'	$\lambda_s : 100^\circ$ a los 10'	$\lambda_s : 85^\circ$ a los 10'	$\lambda_s : 80^\circ$ a los 10'
10,5	27,0	$\lambda = 0,075$	$\lambda = 0,105$	$\lambda = 0,133$	$\lambda = 0,1625$
27,5	60,0	$\lambda = 0,0035 t + 0,1732$			
60,5	→		$\lambda = 0,75$	$\lambda = 0,91$	$\lambda = 1,06$

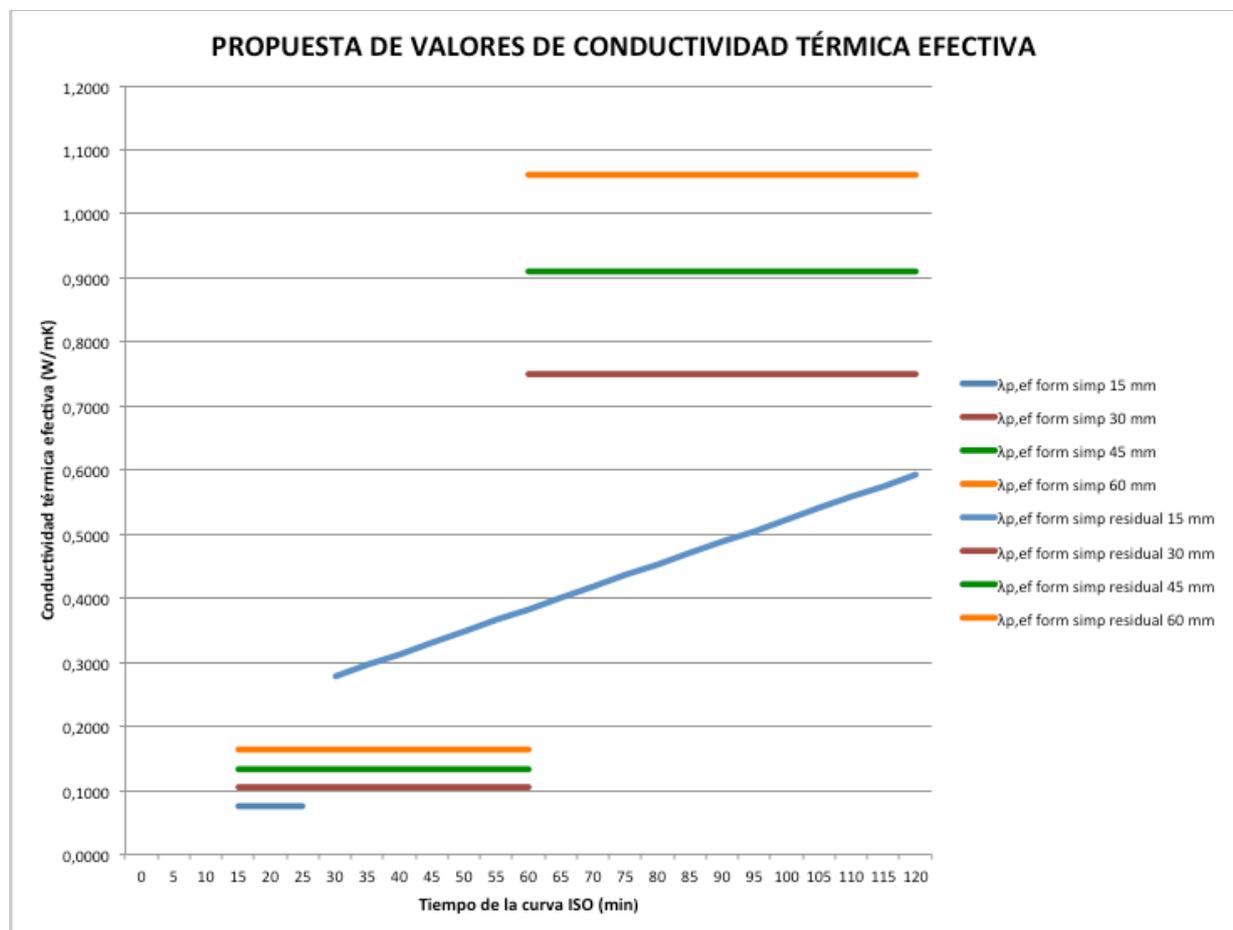


Gráfico IX.2 – Propuesta de valores de conductividad térmica efectiva simplificada.

Todos ellos presentan las siguientes características comunes:

- **Primer tramo:** El primer tramo, que correspondería, al descenso brusco de la conductividad motivado por la elevación de la temperatura del gas en la curva ISO desde los 0 a los 10 minutos y que no se encuentran representados en la gráfica por comenzar el cálculo con la ecuación diferencial a partir de los 10 minutos con las temperaturas indicadas, como se ha explicado anteriormente.

- **Segundo tramo:** Corresponde a los valores constantes hasta la rotura del material. Puede apreciarse que la separación entre los diferentes tipos de espesor presenta un valor prácticamente constante de aproximadamente 0,03.
- **Tercer tramo:** Corresponde a la fractura del aislamiento con un ascenso brusco de la conductividad a partir del cual se convierte en un valor constante excepto en el caso del revestimiento de 15 mm que presenta forma de ecuación lineal ascendente. También puede apreciarse que la separación entre los espesores viene a ser un valor prácticamente constante de aproximadamente 0,15

Hay que destacar que, a partir de la fractura del material (sobre los 25 minutos en el caso de los 15 mm de espesor y sobre los 60 minutos en el resto de los casos), el valor propuesto no corresponde a una magnitud física sino a un valor que al ser adoptado en el cálculo (que podría ser llamado *conductividad térmica efectiva residual*) proporciona una evolución de la temperatura del acero similar a la registrada en los ensayos.

9.5.6 Interpolación de valores

A la vista de los anteriores datos, puede deducirse que es factible admitir la deducción de valores por interpolación lineal para espesores distintos de los analizados teniendo en cuenta que sobre los 30 minutos se detecta una fractura en el material para 15 mm de espesor y, para el resto de los casos, sobre los 60 minutos.

9.6 APLICACIÓN A UN CASO REAL

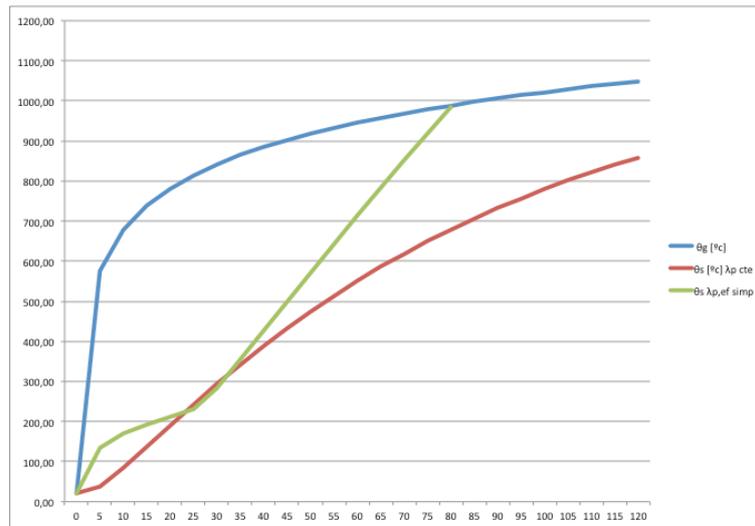
9.6.1 DATOS DE PARTIDA

A continuación se procede a aplicar los valores de conductividad térmica efectiva simplificada propuestos a un caso real de un soporte HEB 140 de 5 m de luz solicitado según se indica en la Tabla y cuya temperatura crítica calculada es de 693° y a analizar los resultados obtenidos mediante la herramienta de cálculo del tiempo al que se alcanza la citada temperatura crítica.

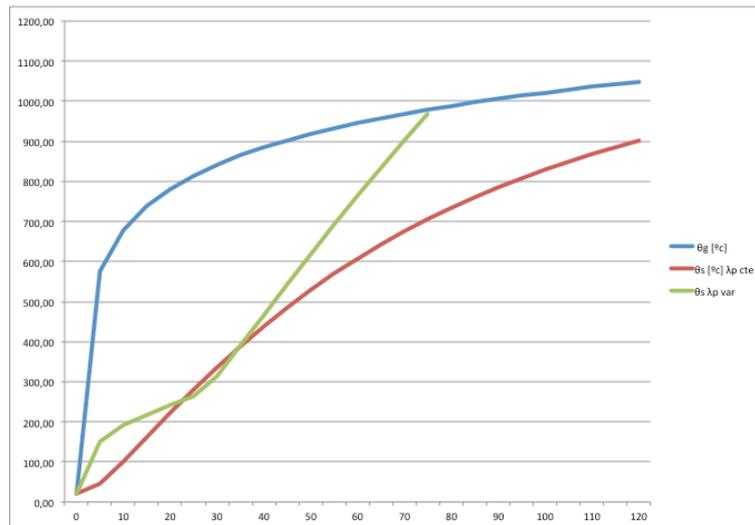
COMPRESIÓN PURA									
DATOS DE ENTRADA									
Escenario de incendio									
$T_{R,REQ}$		[min]	Curva de incendio			ESTANDAR			
Características geométricas									
Perfil	Luz [cm]	h [mm]	t_w [mm]	b [mm]	t_f [mm]	d [mm]		I_y [cm ⁴]	I_z [cm ⁴]
HEB 140	500,00	140,0	7,0	140,0	12,0	92,0		1.509,00	550,00
	A [cm ²]	A_w [m ² /m]	$W_{el,y}$ [cm ³]	$W_{el,z}$ [cm ³]	$W_{pl,y}$ [cm ³]	$W_{pl,z}$ [cm ³]	i_y [cm]	i_z [cm]	
	43,00	0,805	215,60	78,50	245,40	119,80	5,93	3,58	
Características mecánicas									
Aceros	f_y [Mpa]	f_u [Mpa]	c [J/kg ² K]	ρ [kg/m ³]	E [Mpa]				
S275	275	430	600	7.850	210.000				
Acciones y solicitaciones									
Sustentación	G_s [kN/m ²]	$Q_{s,1}$ [kN/m ²]	Tipo	N ₁ [Kn]	N ₂ [Kn]	M ₁ [Kn.m]	M ₂ [Kn.m]	V ₁ [Kn]	V ₂ [Kn]
2	3,75	2,00	2		177,70				
CLASIFICACIÓN DE LA SECCIÓN									
CLASE 1									
CÁLCULO DE ESBELTECES									
Esbeltéz mecánica				97,77					
Esbeltéz de Euler				86,81					
Esbeltéz adimensional				1,13					
Esbeltéz reducida				NO PROCEDE POR NO ESTAR SOLICITADO A FLEXION					
FACTOR DE REDUCCIÓN DE LAS ACCIONES									
γ_s	$\gamma_{Q,1}$	Usos		$\psi_{1,1}$					
1,35	1,50	Residencial		0,30					
η_n		0,5395							
TEMPERATURA CRÍTICA DEL ELEMENTO									
Valor mínimo del factor de reducción $k_{s,0}$				0,2462					
Temperatura crítica (dominio temperatura) θ_{cr}				697,35 [°C]					
Temperatura crítica (dominio resistencia) θ_{cr}				693,00 [°C]					
Temperatura crítica del elemento θ_{cr}				693,00 [°C]					

9.6.2 REVESTIMIENTOS ENTORNO 15 mm

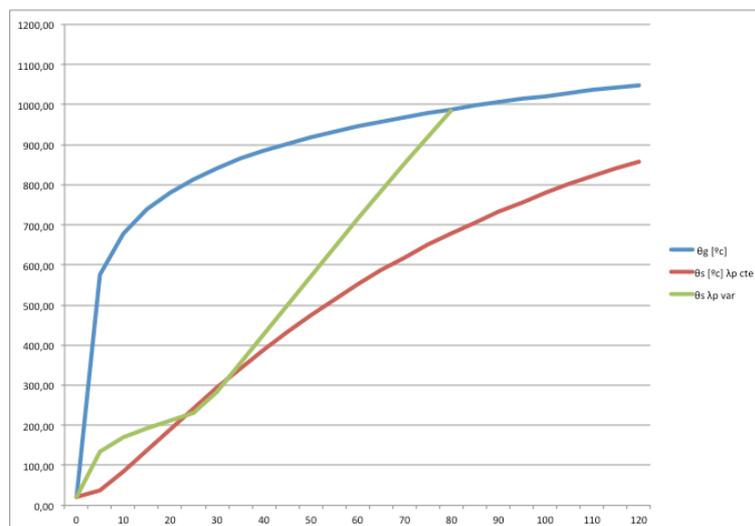
9.6.2.1 Tesis 15 mm



9.6.2.2 Fabricante "A" 13 mm



9.6.2.3 Fabricante "B" 13 mm



9.6.2.4 Conclusiones

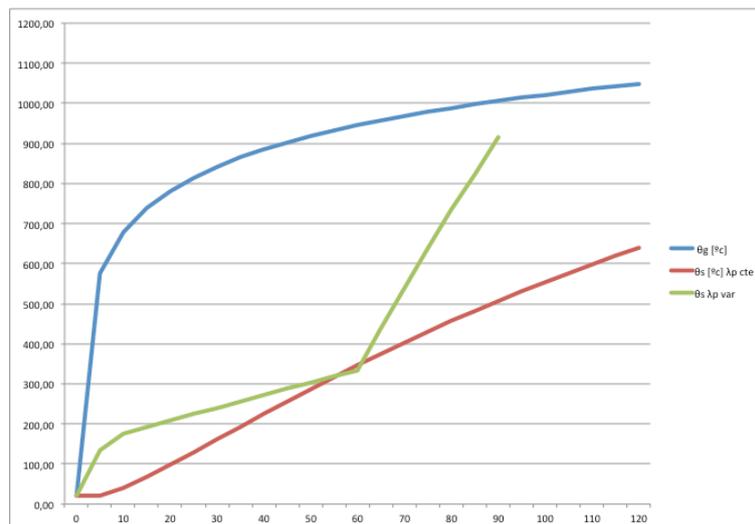
En el caso de revestimientos de placa simple con un espesor de unos 15 mm, podemos observar que la temperatura crítica de 693° para el perfil HEB 140 se alcanza:

- Para el revestimiento de la Tesis sobre los 62,5 minutos.
- Para el revestimiento del Fabricante “A” de 13 mm sobre los 55 minutos (en los ensayos facilitados por el fabricante se alcanza sobre los 81 minutos como valor mediana de dos perfiles (IPE 400))
- Para el revestimiento del Fabricante “B” de 15 mm sobre los 58,5 minutos (en los ensayos facilitados por el fabricante se alcanza sobre los 93 minutos como valor mediana de cuatro perfiles (HEA 300 / HEM 280 / HEB 300 / HEA 200))

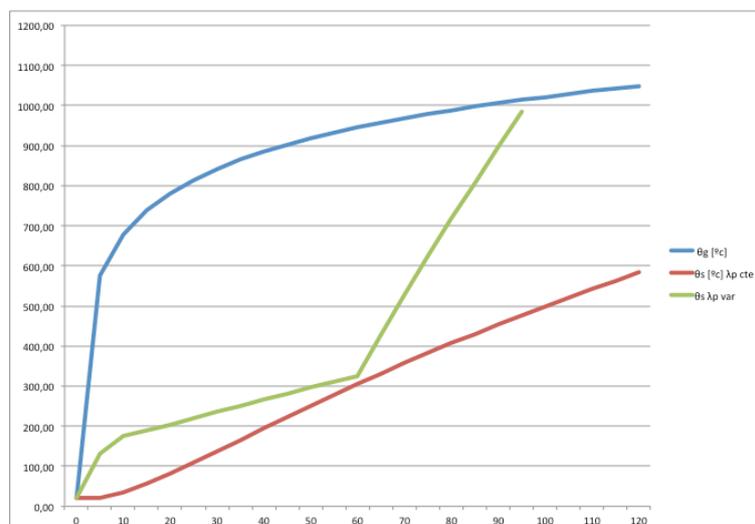
Con un revestimiento de placa simple de unos 15 mm se puede asegurar una resistencia al fuego de unos 30 y 45 minutos para una temperatura crítica de unos 700° y con un cálculo detallado podría llegarse a los 60 minutos.

