



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERA CIVIL

MODELACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS DE PINTURA INTUMESCENTE APLICADA  
SOBRE PERFILES DE ACERO EXPUESTOS A INCENDIO

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL

FELIPE EDGARDO VAN SCHUERBECK CORTES

PROFESOR GUÍA:  
SR. MIGUEL BUSTAMANTE SEPULVEDA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
SR. GABRIEL RODRÍGUEZ JAQUE  
SR. CARLOS AGUILERA GUTIÉRREZ

SANTIAGO DE CHILE  
MAYO, 2013

## Resumen

El objetivo del presente trabajo fue buscar una herramienta computacional eficaz y rápida, para estudiar el comportamiento frente a la acción del fuego de los elementos estructurales de acero protegidos con pintura intumescente.

En la búsqueda de esta herramienta de trabajo se desarrollaron tres modelaciones numéricas y/o computacionales que simulan el desarrollo de transferencia de calor dinámica que se genera en el ensayo normalizado de resistencia al fuego definido en la norma NCh 935/1 Of 1997.

Para su desarrollo se utilizó como base de calibración una serie de ensayos de resistencia al fuego de pilares de acero protegidos con pintura intumescente, los cuales que se realizaron en el Laboratorio de Incendios del IDIEM de la Universidad de Chile, según lo indicado en la norma NCh 935/1. Para efecto del estudio se consideró la relación tiempo-temperatura de cada elemento ensayado.

El primer modelo se desarrolló a partir de una serie de regresiones numéricas sobre la información obtenida de los ensayos realizados y permite predecir la temperatura promedio de un perfil de acero expuesto al fuego como una función del tiempo de exposición al fuego, de su masividad y espesor inicial de la pintura intumescente.

El segundo modelo tiene como base la fórmula 4.22 del Eurocódigo 3 Parte 1.2, del año 2001, que permite determinar el aumento de la temperatura de la sección transversal de un perfil de acero protegido del fuego con diversos materiales tales como: placas de yeso-cartón, madera, morteros livianos y otros. Esta fórmula no considera la pintura intumescente dentro de las soluciones de protección, por lo que para esta modelación se estudió la forma de incluirla y validar el método.

El tercer modelo utiliza un software de elementos finitos llamado “COMSOL Multiphysics” versión 4.0, Módulo de Transferencia de Calor. Este software simula el comportamiento térmico dinámico considerando la transmisión térmica por conducción, convección y radiación, para determinar las variaciones de temperatura de un perfil de acero protegido con pintura intumescente expuesto a las condiciones de un incendio.

Como resultado de este estudio, puede afirmarse que las tres modelaciones numéricas cumplen el objetivo propuesto, dado que permiten reproducir analíticamente y en corto tiempo el comportamiento al fuego por conducción térmica dinámica de los elementos de acero cuando se protegen con pintura intumescente. Los resultados son similares a los obtenidos en ensayos de resistencia al fuego realizados de acuerdo con la norma NCh 935/1 Of 1997.

*A mi esposa,  
mis padres, mis hermanos,  
mis tíos, mis primos y mis abuelos.*

## **Agradecimientos**

Gracias a Dios por todo lo que me ha dado.

Gracias a mis padres, mis tíos y mis abuelos, por todo lo que me han entregado; su esfuerzo, dedicación, sacrificio, apoyo, amor y cariño.

Gracias a mis hermanos y mis primos, por ser una de mis motivaciones para ser un profesional. Espero ser un buen ejemplo a seguir.

Gracias a mi esposa, por su apoyo incondicional, amor y compañía durante todos mis años de estudios universitarios.

Gracias a mis amigos de siempre, por su amistad y constancia.

Gracias a todos los que trabajan en la Sección de Ingeniería Contra Incendios del IDIEM, en especial a Don Miguel Bustamante, Miguel Pérez y Marcial Salaverry, quienes me entregaron los conocimientos necesarios para desarrollar de buena manera mi trabajo de título.

Gracias a todos los que, de una u otra manera, ayudaron en mi formación educacional y profesional.

A Todos  
Muchas Gracias

## Tabla de Contenido

1	INTRODUCCIÓN .....	1
2	ALCANCE Y OBJETIVOS.....	2
2.1	Alcance .....	2
2.2	Objetivo General.....	2
2.3	Objetivos Específicos .....	2
3	ANTECEDENTES.....	3
3.1	Protección Contra Incendios.....	3
3.2	Incendio Estándar .....	4
3.3	Transferencia de Calor.....	5
3.3.1	Conducción.....	6
3.3.2	Convección .....	7
3.3.3	Radiación .....	7
3.4	Acero Estructural.....	8
3.5	Masividad .....	9
3.6	Sistema Intumescente .....	10
4	DATOS DE ENTRADA .....	11
4.1	Ensayos.....	11
4.1.1	Dimensiones de las probetas.....	11
4.1.2	Curvas tiempo – temperatura.....	11
4.1.3	Espesores iniciales y finales de la PI.....	17
4.2	Acero .....	19
4.2.1	Densidad .....	19
4.2.2	Calor específico .....	19
4.2.3	Conductividad térmica.....	20
4.3	Pintura Intumescente .....	20
4.3.1	Calor específico .....	20
4.3.2	Densidad .....	20
4.3.3	Conductividad térmica.....	20
5	MODELO 1: REGRESIONES NUMÉRICAS.....	21
5.1	Introducción.....	21
5.2	Función Tiempo.....	21
5.2.1	Tiempo como función del espesor inicial.....	21
5.2.2	Constantes A y B como funciones de la masividad.....	25
5.2.3	Constantes C, D, E, F, G y H como funciones de la temperatura .....	27

5.2.4	Tiempo como función del espesor inicial, de la masividad y de la temperatura.....	29
5.3	Función Temperatura.....	31
5.3.1	Temperatura como función del tiempo.....	31
5.3.2	Constantes A' y B' como funciones del espesor inicial.....	32
5.3.3	Constantes C', D', E' y F' como funciones de la masividad.....	34
5.3.4	Temperatura como función del tiempo, del espesor inicial y de la masividad.....	35
5.4	Temperaturas según Regresiones Numéricas.....	36
6	MODELO 2: EUROCÓDIGO 3 PARTE 1.2.....	37
6.1	Introducción.....	37
6.2	Fórmula (4.22) del Eurocódigo 3 Parte 1.2.....	37
6.3	Determinación de la Conductividad Térmica de la PI.....	38
6.3.1	Metodología.....	38
6.3.2	Conductividades térmicas relativas de la PI para cada perfil.....	38
6.3.3	Promedio de conductividades térmicas relativas de la PI.....	45
6.3.4	Validación de la conductividad térmica relativa de la PI.....	46
6.3.5	Nuevo promedio de conductividades térmicas relativas de la PI.....	48
6.3.6	Nueva validación de la conductividad térmica de la PI.....	49
6.3.7	Función de la conductividad térmica de la PI.....	50
6.4	Temperaturas según Eurocódigo 3 Parte 1.2.....	51
7	MODELO 3: MODELACIÓN COMPUTACIONAL.....	52
7.1	Introducción.....	52
7.2	Método de Elementos Finitos.....	52
7.3	Transferencia de Calor mediante Elementos Finitos.....	53
7.3.1	Transferencia de calor al interior de un sólido.....	53
7.3.2	Transferencia de calor al borde de un sólido.....	54
7.4	Modelación Computacional.....	55
7.4.1	Parámetros del modelo.....	55
7.4.2	Construcción de la geometría.....	57
7.4.3	Definición de los materiales.....	58
7.4.4	Definición de las condiciones de borde.....	59
7.4.5	Mallado de las geometrías.....	60
7.4.6	Ejecución de la simulación.....	61
7.4.7	Resultado de la simulación.....	62
7.4.8	Extracción de las temperaturas.....	62
7.4.9	Gradientes térmicos.....	63
7.5	Temperaturas según Modelación Computacional.....	66

8	COMPARACIÓN DE LAS CURVAS DE LOS MODELOS .....	67
8.1	Probeta P1 .....	67
8.2	Probeta P2 .....	67
8.3	Probeta P3 .....	68
8.4	Probeta P4 .....	68
8.5	Probeta P5 .....	69
8.6	Probeta P6 .....	69
8.7	Probeta P7 .....	70
8.8	Probeta P8 .....	70
8.9	Probeta P9 .....	71
8.10	Probeta P10 .....	71
8.11	Probeta P11 .....	72
8.12	Probeta P12 .....	72
8.13	Probeta P13 .....	73
8.14	Probeta P14 .....	73
8.15	Probeta P15 .....	74
8.16	Probeta P16 .....	74
9	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS .....	75
10	BIBLIOGRAFÍA .....	76
11	ANEXO A: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS .....	77
12	ANEXO B: TEMPERATURAS DE LOS PERFILES SEGÚN MÓDELO 1 .....	82
13	ANEXO C: CONDUCTIVIDADES TÉRMICAS RELATIVAS DE LA PI .....	84
14	ANEXO D: TEMPERATURAS DE LOS PERFILES SEGÚN MÓDELO 2 .....	105
15	ANEXO E: TEMPERATURAS DE LOS PERFILES SEGÚN MÓDELO 3 .....	107

## Índice de Tablas

Tabla 3-1: Clasificación de la resistencia al fuego según NCh 935/1 Of. 97 [2].	4
Tabla 3-2: Resistencia al fuego requerida para los elementos de construcción de edificios.	4
Tabla 4-1: Dimensiones y masividades de las probetas ensayadas.	11
Tabla 4-2: Espesores iniciales y finales de PI del estudio extranjero [8].	17
Tabla 4-3: Espesores iniciales y finales de PI para cada probeta.	18
Tabla 5-1: Tiempo y espesor inicial para M1 ( $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).	21
Tabla 5-2: Tiempo y espesor inicial para M2 ( $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).	22
Tabla 5-3: Tiempo y espesor inicial para M3 ( $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).	23
Tabla 5-4: Tiempo y espesor inicial para M4 ( $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).	23
Tabla 5-5: Constantes de funciones tiempo – espesor inicial para cada masividad ( $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).	24
Tabla 5-6: Constantes de funciones tiempo – espesor inicial para cada masividad ( $T \geq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).	24
Tabla 5-7: Constantes de las funciones constante A – masividad para cada temperatura.	26
Tabla 5-8: Constantes de las funciones constante B – masividad para cada temperatura.	26
Tabla 5-9: Constantes de las funciones constante C, D y E – temperatura.	28
Tabla 5-10: Constantes de las funciones constante E, F y G – temperatura.	28
Tabla 5-11: Funciones entre el tiempo, el espesor inicial, la masividad y la temperatura.	29
Tabla 5-12: Constantes de la función temperatura – tiempo para cada probeta.	32
Tabla 5-13: Constantes de las funciones constante A' – espesor inicial para cada masividad.	33
Tabla 5-14: Constantes de las funciones constante B' – espesor inicial para cada masividad.	33
Tabla 5-15: Constantes de las funciones constante C' y D' – masividad.	35
Tabla 5-16: Constantes de las funciones constante E' y F' – masividad.	35
Tabla 5-17: Funciones entre la temperatura, el espesor inicial, la masividad y el tiempo.	35
Tabla 5-18: Temperaturas del perfil según ensayos y modelo 1, probetas P1, P2, P3 y P4.	36
Tabla 6-1: Conductividad térmica relativa de la PI para P1.	39
Tabla 6-2: Temperaturas del perfil según ensayos y modelo 2, probetas P1, P2, P3 y P4.	51
Tabla 7-1: Temperaturas del perfil según ensayos y modelo 3, probetas P1, P2, P3 y P4.	66
Tabla 11-1: Temperaturas durante el ensayo, probetas P1, P2, P3 y P4.	77
Tabla 11-2: Temperaturas durante el ensayo, probetas P5, P6, P7 y P8.	78
Tabla 11-3: Temperaturas durante el ensayo, probetas P9, P10, P11 y P12.	80
Tabla 11-4: Temperaturas durante el ensayo, probetas P13, P14, P15 y P16.	81
Tabla 12-1: Temperaturas perfil según ensayos y modelo 1, probetas P5, P6, P7 y P8.	82
Tabla 12-2: Temperaturas perfil según ensayos y modelo 1, probetas P9, P10, P11 y P12.	82
Tabla 12-3: Temperaturas del perfil según ensayos y modelo 1, probetas P13, P14, P15 y P16.	83
Tabla 13-1: Conductividad térmica relativa de la PI para P2.	84



Tabla 13-2: Conductividad térmica relativa de la PI para P3.....	85
Tabla 13-3: Conductividad térmica relativa de la PI para P4.....	87
Tabla 13-4: Conductividad térmica relativa de la PI para P5.....	89
Tabla 13-5: Conductividad térmica relativa de la PI para P6.....	90
Tabla 13-6: Conductividad térmica relativa de la PI para P7.....	92
Tabla 13-7: Conductividad térmica relativa de la PI para P8.....	93
Tabla 13-8: Conductividad térmica relativa de la PI para P9.....	95
Tabla 13-9: Conductividad térmica relativa de la PI para P10.....	96
Tabla 13-10: Conductividad térmica relativa de la PI para P11.....	97
Tabla 13-11: Conductividad térmica relativa de la PI para P12.....	98
Tabla 13-12: Conductividad térmica relativa de la PI para P13.....	100
Tabla 13-13: Conductividad térmica relativa de la PI para P14.....	101
Tabla 13-14: Conductividad térmica relativa de la PI para P15.....	102
Tabla 13-15: Conductividad térmica relativa de la PI para P16.....	103
Tabla 14-1: Temperaturas del perfil según ensayos y modelo 2, probetas P5, P6, P7 y P8.....	105
Tabla 14-2: Temperaturas del perfil según ensayos y modelo 2, probetas P9, P10, P11 y P12..	105
Tabla 14-3: Temperaturas perfil según ensayos y modelo 2, probetas P13, P14, P15 y P16.....	106
Tabla 15-1: Temperaturas del perfil según ensayos y modelo 3, probetas P5, P6, P7 y P8.....	107
Tabla 15-2: Temperaturas del perfil según ensayos y modelo 3, probetas P9, P10, P11 y P12..	107
Tabla 15-3: Temperaturas perfil según ensayos y modelo 3, probetas P13, P14, P15 y P16.....	108

## Índice de Figuras

Figura 3-1: Curva normal tiempo-temperatura.....	5
Figura 3-2: Transferencia de calor en un incendio.....	5
Figura 3-3: Reducción de las propiedades mecánicas del acero por efecto de la temperatura.....	8
Figura 3-4: Curvas tensión-deformación en función de la temperatura para el acero.....	8
Figura 3-5: Componentes de un sistema intumescente.....	10
Figura 3-6: Perfiles de acero protegidos con PI antes (Izq) y después del ensayo (Der).....	10
Figura 4-1: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P1.....	11
Figura 4-2: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P2.....	12
Figura 4-3: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P3.....	12
Figura 4-4: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P4.....	12
Figura 4-5: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P5.....	13
Figura 4-6: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P6.....	13
Figura 4-7: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P7.....	13
Figura 4-8: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P8.....	14
Figura 4-9: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P9.....	14
Figura 4-10: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P10.....	14
Figura 4-11: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P11.....	15
Figura 4-12: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P12.....	15
Figura 4-13: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P13.....	15
Figura 4-14: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P14.....	16
Figura 4-15: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P15.....	16
Figura 4-16: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P16.....	16
Figura 4-17: Espesores iniciales vs espesores finales de PI del estudio extranjero [8].....	18
Figura 4-18: Calor específico del acero en función de la temperatura.....	19
Figura 4-19: Conductividad térmica del acero en función de la temperatura.....	20
Figura 5-1: Tiempo en función del espesor inicial para M1 (T = 300 °C).....	22
Figura 5-2: Tiempo en función del espesor inicial para M2 (T = 300 °C).....	22
Figura 5-3: Tiempo en función del espesor inicial para M3 (T = 300 °C).....	23
Figura 5-4: Tiempo en función del espesor inicial para M4 (T = 300 °C).....	24
Figura 5-5: Constante A en función de la masividad (T = 300 °C).....	25
Figura 5-6: Constante B en función de la masividad (T = 300 °C).....	26
Figura 5-7: Constante C en función de la temperatura.....	27
Figura 5-8: Constante D en función de la temperatura.....	27
Figura 5-9: Constante E en función de la temperatura.....	28

Figura 5-10: Curvas tiempo-temperatura para perfiles M1, según ensayo y modelo 1 previo. ....	29
Figura 5-11: Curvas tiempo-temperatura para perfiles M2, según ensayo y modelo 1 previo. ....	30
Figura 5-12: Curvas tiempo-temperatura para perfiles M3, según ensayo y modelo 1 previo. ....	30
Figura 5-13: Curvas tiempo-temperatura para perfiles M4, según ensayo y modelo 1 previo. ....	30
Figura 5-14: Temperatura en función del tiempo para M1. ....	31
Figura 5-15: Constante A' en función del espesor inicial para M1. ....	32
Figura 5-16: Constante B' en función del espesor inicial para M1. ....	33
Figura 5-17: Constante C' en función de la masividad. ....	34
Figura 5-18: Constante D' en función de la masividad. ....	34
Figura 6-1: Conductividad térmica relativa de la PI para P1. ....	40
Figura 6-2: Conductividad térmica relativa de la PI para P2. ....	40
Figura 6-3: Conductividad térmica relativa de la PI para P3. ....	40
Figura 6-4: Conductividad térmica relativa de la PI para P4. ....	41
Figura 6-5: Conductividad térmica relativa de la PI para P5. ....	41
Figura 6-6: Conductividad térmica relativa de la PI para P6. ....	41
Figura 6-7: Conductividad térmica relativa de la PI para P7. ....	42
Figura 6-8: Conductividad térmica relativa de la PI para P8. ....	42
Figura 6-9: Conductividad térmica relativa de la PI para P9. ....	42
Figura 6-10: Conductividad térmica relativa de la PI para P10. ....	43
Figura 6-11: Conductividad térmica relativa de la PI para P11. ....	43
Figura 6-12: Conductividad térmica relativa de la PI para P12. ....	43
Figura 6-13: Conductividad térmica relativa de la PI para P13. ....	44
Figura 6-14: Conductividad térmica relativa de la PI para P14. ....	44
Figura 6-15: Conductividad térmica relativa de la PI para P15. ....	44
Figura 6-16: Conductividad térmica relativa de la PI para P16. ....	45
Figura 6-17: Conductividades térmicas relativas y su promedio cada 10 °C. ....	45
Figura 6-18: Regresiones sobre el promedio de las conductividades térmicas relativas. ....	46
Figura 6-19: Curvas tiempo-temperatura para perfiles M1, según ensayo y modelo 2 previo. ....	46
Figura 6-20: Curvas tiempo-temperatura para perfiles M2, según ensayo y modelo 2 previo. ....	47
Figura 6-21: Curvas tiempo-temperatura para perfiles M3, según ensayo y modelo 2 previo. ....	47
Figura 6-22: Curvas tiempo-temperatura para perfiles M4, según ensayo y modelo 2 previo. ....	47
Figura 6-23: Desviación entre las temperaturas de ensayos y modelo. ....	48
Figura 6-24: Conductividades térmicas relativas y su nuevo promedio cada 10 °C. ....	48
Figura 6-25: Nuevas regresiones sobre el promedio de las conductividades térmicas relativas. ...	49
Figura 6-26: Nueva desviación de las temperaturas de ensayos y modelo. ....	49
Figura 6-27: Conductividad térmica de la PI en función de la temperatura. ....	50

Figura 7-1: Esquema unidimensional de celdas para modelo de transferencia de calor. ....	53
Figura 7-2: Condición de borde, modelo de transferencia de calor.....	54
Figura 7-3: Definición de los parámetros geométricos en COMSOL. ....	55
Figura 7-4: Calor específico del acero en COMSOL. ....	55
Figura 7-5: Conductividad térmica de la PI en COMSOL. ....	56
Figura 7-6: Curva tiempo – temperatura del horno para la probeta P1 en COMSOL.....	56
Figura 7-7: Parámetros del flujo de calor generado un incendio en COMSOL. ....	57
Figura 7-8: Construcción de la geometría de la PI en COMSOL.....	57
Figura 7-9: Definición del material “Acero” y sus propiedades en COMSOL. ....	58
Figura 7-10: Definición del material “PI” y sus propiedades en COMSOL. ....	58
Figura 7-11: Temperatura inicial de la probeta y la PI en COMSOL. ....	59
Figura 7-12: Bordes expuestos al flujo de calor en COMSOL. ....	59
Figura 7-13: Mallado de la geometría del perfil en COMSOL. ....	60
Figura 7-14: Mallado de la geometría de la PI en COMSOL.....	60
Figura 7-15: Definición del tiempo de simulación y del intervalo de análisis en COMSOL.....	61
Figura 7-16: Ejecución de la simulación en COMSOL.....	61
Figura 7-17: Resultado de la simulación en COMSOL.....	62
Figura 7-18: Selección de los resultados requeridos en COMSOL.....	62
Figura 7-19: Curva tiempo – temperatura según la simulación en COMSOL. ....	63
Figura 7-20: Gradiente térmico de la probeta P1, al término de la simulación.....	63
Figura 7-21: Gradientes térmicos de probetas P2, P3 y P4, al término de la simulación.....	64
Figura 7-22: Gradientes térmicos de probetas P5, P6, P7 y P8, al término de la simulación. ....	64
Figura 7-23: Gradientes térmicos de probetas P9, P10, P11 y P12, al término de la simulación. ....	65
Figura 7-24: Gradientes térmicos de probetas P13, P14, P15 y P16, al término de la simulación. ....	65
Figura 8-1: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P1, según ensayo y modelos.....	67
Figura 8-2: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P2, según ensayo y modelos.....	67
Figura 8-3: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P3, según ensayo y modelos.....	68
Figura 8-4: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P4, según ensayo y modelos.....	68
Figura 8-5: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P5, según ensayo y modelos.....	69
Figura 8-6: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P6, según ensayo y modelos.....	69
Figura 8-7: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P7, según ensayo y modelos.....	70
Figura 8-8: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P8, según ensayo y modelos.....	70
Figura 8-9: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P9, según ensayo y modelos.....	71
Figura 8-10: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P10, según ensayo y modelos.....	71
Figura 8-11: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P11, según ensayo y modelos.....	72
Figura 8-12: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P12, según ensayo y modelos.....	72

Figura 8-13: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P13, según ensayo y modelos.....	73
Figura 8-14: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P14, según ensayo y modelos.....	73
Figura 8-15: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P15, según ensayo y modelos.....	74
Figura 8-16: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P16, según ensayo y modelos.....	74

# 1 INTRODUCCIÓN

La seguridad contra incendios es un área de la ingeniería que durante los últimos años ha cobrado relevancia a nivel nacional. Algunos de los últimos grandes incendios han dejado en evidencia la escasa efectividad de los sistemas de protección contra el fuego en las estructuras, debido principalmente a la poca experiencia de los encargados de estos temas. En muchas ocasiones el diseño de los sistemas de seguridad queda en manos de los mismos aplicadores o instaladores, lo que junto a una vulnerable normativa y a un escaso conocimiento por parte del encargado de aprobar las obras, no permiten obtener el nivel de protección requerido, generando situaciones de falsa seguridad.

El IDIEM de la Universidad de Chile, hace más de 30 años ha liderado la investigación en seguridad contra incendios, principalmente realizando ensayos de soluciones constructivas que entregan protección y resistencia al fuego. Gracias a la experiencia adquirida con los ensayos y a la investigación a nivel internacional, se creó la Unidad de Ingeniería contra Incendios, la cual está encargada de desarrollar proyectos de seguridad contra incendios de manera imparcial y sobre todo profesional.

En la mayoría de los proyectos realizados por esta unidad, una de las principales recomendaciones es proteger las estructuras de los edificios frente a la acción del fuego, sean de hormigón o de acero, ya que en alguna medida éstas al alcanzar sus temperaturas críticas o de falla, verán afectadas sus propiedades mecánicas y con esto su estabilidad estructural. Entre las medidas orientadas a la protección de estructuras se pueden mencionar; la modificación de las dimensiones de los elementos y la aplicación de soluciones aislantes.

Una de las soluciones aislantes más utilizadas para proteger elementos de acero, corresponde a la aplicación de pintura intumescente (PI), que en condiciones normales parece una pintura común y corriente, pero frente a la acción del fuego reacciona aumentando su volumen, formando una capa de ceniza aislante, capaz de proteger el acero del fuego. Por ejemplo, en caso de incendio, si un elemento de acero sin protección demora 10 [min] en llegar a su temperatura crítica, el mismo elemento de acero protegido con pintura intumescente puede demorar desde 30 hasta 90 [min].

La diferencia en el tiempo en que un elemento de acero protegido con pintura intumescente llega a su temperatura crítica, está asociado al nivel de protección entregado por la pintura, el que depende de la geometría del elemento de acero, de la superficie expuesta al fuego y del espesor de pintura aplicado. Dado lo anterior, no es correcto suponer que un mismo espesor de pintura entregará el mismo nivel de protección a elementos de acero de distintas geometrías.

Lo anterior ha obligado, hasta ahora, que para determinar la resistencia al fuego de un elemento de acero protegido con pintura intumescente, se deban realizar ensayos a escala real al interior de un horno que simula un incendio normalizado. Con estos ensayos, se estudian de manera estadística los niveles de protección que entrega la pintura, ya que por razones de costo y tiempo, solo se ensayan algunas tipos de perfiles protegidos con algunos espesores de pintura.

El contar con metodologías analíticas que permitan predecir, de manera rápida y sin costos, las variaciones de temperatura de cualquier tipo de perfil de acero protegido con cualquier espesor de pintura intumescente al estar expuesto a una condición de incendio, es de gran utilidad para la determinación de la resistencia al fuego de dicho perfil.

## **2 ALCANCE Y OBJETIVOS**

### **2.1 Alcance**

El presente trabajo de título considera el estado del arte en la protección contra incendios disponible en la Unidad de Ingeniería Contra Incendios del IDIEM, el que se compone principalmente de la experiencia obtenida a partir de los ensayos realizados en su laboratorio, en la normativa nacional (O.G.U.C. [4] y NCh 935/1 Of.97 [2]), en el código internacional (Eurocódigo 3 [6] ) y en publicaciones internacionales (Fire Safety Journal [8] [9]).

Los datos utilizados para el desarrollo del trabajo corresponden a los resultados de una serie de 16 ensayos realizados en el laboratorio de incendios del IDIEM, ejecutados según lo indicado en la norma chilena NCh 935/1 Of. 97 Prevención de incendio en edificios – Ensayo de resistencia al fuego – Parte 1: Elementos de construcción en general. Los ensayos tuvieron como objetivo determinar la resistencia al fuego de perfiles de acero protegidos con pintura intumescente (de base acuosa), a los que se les midieron sus dimensiones, el espesor promedio de pintura intumescente aplicado (inicial) y la temperatura promedio cada un minuto durante el ensayo.

### **2.2 Objetivo General**

El objetivo general del presente trabajo de título es disponer de modelos numéricos o computacionales (mediante software de elementos finitos) que permitan determinar la variación en el tiempo de la temperatura, también conocida como curva tiempo-temperatura, de perfiles de acero protegidos con pintura intumescente expuestos a un incendio normalizado o estándar. Estos modelos permitirán a la Unidad de Ingeniería Contra Incendios del IDIEM, conocer de mejor manera el comportamiento de elementos de acero protegidos con esta pintura.

### **2.3 Objetivos Específicos**

- Obtener las propiedades físicas y térmicas de la pintura intumescente (densidad, calor específico, conductividad térmica) por medio de la recopilación bibliográfica o del cálculo a partir de modelos matemáticos basados en resultados de ensayos realizados en el laboratorio de incendios del IDIEM.
- Obtener una relación entre el espesor inicial de la pintura intumescente aplicada sobre el acero y el espesor final de la capa de ceniza generada por la combustión de la pintura.
- Realizar modelos numéricos para determinar la curva tiempo-temperatura de perfiles de acero protegidos con pintura intumescente expuestos a un incendio normalizado.
- Realizar modelos computacionales mediante software de elementos finitos para determinar la curva tiempo-temperatura de perfiles de acero protegidos con pintura intumescente expuestos a un incendio normalizado.
- Validar los modelos desarrollados comparando las curvas tiempo-temperatura obtenidas a partir de estos modelos, con las obtenidas en los ensayos.

### 3 ANTECEDENTES

#### 3.1 Protección Contra Incendios

La normativa nacional, materializada en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (O.G.U.C.) [4], exige que todo edificio debe cumplir con las condiciones mínimas de seguridad contra incendio estipuladas en ella, con el objetivo fundamental de que el diseño de dichos edificios asegure el cumplimiento de las siguientes condiciones:

- ✓ Que se facilite el salvamento de los ocupantes de los edificios en caso de incendio.
- ✓ Que se reduzca al mínimo, en cada edificio, el riesgo de incendio.
- ✓ Que se evite la propagación del fuego, tanto al resto del edificio como desde un edificio a otro.
- ✓ Que se facilite la extinción de los incendios.

Para lograr dichos objetivos, en la mayoría de los casos, los edificios y sus elementos constructivos deben protegerse contra incendios utilizando alguno de los sistemas de protección que se describen a continuación:

**Protección pasiva:** *“La que se basa en elementos de construcción que por sus condiciones físicas aíslan la estructura de un edificio de los efectos del fuego durante un determinado lapso de tiempo, retardando su acción y permitiendo en esa forma la evacuación de sus ocupantes antes del eventual colapso de la estructura y dando, además, tiempo para la llegada y acción de bomberos. Los elementos de construcción o sus revestimientos pueden ser de materiales no combustibles, con capacidad propia de aislación o por efecto intumescente o sublimante frente a la acción del fuego.”* [4]

**Protección activa:** *“La compuesta por sistemas que, conectados a sensores o dispositivos de detección, entran automáticamente en funcionamiento frente a determinados rangos de partículas y temperatura del aire, descargando agentes extintores de fuego tales como agua, gases, espumas o polvos químicos.”* [4]

Estos sistemas de protección contra incendios permiten que los elementos constructivos del edificio cumplan con las exigencias de resistencia al fuego estipuladas en la O.G.U.C., las que dependen del tipo de elemento y de la clasificación del edificio.

La resistencia al fuego mencionada anteriormente se define como la *“cualidad de un elemento de construcción de soportar las condiciones de un incendio estándar, sin deterioro importante de su capacidad funcional. Esta cualidad se mide por el tiempo en minutos durante el cual el elemento conserva la estabilidad mecánica, la estanquidad a las llamas, el aislamiento térmico y la no emisión de gases inflamables.”* [2]. En la Tabla 3-1 se presenta la clasificación de la resistencia al fuego indicada en la NCh 935/1 Of.97 [2].



**Tabla 3-1: Clasificación de la resistencia al fuego según NCh 935/1 Of. 97 [2].**

Clasificación de la Resistencia		
Clase F 0	duración $\geq 0 < 15$	minutos
Clase F 15	duración $\geq 15 < 30$	minutos
Clase F 30	duración $\geq 30 < 60$	minutos
Clase F 60	duración $\geq 60 < 90$	minutos
Clase F 90	duración $\geq 90 < 120$	minutos
Clase F 120	duración $\geq 120 < 150$	minutos
Clase F 150	duración $\geq 150 < 180$	minutos
Clase F 180	duración $\geq 180 < 240$	minutos
Clase F 240	duración $\geq 240$	minutos

Los elementos constructivos a los que la O.G.U.C. les exige cumplir una determinada clasificación de resistencia al fuego, son los siguientes:

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

En la Tabla 3-2 se presentan las resistencias al fuego requeridas para cada tipo de elemento constructivo señalado anteriormente, en función de la clasificación del edificio (tipo a, b, c o d).

**Tabla 3-2: Resistencia al fuego requerida para los elementos de construcción de edificios.**

Elementos de Construcción									
TIPO	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
a	F-180	F-120	F-120	F-120	F-120	F-30	F-60	F-120	F-60
b	F-150	F-120	F-90	F-90	F-90	F-15	F-30	F-90	F-60
c	F-120	F-90	F-60	F-60	F-60	-	F-15	F-60	F-30
d	F-120	F-60	F-60	F-60	F-30	-	-	F-30	F-15

La clasificación de los edificios se realiza según las tablas 1, 2 y 3 del artículo 4.3.4. de la O.G.U.C., para lo que se debe considerar el destino y número de pisos del edificio, la superficie edificada, la carga de ocupación o la densidad de carga combustible, según corresponda.

### 3.2 Incendio Estándar

La NCh 935/1 Of.97 es la norma chilena que establece las condiciones de ensayo y los criterios que permiten determinar la resistencia al fuego de elementos de construcción en general. Estos ensayos se deben realizar en un horno que sea capaz de someter al elemento ensayado bajo condiciones de temperatura y presión establecidas. La condición de temperatura mencionada se refiere a un programa térmico en el que la temperatura debe variar en función del tiempo de acuerdo a la fórmula (1).

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

Donde

$t$  : es el tiempo expresado en minutos contado desde el inicio del ensayo

$T(t)$  : es la temperatura del horno en el instante  $t$ , medida en °C

$T_0$  : es la temperatura inicial del horno, medida en °C, la que estará comprendida entre 0 y 40° C

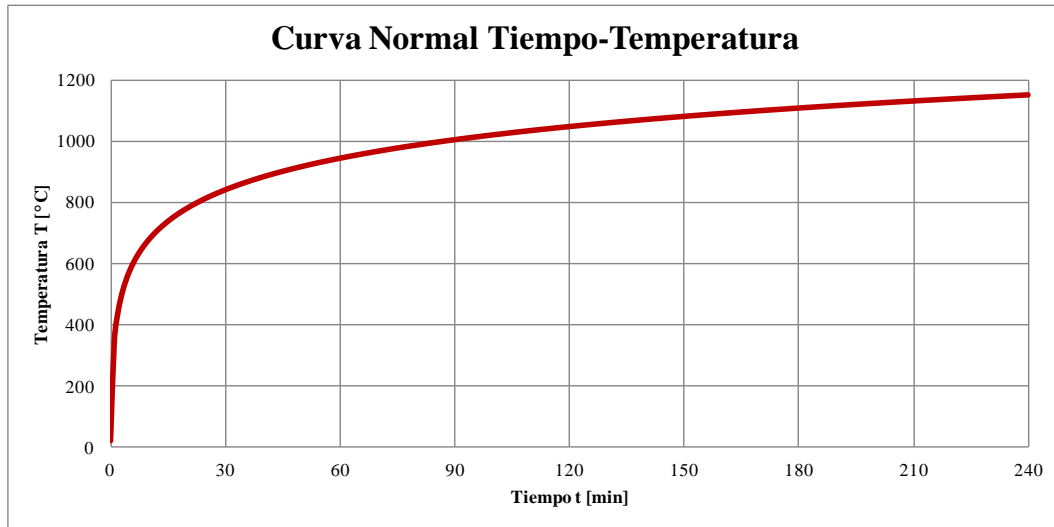


Figura 3-1: Curva normal tiempo-temperatura.

### 3.3 Transferencia de Calor

El calor generado por un incendio en un edificio es transferido a los elementos constructivos mediante dos procesos, convección y radiación. A su vez, los elementos transfieren el calor absorbido hacia su interior mediante un proceso denominado conducción. En la siguiente figura se presentan de manera gráfica estos procesos, los que posteriormente se describen según [5].

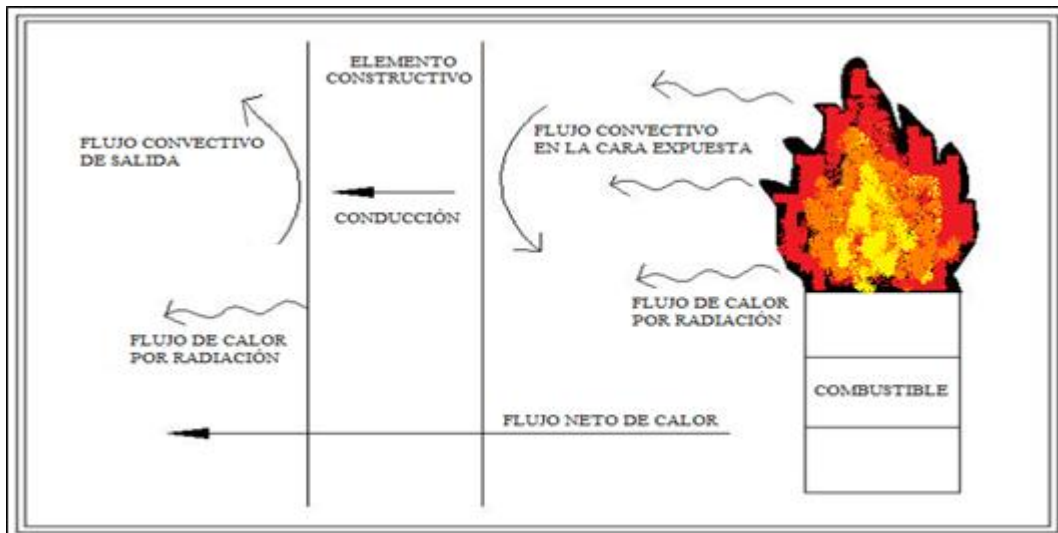


Figura 3-2: Transferencia de calor en un incendio.

### 3.3.1 Conducción

La conducción es el mecanismo de transferencia de calor en los materiales sólidos. En los materiales que son buenos conductores del calor, éste es transferido por las interacciones de los electrones libre. En los materiales que son malos conductores, el calor es conducido por las vibraciones mecánicas de la red molecular. La conducción de calor es un factor importante en la ignición de superficies sólidas y en la resistencia al fuego de las protecciones contra incendio y de los elementos constructivos.