9.6.3 REVESTIMIENTOS ENTORNO 25 mm

9.6.3.1 Fabricante “B” 25 mm



9.6.3.2 Fabricante “A” 28 mm



9.6.3.3 Conclusiones

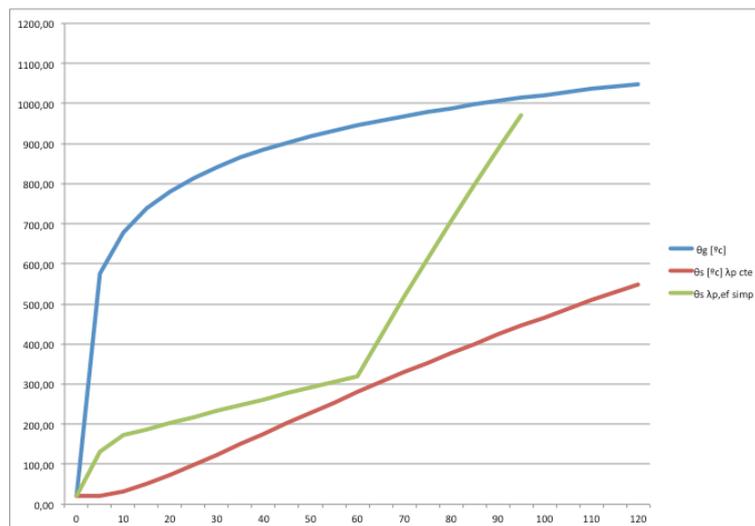
En el caso de revestimientos con un espesor de unos 25 mm, podemos observar que la temperatura crítica de 693° para el perfil HEB 140 se alcanza:

- Para el revestimiento del Fabricante “A” de 13+15 mm sobre los 79 minutos (en los ensayos facilitados por el fabricante se alcanza sobre los 101 minutos como valor mediana de un perfil (IPE 160))
- Para el revestimiento del Fabricante “B” de 25 mm sobre los 78 minutos (en los ensayos facilitados por el fabricante se alcanza sobre los 107 minutos como valor mediana de tres perfiles (HEM 280 / IPE 200 / IPE 160))

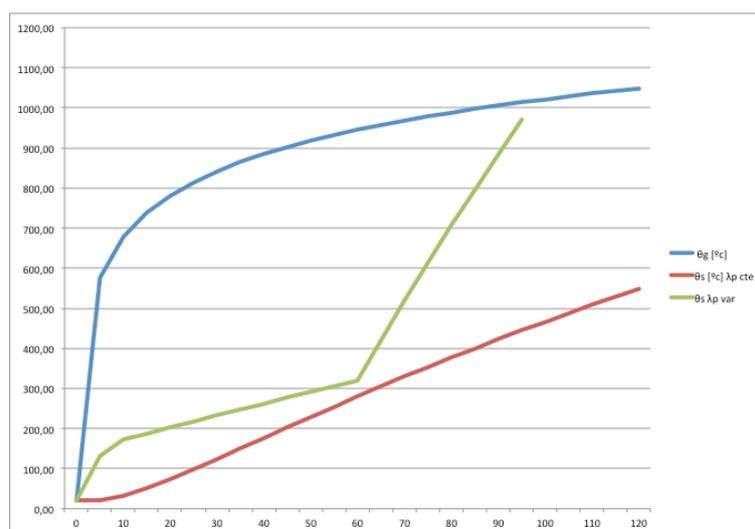
Con un revestimiento de unos 25 mm se puede asegurar una resistencia al fuego de unos 60 minutos para una temperatura crítica de unos 700° pero sin alcanzar los 90 minutos.

9.6.4 REVESTIMIENTOS ENTORNO 30 mm

9.6.4.1 Tesis 30 mm



9.6.4.2 Fabricante “A” 30 mm



9.6.4.3 Conclusiones

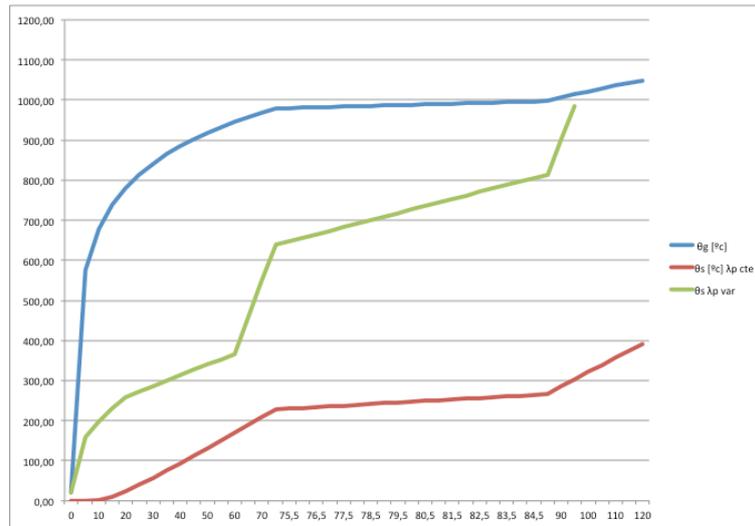
En el caso de revestimientos con un espesor de unos 30 mm, podemos observar que la temperatura crítica de 693° para el perfil HEB 140 se alcanza:

- Para el revestimiento de la Tesis sobre los 78,5 minutos.
- Para el revestimiento del Fabricante “A” de 15+15 mm sobre los 79,5 minutos (en los ensayos facilitados por el fabricante se alcanza sobre los 103 minutos como valor de un IPE 200)

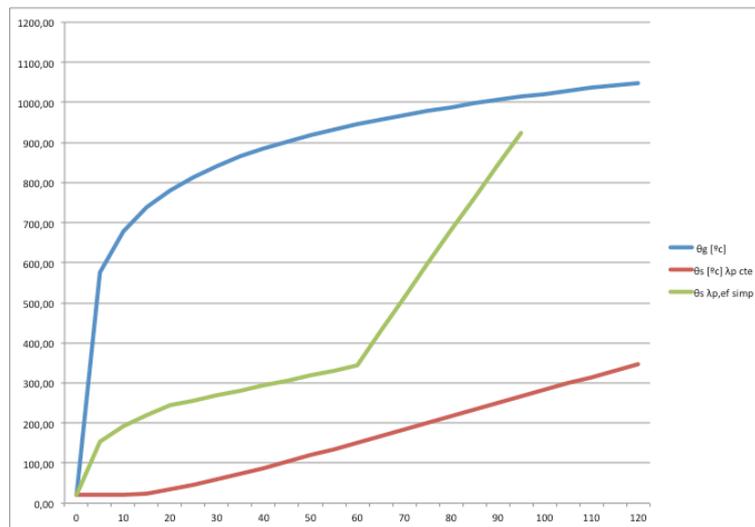
Con un revestimiento de placa doble de 15 mm (30 mm) se puede asegurar una resistencia al fuego de unos 60 minutos para una temperatura crítica de unos 700° y prácticamente de 90 minutos.

9.6.5 REVESTIMIENTOS ENTORNO 45 mm

9.6.5.1 Fabricante “B” 40 mm



9.6.5.2 Tesis 45 mm



9.6.5.3 Conclusiones

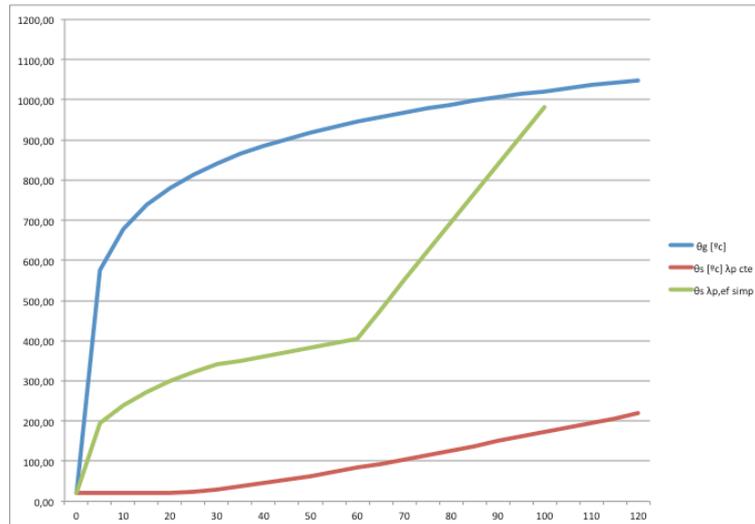
En el caso de revestimientos de placa simple con un espesor de unos 45 mm, podemos observar que la temperatura crítica de 693° para el perfil HEB 140 se alcanza:

- Para el revestimiento de la Tesis sobre los 90,5 minutos.
- Para el revestimiento del Fabricante “B” de 40 mm sobre los 78 minutos (en los ensayos facilitados por el fabricante se alcanza sobre los 142 minutos como valor mediana de cuatro perfiles (HEB 400 / HEA 300 / HEA 200 / IPE 200)

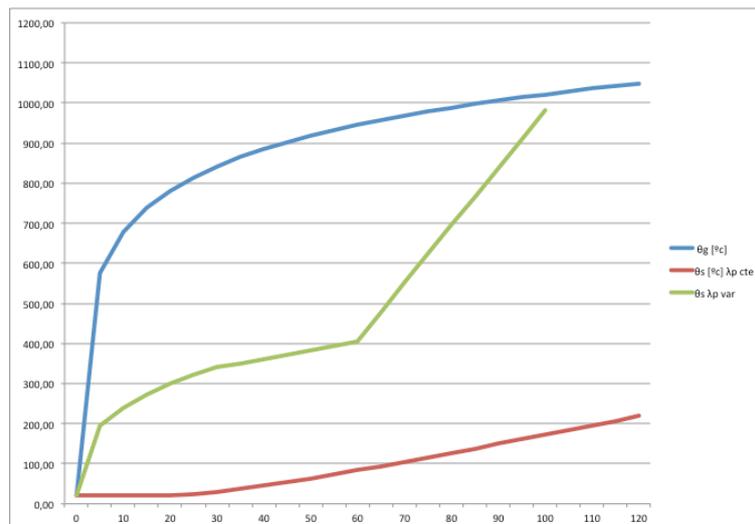
Con un revestimiento de placa triple de 45 mm se puede asegurar una resistencia al fuego de unos 90 minutos para una temperatura crítica de unos 700°

9.6.6 REVESTIMIENTOS ENTORNO 60 mm

9.6.6.1 Tesis 60 mm



9.6.6.2 Fabricante "A" 60 mm



9.6.6.3 Conclusiones

En el caso de revestimientos de placa simple con un espesor de 60mm, podemos observar que la temperatura crítica de 693° para el perfil HEB 140 se alcanza:

- Para el revestimiento de la Tesis sobre los 95 minutos.
- Para el revestimiento del Fabricante "A" de 60 mm sobre los 80 minutos (en los ensayos facilitados por el fabricante se alcanza pasados los 180 minutos como valor mediana de seis perfiles (IPE 200 / HEB 450 / HEA 300 / HEA 200 / IPE 400 1,5m / OPE 400 4,5m)

9.6.7 CONCLUSIONES ADICIONALES

Las diferencias de tiempos descritas debe ser tomada con precaución por:

- No tratarse los valores de los fabricantes de los mismos perfiles que el analizado.
- La dispersión de valores que se produce tras la fractura del material de revestimiento a partir de los 30 minutos (en el revestimiento de 15 mm) y de los 60 minutos (en el resto de los revestimientos) que arroja resultados muy dispares.
- El posible mejor tiempo obtenido en los ensayos de los fabricantes al tratarse de probetas y hornos de mayor tamaño con una disposición constructiva mas sólida que la de la probeta de los ensayos realizados en la Tesis y una menor concentración de la temperatura del gas en el horno.

En cualquier caso, puede deducirse que no debe considerarse el valor de la conductividad térmica como un valor constante del material a temperatura ambiente debido a las diferencias de valores de la temperatura del acero que se producen a partir de la fractura del material.

9.7 CONCLUSIONES

De todo lo anteriormente expuesto podemos deducir que, adoptando los valores de conductividad térmica efectiva simplificada propuestos en la presente Tesis:

t_{inicial}	t_{final}	15 mm	30 mm	45 mm	60 mm
0,0	10,0	$\lambda_s : 150^\circ$ a los 10'	$\lambda_s : 100^\circ$ a los 10'	$\lambda_s : 85^\circ$ a los 10'	$\lambda_s : 80^\circ$ a los 10'
10,5	27,0	$\lambda = 0,075$	$\lambda = 0,105$	$\lambda = 0,133$	$\lambda = 0,1625$
27,5	60,0	$\lambda = 0,0035 t + 0,1732$			
60,5	→		$\lambda = 0,75$	$\lambda = 0,91$	$\lambda = 1,06$

se puede concluir que:

- Con un revestimiento de 15 mm, para temperaturas críticas inferiores a 700°C se alcanza una R30 y, en función de la temperatura crítica del elemento podría llegarse a R 60.
- Con un revestimiento de 30 mm, para temperaturas críticas inferiores a 700°C se alcanza una R60 y, en función de la temperatura crítica del elemento podría llegarse a R 90.
- Con un revestimiento de 45 mm, para temperaturas críticas inferiores a 700°C se alcanza una R90 y, en función de la temperatura crítica del elemento podría llegarse a R 120, aunque los resultados obtenidos quedan muy lejos de esa resistencia.
- Con un revestimiento de 60 mm, para temperaturas críticas inferiores a 700°C se alcanza una R90 y, en función de la temperatura crítica del elemento podría llegarse a R 120, aunque los resultados obtenidos quedan muy lejos de esa resistencia.

En ningún caso parece que se pueda alcanzar los 180 minutos con protección a base de placas de yeso laminado.

10 CONCLUSIONES, PROPUESTA Y NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

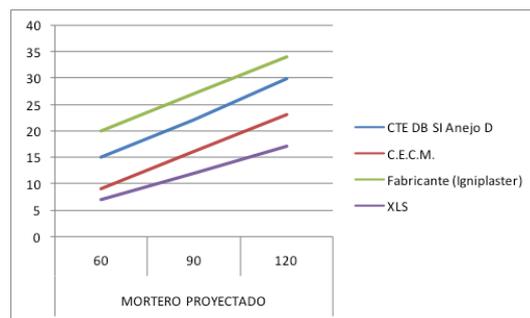
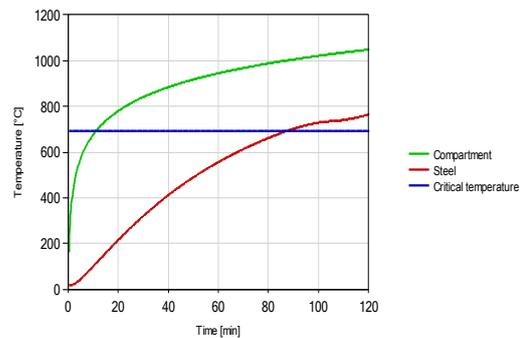
10.1 CONCLUSIONES DE LA TESIS

- Independientemente del modelo de cálculo a utilizar para el cálculo de la resistencia al fuego de las estructuras de acero (general o simplificado), se ha constatado que, de los disponibles, el método más preciso para determinar la transferencia de temperatura del gas ambiente al acero es la **ecuación diferencial** (que se incluye tanto en el EC-3, como en el Anejo D del DB SI del CTE, el Capítulo XII de la Instrucción EAE o en la norma UNE ENV 13381-4)

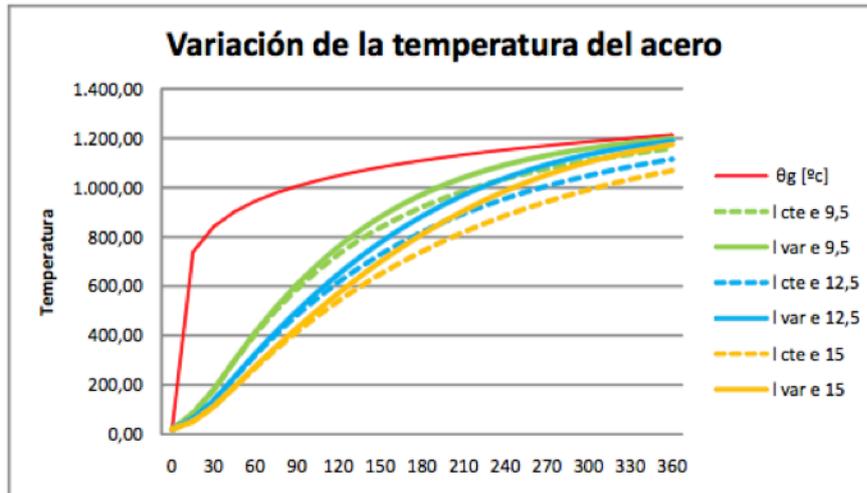
$$\Delta\theta_{s,t} = \frac{\lambda_p}{d_p c_s \rho_s} \frac{A_p}{V} \left(\frac{1}{1 + \phi/3} \right) (\theta_{g,t} - \theta_{s,t}) \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \geq 0$$

Para ello se ha desarrollado - para la presente Tesis - una herramienta de cálculo con la que se ha analizado la precisión de los métodos simplificados disponibles (se incluye en la Tesis un estudio sobre la analogía del dominio de la resistencia y la temperatura de los métodos simplificados y una propuesta de fórmulas para determinar el valor del factor de reducción del límite elástico en función de los distintos tipos de sollicitación). Esta herramienta se ha validado con el programa ELEFIR desarrollado por las Universidades de Lieja y Oporto.