Para los cálculos de transferencia de calor en sólidos, son necesarias las siguientes propiedades de los materiales; la densidad, el calor específico y la conductividad térmica. La densidad,  $\rho$ , es la masa del material por unidad de volumen en  $\text{kg/m}^3$ . El calor específico,  $C_p$ , es la cantidad de calor requerida para calentar una unidad de masa del material en un grado, con unidades de  $\text{J/kgK}$ . La conductividad térmica,  $k$ , representa la tasa de transferencia de calor a través de una unidad de espesor del material por unidad de diferencia de temperatura, con unidades de  $\text{W/mK}$ .

De estas tres propiedades se derivan dos nuevas, la difusividad térmica,  $\alpha$ , dada por  $k/\rho C_p$  con unidades  $\text{m}^2/\text{s}$ , y la inercia térmica dada por  $k\rho C_p$  con unidades  $\text{W}^2/\text{s/m}^4\text{K}^2$ . Cuando los materiales con baja inercia térmica están expuestos a calentamiento, las temperaturas superficiales aumentan rápidamente, de modo que estos materiales prenden más fácilmente. Para un fuego dado, recintos revestidos con materiales de baja inercia térmica experimentarán temperaturas más altas que recintos revestidos con materiales de alta inercia térmica.

En régimen estacionario, la transferencia de calor por conducción es directamente proporcional al gradiente de temperatura entre dos puntos, con una constante de proporcionalidad conocida como la conductividad térmica,  $k$ , de modo que

$$\dot{q}'' = k \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Donde  $\dot{q}''$  es el flujo de calor por unidad de área ( $\text{W/m}^2$ ),  $k$  es la conductividad térmica ( $\text{W/mK}$ ),  $T$  es la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$  o  $\text{K}$ ) y  $x$  es la distancia en la dirección del flujo de calor (m).

El cálculo en régimen estacionario no requiere considerar el calor necesario para cambiar la temperatura del material que está siendo calentado o enfriado. En cambio, para el flujo de calor en régimen transiente, es decir, cuando las temperaturas están cambiando con el tiempo, la cantidad de calor necesaria para cambiar la temperatura del material debe ser incluida. Para la transferencia de calor unidimensional por conducción en un material sin generación de calor interno, la ecuación que gobierna es

$$\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\delta T}{\delta t} \quad (3)$$

Donde  $t$  es el tiempo (s) y  $\alpha$  es la difusividad térmica ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

Se puede observar que los materiales con menor difusividad térmica conducirán más calor que los materiales con alta difusividad, cuando se exponen a un aumento de la temperatura superficial en régimen no estacionario de transferencia de calor conductiva.

### 3.3.2 Convección

La convección es la transferencia de calor por el movimiento de fluidos, ya sea gases o líquidos. La transferencia de calor por convección es un factor importante en la propagación de la llama y en el transporte ascendente del humo y los gases calientes en el techo o por la ventana de un recinto incendiado.

Los cálculos de transferencia de calor convectivo, por lo general involucran la transferencia de calor entre la superficie de un sólido y un líquido circundante que calienta o enfría el material sólido. La velocidad de calentamiento o de enfriamiento depende de varios factores, especialmente la velocidad del fluido en la superficie. Para condiciones dadas, la transferencia de calor es directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre los dos materiales, de modo que el flujo de calor por unidad de área  $\dot{q}''$  (W/m<sup>2</sup>) está dada por

$$\dot{q}'' = h \cdot \Delta T \quad (4)$$

Donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m<sup>2</sup>K) y  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura entre la superficie de los sólidos y el líquido (°C o K).

El valor del coeficiente de transferencia de calor por convección,  $h$ , puede variar dependiendo de factores tales como la geometría de la superficie, la naturaleza del flujo, y el espesor de la capa límite. Un valor típico para elementos constructivos expuestos al fuego es de 25 W/m<sup>2</sup>K.

### 3.3.3 Radiación

La radiación es la transferencia de energía por ondas electromagnéticas que pueden viajar a través del vacío, o a través de un sólido o un líquido transparente. La radiación es extremadamente importante en los incendios, ya que es el principal mecanismo para la transferencia de calor desde las llamas hacia la superficie de los combustibles, desde el humo caliente hacia los elementos de construcción y desde un edificio en llamas hacia un edificio adyacente.

El flujo de calor resultante  $\dot{q}''$  (W/m<sup>2</sup>) desde la superficie emisora hacia la superficie receptora está dada por

$$\dot{q}'' = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_e^4 - T_r^4) \quad (5)$$

Donde  $\varepsilon$  es la emisividad resultante de las dos superficies,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann (5,67x10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>),  $T_e$  es la temperatura absoluta de la superficie emisora (K) y  $T_r$  es la temperatura absoluta de la superficie receptora (K).

La emisividad  $\varepsilon$  indica la eficiencia de la superficie emisora como una fuente de radiación, con un valor en el intervalo de 0 a 1,0. Un "cuerpo negro" tiene una emisividad de 1,0. En situaciones de incendio, las superficies más calientes, las partículas de humo o las llamas luminosas tienen una emisividad entre 0,7 y 1,0.

### 3.4 Acero Estructural

Cuando el acero estructural está expuesto al fuego, su temperatura aumenta y su resistencia mecánica y rigidez disminuye, permitiendo posibles deformaciones y fallas, dependiendo de las cargas aplicadas y de las condiciones de apoyo. El aumento de la temperatura del acero depende de la intensidad del fuego, del área expuesta y de la cantidad de protección contra el fuego aplicada.

En la Figura 3-3 se muestran los factores de reducción sobre la fluencia, el límite de proporcionalidad y el módulo elástico, en función de temperatura, indicados en el Eurocódigo 3: Diseño de Estructuras de Acero – Parte 1.2: Diseño Estructural Contra Incendios [6].

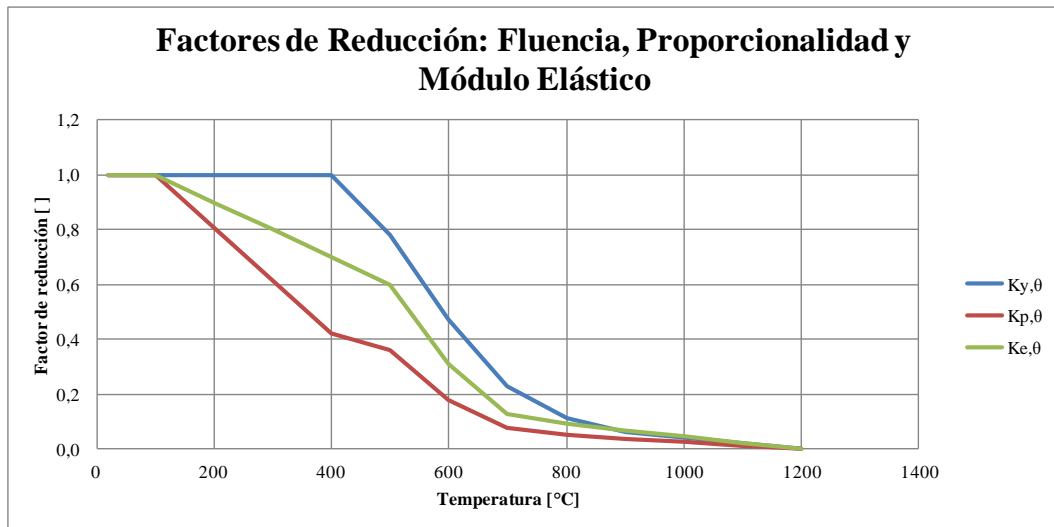


Figura 3-3: Reducción de las propiedades mecánicas del acero por efecto de la temperatura.

En la Figura 3-4 se muestran las curvas tensión-deformación en función de la temperatura para un acero grado S235, según el Eurocódigo 3 [6]. La disminución en la resistencia mecánica del acero con el aumento de la temperatura es el principal efecto del fuego, ya que afecta directamente la estabilidad estructural del elemento constructivo.

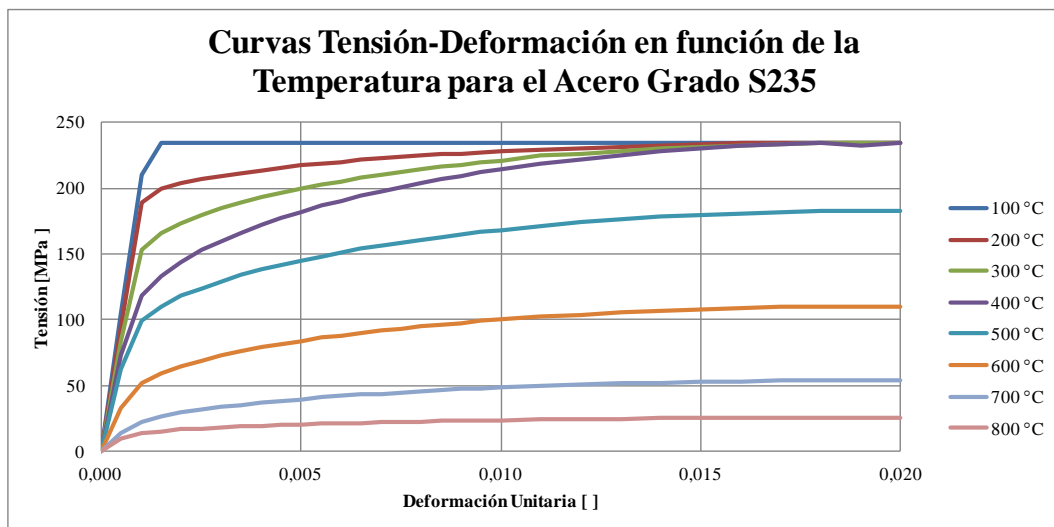


Figura 3-4: Curvas tensión-deformación en función de la temperatura para el acero.

### 3.5 Masividad

Para entender el concepto de masividad es necesario realizar unos simples cálculos de termodinámica [7], los que comienzan con la ecuación de la variación de energía que experimenta un cuerpo por un aumento de temperatura en su interior, la que está dada por

$$\Delta U = Masa \cdot Cp \cdot \Delta T \quad (6)$$

En el caso de incendio, la variación de energía proviene de los flujos de calor entregados por el incendio, los que se definen en las ecuaciones (4) y (5). Dado lo anterior, la ecuación de equilibrio que controla la transferencia de calor superficial de un cuerpo está definida por

$$\Delta U = A_{sup} \cdot (\dot{q}''_{conv} + \dot{q}''_{rad}) \cdot \Delta t \quad (7)$$

Con lo que

$$Masa \cdot Cp \cdot \Delta T = A_{sup} \cdot (\dot{q}''_{conv} + \dot{q}''_{rad}) \cdot \Delta t \quad (8)$$

Además, considerando que la masa es la densidad por el volumen

$$V \cdot \rho \cdot Cp \cdot \Delta T = A_{sup} \cdot (\dot{q}''_{conv} + \dot{q}''_{rad}) \cdot \Delta t \quad (9)$$

$$\rho \cdot Cp \cdot \Delta T = \frac{A_{sup}}{V} \cdot (\dot{q}''_{conv} + \dot{q}''_{rad}) \cdot \Delta t \quad (10)$$

Ahora si consideramos el cuerpo en cuestión como un elemento constructivo, específicamente como un perfil de acero, se tiene que el área superficial  $A_{sup}$  es el perímetro expuesto por el largo del elemento y que el volumen  $V$  corresponde al área de la sección transversal por el mismo largo.

$$A_{sup} = P \cdot l \quad (11)$$

$$V = A_{sec} \cdot l \quad (12)$$

Reemplazando estos valores en la ecuación (10) y simplificando, se tiene que

$$\rho \cdot Cp \cdot \Delta T = \frac{P}{A_{sec}} \cdot (\dot{q}''_{conv} + \dot{q}''_{rad}) \cdot \Delta t \quad (13)$$

Donde se observa que el flujo de calor absorbido por un elemento es proporcional a una condición geométrica, la que se denomina masividad y que está definida como

$$M = \frac{P}{A_{sec}} [m^{-1}] \quad (14)$$

Por lo que la ecuación de equilibrio para la transferencia de calor superficial queda como

$$\rho \cdot Cp \cdot \Delta T = M \cdot (\dot{q}''_{conv} + \dot{q}''_{rad}) \cdot \Delta t \quad (15)$$

### 3.6 Sistema Intumescente

Según la NCh 3040 Of. 2007 [3], el Sistema Intumescente está compuesto por un imprimante, una pintura intumescente (PI) y eventualmente una pintura de sellado imprimante. El imprimante es una pintura aplicada para proteger la estructura de acero de la corrosión. La pintura de sellado es un producto que tiene como objetivo proteger la pintura intumescente del desgaste que le produce el medio ambiente, tales como la radiación ultravioleta y la humedad ambiente.

La pintura intumescente, es un producto cuya película seca reacciona frente al calor produciendo un aumento de volumen en forma de espuma. Está compuesta por un catalizador (como el fosfato de amonio) que se descompone para producir un ácido mineral como el ácido fosfórico; un carbonífero o fuente de carbón (como los alcoholes polihídrico); una resina que reblandece a una determinada temperatura sobre los límites superiores del rango de la temperatura de reacción; y un agente espumífico el cual se descompone junto con la fusión de la resina, liberando grandes volúmenes de gases no inflamables. Estos gases incluyen anhídrido carbónico, amoníaco y vapor de agua. La producción de estos gases causa que la resina se hinche y se expanda muchas veces su espesor original para formar una capa aislante.

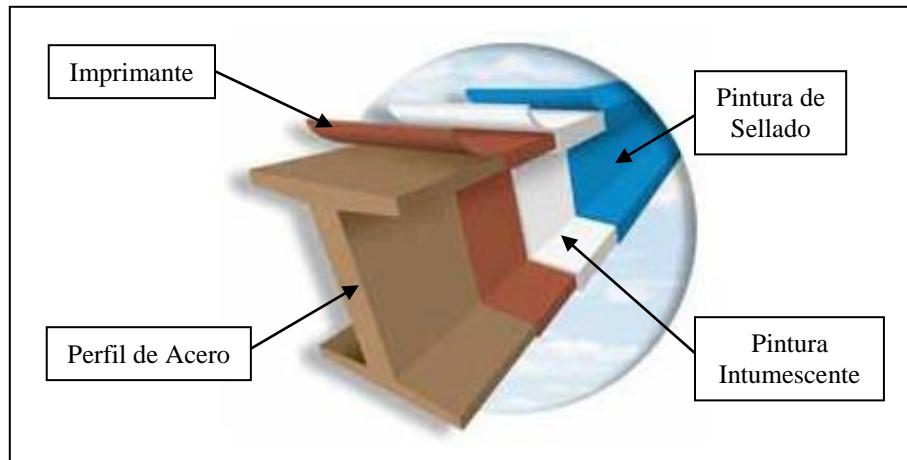


Figura 3-5: Componentes de un sistema intumescente.

En la Figura 3-6 se presenta uno de los perfiles de acero ensayado, protegido con la pintura intumescente antes del ensayo (Izq) y protegido por la capa de cenizas después del ensayo (Der).



Figura 3-6: Perfiles de acero protegidos con PI antes (Izq) y después del ensayo (Der).

## 4 DATOS DE ENTRADA

### 4.1 Ensayos

#### 4.1.1 Dimensiones de las probetas

Las 16 probetas ensayadas corresponden a perfiles de acero, los que se pueden agrupar según su masividad en 4 grupos. Los dos primeros corresponden a perfiles tipo HN y los otros dos a perfiles tipo IN. En la Tabla 4-1 se presentan las dimensiones y masividades de cada grupo de perfiles.

Tabla 4-1: Dimensiones y masividades de las probetas ensayadas.

Nombre Grupo	N° Probeta	Dimensiones [mm]	Masividad M [m <sup>-1</sup> ]
M1	P1, P2, P3 y P4	200x200x22x14	107
M2	P5, P6, P7 y P8	200x200x14x8	170
M3	P9, P10, P11 y P12	200x150x10x5	254
M4	P13, P14, P15 y P16	200x100x8x5	313

#### 4.1.2 Curvas tiempo – temperatura

En los ensayo, cada un minuto, se midieron las temperaturas promedio de la probeta y del interior del horno. Estos datos permiten generar las curvas tiempo – temperatura de cada ensayo, las que se utilizan como datos de entrada para todos los modelos y que, a su vez, permiten la validación. Desde la Figura 4-1 hasta Figura 4-16 se presentan las curvas tiempo – temperatura de cada probeta, del horno en cada ensayo y la indicada en la NCh 935/1 [2]. Los valores de las temperatura en el tiempo de las probetas y del horno se adjuntan en tablas en el Anexo A.

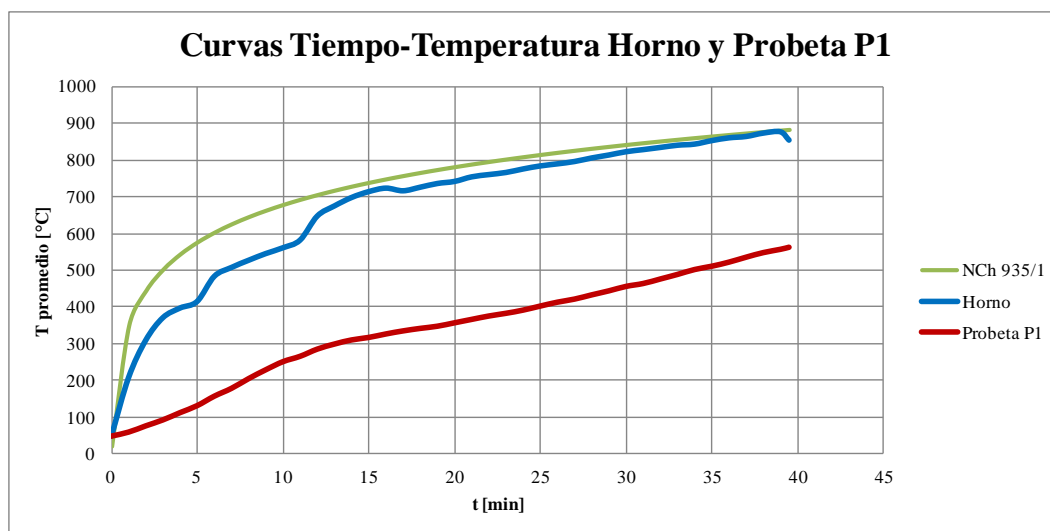


Figura 4-1: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P1.