SOPORTE CENTRAL																				
FLEXIÓN SIMPLE																				
DATOS DE ENTRADA																				
Escenario de incendio																				
T _{amb}	60	(min)	Curva de incendio							ESTANDAR										
Características geométricas																				
Perfil	HEB 300	Luz [cm]	430.00	h [mm]	300.0	h ₁ [mm]	11.0	b [mm]	300.0	t ₁ [mm]	208.0	I _y [cm ⁴]	25.168.00	I _z [cm ⁴]	8.963.00					
A _g [cm ²]	149.10	A _w [cm ²]	1.732	W _{el} [cm ³]	1.877.80	W _{ey} [cm ³]	870.90	W _{ez} [cm ³]	1.868.80	W _{pl,y} [cm ³]	870.10	i _y [cm]	12.99	i _z [cm]	7.98					
Características mecánicas																				
Acero	S275	f _y [Mpa]	275	f _t [Mpa]	430	c [J/kgK]	600	ρ [kg/m ³]	7.850	E [Mpa]	210.000									
Acciones y sollicitaciones																				
Solicitación	1	S _z [kNm]	5.75	Q _z [kNm]	2.00	Tipo	5	N ₁ [kN]		N ₂ [kN]		M ₁ [kNm]	10.00	M ₂ [kNm]		V ₁ [kN]	18.85	V ₂ [kN]		
CLASIFICACIÓN DE LA SECCIÓN																				
CLASE										1										
CÁLCULO DE ESBELTECES																				
Esbeltez mecánica										56.73										
Esbeltez de Euler										86.81										
Esbeltez adimensional										NO PROCEDE POR NO ESTAR SOLICITADO A COMPRESIÓN										
Esbeltez reducida										NO PROCEDE POR ARRIOSTRAMIENTO LATERAL SUFICIENTE										
FACTOR DE REDUCCIÓN DE LAS ACCIONES																				
γ	1.35	γ _{ac}	1.50	γ _{st}	Residencial	0.30	ψ ₁		ψ ₂		ψ ₃		ψ ₄		ψ ₅		ψ ₆		ψ ₇	
n _t										0.5395										
TEMPERATURA CRÍTICA DEL ELEMENTO																				
Valor mínimo del factor de reducción k _φ										0.0691										
Temperatura crítica (dominio temperatura) θ _{cr}										888.48	°C									
Temperatura crítica (dominio resistencia) θ _{cr}										881.00	°C									
Temperatura crítica del elemento θ _{cr}										881.00	°C									
TEMPERATURA DEL ACERO NO PROTEGIDO																				
A _g [m ²]	0.01491	V [m ³]	41.52	φ	1.00	ε ₁	1.00	ε ₂	0.50	σ [W/m ² K]	0.00000567	α ₁ [W/m ² K]	25	CURVA NORMAL ESTANDAR						
t [min]	θ _g [°C]	θ _s [°C]																		
0.00	20.00	20.00	VALIDO																	
1.00	349.01	131.05	VALIDO																	
2.00	444.50	332.83	VALIDO																	
3.00	502.29	471.89	VALIDO																	
4.00	543.89	530.52	VALIDO																	
5.00	576.41	567.62	VALIDO																	
6.00	603.12	596.52	VALIDO																	
7.00	625.78	620.69	VALIDO																	
8.00	645.48	641.32	VALIDO																	
9.00	662.85	659.39	VALIDO																	
10.00	678.43	675.48	VALIDO																	
15.00	738.56	736.94	VALIDO																	
20.00	781.35	790.29	VALIDO																	
30.00	841.80	841.20	VALIDO																	
45.00	902.34	902.00	VALIDO																	
60.00	945.34	945.11	VALIDO																	
TEMPERATURA DEL ACERO PROTEGIDO																				
Material protector										Placas de silicato-cálcico										
A _g [m ²]	0.01491	A _v [V/m ²]	32.86	λ [W/mK]	0.06	d [m]	0.0695	c [J/kgK]	1.100	ρ [kg/m ³]	220	CURVA NORMAL ESTANDAR								
t [min]	θ _g [°C]	θ _s [°C]																		
0	20.00	20.00	VALIDO																	
15	738.56	38.69	VALIDO																	
20	781.35	48.55	VALIDO																	
30	841.80	67.31	VALIDO																	
45	902.34	96.88	VALIDO																	
60	945.34	127.26	VALIDO																	
90	1005.99	188.61	VALIDO																	
120	1049.04	249.23	VALIDO																	
180	1109.74	365.13	VALIDO																	
240	1152.62	471.98	VALIDO																	
360	1213.54	657.12	VALIDO																	



2. Con la citada herramienta se han realizado estudios analíticos para determinar que, de todos los parámetros que intervienen en la ecuación diferencial, el más relevante es el valor de la *conductividad térmica del material de protección* ya que su variación incide notablemente en la evolución de la temperatura del acero.



Esta variación de la conductividad térmica del material de protección (y su consiguiente influencia en la evolución de la temperatura del acero) no es tenida en cuenta, sin embargo, en la reglamentación nacional, en la que se habla de **conductividad térmica efectiva** asignándole un valor constante (y en el caso de las placas de yeso laminado, su valor a temperatura ambiente)

d/λ_p coeficiente de aislamiento del revestimiento, (m^2K/W) obtenido como promedio de las caras expuestas al fuego, siendo:

d espesor del revestimiento, [m];

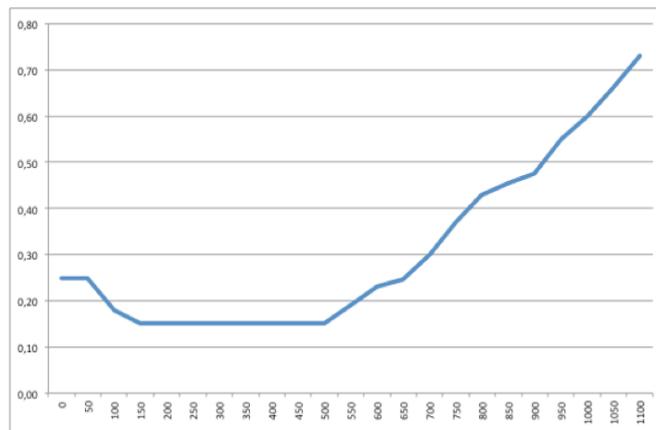
λ_p conductividad térmica efectiva del revestimiento, para el desarrollo total del tiempo de resistencia a fuego considerado; (W/mK).

En materiales de tipo pétreo, cerámico, hormigones, morteros y yesos, se puede tomar el valor de λ_p correspondiente a 20 °C.

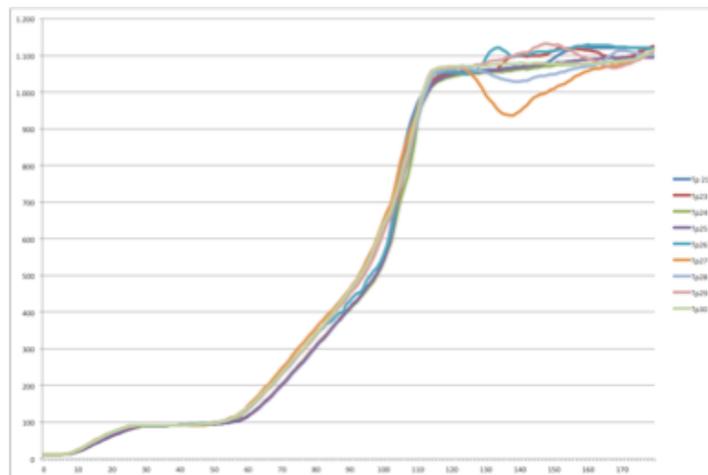
Tabla 45.2. Valores característicos de propiedades convencionales de materiales de protección genéricos.

Material	λ_{pk} W/(m ² K)	c_{pk} J/(kg ² K)	ρ_{pk} kg/m ³	P_k % peso
Granito, mármol.	2,40	900	2800	0
Hormigón de densidad normal con árido silíceo (°).	1,60	1000	2300	0
Hormigón de densidad normal con árido calizo (°).	1,30	1000	2300	0
Fábrica de ladrillo cerámico con mortero de cemento.	1,15	1000	1450	0
Hormigón ligero, según su densidad.	0,80 (°)	840	1600	2
	0,65	850	1300	2
	0,50	800	1000	2
	0,35	800	700	2
Placas de yeso.	0,20	1700	800	20

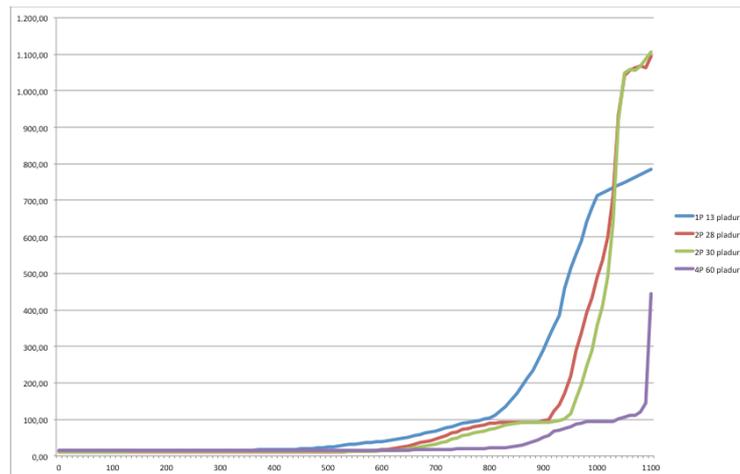
3. En los **estudios internacionales** sobre el comportamiento y la conductividad térmica de placas de yeso laminado analizados se aprecian una serie de características comunes:
- El valor habitualmente declarado a temperatura ambiente comienza a decrecer a los 50° de temperatura del gas hasta estabilizarse sobre los 150°.
 - Desde ese momento, el valor de la conductividad es sensiblemente horizontal, y con un valor inferior al declarado a temperatura ambiente (0,20-0,25) , hasta alcanzarse una temperatura del gas entre los 500° y 600°
 - A partir de esa zona, el valor de la conductividad comienza a subir bruscamente y se detecta que las placas de yeso laminado sufren rotura cuando se alcanzan temperaturas del gas entre los 600° y 700°: Gonçalves et al (1995), Sultan (1996), Takeda (1999), Petrell (2010)...



4. De los datos analizados de los ensayos de diversos **fabricantes del mercado nacional** (realizados de acuerdo a la Norma ENV 13381-4) se deducen características comunes:
- Dispersión de valores de los termopares a partir de cierta temperatura.



- Valores constantes de la temperatura del acero hasta en entorno de los 600° de temperatura del gas (cabría suponer que estas líneas deberían presentar una ligera pendiente ascendente, ya que no parece razonable que, incrementándose la temperatura del gas ambiente hasta esos valores, la temperatura del acero permanezca prácticamente inalterada)



- Analogías en los valores de temperatura del acero registradas para similares espesores de material de protección.

	Inicia ascenso brusco de temperatura del acero a la temperatura del gas de	Alcanza una temperatura del acero de 700° a la temperatura del gas de
FABRICANTE "A"		
13 mm	800° (23 min ISO)	1000° (87 min ISO)
28 mm	900° (45 min ISO)	1020° (99 min ISO)
30 mm	940° (58 min ISO)	1040° (113 min ISO)
60 mm	1080° (148 min ISO)	>1100° (169 min ISO)
FABRICANTE "B"		
15 mm	800° (23 min ISO)	1010° (93 min ISO)
25 mm	920° (51 min ISO)	1040° (113 min ISO)
40 mm	1000° (87 min ISO)	≈1100° (169 min ISO)

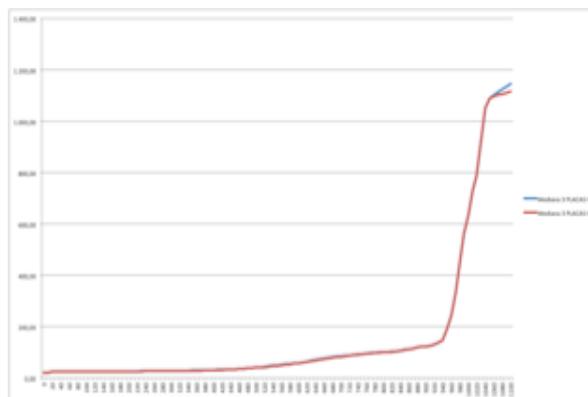
Y también se ha detectado que:

- No existe homogeneidad en las temperaturas del acero registradas para idénticos espesores de material de protección del mismo fabricante.
- No se ha observado el incremento brusco de la temperatura del acero a partir del entorno de los 600° que se indica en los diversos estudios internacionales indicados con anterioridad.
- Al no haber tenido acceso a los ensayos completos no se ha podido comprobar la existencia de las correcciones que, sobre la temperatura del acero, indica la norma UNE ENV 13381-4 así como la determinación del valor de conductividad térmica efectiva del revestimiento, datos de pegabilidad, etc. (limitándose a proponer tablas de espesores en función del factor de forma del elemento estructural) ni el estudio en los diferentes rangos de temperaturas críticas que se indican en la citada Norma, incluyéndose tablas únicamente para una Temperatura crítica del acero de 500°.
- Como se puede apreciar en el estudio comparativo de los valores incluidos en las citadas tablas, existen discrepancias notables entre los espesores de material de protección que indica cada fabricante para una temperatura crítica del acero de 500°.

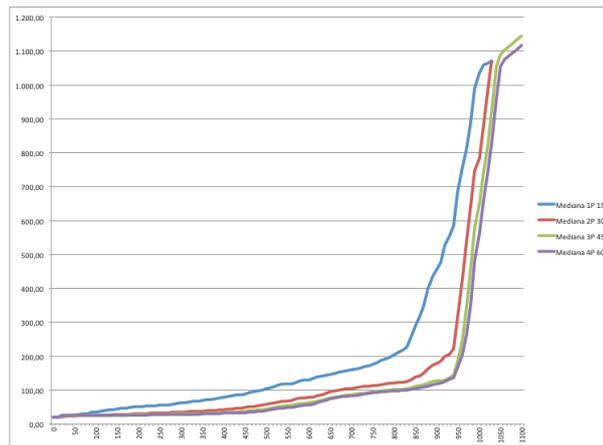
TABLA DE ESPESORES DE PROTECCIÓN DE PLACAS DE YESO LAMINADO															
Factor sección	Temperatura crítica del acero 500 ^o														
	30 minutos			60 minutos			90 minutos			120 minutos			180 minutos		
	"A"	"B"	"C"	"A"	"B"	"C"	"A"	"B"	"C"	"A"	"B"	"C"	"A"	"B"	"C"
40	14	13	15	14	13	15	14	13	25	20	13	35	33	38	50
50	14	13	15	14	13	15	15	13	25	21	25	35	35	38	50
60	14	13	15	14	13	20	17	13	30	25	25	40	39	38	55
70	14	13	15	14	13	20	20	13	30	27	25	40	42	38	55
80	14	13	15	14	13	20	21	25	30	29	25	40	45	38	55
90	14	13	15	15	13	25	23	25	35	31	25	45	47		60
100	14	13	15	16	13	25	24	25	35	32	25	45	49		60
110	14	13	15	17	13	25	25	25	35	34	25	45	51		60
120	14	13	15	17	13	25	26	25	35	35	38	45	52		60
130	14	13	15	18	13	25	27	25	35	36	38	45	53		60
140	14	13	15	19	13	25	28	25	35	36	38	45	54		60
150	14	13	15	19	25	25	28	25	35	37	38	50	55		60
160	14	13	15	20	25	25	29	25	35	38	38	50	56		60
170	14	13	15	20	25	25	29	25	40	38	38	50	57		60
180	14	13	15	21	25	25	30	25	40	39	38	50	57		60
190	14	13	15	21	25	30	30	25	40	39	38	50	58		60
200	14	13	15	21	25	30	31	25	40	40	38	50	59		60
210	14	13	15	21	25	30	31	25	40	40	38	50	59		65
220	14	13	15	22	25	30	31	25	40	41	38	50	60		65
230	14	13	20	22	25	30	32	25	40	41	38	50	60		65
240	14	13	20	22	25	30	32	25	40	41	38	50	61		65
250	14	13	20	22	25	30	32	25	40	42	38	50	61		65
260	14	13	20	23	25	30	32	25	40	42	38	50	61		65
270		13	20		25	30		25	40		38	50			65
280		13	20		25	30		25	40		38	50			65
290		13	20		25	30		25	40		38	50			65
300		13	20		25	30		25	40		38	50			65
310			20			30			40			50			65
320			20			30			40			50			65
330			20			30			40			50			65
340			20			30			40			50			65
350			20			30			40			50			70
360			20			30			40			50			70
370			20			30			40			50			70
380			20			30			40			50			70
390			20			30			40			50			70
400			20			30			40			50			70
Valores obtenidos por extrapolación															

5. En los **ensayos a pequeña escala realizados para la Tesis** se aprecia que:
- No existen diferencias, en cuanto a la temperatura del acero registrada, de las placas normales con las mejoradas, lo que implica que la conductividad térmica efectiva de ambos materiales puede considerarse similar (aunque el comportamiento mecánico de las mejoradas es superior).

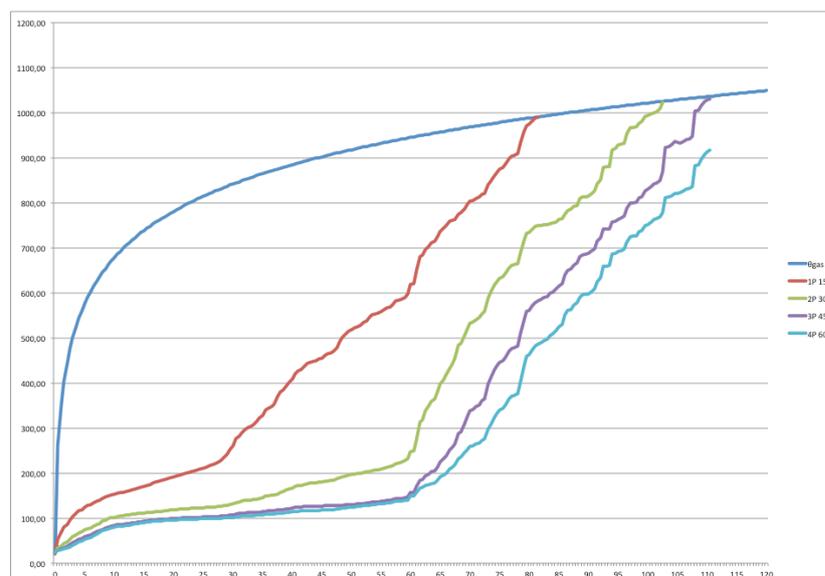
Este fenómeno también se indica en los estudios no nacionales y, en cuanto a los ensayos de los fabricantes nacionales, éstos han sido realizados siempre con placas mejoradas, luego no se pueden deducir conclusiones a este respecto de los mismos.



- A partir de determinadas temperaturas del gas, la temperatura del acero se eleva bruscamente, lo que indica que el revestimiento protector pierde su eficacia (debido, con toda probabilidad, a su rotura)

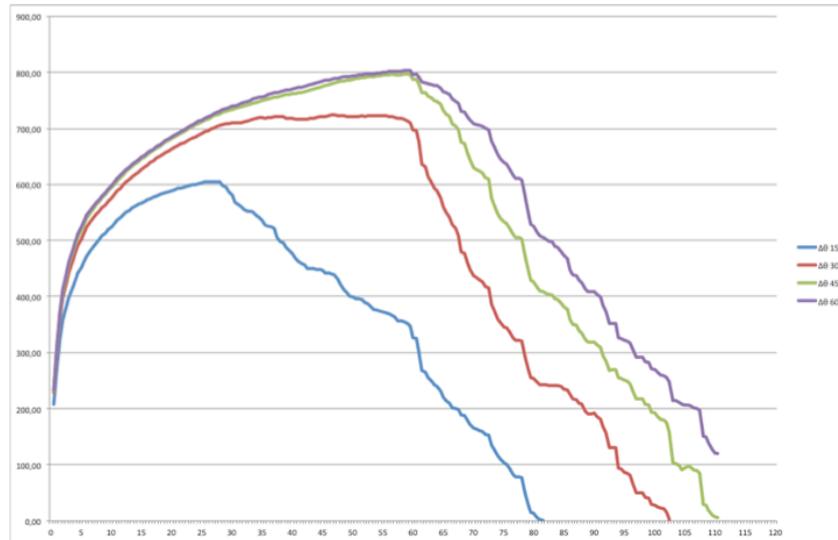


- Se detecta una pendiente en la evolución de la temperatura del acero y unos resultados homogéneos en cuanto a comportamiento hasta que se produce la fractura del revestimiento (no apreciable en los ensayos de los fabricantes pero si detectados en los estudios internacionales).
- Los resultados de placas triples y cuádruples son prácticamente coincidentes. En los revestimientos con dos, tres y cuatro placas, a partir de los 940° de temperatura del gas ambiente, la temperatura del acero se eleva bruscamente. El valor que se aleja de los anteriores es el de revestimiento con una sola placa en el que el citado incremento se produce sobre los 830° y, posteriormente a los 950°.
- En la gráfica en la que se representan los valores mediana de temperatura alcanzada por el acero (calculados mediante un proceso de interpolación) en relación con el tiempo de la curva nominal estándar, puede apreciarse que los valores presentan una cierta homogeneidad hasta los 30 minutos en el caso del revestimiento con una placa, y hasta los 60 minutos en el resto de los casos (dos, tres y cuatro placas) a partir de esos tiempos comienza el comportamiento irregular de las medidas de temperatura del acero (por rotura del revestimiento).



Obviamente, las pendientes de estos tramos homogéneos en forma de meseta son de diferente pendiente en función del espesor de revestimiento utilizado, siendo mas tendidas a medida que el espesor del revestimiento es mayor. Las pendientes de estos tramos son prácticamente coincidentes en el caso de tres y cuatro placas.

- Los diversos espesores de revestimiento absorben calor hasta determinados tiempos (y sus correspondientes temperaturas de la curva ISO) a partir de los cuales pierden su eficacia quedando una absorción de calor residual. en el eje de ordenadas de la siguiente gráfica puede apreciarse el calor absorbido por el revestimiento, calculado como la diferencia entre la temperatura del gas en el incendio y la temperatura del acero.



6. Del **análisis comparativo** realizado entre los datos de los estudios internacionales, los de los fabricantes distribuidores del mercado nacional y los ensayos realizados para la presente Tesis se deduce que:
 - Existen diferencias y coincidencias entre los datos obtenidos de los ensayos de la Tesis y los ensayos de los fabricantes, ya que son coincidentes en el caso de espesores de revestimiento de 15 y 30 mm y se aprecian diferencias en los revestimientos de 45 y 60 mm.

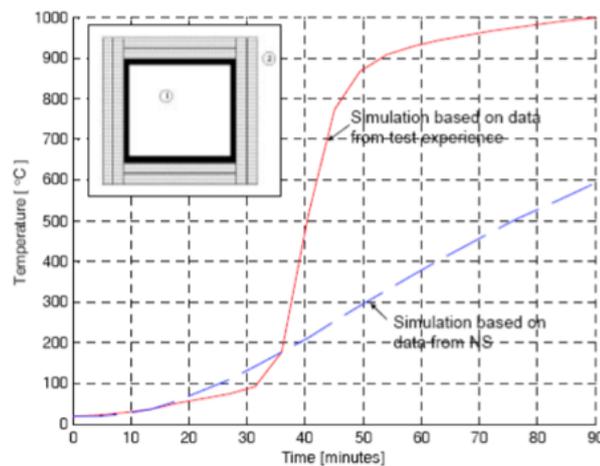
	Inicia ascenso brusco de temperatura del acero a la temperatura del gas de	Alcanza una temperatura del acero de 700° a la temperatura del gas de
FABRICANTE "A"		
13 mm	800° (23 min ISO)	990° (81 min ISO)
28 mm	900° (45 min ISO)	1020° (99 min ISO)
30 mm	940° (58 min ISO)	1030° (106 min ISO)
60 mm	1080° (148 min ISO)	>1100° (169 min ISO)
FABRICANTE "B"		
15 mm	800° (23 min ISO)	1010° (93 min ISO)
25 mm	920° (51 min ISO)	1030° (106 min ISO)
40 mm	1000° (87 min ISO)	≈1100° (169 min ISO)
ENSAYOS TESIS		
15 mm	820° (26 min ISO)	950° (62 min ISO)
30 mm	930° (54 min ISO)	990° (81 min ISO)
45 mm	940° (58 min ISO)	1010° (93 min ISO)
60 mm	940° (58 min ISO)	1020° (99 min ISO)

- El motivo de estas diferencias puede ser debido al tamaño de la probeta y el horno utilizado en los ensayos de las fabricantes de acuerdo con la norma UNE ENV 13381-4 totalmente diferente en tamaño y composición al usado en los ensayos. Ha de tenerse en cuenta, igualmente, que la distribución de temperaturas del gas en el interior del horno no son coincidentes en el caso del utilizado en los ensayos

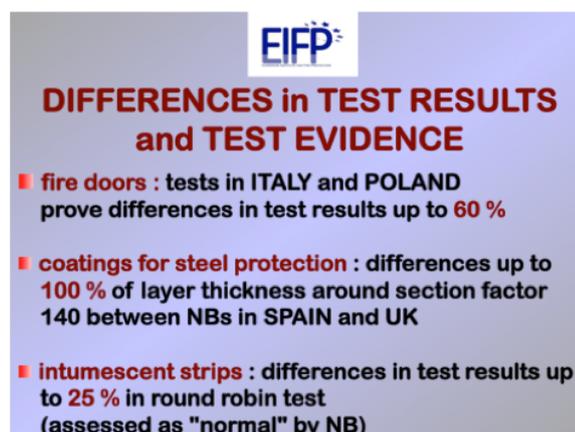
de la Tesis (eléctrico y de reducidas dimensiones) y de los fabricantes (combustible líquido y de grandes dimensiones). Si bien se trata de una mera suposición del autor que no se ha confrontado exhaustivamente, ya que se necesitaría conocer con detalle el desarrollo de los ensayos en horno a gran escala según la norma UNE ENV 13381-4 para poder establecer hipótesis al respecto. (apoyándose, entre otros aspectos, en reportajes fotográficos y videográficos)

- En cualquier caso, los datos de los ensayos de la Tesis no corresponden (para los revestimientos de 45 mm en adelante) con lo resultados analizados en los ensayos de los fabricantes iniciales, que proporcionan valores de resistencia al fuego superiores a 120 y 180 minutos.

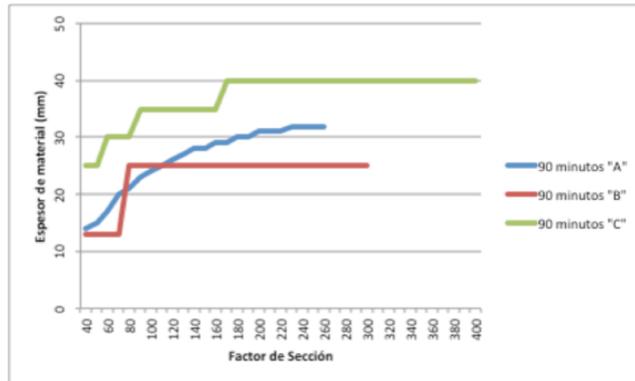
En estos ensayos de los fabricantes no aparece la rotura del revestimiento apreciada, tanto en la presente Tesis como en los diversos estudios experimentales realizados en el extranjero (en los que, como en los de la Tesis, se ha observado que, con motivo de producirse la rotura del material de revestimiento el desarrollo de la evolución de la temperatura del acero sufre cambios profundos tal y como se puede apreciar en la presente gráfica preparada por PETRELL (Noruega).



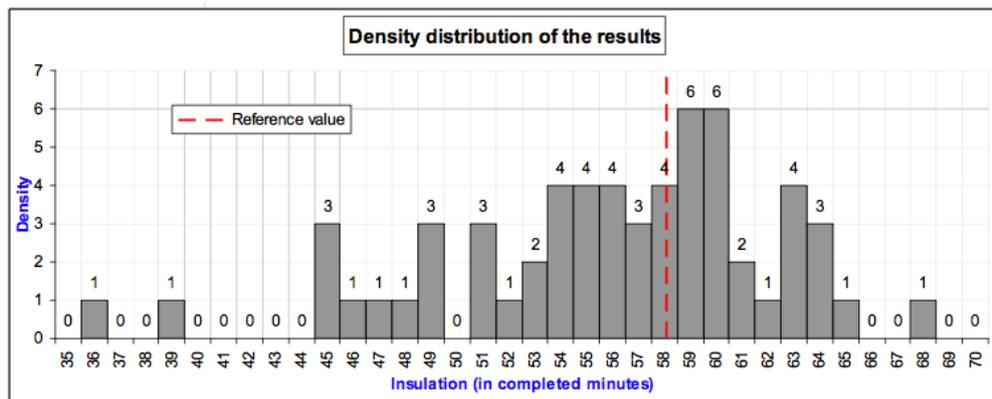
- Respecto a los datos de los ensayos realizados por los fabricantes, en un reciente informe realizado por el Instituto Europeo para la Protección ante el Fuego (EIFP), se han puesto en evidencia grandes diferencias entre los resultados de los ensayos realizados por Laboratorios de distintos países (obsérvese el segundo epígrafe en el que se denuncian diferencias de hasta el 100% en el espesor de protección entre dos países).



- Además, analizando los valores de espesores de revestimiento necesarios para una temperatura crítica del acero de 500° de los tres fabricantes estudiados se aprecian discrepancias muy apreciables entre ellos.



- En un reciente informe (*Round Robin # TC2 09-1*) realizado por el Grupo Europeo de Laboratorios de Fuego (EGOLF) en el que se han analizado estadísticamente los resultados de 32 laboratorios sobre el mismo tipo de ensayo normalizado, se han apreciado dispersiones apreciables en los resultados arrojados por los participantes.