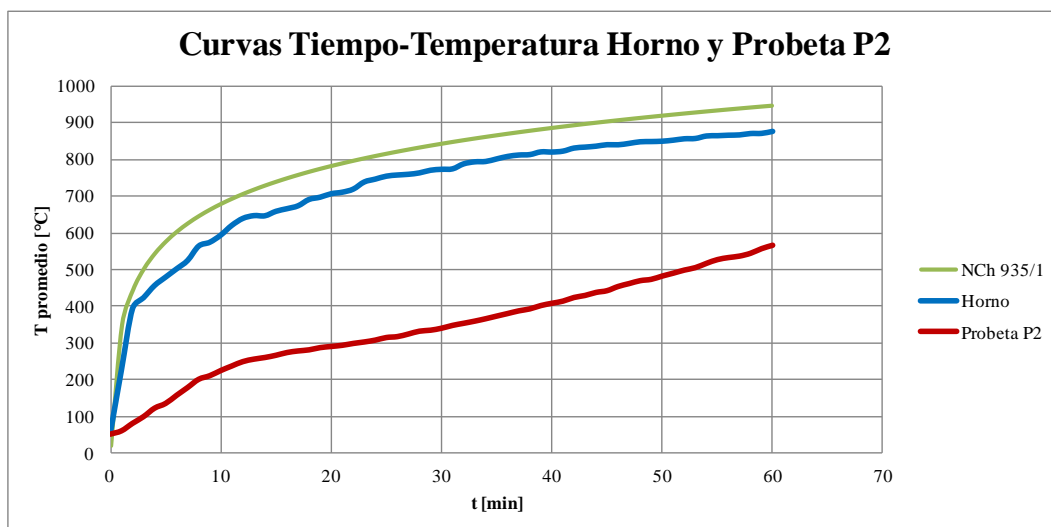


Figura 4-2: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P2.

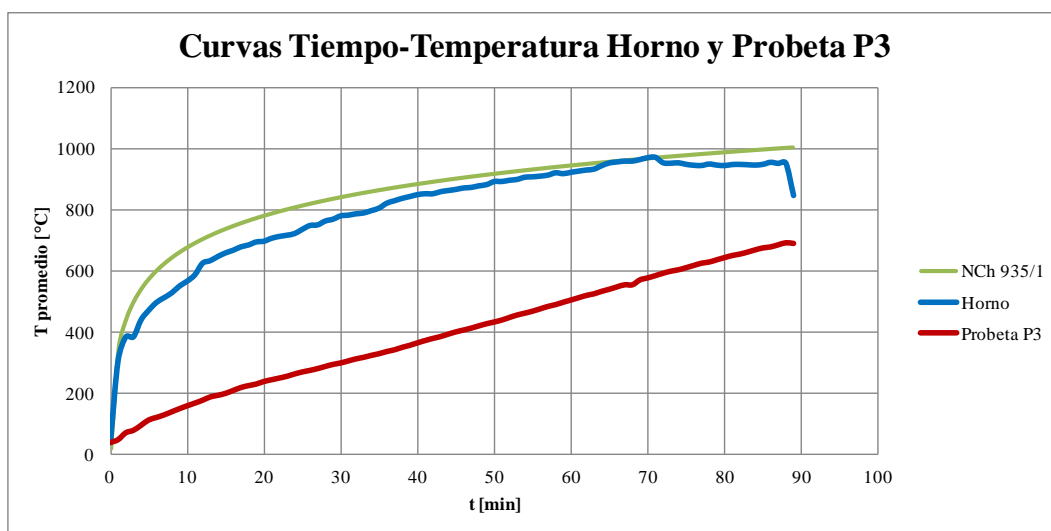


Figura 4-3: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P3.

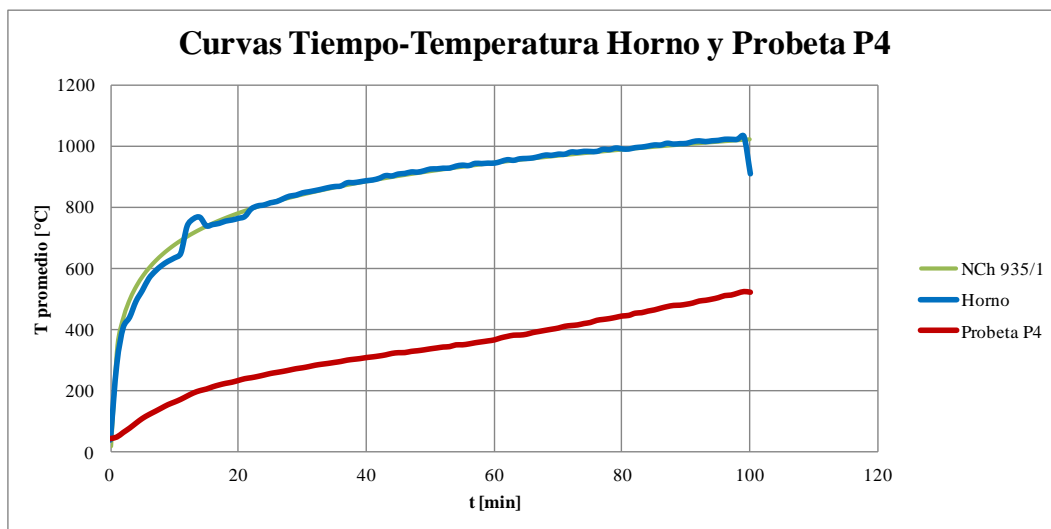


Figura 4-4: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P4.

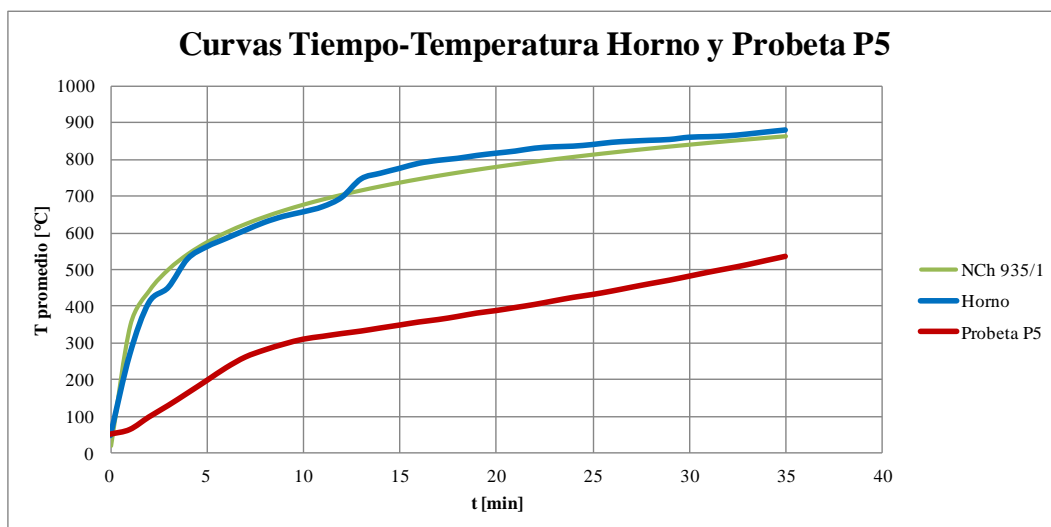


Figura 4-5: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P5.

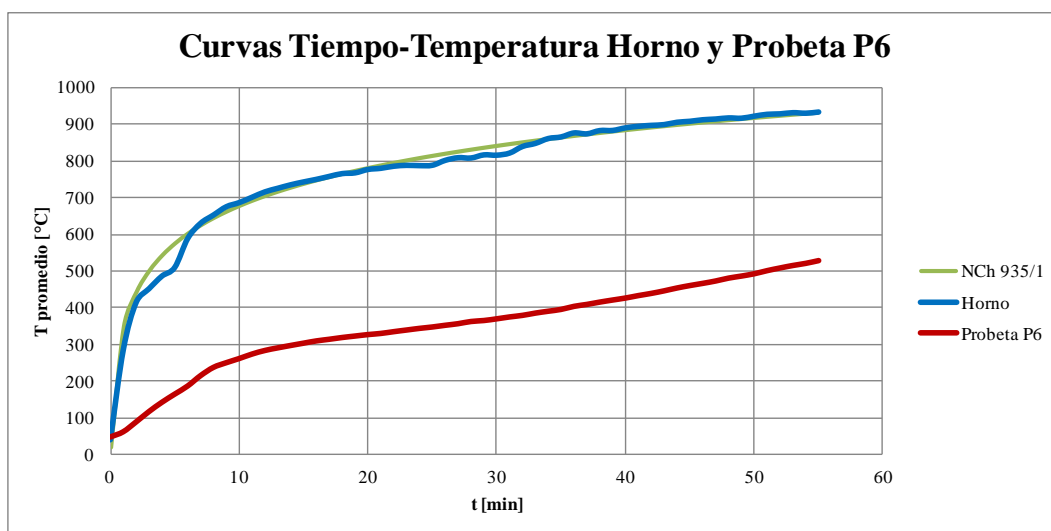


Figura 4-6: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P6.

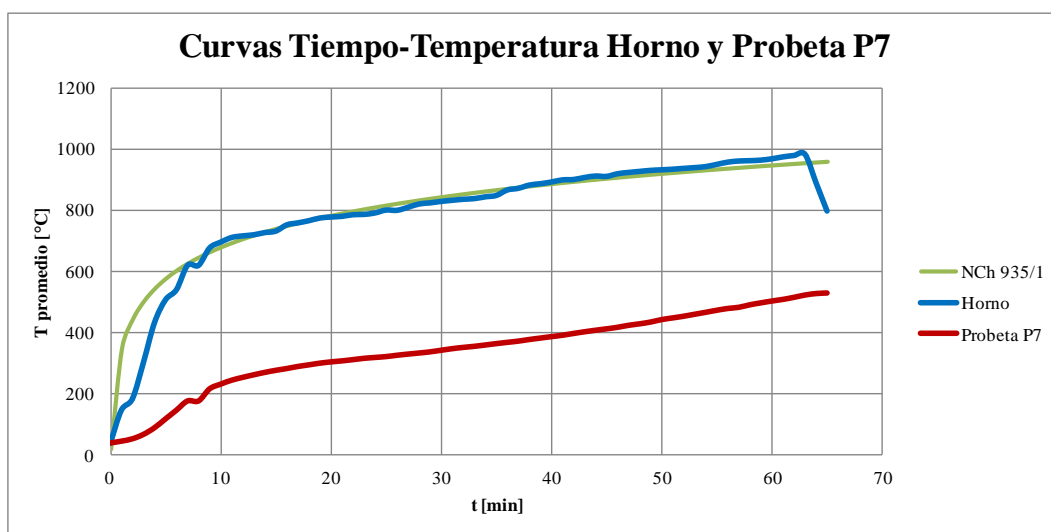


Figura 4-7: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P7.

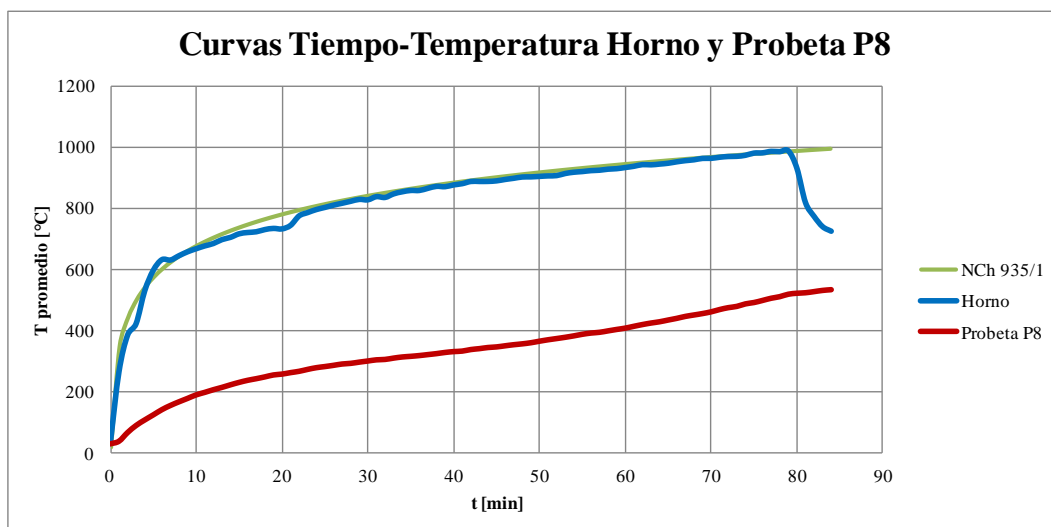


Figura 4-8: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P8.

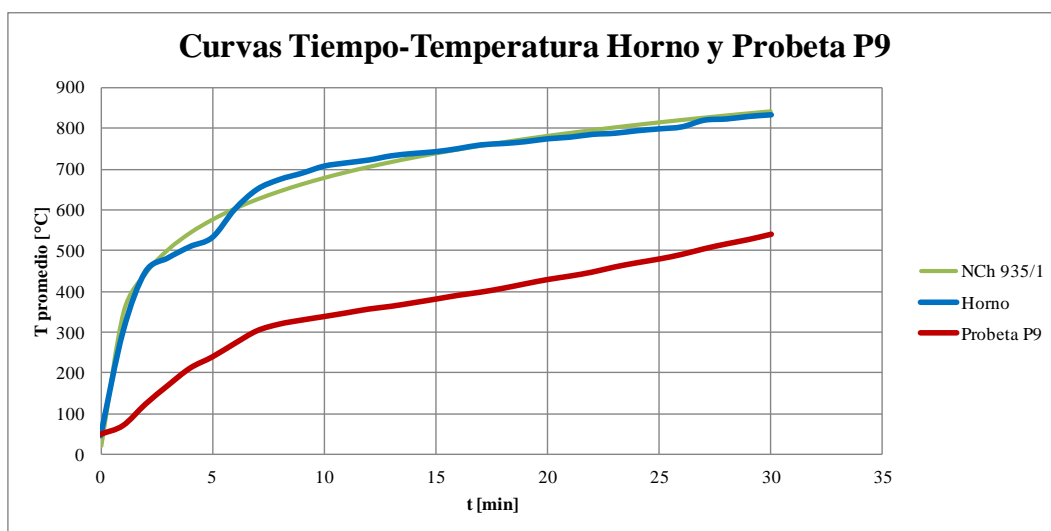


Figura 4-9: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P9.

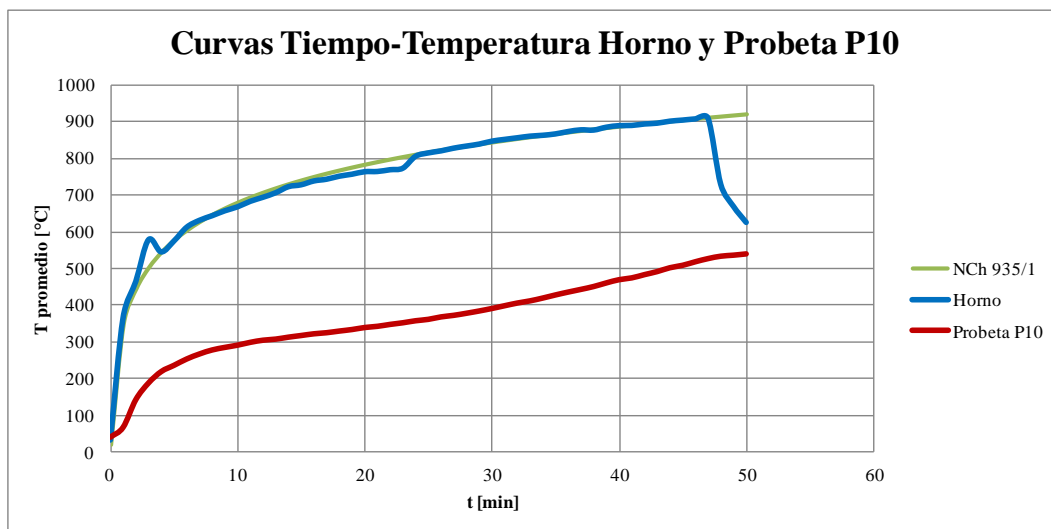


Figura 4-10: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P10.

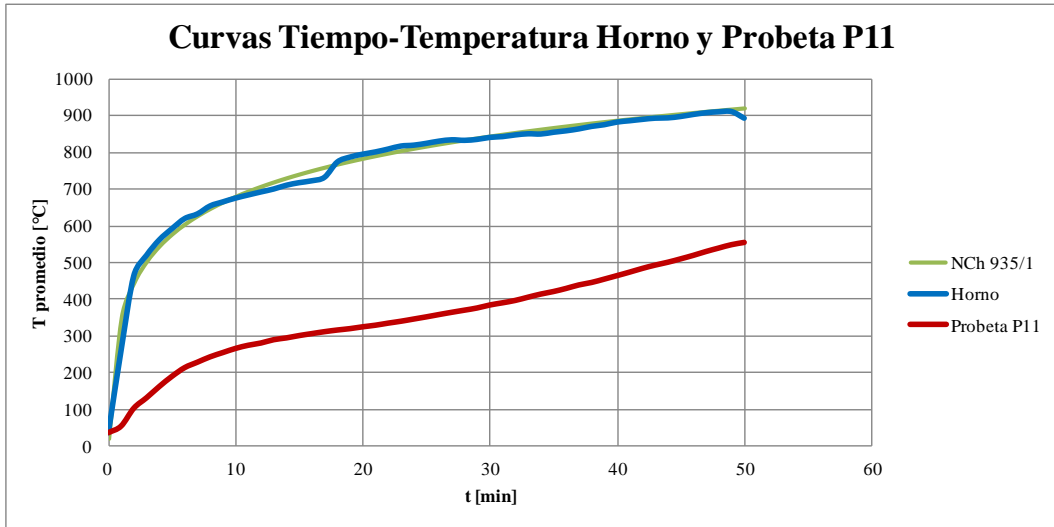


Figura 4-11: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P11.

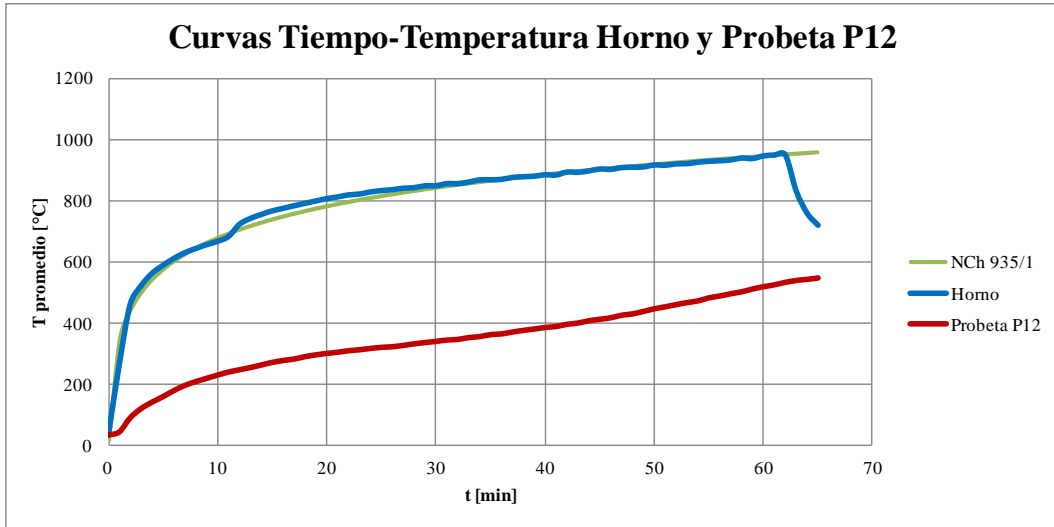


Figura 4-12: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P12.