7. Con los valores de los ensayos de la Tesis se ha despejado el **valor de conductividad térmica efectiva del material** de protección desde la ecuación diferencial mediante la siguiente fórmula:

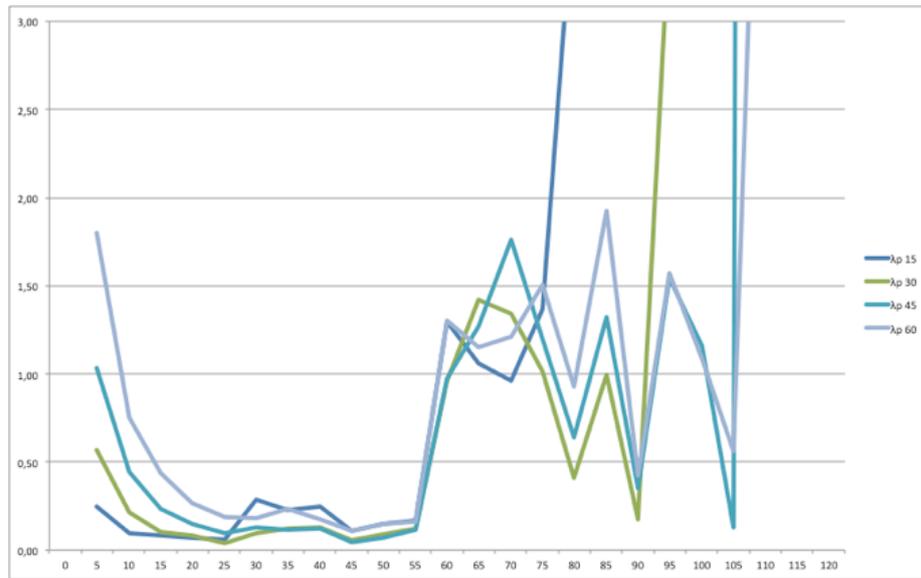
$$\lambda_p = \left[\Delta\theta_{s,t} + (e^{\varphi/10} - 1)\Delta\theta_{g,t} \right] \left[d_p c_s \rho_s \frac{V}{A_p} \right] \left[1 + \varphi/3 \right] \left[\frac{1}{(\theta_{g,t} - \theta_{s,t})\Delta t} \right]$$

observándose unos comportamientos homogéneos en todos los espesores de revestimiento:

- Fase inicial de descenso acusado hasta los 15-30 minutos en función del espesor de protección.
- Línea en meseta horizontal y con un valor inferior a la conductividad a temperatura ambiente prácticamente horizontal hasta los 30 minutos(en el caso de una placa) y hasta los 60-65 minutos en el resto de espesores. El valor de la conductividad térmica en esta meseta horizontal es de aproximadamente 0,03 en

el caso de 15 mm, 0,06 en el caso de 30 mm, 0,11 en el caso de 45 mm y 0,15 en el caso de 60 mm.

- Brusco ascenso y comportamiento errático del valor a partir de esos tiempos



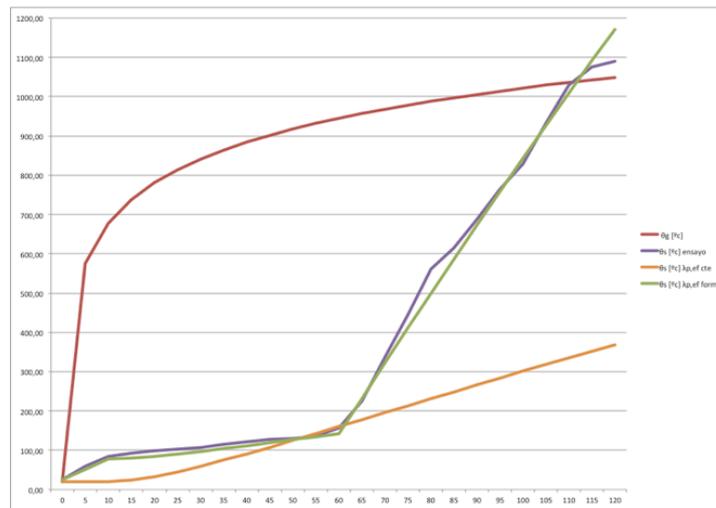
- Los valores obtenidos se han aproximado a ecuaciones por períodos de tiempo:

t _{inicial}	t _{final}	15 mm	30 mm	45 mm	60 mm
0	3	$\lambda = 10,73 t^{-1,85}$ (***)	$\lambda = 20,43 t^{-1,76}$ (***)	$\lambda = 52,63 t^{-1,52}$ (***)	$\lambda = 114,91 t^{-2,03}$ (***)
3,5	10	$\lambda = 0,35 t^{-0,50}$	$\lambda = 0,64 e^{-0,08 t}$	$\lambda = 1,52 t^{-0,44}$	$\lambda = 2,67 t^{-0,41}$
10,5	24	$\lambda = 0,006 t + 0,065$	$\lambda = 0,0001 t^2 - 0,0061 t + 0,15$	$\lambda = 0,34 t^{-0,30}$	$\lambda = -0,0003 t^2 - 0,023 t + 0,5749$
24,5	27				
27,5	60	$\lambda = 0,00002 t^2 + 0,0011 t + 0,226$	$\lambda = 0,066 e^{0,013 t}$	$\lambda = 0,18 t^{-0,03}$	$\lambda = 0,18 t^{-0,03}$
60,5	→				

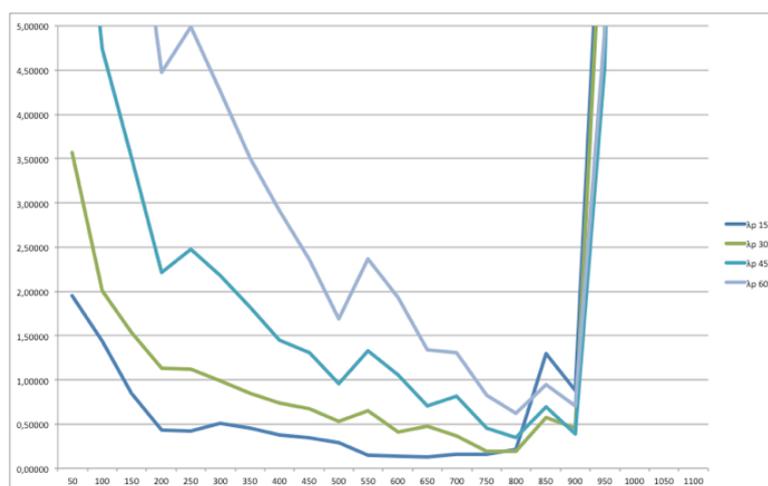
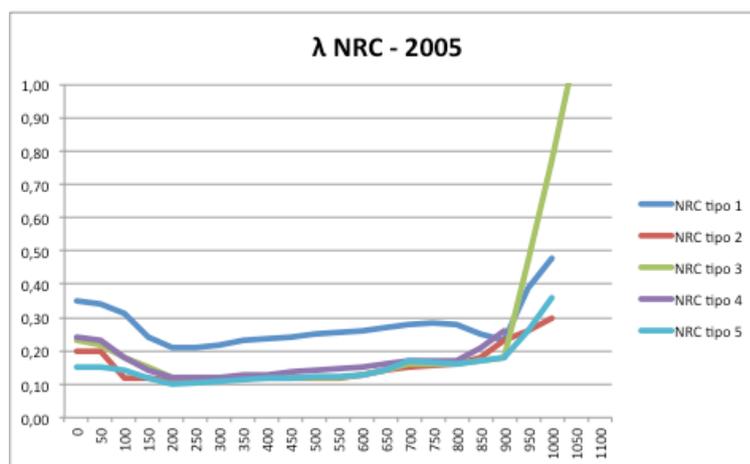
- Se ha efectuado una validación de la aplicación de los valores propuestos a los obtenidos en los ensayos observándose que, excepto en el caso del revestimiento con una sola placa de 15 mm, que mantiene una evolución razonable hasta el entorno de los 30 minutos, la temperatura del acero presenta un comportamiento lógico (con una ligera pendiente ascendente) hasta los 60 minutos, iniciándose a continuación un brusco ascenso de la temperatura.

En todos los casos resulta evidente la diferencia que se aprecia en la temperatura del acero al considerar la conductividad térmica del material de protección como un valor constante o variable.

- Las ecuaciones desde los 0 a los diez minutos de la primera fila (sobre todo las de la primera fila marcadas con tres asteriscos) no proporcionan exactamente los valores de conductividad térmica efectiva reales, por lo que se deben introducir manualmente ya que, de otra manera, los resultados se distorsionan notablemente.
- En la gráfica puede apreciarse que los valores calculados con la conductividad térmica efectiva formulada (color verde) coinciden con los reales obtenidos en los ensayos (color añil) sobre todo en la primera parte en los que se inicia la dispersión de valores registrados por los termopares debido a la rotura del material.
- A partir de ese tiempo la temperatura calculada se aproxima de forma lineal continua a la pendiente de la realmente obtenida.



- Existen similitudes entre los resultados de los ensayos realizados para la presente Tesis y los obtenidos por el NRC mediante el *Thermal Conductivity Meter KYOTO ELECTRONICS TC-31* en lo referido a la temperatura del gas a la que comienza el ascenso brusco de la temperatura del acero (fractura del material) en el entorno de los 900°.



10.2 PROPUESTA

A partir de las conclusiones citadas anteriormente, se efectúa la siguiente propuesta de simplificación de los valores .

- Con objeto de simplificar y homogeneizar las anteriores ecuaciones se ha realizado un estudio analítico proponiéndose valores mas elementales (que se pueden apreciar en la siguiente Tabla), habiéndose comprobado, mediante aplicación a un caso real, que los resultados obtenidos con estos valores se aproximan a los obtenidos realmente.

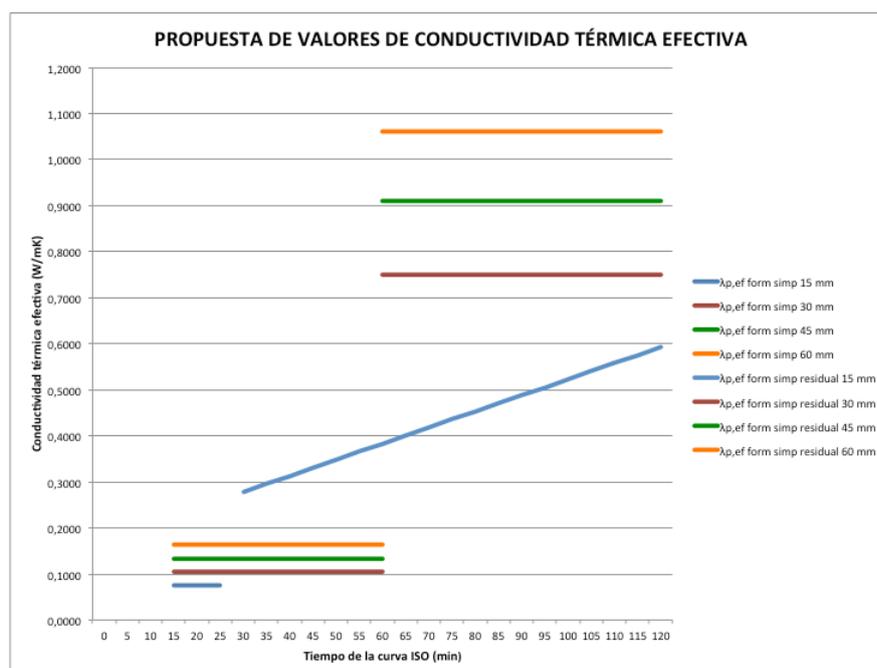
t _{inicial}	t _{final}	15 mm	30 mm	45 mm	60 mm
0,0	10,0	Θs :150º a los 10 min	Θs :100º a los 10 min	Θs :85º a los 10 min	Θs :80º a los 10 min
10,5	27,0	λ = 0,075	λ = 0,105	λ = 0,133	λ = 0,1625
27,5	60,0	λ = 0,0035 t + 0,1732			
60,5	→		λ = 0,75	λ = 0,91	λ = 1,06

Como los valores de la conductividad térmica efectiva que reproducen la temperatura que alcanza realmente el acero en el periodo de tiempo comprendido entre los 0 y los 10 minutos resultan ser valores que difieren exageradamente de la propia magnitud de la conductividad térmica (recuérdese que los fabricantes declaran valores entre 0,20 y 0,25 a temperatura ambiente) se propone comenzar el uso de la ecuación diferencial a partir de los 10 minutos y tomando como valores de la temperatura del acero a ese tiempo los obtenidos en los ensayos, que resultan ser:

- Para el revestimiento de una placa de 15 mm: 150°
- Para el revestimiento de dos placas con un total de 30 mm: 100°
- Para el revestimiento de dos placas con un total de 45 mm: 85°
- Para el revestimiento de dos placas con un total de 60 mm: 80

A partir de esa fila (resaltada en gris claro) se propone unos valores constantes (excepto en el caso del revestimiento de 15 mm que, desde los 27,5 en adelante se conforma por una ecuación lineal)

De forma gráfica se expresan los valores de conductividad térmica efectiva simplificada para los distintos espesores que se proponen en la presente Tesis.



Esto se puede resumir en tres tramos:

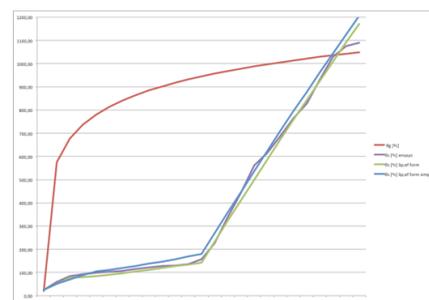
- El primer tramo, que correspondería, al descenso brusco de la conductividad motivado por la elevación de la temperatura del gas en la curva ISO desde los 0 a los 10 minutos y que no se encuentran representados en la gráfica por comenzar el cálculo con la ecuación diferencial a partir de los 10 minutos con las temperaturas indicadas, como se ha explicado anteriormente.
- El segundo tramo, que corresponde a los valores constantes hasta la rotura del material. Puede apreciarse que la separación entre los diferentes tipos de espesor presenta un valor prácticamente constante de aproximadamente 0,03.
- El tercer tramo, que corresponde a la fractura del aislamiento con un ascenso brusco de la conductividad a partir del cual se convierte en un valor constante excepto en el caso del revestimiento de 15 mm que presenta forma de ecuación lineal ascendente. También puede apreciarse que la separación entre los espesores viene a ser un valor prácticamente constante de aproximadamente 0,15
- Hay que destacar que, a partir de la fractura del material (sobre los 25 minutos en el caso de los 15 mm de espesor y sobre los 60 minutos en el resto de los casos), el valor propuesto no corresponde a una magnitud física sino a un valor que al ser adoptado en el cálculo (que podría ser llamado *conductividad térmica efectiva residual*) proporciona una evolución de la temperatura del acero similar a la registrada en los ensayos.

Puede deducirse que se puede admitir la deducción de valores por interpolación lineal para espesores distintos de los analizados teniendo en cuenta que sobre los 30 minutos se detecta una fractura en el material para 15 mm de espesor y, para el resto de los casos, sobre los 60 minutos.

Por último, se propone que, adoptando los valores de conductividad térmica efectiva simplificada para las placas de yeso laminado determinados en la presente Tesis mediante el procedimiento de ensayo seguido se puede concluir que:

- Con un revestimiento de 15 mm, para temperaturas críticas inferiores a 700°C se alcanza una R30 y, en función de la Temperatura crítica del elemento podría llegarse a R 60.
- Con un revestimiento de 30 mm, para temperaturas críticas inferiores a 700°C se alcanza una R60 y, en función de la Temperatura crítica del elemento podría llegarse a R 90.
- Con un revestimiento de 45 mm, para temperaturas críticas inferiores a 700°C se alcanza una R90 y, en función de la Temperatura crítica del elemento podría llegarse a R 120, aunque los resultados obtenidos quedan muy lejos de esa resistencia.
- Con un revestimiento de 60 mm, para temperaturas críticas inferiores a 700°C se alcanza una R90 y, en función de la Temperatura crítica del elemento podría llegarse a R 120, aunque los resultados obtenidos quedan muy lejos de esa resistencia.
- En ningún caso parece que se pueda alcanzar los 180 minutos con protección a base de placas de yeso laminado.