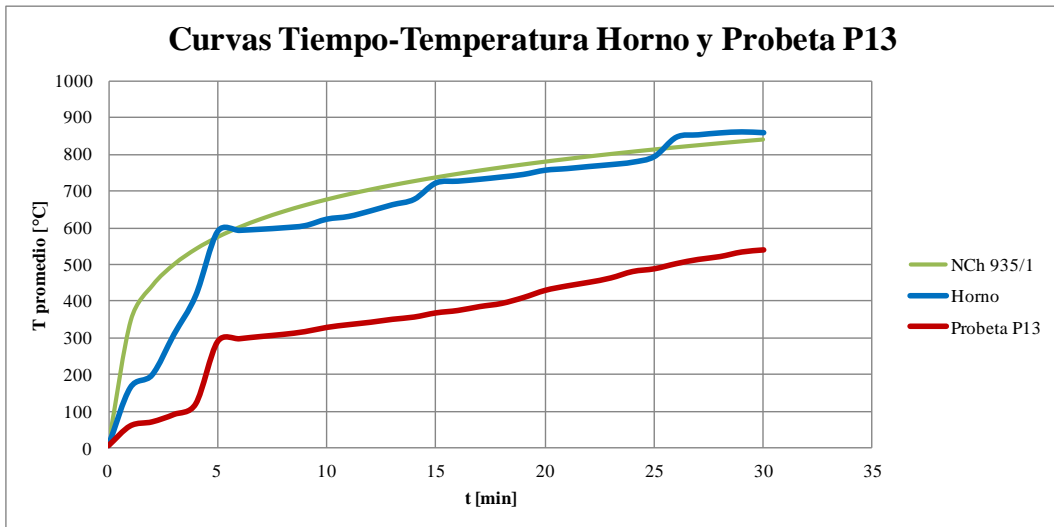


Figura 4-13: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P13.

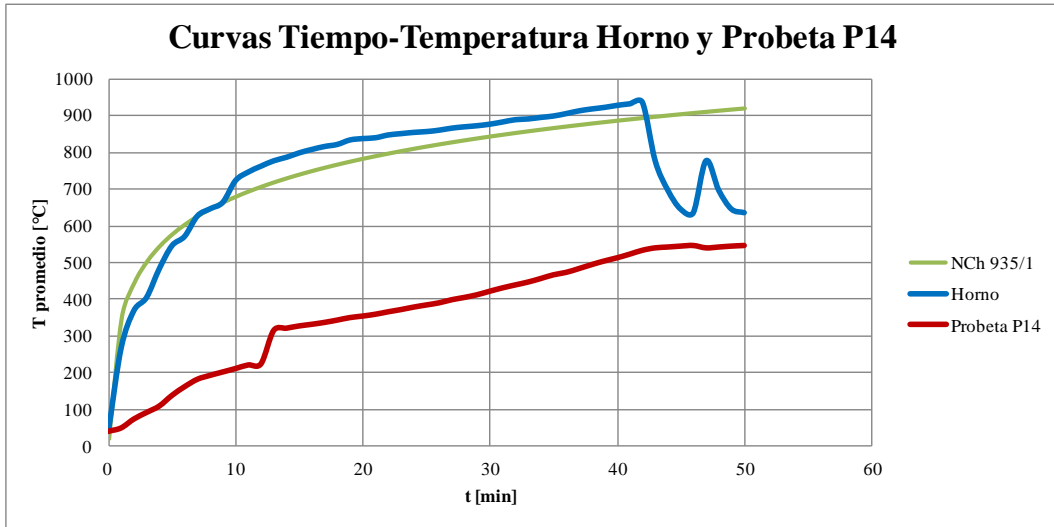


Figura 4-14: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P14.

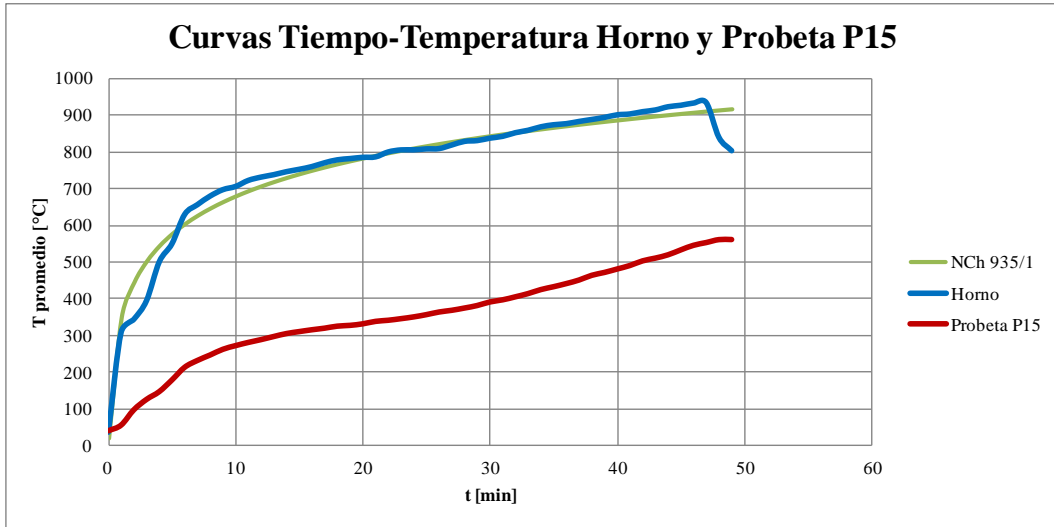


Figura 4-15: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P15.

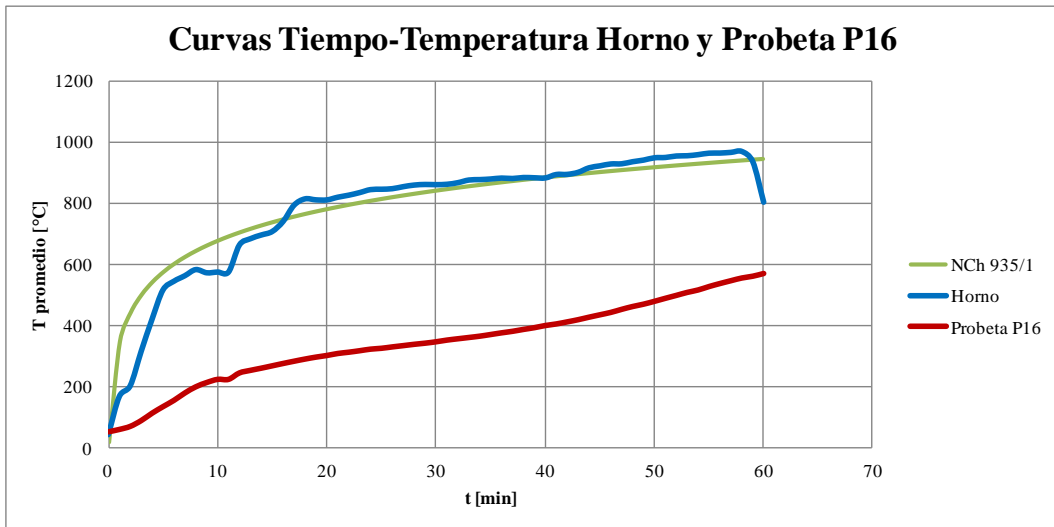


Figura 4-16: Curvas tiempo-temperatura del horno y de la probeta P16.

### 4.1.3 Espesores iniciales y finales de la PI

Otros datos necesarios para el desarrollo de los modelos son los espesores iniciales y finales de PI. Al momento de realizar los ensayos solo se registraron los espesores iniciales, por lo que es necesario realizar algún procedimiento para estimar los datos faltantes.

El procedimiento escogido consiste en obtener una relación numérica entre ambos espesores, a partir de los resultados de una serie de ensayos publicados en un estudio extranjero denominado “*Global modeling of fire protection performance of intumescent coating under different cone calorimeter heating conditions*” [8]. Estos ensayos fueron realizados sobre placas de acero protegidas con PI, expuestas a determinados flujos de calor radiativo en un cono calorimétrico.

A pesar de que la experiencia indica que los resultados (espesores finales) dependen de cada pintura, de todos modos se consideran estos valores para determinar la relación numérica que permite estimar los espesores finales de los ensayos utilizados como base.

Los resultados utilizados para desarrollar el procedimiento son presentados en la Tabla 4-2, y corresponden a los espesores iniciales y finales de PI de cada placa.

**Tabla 4-2: Espesores iniciales y finales de PI del estudio extranjero [8].**

<b>Nombre de la Placa</b>	<b>Espesor Inicial de Protección ei [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Espesor Final de Protección ef [mm]</b>
A04L1	350	22
A04L2	370	20
A08L1	900	38
A08L2	1000	36
A12L1	1250	48
A12L2	1300	46
B04L1	500	25
B04L2	500	24
B08L1	850	38
B08L2	830	38
B12L1	1100	41
B12L2	1200	39
C04L1	540	20
C04L2	550	19
C08L1	1100	39
C08L2	1000	38
C12L1	1500	40
C12L2	1600	42

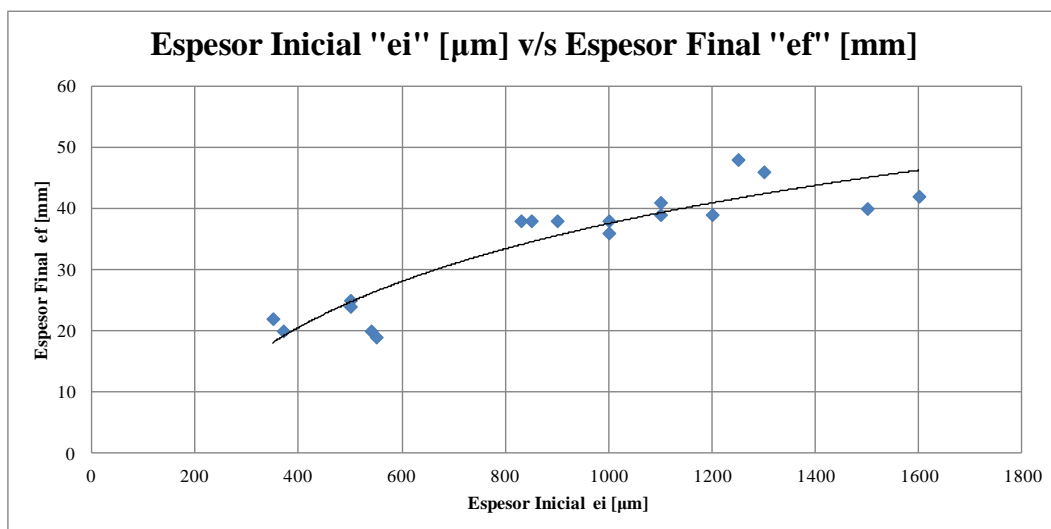


Figura 4-17: Espesores iniciales vs espesores finales de PI del estudio extranjero [8].

La relación numérica se obtiene mediante una regresión logarítmica sobre los resultados, tal como se muestra en la Figura 4-17. Con esto, se puede relacionar el espesor inicial “ei” y el espesor final “ef” de PI, como

$$ef = 18,528 \cdot \ln(ei) - 90,470 \quad (16)$$

$$R^2 = 0,839$$

Con esta relación se estiman los espesores finales de la PI para cada ensayo.

Tabla 4-3: Espesores iniciales y finales de PI para cada probeta.

N° Probeta	Espesor Inicial de Protección ei [μm]	Espesor Final de Protección ef [mm]
P1	438	22
P2	796	33
P3	1777	48
P4	1876	49
P5	449	23
P6	882	35
P7	1239	41
P8	1814	49
P9	483	24
P10	924	36
P11	1182	41
P12	1759	48
P13	450	23
P14	906	36
P15	1181	41
P16	1771	48

## 4.2 Acero

### 4.2.1 Densidad

Según el Eurocódigo 3 [6], la densidad del acero debe ser considerada independiente de la temperatura. El valor que se debe considerar es 7850 [kg/m<sup>3</sup>].

### 4.2.2 Calor específico

Según el Eurocódigo 3 [6], el calor específico del acero debe ser determinado a partir de lo siguiente:

- Para  $20\text{ °C} \leq T \leq 600\text{ °C}$

$$Cp = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \cdot T - 1,69 \times 10^{-3} \cdot T^2 + 2,22 \times 10^{-6} \cdot T^3 \text{ [J/kgK]} \quad (17)$$

- Para  $600\text{ °C} \leq T \leq 735\text{ °C}$

$$Cp = 666 + \frac{13002}{738 - T} \text{ [J/kgK]} \quad (18)$$

- Para  $735\text{ °C} \leq T \leq 900\text{ °C}$

$$Cp = 545 + \frac{17820}{T - 731} \text{ [J/kgK]} \quad (19)$$

- Para  $900\text{ °C} \leq T \leq 1200\text{ °C}$

$$Cp = 650 \text{ [J/kgK]} \quad (20)$$

La variación del calor específico con la temperatura se presenta en la Figura 4-18.

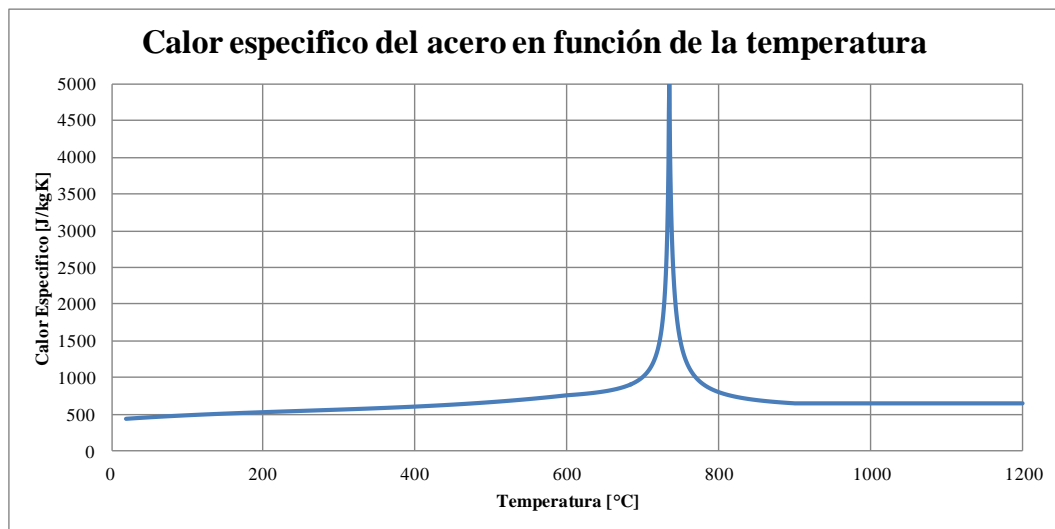


Figura 4-18: Calor específico del acero en función de la temperatura.



### 4.2.3 Conductividad térmica

Según el Eurocódigo 3 [6], la conductividad térmica del acero debe ser determinada como:

- Para  $20\text{ °C} \leq T \leq 800\text{ °C}$

$$k = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \cdot T \text{ [ W/mK]} \quad (21)$$

- Para  $800\text{ °C} \leq T \leq 1200\text{ °C}$

$$k = 27,3 \text{ [ W/mK]} \quad (22)$$

La variación del calor específico con la temperatura se presenta en la Figura 4-19.

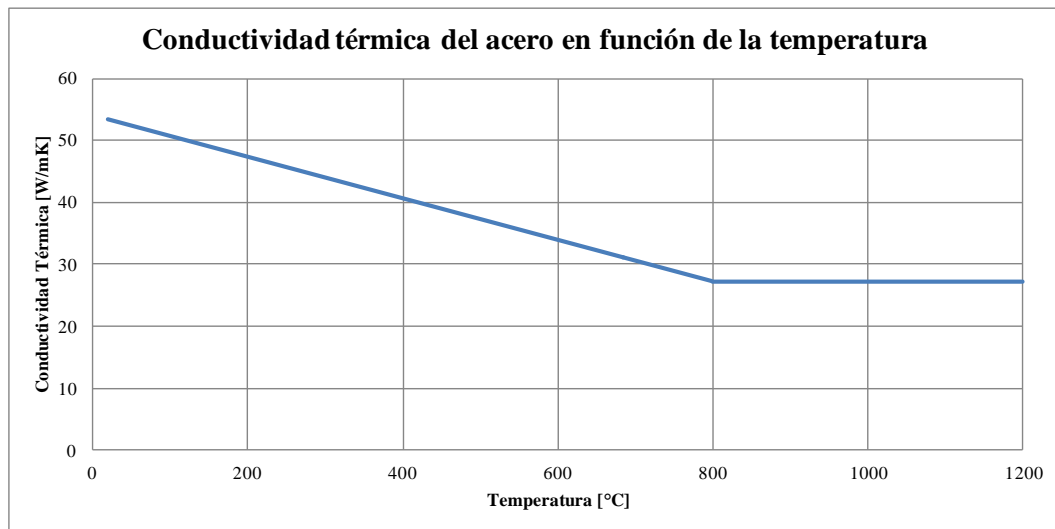


Figura 4-19: Conductividad térmica del acero en función de la temperatura.

## 4.3 Pintura Intumescente

### 4.3.1 Calor específico

Según el estudio extranjero denominado “*Temperature distribution of intumescent coated steel framed connection at elevated temperature*” [9], el calor específico de la pintura intumescente es independiente de la temperatura y su valor es  $1.000 \text{ [J/kgK]}$ .

### 4.3.2 Densidad

Del estudio citado anteriormente [9], se tiene que la densidad de la pintura intumescente es  $1300 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  a los  $20\text{ °C}$  y  $10 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  a los  $900\text{ °C}$ . Dado que no se encontraron valores de densidades para distintas temperaturas, y que según lo indicado en [8], no es posible suponer una variación lineal de la densidad con respecto de la temperatura, se considera que la densidad antes de intumescer es  $1.300 \text{ kg/m}^3$  y que cuando está intumescida es  $10 \text{ kg/m}^3$ .

### 4.3.3 Conductividad térmica

Durante la revisión bibliográfica no se encontró información respecto de la conductividad térmica de la PI. Esta propiedad debe ser calculada mediante al procedimiento teórico.

## 5 MODELO 1: REGRESIONES NUMÉRICAS

### 5.1 Introducción

El primer modelo desarrollado consiste en un modelo matemático obtenido a partir de una serie de regresiones numéricas realizadas sobre los datos de las curvas tiempo – temperatura presentadas en el punto 4.1.2 y en las tablas del Anexo A.

Este modelo permite predecir la temperatura promedio “ $T$ ” de la sección transversal de un perfil de acero expuesto al fuego, como una función del tiempo de exposición “ $t$ ”, de su masividad “ $M$ ” y del espesor inicial de la protección de PI “ $ei$ ”. Con estos datos se obtiene la curva tiempo-temperatura de cada perfil.

La metodología considerada para desarrollar el modelo tiene como base la utilizada en el IDIEM para determinar las “Curvas de la PI”, presentadas en un gráfico como resultado del análisis numérico de una determinada serie de ensayos. Estas curvas relacionan la masividad del perfil de acero y el espesor inicial de PI, con el tiempo en que la sección transversal del perfil alcanza los 500 °C en promedio, considerados como criterio de falla según la NCh 935/1 Of. 97 [2].

El primer paso consiste en determinar el tiempo en que cada probeta alcanzó los 300 °C, 350 °C, 400 °C, 450 °C y 500 °C. El tiempo se obtiene mediante una interpolación línea, sobre los datos del Anexo A y se expresa en segundos.

### 5.2 Función Tiempo

#### 5.2.1 Tiempo como función del espesor inicial

Para realizar las primeras regresiones se debe conocer el tiempo en que cada probeta llegó a los 300 °C. Estas regresiones numéricas son entre el tiempo  $t$  y el espesor inicial  $ei$  de PI, y se realizan sobre cada grupo de masividades.

- M1

Tabla 5-1: Tiempo y espesor inicial para M1 (T = 300 °C).

M1 [m <sup>-1</sup> ]	ei [μm]	t [s]
107	438	788
	796	1340
	1777	1790
	1876	2213

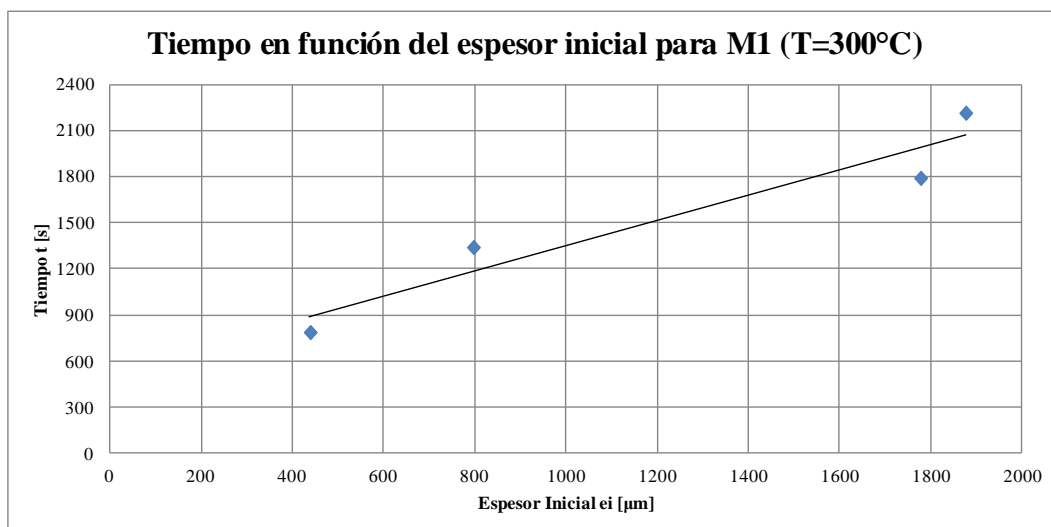


Figura 5-1: Tiempo en función del espesor inicial para M1 (T = 300 °C).

La función obtenida con la regresión es:

$$t = 0,81838 \cdot e_i + 532,89525 \quad (23)$$

$$R^2 = 0,91545$$

- M2

Tabla 5-2: Tiempo y espesor inicial para M2 (T = 300 °C).

M2 [ $\text{m}^{-1}$ ]	$e_i$ [ $\mu\text{m}$ ]	T [s]
170	449	557
	882	865
	1239	1166
	1814	1800

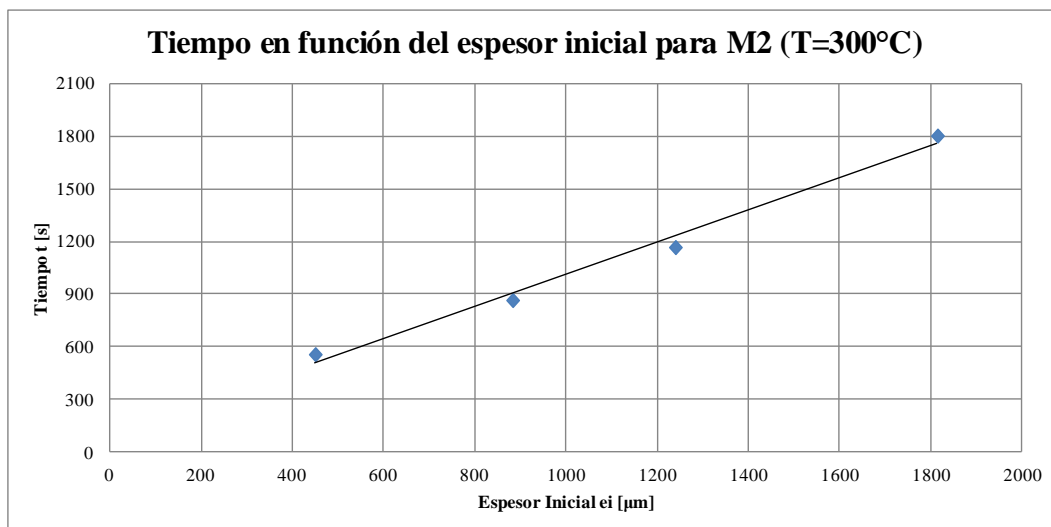


Figura 5-2: Tiempo en función del espesor inicial para M2 (T = 300 °C).

La función obtenida con la regresión es:

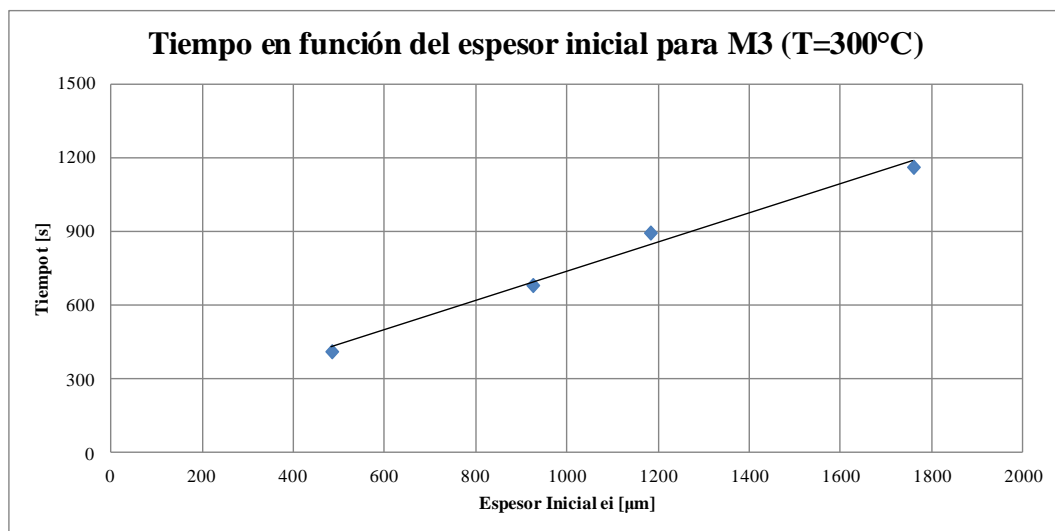
$$t = 0,91330 \cdot ei + 96,01907$$

$$R^2 = 0,98821$$
(24)

- M3

**Tabla 5-3: Tiempo y espesor inicial para M3 (T = 300 °C).**

M3 [m <sup>-1</sup> ]	ei [μm]	t [s]
254	483	412
	924	681
	1182	894
	1759	1161



**Figura 5-3: Tiempo en función del espesor inicial para M3 (T = 300 °C).**

La función obtenida con la regresión es:

$$t = 0,59305 \cdot ei + 142,35981$$

$$R^2 = 0,98833$$
(25)

- M4

**Tabla 5-4: Tiempo y espesor inicial para M4 (T = 300 °C).**

M4 [m <sup>-1</sup> ]	ei [μm]	t [s]
313	450	397
	906	770
	1181	801
	1771	1191

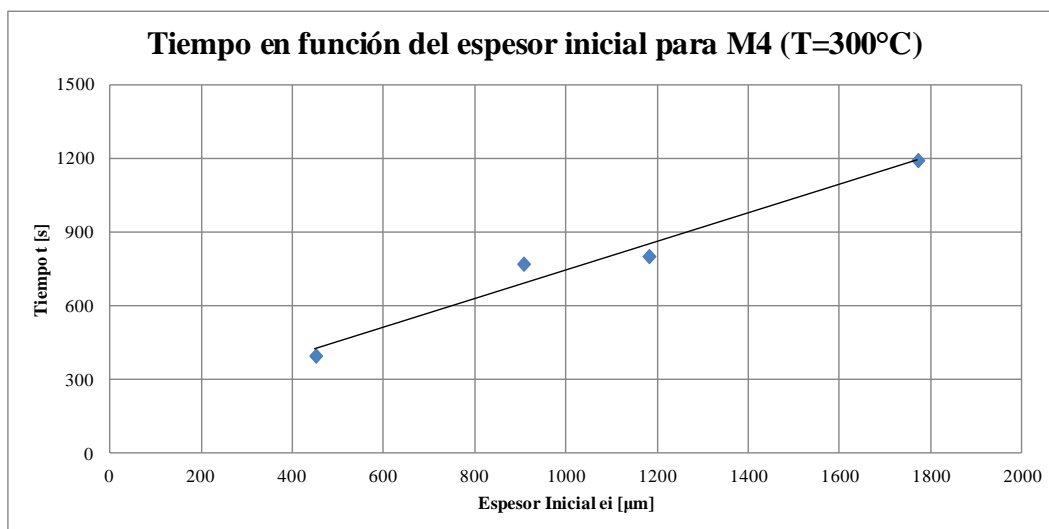


Figura 5-4: Tiempo en función del espesor inicial para M4 (T = 300 °C).

La función obtenida con la regresión es:

$$t = 0,57855 \cdot e_i + 166,65314 \quad (26)$$

$$R^2 = 0,96972$$

Estas funciones que relacionan el tiempo y el espesor inicial, tienen la forma:

$$t(e_i) = A \cdot e_i + B \quad (27)$$

En la Tabla 5-5 se presenta un resumen con las constantes de las relaciones tiempo – espesor inicial para cada masividad.

Tabla 5-5: Constantes de funciones tiempo – espesor inicial para cada masividad (T = 300 °C).

T [°C]	M [ $\text{m}^{-1}$ ]	A	B
300	107	0,81838	532,89525
	170	0,91330	96,01907
	254	0,59305	142,35981
	313	0,57855	166,65314

Este procedimiento se repite para obtener la relación entre el tiempo en que cada probeta llega a 350 °C, 400 °C, 450 °C y 500 °C con el espesor inicial de PI, para cada grupo de masividad.

Tabla 5-6: Constantes de funciones tiempo – espesor inicial para cada masividad (T ≥ 300 °C)

T [°C]	M [ $\text{m}^{-1}$ ]	A	B
350	107	1,08695	810,26950
	170	1,34147	311,74896
	254	0,95022	328,36563
	313	0,80490	433,37415
400	107	1,32211	1042,21433
	170	1,58881	630,41486
	254	1,13611	612,29448
	313	0,97631	705,26515

T [°C]	M [m <sup>-1</sup> ]	A	B
450	107	1,55209	1238,47816
	170	1,76553	912,72953
	254	1,25205	868,76793
	313	1,10208	898,05870
500	107	1,78594	1414,52567
	170	1,91125	1183,52159
	254	1,36725	1086,79516
	313	1,16297	1124,22606

### 5.2.2 Constantes A y B como funciones de la masividad

Las siguientes regresiones se realizan entre las masividades y las constantes A y B de la regresión anterior, para temperatura por separado.

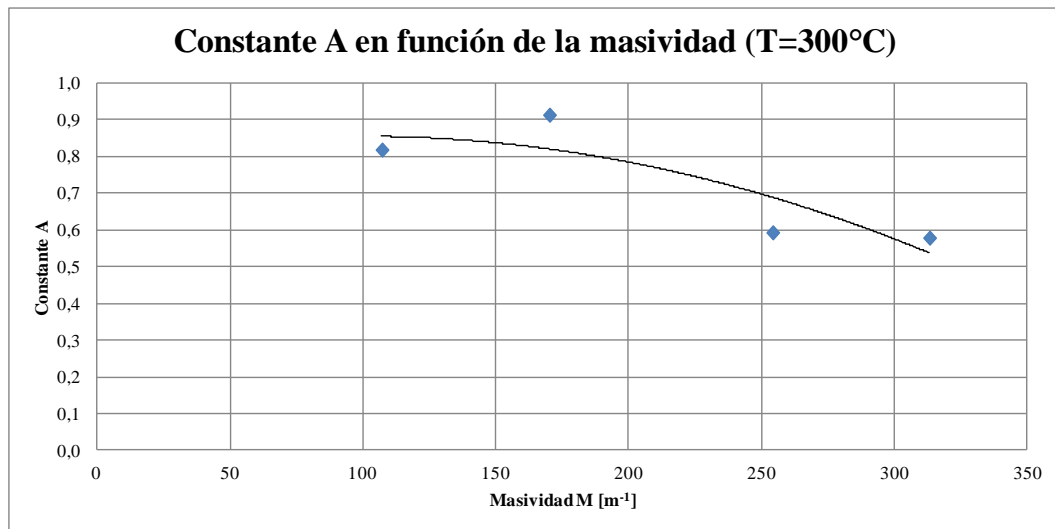


Figura 5-5: Constante A en función de la masividad (T = 300 °C).

La función obtenida con la regresión es:

$$A = -6,942 \times 10^{-6} \cdot M^2 + 1,377 \times 10^{-3} \cdot M + 7,872 \times 10^{-1}$$

$$R^2 = 0,74966 \quad (28)$$

Esta función que relaciona la constante A y la masividad, tiene la forma:

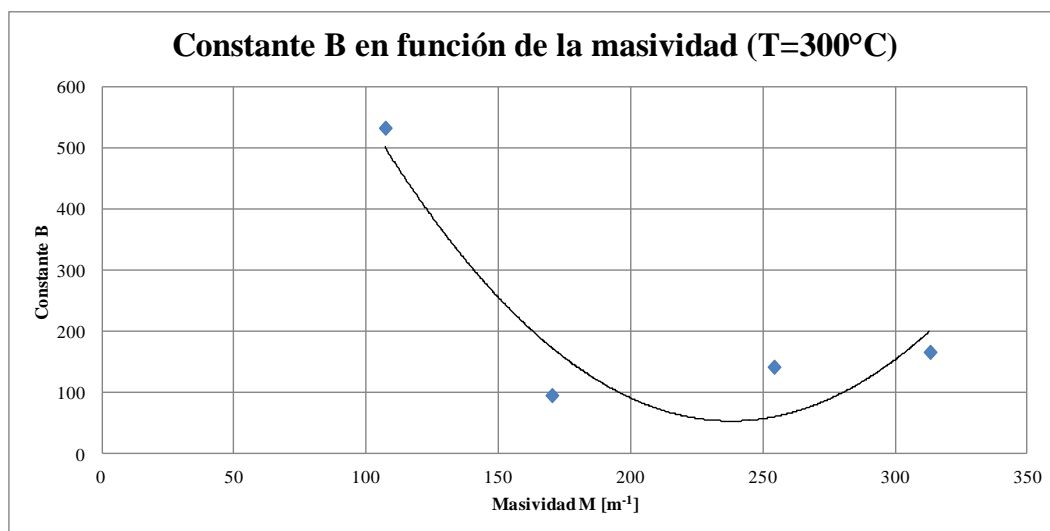
$$A(M) = C \cdot M^2 + D \cdot M + E \quad (29)$$

Este procedimiento se repite para las otras temperaturas y se obtienen las constantes C, D y E.

**Tabla 5-7: Constantes de las funciones constante A – masividad para cada temperatura.**

T [°C]	Constante C	Constante D	Constante E
300	$-6,942 \times 10^{-6}$	$1,377 \times 10^{-3}$	$7,872 \times 10^{-1}$
350	$-2,352 \times 10^{-5}$	$8,053 \times 10^{-3}$	$5,393 \times 10^{-1}$
400	$-2,518 \times 10^{-5}$	$8,380 \times 10^{-3}$	$7,642 \times 10^{-1}$
450	$-2,177 \times 10^{-5}$	$6,409 \times 10^{-3}$	$1,169 \times 10^0$
500	$-1,995 \times 10^{-5}$	$4,876 \times 10^{-3}$	$1,540 \times 10^0$

De igual manera



**Figura 5-6: Constante B en función de la masividad (T = 300 °C).**

La función obtenida con la regresión es:

$$B = 2,610 \times 10^{-2} \cdot M^2 - 12,42044 \cdot M + 1.531,93797 \quad (30)$$

$$R^2 = 0,87646$$

Esta función que relaciona la constante B y la masividad, tiene la forma:

$$B(M) = F \cdot M^2 + G \cdot M + H \quad (31)$$

Este procedimiento se repite para las otras temperaturas y se obtienen las constantes F, G y H.

**Tabla 5-8: Constantes de las funciones constante B – masividad para cada temperatura.**

T [°C]	Constante F	Constante G	Constante H
300	$2,610 \times 10^{-2}$	-12,42044	1531,93797
350	$3,407 \times 10^{-2}$	-15,87012	2091,78095
400	$2,842 \times 10^{-2}$	-13,38631	2130,84891
450	$1,990 \times 10^{-2}$	-9,86146	2051,09445
500	$1,490 \times 10^{-2}$	-7,63875	2058,51174

### 5.2.3 Constantes C, D, E, F, G y H como funciones de la temperatura

Las siguientes regresiones se realizan entre la temperatura y constantes C, D, E, F, G y H de las regresiones anteriores, por separado.

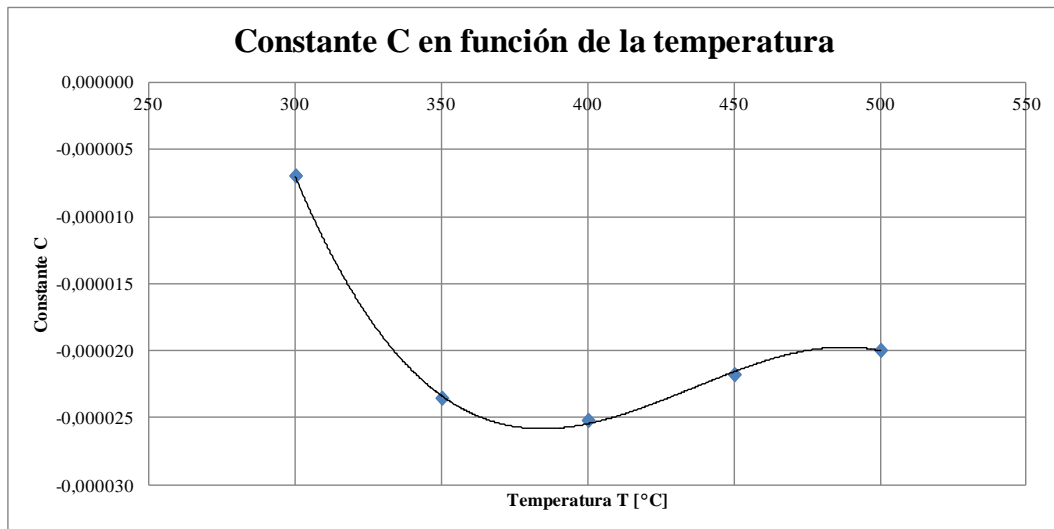


Figura 5-7: Constante C en función de la temperatura.