Los valores propuestos se han validado aplicando los mismos a un caso real y comprobando que los valores de temperatura del acero obtenidos coinciden sensiblemente con los registrados en los ensayos.

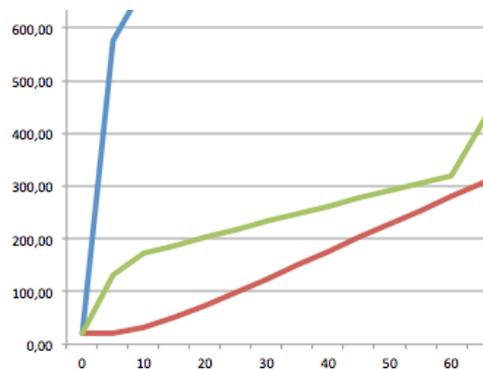


10.3 NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

1. Ampliar el estudio (mediante el procedimiento de ensayo descrito en la presente Tesis) a diversos tipos de materiales de revestimiento no reactivos convencionales:
 - Con placas (de lana de roca, a base de silicatos, de vidrio celular...)
 - Con morteros proyectados (de vermiculita, perlita, fibra mineral y diversos ligantes...)

determinando:

- Los puntos de temperatura a partir de los que la ecuación diferencial proporciona resultados coherentes, ya que se ha observado que (en el caso de las placas de yeso laminado) desde los 0 a los 10 minutos los valores obtenidos no arrojan un resultado coherente (ni tampoco al considerar el valor a temperatura ambiente)



- Los puntos a partir de los cuales el revestimiento protector pierde efectividad debido a su rotura, despegue o deterioro.
 - Los valores (constantes o mediante ecuaciones) de la conductividad térmica efectiva hasta el punto de pérdida de efectividad.
 - Los valores (constantes o mediante ecuaciones) de la conductividad térmica efectiva *residual* desde el punto de pérdida de efectividad.
 - La absorción de calor por el revestimiento protector analizando los tiempos de retardo de transmisión al acero.
 - Confeccionar Tablas con valores de resistencia al fuego con espesores habituales.
2. Formular curvas de comportamiento y valores (calculados y simplificados) del comportamiento de la conductividad térmica efectiva de los materiales de protección genéricos.
 - Para el período de no validez de la ecuación diferencial.
 - Para el periodo de validez de $\lambda_{p,ef,simp}$
 - Para el periodo de validez de $\lambda_{p,ef,simp}$ *residual*
 3. Confeccionar Tablas con los valores de Resistencia al Fuego alcanzados con revestimientos de espesor habitual y sus procedimientos de interpolación para materiales genéricos.
 4. Estudiar una formulación de la ecuación diferencial que proporcione unos valores adecuados de la temperatura del acero en el periodo de 0 a 10 minutos de tiempo de la curva de incendio estándar.
 5. Analizar el motivo por el que los ensayos de los fabricantes no reproducen la rotura del material apreciada tanto en los ensayos de la presente Tesis como en los estudios

internacionales, para lo que sería necesario tener mas datos de esos ensayos para observar, por ejemplo, en fotos si se produce rotura del revestimiento, vídeos del comportamiento de las probetas, los datos de pegabilidad, los análisis mediante ecuación diferencial, etc. ya que en los ensayos de los fabricantes parece que las fijaciones del sistema constructivo resisten mejor el efecto del fuego y posiblemente por esa razón las placas no se fracturen.

6. Disponiendo de todos esos datos, relacionar la conductividad térmica efectiva residual de los ensayos a pequeña y gran escala y, en su caso, elaborar una propuesta de modificación del procedimiento de ensayo de la Norma ENV 13381-4.
7. Elaborar una propuesta de modificación del ANEJO D del DB SI y de la Instrucción EAE relativa a los valores de conductividad térmica efectiva de los materiales de protección analizados.

Abril de 2013.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	FUNDAMENTOS.....	1
1.1.1	EFFECTOS DEL INCENDIO SOBRE LA ESTRUCTURA.....	1
1.1.2	PRINCIPIOS BÁSICOS DE CÁLCULO	1
1.1.2.1	VALOR DEL TIEMPO DE RESISTENCIA AL FUEGO EXIGIDO	2
1.1.2.2	COMPROBACIÓN DEL VALOR DEL TIEMPO DE RESISTENCIA AL FUEGO EXIGIDO	2
1.1.2.2.1	Comprobación mediante ensayos.....	2
1.1.2.2.2	Comprobación mediante métodos de cálculo.....	3
1.1.3	APLICACIÓN DE MÉTODOS DE CÁLCULO SIMPLIFICADOS.....	5
1.1.3.1	NORMA UNE-ENV 13381-4.....	6
1.1.3.2	VALORES TABULADOS DEL ANEJO D DEL DB-SI	9
1.1.3.3	ECUACIÓN DE LA CECM.....	10
1.1.3.4	ECUACIÓN DIFERENCIAL INCREMENTAL.....	11
1.2	CONCLUSIONES.....	13
2	HERRAMIENTA DE CÁLCULO.....	15
2.1	PROPIEDADES DEL ACERO ESTRUCTURAL.....	15
2.1.1	A TEMPERATURA NORMAL	15
2.1.2	A TEMPERATURA ELEVADA	16
2.1.2.1	LÍMITE ELÁSTICO.....	16
2.1.2.1.1	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	17
2.1.2.1.2	Calor específico	17
2.2	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES DE PROTECCIÓN.....	18
2.2.1	TIPOLOGÍA	19
2.2.1.1	MORTEROS	19
2.2.1.2	PANELES	19
2.2.1.3	REVESTIMIENTOS INTUMESCENTES	20
2.3	BASES DE CÁLCULO	21
2.3.1	MÉTODOS DE CÁLCULO	21
2.3.1.1	CLASIFICACIÓN DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL	22
2.3.1.2	CÁLCULO DE LA TEMPERATURA CRÍTICA	23
2.3.1.2.1	En el dominio de la temperatura	23
2.3.1.2.2	En el dominio de la resistencia.....	24
2.3.1.2.3	Analogía entre el dominio de la resistencia y el de la temperatura	25
2.3.1.2.4	Valores de cálculo del factor de reducción del límite elástico	27
2.3.1.3	CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DEL ACERO SIN PROTECCIÓN	28
2.3.1.4	CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DEL ACERO PROTEGIDO.....	29

2.4	DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO	29
2.4.1	DATOS DE ENTRADA.....	29
2.4.2	PROCESO DE CÁLCULO	30
2.4.3	SALIDA DE RESULTADOS	31
2.5	VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO	32
2.5.1	HEB 140 REVESTIDO CON UNA PLACA	32
2.5.1.1	ELEFIR-EN REPORT	32
2.5.1.2	RESULTADOS XLS	33
2.5.2	HEB 140 REVESTIDO CON DOS PLACAS	34
2.5.2.1	ELEFIR-EN REPORT	34
2.5.2.2	RESULTADOS XLS	35
2.5.3	HEB 140 REVESTIDO CON TRES PLACAS	36
2.5.3.1	ELEFIR-EN REPORT	36
2.5.3.2	RESULTADOS XLS	37
2.5.4	HEB 140 REVESTIDO CON CUATRO PLACAS.....	38
2.5.4.1	ELEFIR-EN REPORT	38
2.5.4.2	RESULTADOS XLS	39
2.6	CONCLUSIONES.....	40
3	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS DE CÁLCULO SIMPLIFICADOS	41
3.1	DATOS DE ENTRADA.....	41
3.2	CÁLCULO DEL ESPESOR DE LA PROTECCIÓN.....	41
3.2.1	TABLA ANEJO D - DB-SI	41
3.2.2	ECUACIÓN DE LA CECM.....	42
3.2.3	DATOS DEL FABRICANTE SEGÚN UNE-ENV 13 381	42
3.2.3.1	PINTURA INTUMESCENTE.....	43
3.2.3.2	MORTERO PROYECTADO	43
3.2.3.3	REVESTIMIENTO CON PLACAS.....	44
3.2.4	ECUACIÓN DIFERENCIAL INCREMENTAL.....	44
3.2.5	ANÁLISIS COMPARATIVO	45
3.2.5.1	TRACCIÓN	46
3.2.5.2	COMPRESIÓN	47
3.2.5.3	FLEXIÓN	48
3.2.5.4	CORTANTE	49
3.2.5.5	FLEXIÓN SIMPLE.....	50
3.2.5.6	FLEXOCOMPRESIÓN.....	51
3.3	CONCLUSIONES.....	52
4	ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL.....	53

4.1	LA ECUACIÓN DIFERENCIAL.....	53
4.1.1	ECUACIÓN BÁSICA DE LA CONDUCCIÓN DE CALOR	53
4.1.2	DESARROLLO - MANUALES DE DISEÑO DE LA CECM	54
4.1.3	UTILIZACIÓN NORMATIVA DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL	57
4.1.3.1	NORMA UNE 23820 EX.....	57
4.1.3.2	NORMA UNE-ENV 13381-4.....	57
4.1.3.3	EUROCÓDIGOS ESTRUCTURALES	57
4.1.3.4	CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN	57
4.1.3.5	INSTRUCCIÓN EAE.....	57
4.2	PARÁMETROS A ANALIZAR	57
4.2.1	PROPIEDADES DEL AMBIENTE.....	57
4.2.1.1	TEMPERATURA.....	57
4.2.2	PROPIEDADES DEL ACERO	59
4.2.2.1	TEMPERATURA.....	59
4.2.2.2	CALOR ESPECÍFICO	59
4.2.2.3	DENSIDAD	59
4.2.3	PROPIEDADES DE LA SECCIÓN	60
4.2.3.1	FACTOR DE SECCIÓN	60
4.2.4	PROPIEDADES DEL MATERIAL DE PROTECCIÓN	60
4.2.4.1	ESPESOR.....	62
4.2.4.2	CALOR ESPECÍFICO	63
4.2.4.3	DENSIDAD	63
4.2.4.4	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	63
4.3	VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES A ALTAS TEMPERATURAS	64
4.4	HERRAMIENTA DE CÁLCULO NUMÉRICO-GRÁFICO.....	66
4.4.1	PARÁMETROS DE ENTRADA.....	66
4.4.1.1	TIEMPO.....	66
4.4.1.2	TEMPERATURA DEL GAS AMBIENTE.....	67
4.4.1.3	DENSIDAD DEL ACERO.....	67
4.4.1.4	CALOR ESPECÍFICO DEL ACERO	67
4.4.1.5	DENSIDAD, CALOR ESPECÍFICO Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL MATERIAL DE PROTECCIÓN	68
4.4.2	PROCESO DE CÁLCULO	68
4.4.3	SALIDA DE RESULTADOS	69
4.5	ESTUDIO ANALÍTICO DE LA INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES DE PROTECCIÓN.....	70
4.5.1	VARIACIÓN DE LA DENSIDAD.....	70
4.5.1.1	MORTEROS DE FIBRA MINERAL - $\rho=220 \text{ kg/m}^3$ - $e=25 \text{ mm}$	72

4.5.1.2	MORTEROS ÁRIDOS LIGEROS/PANELES FIBROSILICATO $\rho=600 \text{ kg/m}^3$ e=20 mm	73
4.5.1.3	PANELES DE YESO LAMINADO - $\rho=800 \text{ kg/m}^3$ - e=15 mm	74
4.5.1.4	PANELES DE LANA MINERAL - $\rho=175 \text{ kg/m}^3$ - e=40 mm	75
4.5.2	VARIACIÓN DEL CALOR ESPECÍFICO	76
4.5.2.1	MORTEROS DE FIBRA MINERAL - $\rho=220 \text{ kg/m}^3$ - e=25 mm	77
4.5.2.2	MORTEROS ÁRIDOS LIGEROS/PANELES FIBROSILICATO $\rho=600 \text{ kg/m}^3$ e=20 mm	78
4.5.2.3	PANELES DE YESO - $\rho=800 \text{ kg/m}^3$ - e=15 mm	79
4.5.2.4	PANELES DE LANA MINERAL - $\rho=175 \text{ kg/m}^3$ - e=40 mm	80
4.5.3	VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	81
4.5.3.1	MORTEROS DE FIBRA MINERAL - $\rho=220 \text{ kg/m}^3$ - c=1.100 J/kgK	83
4.5.3.2	MORTEROS DE ÁRIDOS LIGEROS $\rho=600 \text{ kg/m}^3$ - c=1.100 J/kgK	84
4.5.3.3	PANELES DE FIBROSILICATO $\rho=600 \text{ kg/m}^3$ - c=1.100 J/kgK	85
4.5.3.4	PANELES DE YESO - $\rho=800 \text{ kg/m}^3$ - c=1.700 J/kgK	86
4.5.3.5	PANELES DE LANA MINERAL - $\rho=175 \text{ kg/m}^3$ - c=1.700 J/kgK	87
4.6	CONCLUSIONES	88
5	ESTUDIOS INTERNACIONALES SOBRE PLACAS DE YESO LAMINADO ...	91
5.1	VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	94
5.1.1	CANADÁ - FORINTEK CORPORATION	94
5.1.2	CANADÁ - NATIONAL RESEARCH COUNCIL	94
5.1.3	SUECIA - TRATEK	95
5.1.4	HOLANDA - UNIVERSIDAD DE TWENTE	96
5.1.5	SUIZA - ETH	96
5.1.6	U.S.A. - NIST	97
5.2	CONCLUSIONES	98
6	DATOS DE DISTRIBUIDORES NACIONALES DE PLACAS DE YESO LAMINADO	101
6.1	DATOS DE ENSAYOS FABRICANTE "A"	102
6.1.1	ELEMENTOS ENSAYADOS	102
6.1.2	VALORES OBTENIDOS	103
6.2	DATOS DE ENSAYOS FABRICANTE "B"	107
6.2.1	ELEMENTOS ENSAYADOS	107
6.2.2	VALORES OBTENIDOS	107
6.3	DATOS DE ENSAYOS FABRICANTE "C"	109
6.3.1	ELEMENTOS ENSAYADOS	109
6.3.2	VALORES OBTENIDOS	110
6.4	ANÁLISIS DE LOS DATOS	111
6.4.1	DISPERSIÓN DE VALORES DE LOS TERMOPARES	111

6.4.2	ANÁLISIS VALORES FABRICANTE “A”	112
6.4.3	ANÁLISIS VALORES FABRICANTE “B”	114
6.4.4	TABLA DE TEMPERATURAS	115
6.4.5	DISCREPANCIAS EN LOS ESPESORES	116
6.5	CONCLUSIONES.....	118
7	CAMPAÑA DE ENSAYOS	119
7.1	CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL UTILIZADO	119
7.1.1	Horno eléctrico.....	119
7.1.2	Termopares	119
7.1.3	Datalogger	119
7.1.4	Acero laminado.....	120
7.1.5	Placas de yeso laminado	120
7.2	PRUEBAS DE VALIDACIÓN	120
7.2.1	Validación del horno	120
7.2.2	Validación de la probeta de acero	121
7.2.3	Validación de toma de temperaturas en las placas de yeso laminado.....	123
7.2.4	Validación de la probeta de ensayo.....	124
7.2.5	Validación del apoyo de la probeta de ensayo.....	125
7.2.6	Determinaciones	126
7.3	RESULTADOS DE LA CAMPAÑA DE ENSAYOS	126
7.3.1	FORMACIÓN DE LAS PROBETAS	127
7.3.2	ESTUDIO FOTOGRÁFICO DE LOS ENSAYOS REALIZADOS.....	129
7.3.2.1	REVESTIMIENTO DE 15 mm	129
7.3.2.1.1	Placa normal	129
7.3.2.1.2	Placa mejorada.....	130
7.3.2.2	REVESTIMIENTO DE 30 mm	131
7.3.2.2.1	Placa normal	131
7.3.2.2.2	Placa mejorada.....	132
7.3.2.3	REVESTIMIENTO DE 45 mm	133
7.3.2.3.1	Placa normal	133
7.3.2.3.2	Placa mejorada.....	134
7.3.2.4	REVESTIMIENTO DE 60 mm	135
7.3.2.4.1	Placa normal	135
7.3.2.4.2	Placa mejorada.....	136
7.3.3	TRATAMIENTO DE LOS DATOS	137
7.3.3.1	PROBETA REVESTIDA CON UNA PLACA DE 15 mm	141
7.3.3.1.1	Fechas de ensayos	141
7.3.3.1.2	Datos obtenidos con revestimiento de placa normal.....	141
7.3.3.1.3	Datos obtenidos con revestimiento de placa mejorada	142