La función obtenida con la regresión es:

$$C = -1,102 \times 10^{-11} \cdot T^3 + 1,441 \times 10^{-8} \cdot T^2 - 6,199 \times 10^{-6} \cdot T + 8,528 \times 10^{-4} \quad (32)$$

$$R^2 = 0,99931$$

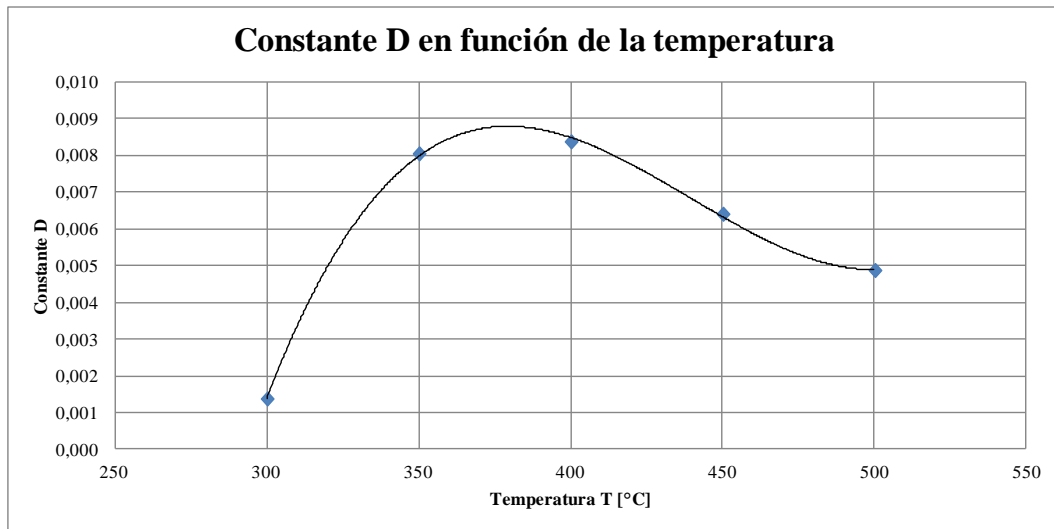


Figura 5-8: Constante D en función de la temperatura.

La función obtenida con la regresión es:

$$D = 4,525 \times 10^{-9} \cdot T^3 - 5,965 \times 10^{-6} \cdot T^2 + 2,572 \times 10^{-3} \cdot T - 3,556 \times 10^{-1} \quad (33)$$

$$R^2 = 0,99924$$



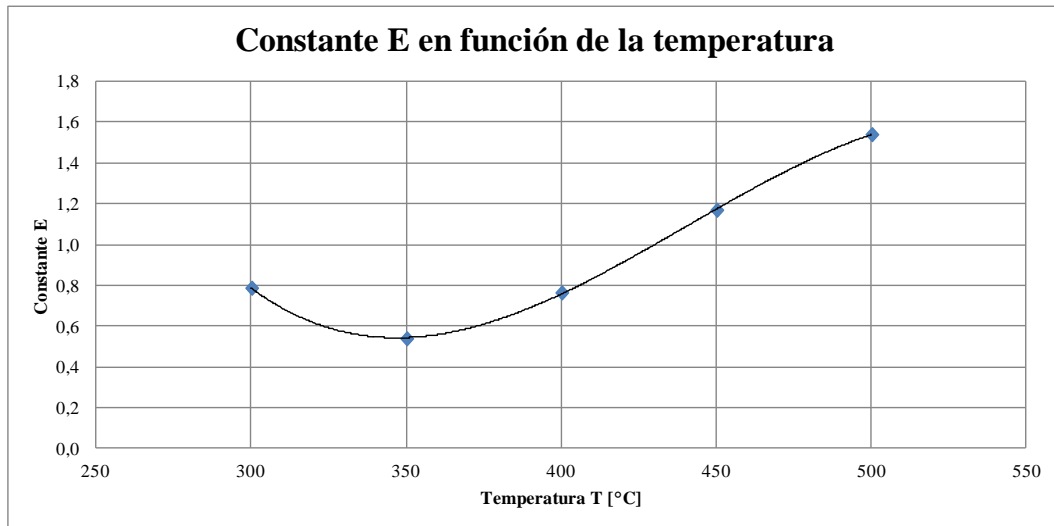


Figura 5-9: Constante E en función de la temperatura.

La función obtenida con la regresión es:

$$E = -3,383 \times 10^{-7} \cdot T^3 + 4,464 \times 10^{-4} \cdot T^2 - 1,876 \times 10^{-1} \cdot T + 2,603 \times 10^1$$

$$R^2 = 0,99986 \quad (34)$$

Estas funciones que relacionan las constantes C, D y E y la temperatura, tienen la forma:

$$C(T) = C3 \cdot T^3 + C2 \cdot T^2 + C1 \cdot T + C0$$

$$D(T) = D3 \cdot T^3 + D2 \cdot T^2 + D1 \cdot T + D0$$

$$E(T) = E3 \cdot T^3 + E2 \cdot T^2 + E1 \cdot T + E0 \quad (35)$$

Tabla 5-9: Constantes de las funciones constante C, D y E – temperatura.

Constante	Valor	Constante	Valor	Constante	Valor
C3	$-1,102 \times 10^{-11}$	D3	$4,525 \times 10^{-9}$	E3	$-3,383 \times 10^{-7}$
C2	$1,441 \times 10^{-8}$	D2	$-5,965 \times 10^{-6}$	E2	$4,464 \times 10^{-4}$
C1	$-6,199 \times 10^{-6}$	D1	$2,572 \times 10^{-3}$	E1	$-1,876 \times 10^{-1}$
C0	$8,528 \times 10^{-4}$	D0	$-3,556 \times 10^{-1}$	E0	$2,603 \times 10^1$

Este procedimiento se repite para las constantes F, G y H. Las funciones que relacionan estas constantes con la temperatura, tienen la forma

$$F(T) = F3 \cdot T^3 + F2 \cdot T^2 + F1 \cdot T + F0$$

$$G(T) = G3 \cdot T^3 + G2 \cdot T^2 + G1 \cdot T + G0$$

$$H(T) = H3 \cdot T^3 + H2 \cdot T^2 + H1 \cdot T + H0 \quad (36)$$

Tabla 5-10: Constantes de las funciones constante E, F y G – temperatura.

Constante	Valor	Constante	Valor	Constante	Valor
F3	$1,143 \times 10^{-8}$	G3	$-4,824 \times 10^{-6}$	H3	$4,053 \times 10^{-4}$
F2	$-1,454 \times 10^{-5}$	G2	$6,142 \times 10^{-3}$	H2	$-5,213 \times 10^{-1}$
F1	$5,975 \times 10^{-3}$	G1	$-2,526 \times 10^0$	H1	$2,211 \times 10^2$
F0	$-7,664 \times 10^{-1}$	G0	$3,229 \times 10^2$	H0	$-2,882 \times 10^4$

### 5.2.4 Tiempo como función del espesor inicial, de la masividad y de la temperatura

Las regresiones anteriores permiten obtener una función para determinar el tiempo  $t$  en que un perfil de masividad  $M$ , protegido con un espesor inicial  $ei$  de PI alcanza una determinada temperatura  $T$ .

$$t = f(ei, M, T) \quad (37)$$

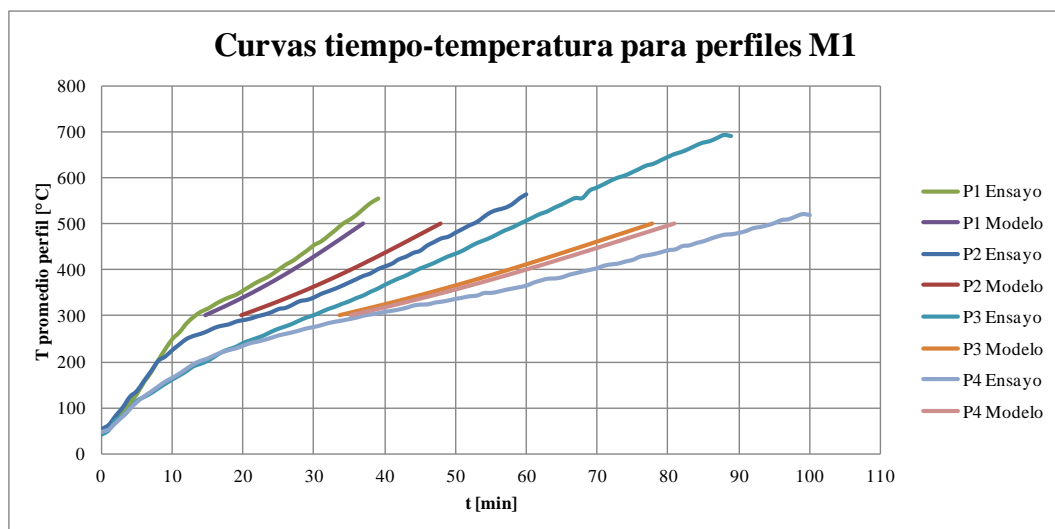
En la Tabla 5-11 se presenta la función de la ecuación (37) y las sub-funciones. En la Tabla 5-9 y Tabla 5-10 se encuentran los valores de las constantes de la función general.

**Tabla 5-11: Funciones entre el tiempo, el espesor inicial, la masividad y la temperatura.**

Función	Variable	Tipo de Función	Expresión
$t$	$ei$	Lineal	$t = A \cdot ei + B$
$A$	$M$	Cuadrática	$A = C \cdot M^2 + D \cdot M + E$
$B$	$M$	Cuadrática	$B = F \cdot M^2 + G \cdot M + H$
$C$	$T$	Cúbica	$C = C3 \cdot T^3 + C2 \cdot T^2 + C1 \cdot T + C0$
$D$	$T$	Cúbica	$D = D3 \cdot T^3 + D2 \cdot T^2 + D1 \cdot T + D0$
$E$	$T$	Cúbica	$E = E3 \cdot T^3 + E2 \cdot T^2 + E1 \cdot T + E0$
$F$	$T$	Cúbica	$F = F3 \cdot T^3 + F2 \cdot T^2 + F1 \cdot T + F0$
$G$	$T$	Cúbica	$G = G3 \cdot T^3 + G2 \cdot T^2 + G1 \cdot T + G0$
$H$	$T$	Cúbica	$H = H3 \cdot T^3 + H2 \cdot T^2 + H1 \cdot T + H0$

Se debe tener en consideración que las masividades utilizadas varían entre 107 y 313 [ $m^{-1}$ ], que los espesores iniciales de PI varían entre 400 y 2000 [ $\mu m$ ] aproximadamente y que las temperaturas van desde 300 °C hasta 500 °C, por lo que la función es válida solo en dichos intervalos.

Considerando lo anterior se obtienen las curvas tiempo – temperatura de las probetas según el modelo, las que se presentan a continuación para cada grupo de masividades.



**Figura 5-10: Curvas tiempo-temperatura para perfiles M1, según ensayo y modelo 1 previo.**

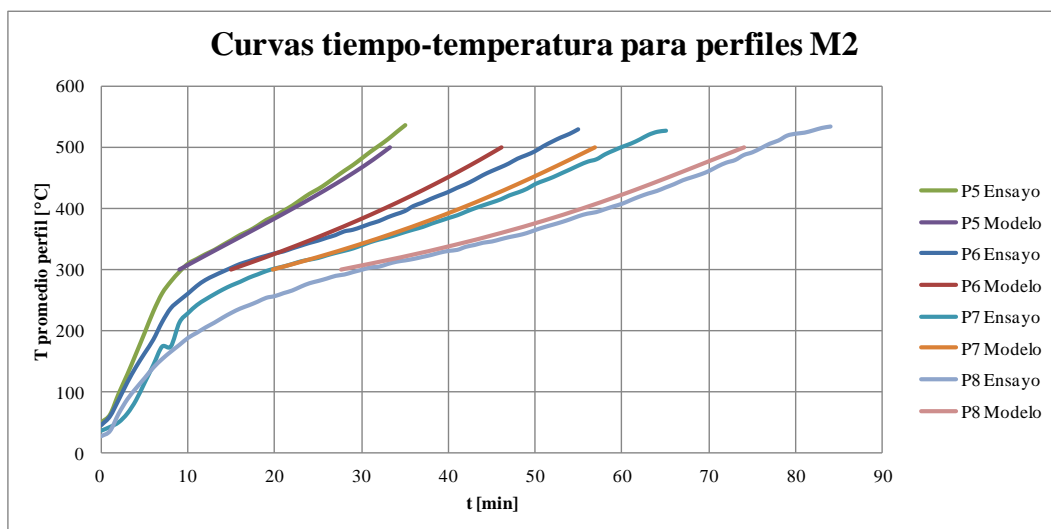


Figura 5-11: Curvas tiempo-temperatura para perfiles M2, según ensayo y modelo 1 previo.

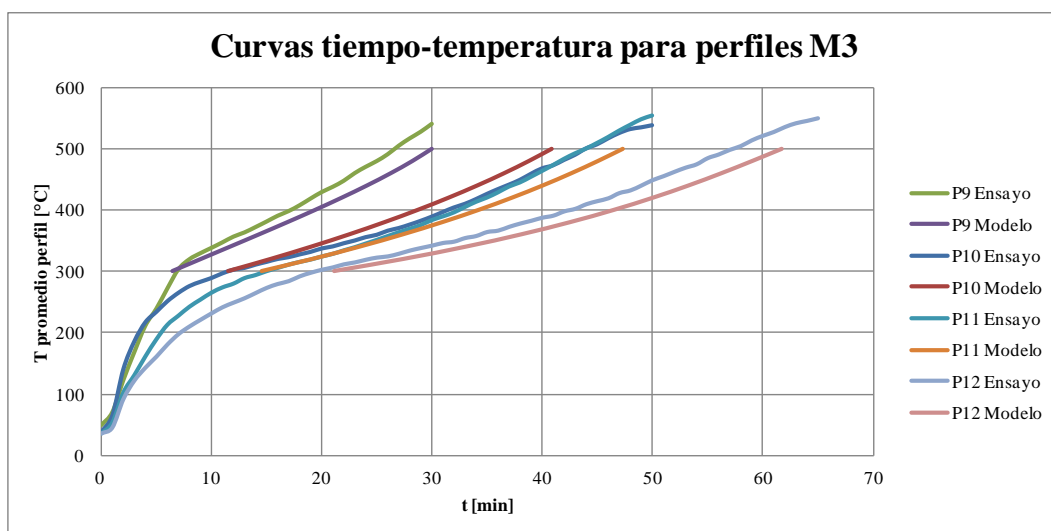


Figura 5-12: Curvas tiempo-temperatura para perfiles M3, según ensayo y modelo 1 previo.

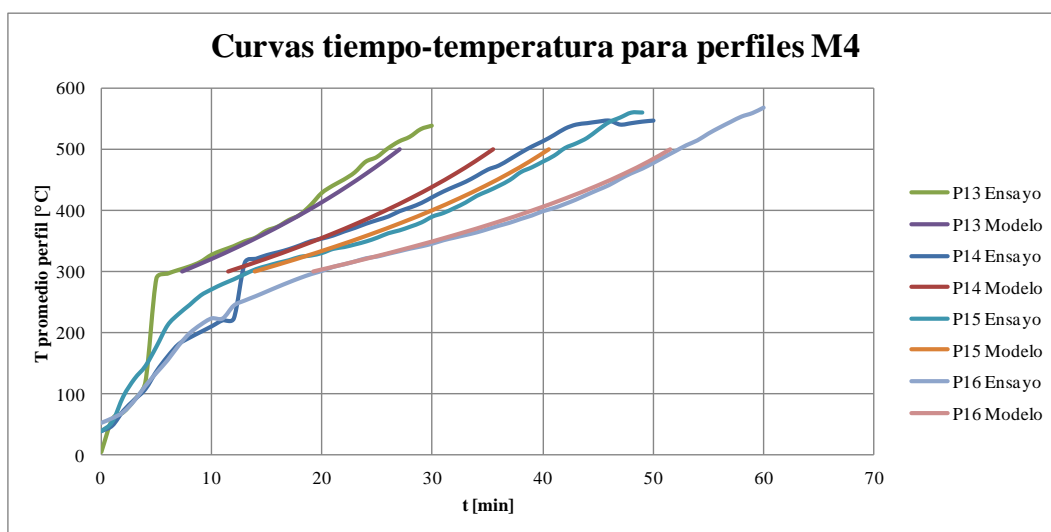


Figura 5-13: Curvas tiempo-temperatura para perfiles M4, según ensayo y modelo 1 previo.

## 5.3 Función Temperatura

### 5.3.1 Temperatura como función del tiempo

Con las curvas tiempo – temperatura determinadas en el punto anterior, es posible realizar nuevas regresiones numéricas con el objetivo de encontrar la función que modela la temperatura dependiendo del tiempo, de su masividad y de su espesor inicial de PI. Al realizar dichas regresiones se obtiene el tiempo en función de la temperatura.

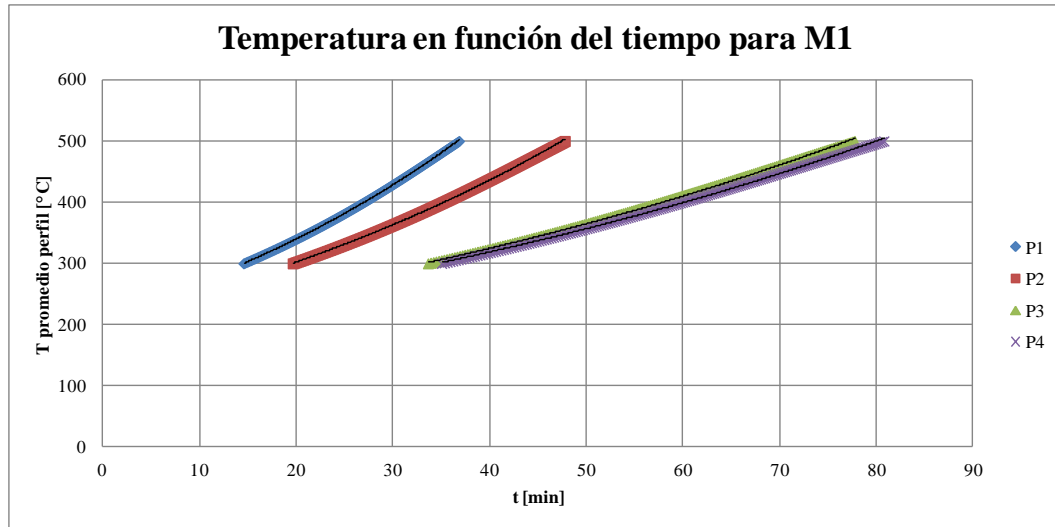


Figura 5-14: Temperatura en función del tiempo para M1.