7.3.3.1.4	Comparación de datos obtenidos placa normal / mejorada	143
7.3.3.1.5	Valor mediana	144
7.3.3.2	PROBETA REVESTIDA CON DOS PLACAS DE 15 mm	145
7.3.3.2.1	Fechas de ensayos	145
7.3.3.2.2	Datos obtenidos con revestimiento de placa normal.....	146
7.3.3.2.3	Datos obtenidos con revestimiento de placa mejorada	147
7.3.3.2.4	Comparación de datos obtenidos placa normal / mejorada	148
7.3.3.2.5	Valor mediana	149
7.3.3.3	PROBETA REVESTIDA CON TRES PLACAS DE 15 mm	150
7.3.3.3.1	Fechas de ensayos	150
7.3.3.3.2	Datos obtenidos con revestimiento de placa normal.....	150
7.3.3.3.3	Datos obtenidos con revestimiento de placa mejorada	151
7.3.3.3.4	Comparación de datos obtenidos placa normal / mejorada	152
7.3.3.3.5	Valor mediana	153
7.3.3.4	PROBETA REVESTIDA CON CUATRO PLACAS DE 15 mm.....	154
7.3.3.4.1	Fechas de ensayos	154
7.3.3.4.2	Datos obtenidos con revestimiento de placa normal.....	154
7.3.3.4.3	Datos obtenidos con revestimiento de placa mejorada	155
7.3.3.4.4	Comparación de datos obtenidos placa normal / mejorada	156
7.3.3.4.5	Valor mediana.....	157
7.4	CONCLUSIONES.....	158
8	OBTENCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EFECTIVA	163
8.1	PROCESO DE CÁLCULO.....	163
8.1.1	FUNDAMENTO MATEMÁTICO.....	163
8.1.2	DATOS DE CÁLCULO	164
8.1.3	PROCESO DE CÁLCULO	166
8.2	RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EFECTIVA	167
8.2.1	ENSAYOS TESIS.....	167
8.2.1.1	PROTECCIÓN CON UNA PLACA DE 15 mm	167
8.2.1.2	PROTECCIÓN CON DOS PLACAS DE 15 mm.....	168
8.2.1.3	PROTECCIÓN CON TRES PLACAS DE 15 mm	169
8.2.1.4	PROTECCIÓN CON CUATRO PLACAS DE 15 mm.....	170
8.2.1.5	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	171
8.2.1.5.1	En relación con la temperatura del horno	171
8.2.1.5.2	En relación con el tiempo de la curva de incendio estándar	172
8.2.1.5.3	Diferencias de la temperatura del acero calculada con conductividad térmica constante o variable.....	174
8.2.2	ENSAYOS FABRICANTE “A”	177

8.2.2.1	PROTECCIÓN CON UNA PLACA DE 13 mm	177
8.2.2.2	PROTECCIÓN CON UNA PLACA DE 13 mm + UNA PLACA DE 15 mm	177
8.2.2.3	PROTECCIÓN CON DOS PLACAS DE 15 mm.....	177
8.2.2.4	PROTECCIÓN CON CUATRO PLACAS DE 15 mm.....	178
8.2.2.5	ANÁLISIS COMPARATIVO	178
8.2.3	ENSAYOS FABRICANTE “B”	179
8.2.3.1	PROTECCIÓN CON UNA PLACA DE 15 mm.....	179
8.2.3.2	PROTECCIÓN CON UNA PLACA DE 25 mm	179
8.2.3.3	PROTECCIÓN CON UNA PLACA DE 15 mm + UNA PLACA DE 25 mm	179
8.2.3.4	ANÁLISIS COMPARATIVO	180
8.3	ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE TIPOS DE ENSAYOS	181
8.3.1	TEMPERATURA DEL ACERO	181
8.3.2	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	182
9	PROPUESTA DE VALORES PARA LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EFECTIVA	183
9.1	CORRECCIÓN DEL VALOR.....	183
9.1.1	FUNDAMENTO.....	183
9.1.2	VALORES CORREGIDOS	184
9.2	PROPUESTA DE ECUACIONES.....	191
9.2.1	Revestimiento de una placa de 15 mm (15 mm).....	191
9.2.2	Revestimiento de dos placas de 15 mm (30 mm).....	193
9.2.3	Revestimiento de tres placas de 15 mm (45 mm).....	195
9.2.4	Revestimiento de cuatro placas de 15 mm (60 mm).....	197
9.2.5	Cuadro resumen	199
9.3	VALIDACIÓN DE LOS VALORES FORMULADOS	200
9.3.1	Revestimiento de una placa de 15 mm (15 mm).....	200
9.3.2	Revestimiento de dos placas de 15 mm (30 mm).....	201
9.3.3	Revestimiento de tres placas de 15 mm (45 mm).....	201
9.3.4	Revestimiento de cuatro placas de 15 mm (60 mm).....	202
9.4	PROPUESTA DE VALORES SIMPLIFICADOS.....	202
9.4.1	Revestimiento de una placa de 15 mm (15 mm).....	203
9.4.2	Revestimiento de dos placas de 15 mm (30 mm).....	203
9.4.3	Revestimiento de tres placas de 15 mm (45 mm).....	203
9.4.4	Revestimiento de cuatro placas de 15 mm (60 mm).....	204
9.4.5	Tabla resumen.....	204
9.5	VALIDACIÓN DE LOS VALORES SIMPLIFICADOS.....	204
9.5.1	Revestimiento de una placa de 15 mm (15 mm).....	205
9.5.2	Revestimiento de dos placas de 15 mm (30 mm).....	205
9.5.3	Revestimiento de tres placas de 15 mm (45 mm).....	206

9.5.4	Revestimiento de cuatro placas de 15 mm (60 mm).....	206
9.5.5	Cuadro resumen	207
9.5.6	Interpolación de valores.....	208
9.6	APLICACIÓN A UN CASO REAL	208
9.6.1	DATOS DE PARTIDA	208
9.6.2	REVESTIMIENTOS ENTORNO 15 mm	209
9.6.2.1	Tesis 15 mm	209
9.6.2.2	Fabricante “A” 13 mm	209
9.6.2.3	Fabricante “B” 13 mm.....	209
9.6.2.4	Conclusiones.....	210
9.6.3	REVESTIMIENTOS ENTORNO 25 mm	210
9.6.3.1	Fabricante “B” 25 mm.....	210
9.6.3.2	Fabricante “A” 28 mm	210
9.6.3.3	Conclusiones.....	211
9.6.4	REVESTIMIENTOS ENTORNO 30 mm	211
9.6.4.1	Tesis 30 mm.....	211
9.6.4.2	Fabricante “A” 30 mm	211
9.6.4.3	Conclusiones.....	211
9.6.5	REVESTIMIENTOS ENTORNO 45 mm	212
9.6.5.1	Fabricante “B” 40 mm.....	212
9.6.5.2	Tesis 45 mm.....	212
9.6.5.3	Conclusiones.....	212
9.6.6	REVESTIMIENTOS ENTORNO 60 mm	213
9.6.6.1	Tesis 60 mm.....	213
9.6.6.2	Fabricante “A” 60 mm	213
9.6.6.3	Conclusiones.....	213
9.6.7	CONCLUSIONES ADICIONALES.....	214
9.7	CONCLUSIONES.....	214
10	CONCLUSIONES, PROPUESTA Y NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	215
10.1	CONCLUSIONES DE LA TESIS.....	215
10.2	PROPUESTA	226
10.3	NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	228

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I.

Tabla I.1 –Tabla ejemplo de resultados de la Norma UNE ENV 13381-4.

Tabla I.2 – Tabla usual de resultados del fabricante de la Norma UNE ENV 13381-4.

Tabla I.3– Tabla del Anejo D del DB SI del CTE.

CAPÍTULO II.

Tabla II.1 – Límite elástico y tensión de rotura en función del tipo de acero.

Tabla II.2 – Propiedades físicas comunes a todos los tipos de acero.

Tabla II.3 – Coeficientes de reducción para la relación tensión-deformación a temperaturas elevadas..

Tabla II.4 – Conductividad térmica del acero en función de la temperatura.

Tabla II.5 – Calor específico del acero en función de la temperatura.

Tabla II.6 – Clasificación de las secciones transversales en función de su vulnerabilidad al pandeo local.

Tabla II.7 – Método de cálculo en función de la clasificación de la sección transversal.

Tabla II.8 – Analogía entre el dominio de la resistencia y el de la temperatura.

Tabla II.9 – Valores del factor mínimo de reducción del límite elástico en función del tipo de sollicitación.

CAPÍTULO III.

Tabla III.1 – Datos de entrada para el análisis comparativo de métodos de cálculo.

Tabla III.2 – Resultados del cálculo según la Tabla del Anejo D del DB SI.

Tabla III.3 – Resultados del cálculo según la fórmula de la CECM.

Tabla III.4 – Resultados del cálculo según los datos facilitados por los fabricantes.

Tabla III.5 – Resultados del cálculo según la ecuación diferencial incremental.

CAPÍTULO IV.

Tabla IV.1 – Valores de propiedades físicas de materiales de protección a temperatura ambiente tomadas de Catálogo.

Tabla IV.2 – Valores de propiedades físicas de materiales de protección a temperatura ambiente tomadas de fabricantes.

Tabla IV.3 – Valores de espesores comerciales de materiales de protección.

Tabla IV.4 – Valores genéricos de calor específico de materiales de protección a temperatura ambiente.

Tabla IV.5 – Valores genéricos de densidad de materiales de protección a temperatura ambiente.

Tabla IV.6 – Valores genéricos de conductividad térmica de materiales de protección a temperatura ambiente.

CAPÍTULO V.

Tabla V.1 – Resumen de datos numéricos de los estudios internacionales sobre evolución de la conductividad térmica en las placas de yeso laminado en función de la temperatura.

Tabla V.2 – Resumen de datos numéricos de los estudios internacionales sobre evolución de la conductividad térmica en las placas de yeso laminado en muestras homogéneas.

CAPÍTULO VI.

Tabla VI.1 – Tabla comparativa temperaturas alcanzadas por el acero en función del espesor de material de protección.

Tabla VI.2 – Tabla comparativa de los espesores de protección indicados por los fabricantes para distintos factores de sección y para una temperatura crítica del acero de 500°.

CAPÍTULO VII.

Tabla VII.1 – Comparativo de temperaturas registradas en función del espesor del material de protección.

CAPÍTULO IX.

Tabla IX.1 – Valores numéricos de conductividad térmica efectiva corregida para distintos espesores de material de protección.

Tabla IX.2 – Propuesta de valores de conductividad térmica efectiva simplificada.

ÍNDICE DE GRÁFICOS

CAPÍTULO II.

Gráfico II.1 – Coeficientes de reducción para la relación tensión-deformación a temperaturas elevadas.

Gráfico II.2 – Conductividad térmica del acero en función de la temperatura.

Gráfico II.3 – Calor específico del acero en función de la temperatura.

Gráfico II.4 – Analogía entre el dominio de la resistencia y el de la temperatura.

Gráfico II.5 – Pantalla de entrada de datos del programa ELEFIR.

CAPÍTULO III.

Gráfico III.1 – Gráficas comparativas de tracción.

Gráfico III.2 – Gráficas comparativas de compresión.

Gráfico III.3 – Gráficas comparativas de flexión.

Gráfico III.4 – Gráficas comparativas de cortante

Gráfico III.5 – Gráficas comparativas de flexión simple.

Gráfico III.6 – Gráficas comparativas de flexocompresión.

CAPÍTULO IV.

Gráfico IV.1 – Fases de un fuego natural, comparando temperaturas atmosféricas con la curva estándar de fuego ISO 834

Gráfico IV.2 – Curva de incendio nominal estándar (ISO 834)

CAPÍTULO V.

Gráfico V.1 – Valor mediana de los datos numéricos de los estudios internacionales sobre evolución de la conductividad térmica en las placas de yeso laminado.

Gráfico V.2 – Gráfica de los datos numéricos de los estudios internacionales sobre evolución de la conductividad térmica en las placas de yeso laminado en muestras homogéneas.

Gráfico V.3 – Valor mediana de los datos numéricos de los estudios internacionales sobre evolución de la conductividad térmica en las placas de yeso laminado en muestras homogéneas.

CAPÍTULO VI.

Gráfico VI.1 – Dispersión de los valores registrados en los termopares en los datos de los ensayos de los fabricantes.

Gráfico VI.2 – Dispersión de los valores mediana registrados en los termopares en los datos de los ensayos de los fabricantes en función del espesor de revestimiento de material de protección. Fabricante “A”

Gráfico VI.3 – Meseta horizontal de los valores mediana registrados en los termopares en los datos de los ensayos de los fabricantes en función del espesor de revestimiento de material de protección. Fabricante “A”

Gráfico VI.4 – Dispersión de los valores mediana registrados en los termopares en los datos de los ensayos de los fabricantes en función del espesor de revestimiento de material de protección. Fabricante “B”

Gráfico VI.5 – Meseta horizontal de los valores mediana registrados en los termopares en los datos de los ensayos de los fabricantes en función del espesor de revestimiento de material de protección. Fabricante “B”

Gráfico VI.6 – Gráficas de los espesores de protección indicados por los fabricantes para distintos tiempos de resistencia al fuego y para una temperatura crítica del acero de 500

CAPÍTULO VII.

Gráfico VII.1 – Curva de incendio del horno de ensayo.

Gráfico VII.2 – Validación de la probeta de acero. Valores de los termopares de registro.

Gráfico VII.3 – Validación de toma de temperaturas en las placas de yeso laminado. Valores de los termopares de registro.

Gráfico VII.4 – Validación de la probeta de ensayo. Valores de los termopares de registro.

Gráfico VII.5 – Validación del apoyo de la probeta de ensayo. Valores de los termopares de registro.

Gráfico VII.6 – Valores de temperaturas del acero registradas en los termopares en función de la temperatura del horno para un revestimiento de 15 mm de placa normal.

Gráfico VII.7 – Valor mediana de temperaturas del acero registradas en los termopares en función de la temperatura del horno para un revestimiento de 15 mm de placa normal.

Gráfico VII.8 – Valores de temperaturas del acero registradas en los termopares en función de la temperatura del horno para un revestimiento de 15 mm de placa mejorada.

Gráfico VII.9 – Valor mediana de temperaturas del acero acero registradas en los termopares en función de la temperatura del horno para un revestimiento de 15 mm de placa mejorada.

Gráfico VII.10 – Comparación entre los valores mediana de las placas normales y las placas mejoradas.

Gráfico VII.11 – Valores de temperaturas del acero registradas en los termopares en función del tiempo de la curva nominal estándar para un revestimiento de 15 mm.

Gráfico VII.12 – Valor mediana de las temperaturas del acero registradas en los termopares en función de la temperatura del horno para un revestimiento de 15 mm.

Gráfico VII.13 – Valor mediana de las temperaturas del acero registradas en los termopares en función del tiempo de la curva nominal estándar para un revestimiento de 15 mm.

Gráfico VII.14 – Valor mediana de las temperaturas del acero registradas en los termopares en función de la temperatura del horno para un revestimiento de 30 mm..

Gráfico VII.15 – Valor mediana de las temperaturas del acero registradas en los termopares en función del tiempo de la curva nominal estándar para un revestimiento de 30 mm.

Gráfico VII.16 – Valor mediana de las temperaturas del acero registradas en los termopares en función de la temperatura del horno para un revestimiento de 45 mm

Gráfico VII.17 – Valor mediana de las temperaturas del acero registradas en los termopares en función del tiempo de la curva nominal estándar para un revestimiento de 45 mm

Gráfico VII.18 – Valor mediana de las temperaturas del acero registradas en los termopares en función de la temperatura del horno para un revestimiento de 60 mm

Gráfico VII.19 – Valor mediana de las temperaturas del acero registradas en los termopares en función del tiempo de la curva nominal estándar para un revestimiento de 60 mm

Gráfico VII.20 – Comparativo de los valores mediana de las temperaturas del acero registradas en los termopares en función de la temperatura del horno.

Gráfico VII.21 – Comparativo de los valores mediana de las temperaturas del acero registradas en los termopares en función del tiempo de la curva nominal estándar.

Gráfico VI.22 – Comparativa de los valores de conductividad térmica efectiva calculada para distintos espesores de material de protección en función de la temperatura del gas en el horno.

Gráfico VI.23 – Comparativa conjunta de los valores de conductividad térmica efectiva calculada para distintos espesores de material de protección en función de la temperatura del gas en el horno.

Gráfico VI.24 – Comparativa de los valores de conductividad térmica efectiva calculada para distintos espesores de material de protección en función del tiempo de la curva estándar.

Gráfico VI.25 – Comparativa conjunta de los valores de conductividad térmica efectiva calculada para distintos espesores de material de protección en función del tiempo de la curva estándar.

Gráfico VI.26 – Comparativa de los valores de temperatura del acero calculada con conductividad térmica constante o variable para un espesor de revestimiento de 15 mm.

Gráfico VI.27 – Comparativa de los valores de temperatura del acero calculada con conductividad térmica constante o variable para un espesor de revestimiento de 30 mm.

Gráfico VI.28 – Comparativa de los valores de temperatura del acero calculada con conductividad térmica constante o variable para un espesor de revestimiento de 45 mm.

Gráfico VI.29 – Comparativa de los valores de temperatura del acero calculada con conductividad térmica constante o variable para un espesor de revestimiento de 60 mm.

Gráfico VI.30– Comparativa conjunta de los valores de conductividad térmica efectiva calculada para distintos espesores de material de protección del fabricante “A” en función del tiempo de la curva estándar.

Gráfico VI.31– Comparativa conjunta de los valores de conductividad térmica efectiva calculada para distintos espesores de material de protección del fabricante “B” en función del tiempo de la curva estándar.

CAPÍTULO IX.

Gráfico IX.1 – Gráficas de conductividad térmica efectiva corregida para distintos espesores de material de protección.

Gráfico IX.2 – Propuesta de valores de conductividad térmica efectiva simplificada.

ÍNDICE DE IMÁGENES

CAPÍTULO II.

Imagen II.1 – Situaciones de pandeo local en alas y alma de perfiles sometidos a la acción del fuego (tomadas del *Cardington Fire Test* realizado en 2003)

CAPÍTULO IV.

Imagen IV.1 – Transferencia de calor desde el gas ambiente al acero a través del material aislante.

Imagen IV.2 – Retraso del incremento de la temperatura del acero debido a la humedad del material protector.

CAPÍTULO VII.

Imagen VII.1 – Validación de la probeta de acero. Colocación de los termopares de registro.

Imagen VII.2 – Validación de toma de temperaturas en las placas de yeso laminado.

Imagen VII.3 – Validación la probeta de ensayo.

Imagen VII.4 – Validación del apoyo de la probeta de ensayo.

Páginas 133 a 140 – Reportaje fotográfico de los ensayos realizados.

REFERENCIAS

NORMATIVA

- Ministerio de Vivienda – Gobierno de España. “Documento Básico Seguridad Estructural” (DB SE) del Código Técnico de la Edificación. (C.T.E.). Abril 2009
- Ministerio de Vivienda – Gobierno de España. “Documento Básico Seguridad Estructural – Acciones en la Edificación” (DB SE-AE) del Código Técnico de la Edificación. (C.T.E.). Abril 2009
- Ministerio de Vivienda – Gobierno de España. “Documento Básico Seguridad Estructural – Acero” (DB SE-A) del Código Técnico de la Edificación. (C.T.E.). Enero 2008
- Ministerio de Vivienda – Gobierno de España. “Documento Básico Seguridad en caso de Incendio” (DB SI) del Código Técnico de la Edificación. (C.T.E.). Febrero 2010
- Ministerio de la Presidencia – Gobierno de España. “Real Decreto 751/2011, de 27 de mayo, por el que se aprueba la Instrucción de Acero Estructural (EAE)”. Junio 2011.
- Ministerio de la Presidencia – Gobierno de España .Real Decreto 312/2005 (modificado por el Real Decreto 110/2008) que establece, de forma armonizada, la clasificación de los productos de construcción en función de su comportamiento ante el fuego en el ámbito de la Unión Europea.
- Ministerio de Vivienda – Gobierno de España. “Catálogo de elementos constructivos del C.T.E.”. Marzo 2010.
- Norma UNE-EN 1990:2010. “Eurocódigos: Bases de cálculo de estructuras”. Junio 2010.
- Norma UNE-EN 1993-1-1:2008. “Eurocódigo 3 : Proyecto de estructuras de acero. Parte 1.1 : Reglas generales y reglas para edificación”. Mayo 2008.
- Norma UNE-EN 1993-1-2:2011. “Eurocódigo 3 : Proyecto de estructuras de acero. Parte 1.2 : Estructuras expuestas al fuego”. Diciembre 2011.
- Norma UNE-EN 1363-1:2000. “Ensayos de resistencia al fuego. Parte 1: Requisitos generales”. Octubre 2000.
- Norma UNE-ENV 13381-4:2005. “Ensayos para determinar la contribución a la resistencia al fuego de los elementos estructurales. Parte 4: Protección aplicada a elementos de acero”. Diciembre 2005
- Guía DITE nº 18 de la EOTA – Productos de protección frente al fuego (Partes 1, 2, 3 y 4)

BIBLIOGRAFÍA

- ORTIZ HERRERA, Jesús / VILLA CELLINO, Julia / LLAMAZARES DE LA PUENTE, Elías: “La seguridad de las estructuras de acero ante el incendio”. Oviedo: Publicaciones ENSIDESA, 1989.
- ORTIZ HERRERA, Jesús / VILLA CELLINO, Julia: “Cálculo de las estructuras de acero frente al incendio”. Madrid: Publicaciones APTA, 2009. ISBN 978-84-691-9549-9.
- FRANSSEN, Jean-Marc / VILA REAL, Paulo: “*Fire Design of Steel Structures*”. ECCS Publications, 2010. ISBN 978-92-9147-099-0
- CASTRO MARTÍN, Carlos: “Aislamiento térmico en edificación”. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia – Escuela de la Edificación, 2008. ISBN 978-84-96555-07-5
- DE VILLANUEVA DOMÍNGUEZ, Luis / GARCÍA SANTOS, Alfonso: “Manual del yeso”. Madrid, Asociación Técnica y Empresarial del Yeso (ATEDY). 2001. Isbn 84-95312-46-8

INFORMES y ARTÍCULOS

- BOCK, Hans Michael / SCHICKERT, Gerald: “Estudio comparativo para la determinación numérica de la temperatura crítica de elementos constructivos de acero sometidos a la sollicitación de incendio”. *Informe BAM n°17*. Berlín: BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung), 1987, pp 251-255
- MATTIEU, Jules: “Asegurar la Resistencia al fuego de las estructuras metálicas”. APTA (Asociación para la promoción técnica del acero)
- HALLER, Mike / CAJOT, Louis-Guy: “*Fire resistance of steel structures*”. Arcelor LCS Research Centre, 2006
- BERGE, Geir / OPSTAD, Kristen: “*Thermal Properties of Intumescent Passive Fire Protection Materials*”. Trondheim, www.Petrell.no, 2009
- PIGNATTA E SILVA, Valdir: “Estructuras de acero en situación de incendio”. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de Brasil, 2005
- KRUPPA, Joël / JOYEUX, Daniel / ZHAO, Bin: “*Scientific background to the harmonization of structural Eurocodes*”. Paris. CTICM (Centre Technique Industriel de la Construction Métallique), 2005
- OUTINEN, Jyri / KAITILA, Olli / MÄKELÄINEN Pentti: “*High-temperature testing of structural steel and modelling of structures at fire temperatures*”. Helsinki: University of Technology Laboratory of Steel Structures, 2001
- AA.VV: “*The behavior of multi-storey steel framed buildings in fire*”. Yorkshire: British Steel plc, Swinden Technology Centre, 1999
- SEPUTRO, Jenny: “*Effect of support conditions on steel beams exposed to fire*”. New Zealand: University of Canterbury, 2001.
- AA.VV.: “*2 European recommendations for the fire safety of steel structures*”. CECM - TC3 (Comité Técnico 3 de la Convención Europea de la Construcción Metálica), Elsevier Scientific Publishing Company, 1983
- AA.VV.: “*Design Manual on the European Recommendations for the fire safety of steel structures*”. CECM - TC3 (Comité Técnico 3 de la Convención Europea de la Construcción Metálica), 1985
- KIRBY, B.R.: “*Fire Resistance of steel structures*”. Cleveland: British Steel Corporation, 1985
- AA.VV.: “*Fire Engineering Design for steel structures. State of the Art*”. Bruselas: International Iron and Steel Institute, 1993
- AA.VV.: “Nomogramas. Método gráfico para determinar la resistencia al fuego de las estructuras de acero según EN 1993-1-2:2005”. APTA (Asociación para la promoción técnica del acero)
- AA.VV.: “*Guía para la comprobación de la resistencia al fuego de estructuras*”. Barcelona: ASCEM (Asociación para la construcción de estructuras metálicas), 2004
- VILLA CELINO, Julia: “Comprobación de la estabilidad ante el incendio de las estructuras de acero. Aplicación de los Eurocódigos” Madrid: Escuela de la Edificación, 2008.
- FRANGI, Andrea / SCHLEIFER, Vanessa / FONTANA, Mario: “*Experimental and Numerical Analysis of Gypsum Plasterboards in Fire*”. Zurich: Institute of Structural Engineering, 2009.
- JONES, Bevan: “*Performance of Gypsum Plasterboard Assemblies Exposed to Real Building Fires*”. New Zealand: University of Canterbury, 2001.

- DE KORTE, A.C.J. / BROUWERS, H.J.H.: “*Thermal conductivity of gypsum plasterboards*”. Enschede, University of Twente. 2009.
- BÉNICHOU, Noureddine / SULTAN. Mohammed: “*Thermal properties of lightweight-framed construction components at elevated temperatures*”. Ontario, Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada. 2005.
- BÉNICHOU, Noureddine / SULTAN. Mohammed / MAC CALLUM, Catherine / HUM, Joe: “*Thermal Properties of Wood, Gypsum and Insulation at Elevated Temperatures*”. Ontario, Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada. 2001.
- DE KORTE, A.C.J. / BROUWERS, H.J.H.: “*Calculation of thermal conductivity of gypsum plasterboards at ambient and elevated temperature*”. Enschede, University of Twente. 2009.
- MANZELLO, Samuel / PARK, Suel-Hyun / MIZUKAMI, Tensei / BENTZ, Dale: “*Measurement of thermal properties of gypsum board at elevated temperatures*”. U.S.A. National Institute of Standards and Technology, 2008.
- AA.VV.: “*Fire resistance design manual of Gypsum Systems*”. U.S.A. Gypsum Association. 2009.
- DUMONT, Fabien. “*Summarised report of the EGOLF Round-Robin nr. TC2 09-1 in fire resistance testing*”. EGOLF. 2009.

SOPORTE INFORMÁTICO

Carpeta DOC

TESIS.PDF

TESIS APENDICES.PDF

Carpeta XLS

HERRAMIENTA CALCULO.XLS

- Cálculo mediante la ecuación diferencial.
- Cálculo mediante la fórmula de la CECM.
- Cálculo mediante la Tabla del Anejo D del DB SI.
- Tabla resumen comparativa de los distintos métodos.
- Comparativo de los dominios de la resistencia y la temperatura.
- Comparativo de los gráficos de tracción.
- Comparativo de los gráficos de compresión.
- Comparativo de los gráficos de flexión pura.
- Comparativo de los gráficos de cortante.
- Comparativo de los gráficos de flexión simple.
- Comparativo de los gráficos de flexocompresión.
- Validación con el programa ELEFIR de revestimientos de 15, 30, 45 y 60 mm.

PARAMETROS ECUACION DIFERENCIAL.XLS

- Datos de entrada.
- Variación de la conductividad térmica.
- Variación de la densidad.
- Variación del calor específico.
- Variación de la conductividad térmica en función del tipo de material de protección.

ESTUDIOS INTERNACIONALES.XLS

- Digitalización de datos de entrada.
- Depuración de los datos de entrada.
- Trasposición de los datos de entrada.
- Interpolación de los datos de entrada.
- Gráficos.

FABRICANTE A.XLS

- Datos de los ensayos realizados según Norma UNE ENV 13381-4.
- Interpolación de los datos de revestimiento de 13 mm.
- Interpolación de los datos de revestimiento de 28 mm.
- Interpolación de los datos de revestimiento de 30 mm.
- Interpolación de los datos de revestimiento de 60 mm.
- Gráfico de la temperatura del acero en función de la temperatura del gas.
- Gráfico de la temperatura del acero en función del tiempo de la curva ISO.
- Gráficos comparativos de las Tablas del ensayo.

FABRICANTE B.XLS

- Datos de los ensayos realizados según Norma UNE ENV 13381-4.
- Interpolación de los datos de revestimiento de 15 mm.
- Interpolación de los datos de revestimiento de 25 mm.
- Interpolación de los datos de revestimiento de 40 mm.
- Gráfico de la temperatura del acero en función de la temperatura del gas.
- Gráfico de la temperatura del acero en función del tiempo de la curva ISO.
- Gráficos comparativos de las Tablas del ensayo.

CAMPAÑA ENSAYOS.XLS

- Datos de los ensayos realizados con un revestimiento de 15 mm.
- Datos de los ensayos realizados con un revestimiento de 30 mm.
- Datos de los ensayos realizados con un revestimiento de 45 mm.
- Datos de los ensayos realizados con un revestimiento de 60 mm.
- Gráficos de la temperatura del acero en función de la temperatura del gas.
- Gráficos de la temperatura del acero en función del tiempo de la curva ISO.
- Gráficos de la absorción de calor en función del espesor de revestimiento.

LANDA ENSAYOS.XLS

- Conductividad térmica de los ensayos realizados con un revestimiento de 15 mm.
- Conductividad térmica de los ensayos realizados con un revestimiento de 30 mm.
- Conductividad térmica de los ensayos realizados con un revestimiento de 45 mm.
- Conductividad térmica de los ensayos realizados con un revestimiento de 60 mm.
- Gráficos de la conductividad térmica en función de la temperatura del gas.
- Gráficos de la conductividad térmica en función del tiempo de la curva ISO.
- Estudios comparativos de la consideración del calor específico del acero constante o variable.

PROPUESTA.XLS

- Propuesta de valores de conductividad térmica efectiva para un revestimiento de 15 mm.
- Propuesta de valores de conductividad térmica efectiva para un revestimiento de 30 mm.
- Propuesta de valores de conductividad térmica efectiva para un revestimiento de 45 mm.
- Propuesta de valores de conductividad térmica efectiva para un revestimiento de 60 mm.
- Gráfico comparativo.
- Gráfico comparativo de valores simplificados.

VALIDACION CASO REAL.XLS

- Datos de entrada.
- Resultados de temperatura del acero para los valores de conductividad térmica efectiva propuestos para un revestimiento de 15 mm.
- Resultados de temperatura del acero para los valores de conductividad térmica efectiva propuestos para un revestimiento de 30 mm.
- Resultados de temperatura del acero para los valores de conductividad térmica efectiva propuestos para un revestimiento de 45 mm.
- Resultados de temperatura del acero para los valores de conductividad térmica efectiva propuestos para un revestimiento de 60 mm.

Carpeta IMG (fotografías)

VALIDACIÓN DEL ACERO

VALIDACIÓN DEL HORNO

VALIDACIÓN DE LA PROBETA

CAMPAÑA DE ENSAYOS

- Una placa.
- Dos placas.
- Tres placas.
- Cuatro placas.