Las funciones obtenidas en cada regresión son:

- P1

$$T(t) = 213,95615 \cdot \text{EXP}(0,02310 \cdot t) \quad (38)$$
$$R^2 = 1,00000$$

- P2

$$T(t) = 209,37677 \cdot \text{EXP}(0,01831 \cdot t) \quad (39)$$
$$R^2 = 0,99987$$

- P3

$$T(t) = 203,21040 \cdot \text{EXP}(0,01168 \cdot t) \quad (40)$$
$$R^2 = 0,99964$$

- P4

$$T(t) = 202,83424 \cdot \text{EXP}(0,01127 \cdot t) \quad (41)$$
$$R^2 = 0,99962$$

Este procedimiento se repite para las otras probetas y se obtiene que la función que relaciona la temperatura y el tiempo, tiene la forma:

$$T(t) = A' \cdot \text{EXP}(B' \cdot t) \quad (42)$$

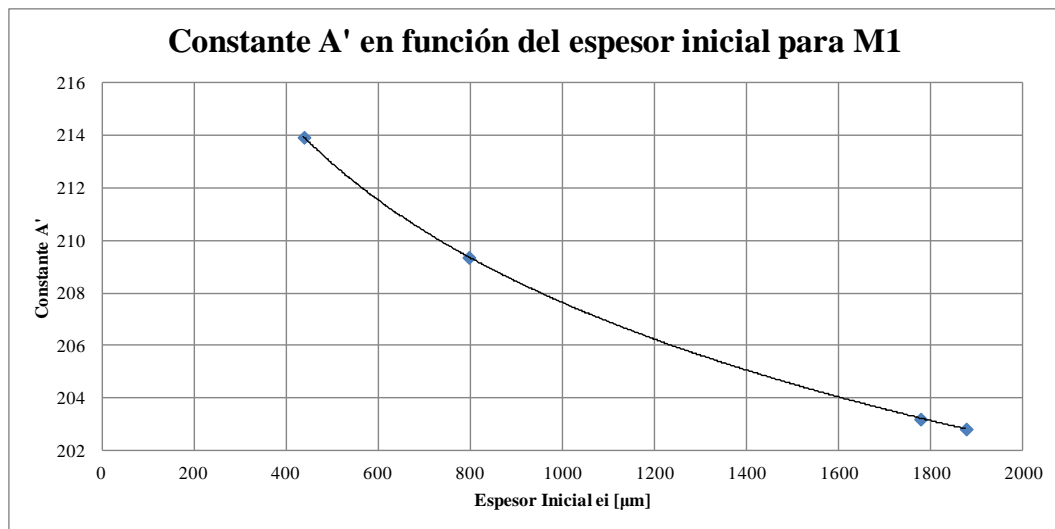
En la Tabla 5-12 se presentan las constantes de las funciones obtenidas con las regresiones.

**Tabla 5-12: Constantes de la función temperatura – tiempo para cada probeta.**

N° Probeta	M [m <sup>-1</sup> ]	ei [μm]	Constante A'	Constantes B'
1	107	438	213,95615	2,310 x10 <sup>-2</sup>
2	107	796	209,37677	1,831x10 <sup>-2</sup>
3	107	1777	203,21040	1,168x10 <sup>-2</sup>
4	107	1876	202,83424	1,126x10 <sup>-2</sup>
5	170	449	252,91955	2,057x10 <sup>-2</sup>
6	170	882	234,86234	1,633x10 <sup>-2</sup>
7	170	1239	225,45971	1,394x10 <sup>-2</sup>
8	170	1814	215,54811	1,127x10 <sup>-2</sup>
9	254	483	264,32672	2,122x10 <sup>-2</sup>
10	254	924	244,02628	1,731x10 <sup>-2</sup>
11	254	1182	235,89359	1,561x10 <sup>-2</sup>
12	254	1759	223,21104	1,279x10 <sup>-2</sup>
13	313	450	246,81347	2,588x10 <sup>-2</sup>
14	313	906	233,38721	2,112x10 <sup>-2</sup>
15	313	1181	227,69972	1,901x10 <sup>-2</sup>
16	313	1771	218,97400	1,564x10 <sup>-2</sup>

### 5.3.2 Constantes A' y B' como funciones del espesor inicial

Las siguientes regresiones se realizan entre el espesor inicial y las constantes A' y B' de la regresión anterior, para cada grupo de masividad.



**Figura 5-15: Constante A' en función del espesor inicial para M1.**

La función obtenida con la regresión es:

$$A' = -7,65759 \cdot LN(ei) + 260,52899$$

$$R^2 = 0,99999 \quad (43)$$

Esta función que relaciona la constante A' y la masividad, tiene la forma:

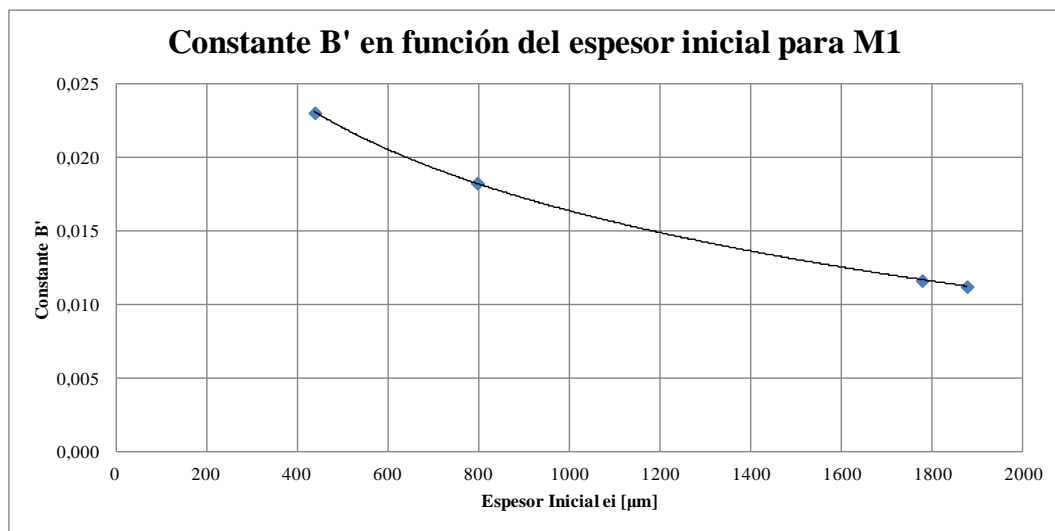
$$A'(ei) = C' \cdot LN(ei) + D' \quad (44)$$

Este procedimiento se repite para las otras masividades y se obtienen las constantes C' y D'.

**Tabla 5-13: Constantes de las funciones constante A' – espesor inicial para cada masividad.**

M [m <sup>-1</sup> ]	Constante C'	Constante D'
107	-7,65758	260,52899
170	-26,83398	416,77874
254	-31,82666	461,11980
313	-20,26495	370,89679

De igual manera para la constante B',



**Figura 5-16: Constante B' en función del espesor inicial para M1.**

La función obtenida con la regresión es:

$$B' = -8,159 \times 10^{-3} \cdot LN(ei) + 7,276 \times 10^{-2} \quad (45)$$

$$R^2 = 0,99995$$

Esta función que relaciona la constante A' y la masividad, tiene la forma:

$$B'(ei) = E' \cdot LN(ei) + F' \quad (46)$$

Este procedimiento se repite para las otras masividades y se obtienen las constantes E' y F'.

**Tabla 5-14: Constantes de las funciones constante B' – espesor inicial para cada masividad.**

M [m <sup>-1</sup> ]	Constante E'	Constante F'
107	-8,159x10 <sup>-3</sup>	7,276x10 <sup>-2</sup>
170	-6,651x10 <sup>-3</sup>	6,128x10 <sup>-2</sup>
254	-6,498x10 <sup>-3</sup>	6,150x10 <sup>-2</sup>
313	-7,432x10 <sup>-3</sup>	7,146x10 <sup>-2</sup>

### 5.3.3 Constantes C', D', E' y F' como funciones de la masividad

Las siguientes regresiones se realizan entre la masividad y las constantes C', D', E' y F' de las regresiones anteriores, por separado.

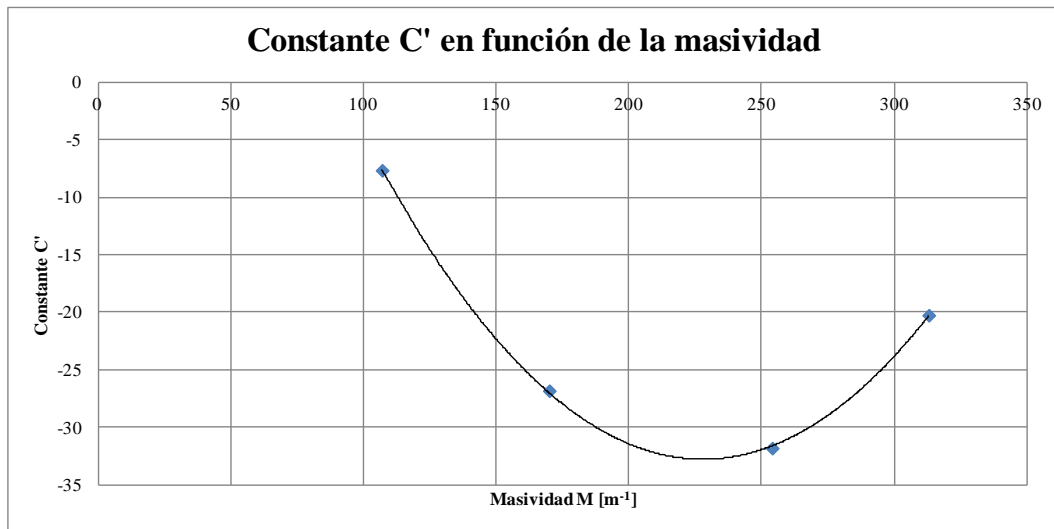


Figura 5-17: Constante C' en función de la masividad.

La función obtenida con la regresión es:

$$C' = 1,724 \times 10^{-3} \cdot M^2 - 7,858 \times 10^{-1} \cdot M + 56,76550$$
$$R^2 = 0,99976 \quad (47)$$

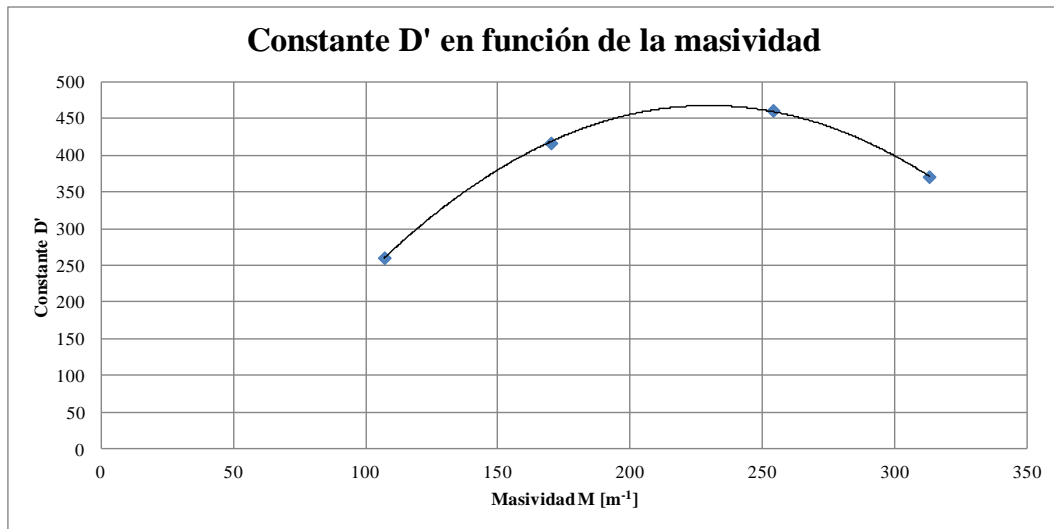


Figura 5-18: Constante D' en función de la masividad.

La función obtenida con la regresión es:

$$D' = -1,381 \times 10^{-2} \cdot M^2 + 6,34236 \cdot M - 260,66574$$
$$R^2 = 0,99970 \quad (48)$$

Estas funciones que relacionan las constantes C' y D' y la masividad, tienen la forma:

$$\begin{aligned} C'(M) &= C'2 \cdot M^2 + C'1 \cdot M + C'0 \\ D'(M) &= D'2 \cdot M^2 + D'1 \cdot M + D'0 \end{aligned} \quad (49)$$

**Tabla 5-15: Constantes de las funciones constante C' y D' – masividad.**

Constante	Valor	Constante	Valor
C'2	1,724x10 <sup>-3</sup>	D'2	-1,381x10 <sup>-2</sup>
C'1	-7,858x10 <sup>-1</sup>	D'1	6,34236
C'0	56,76550	D'0	-260,66574

Este procedimiento se repite para las constantes E' y F'. Las funciones que relacionan estas constantes con la masividad, tienen la forma

$$\begin{aligned} E'(M) &= E'2 \cdot M^2 + E'1 \cdot M + E'0 \\ F'(M) &= F'2 \cdot M^2 + F'1 \cdot M + F'0 \end{aligned} \quad (50)$$

**Tabla 5-16: Constantes de las funciones constante E' y F' – masividad**

Constante	Valor	Constante	Valor
E'2	-1,375x10 <sup>-7</sup>	F'2	1,212x10 <sup>-6</sup>
E'1	6,112x10 <sup>-5</sup>	F'1	-5,146x10 <sup>-4</sup>
E'0	-1,311x10 <sup>-2</sup>	F'0	1,139x10 <sup>-1</sup>

#### 5.3.4 Temperatura como función del tiempo, del espesor inicial y de la masividad

Finalmente, todas las regresiones realizadas permiten obtener una función para determinar la temperatura  $T$  de la sección transversal de un perfil de acero de masividad  $M$ , protegido con un espesor inicial  $ei$  de PI, en cualquier tiempo  $t$ .

$$T = f(t, ei, M) \quad (51)$$

En la Tabla 5-17 se presenta la función de la ecuación (51) y las sub-funciones. En la Tabla 5-15 y Tabla 5-16 se encuentran los valores de las constantes de la función general.

**Tabla 5-17: Funciones entre la temperatura, el espesor inicial, la masividad y el tiempo.**

Función	Variable	Tipo de Función	Expresión
$T$	$t$	Exponencial	$T = A' \cdot EXP(B' \cdot t)$
$A'$	$ei$	Logarítmica	$A' = C' \cdot LN(ei) + D'$
$B'$	$ei$	Logarítmica	$B = E' \cdot LN(ei) + F'$
$C'$	$M$	Cuadrática	$C' = C'2 \cdot M^2 + C'1 \cdot M + C'0$
$D'$	$M$	Cuadrática	$D' = D'2 \cdot M^2 + D'1 \cdot M + D'0$
$E'$	$M$	Cuadrática	$E' = E'2 \cdot M^2 + E'1 \cdot M + E'0$
$F'$	$M$	Cuadrática	$F' = F'2 \cdot M^2 + F'1 \cdot M + F'0$



## 5.4 Temperaturas según Regresiones Numéricas

Dado los datos utilizados en el desarrollo del modelo, la función es válida solo para masividades entre 107 y 313 [m<sup>-1</sup>], temperaturas sobre 300 [°C] y espesores iniciales de PI entre 400 y 2000 [μm].

Con esta función se calculan las temperaturas y se obtienen las curvas tiempo – temperatura de las 16 probetas, que se comparan más adelante en el punto 8. La Tabla 5-18 muestra las temperaturas cada un minuto durante el ensayo y las calculadas con el modelo para los perfiles M1. Las temperaturas de los otros perfiles se presentan en el Anexo B.

**Tabla 5-18: Temperaturas del perfil según ensayos y modelo 1, probetas P1, P2, P3 y P4.**

t [min]	P1		P2		P3		P4		t [min]	P1		P2		P3		P4	
	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]		TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]
0	49	214	53	209	40	203	46	203	51	-	-	489	532	441	370	340	361
1	59	219	62	213	50	206	51	205	52	-	-	497	542	450	375	343	365
2	76	224	82	217	72	208	66	207	53	-	-	504	552	458	379	344	369
3	92	229	101	221	80	210	80	210	54	-	-	515	562	464	383	350	374
4	112	234	124	225	97	213	96	212	55	-	-	526	573	470	388	350	378
5	131	240	136	229	114	215	112	215	56	-	-	531	583	478	393	353	382
6	157	246	158	233	122	218	124	217	57	-	-	535	594	486	397	357	387
7	178	251	180	238	131	221	134	219	58	-	-	543	605	492	402	360	391
8	205	257	202	242	141	223	145	222	59	-	-	555	616	500	407	363	395
9	229	263	211	247	151	226	156	224	60	-	-	564	627	507	411	366	400
10	251	269	225	251	161	228	165	227	61	-	-	-	-	514	416	373	404
11	265	276	238	256	169	231	174	230	62	-	-	-	-	522	421	377	409
12	285	282	250	261	179	234	184	232	63	-	-	-	-	527	426	381	414
13	298	289	256	265	190	237	194	235	64	-	-	-	-	535	431	382	418
14	310	296	261	270	195	239	202	238	65	-	-	-	-	542	436	384	423
15	316	303	267	275	201	242	207	240	66	-	-	-	-	550	442	390	428
16	326	310	274	280	211	245	214	243	67	-	-	-	-	557	447	394	433
17	334	317	278	286	220	248	220	246	68	-	-	-	-	557	452	397	438
18	341	324	281	291	227	251	225	249	69	-	-	-	-	573	457	401	443
19	347	332	287	296	232	254	229	251	70	-	-	-	-	579	463	405	448
20	356	340	291	302	240	257	235	254	71	-	-	-	-	587	468	410	453
21	365	348	294	307	246	260	240	257	72	-	-	-	-	595	474	413	458
22	375	356	299	313	251	263	244	260	73	-	-	-	-	601	480	415	463
23	382	364	303	319	257	266	248	263	74	-	-	-	-	606	485	419	469
24	391	373	308	325	265	269	252	266	75	-	-	-	-	613	491	423	474
25	402	381	315	331	271	273	257	269	76	-	-	-	-	620	497	430	479
26	412	390	317	337	277	276	261	272	77	-	-	-	-	627	503	433	485
27	421	400	324	343	282	279	264	275	78	-	-	-	-	631	509	435	490
28	432	409	332	349	290	282	268	278	79	-	-	-	-	639	515	439	496
29	443	418	335	356	296	286	273	282	80	-	-	-	-	646	521	444	502
30	455	428	340	362	301	289	276	285	81	-	-	-	-	653	527	446	507
31	463	438	348	369	308	293	280	288	82	-	-	-	-	657	533	453	513
32	475	449	353	376	314	296	284	291	83	-	-	-	-	664	539	454	519
33	487	459	359	383	319	299	287	295	84	-	-	-	-	671	546	460	525
34	501	470	366	390	326	303	290	298	85	-	-	-	-	677	552	463	531
35	510	481	373	397	331	307	293	301	86	-	-	-	-	681	559	469	537
36	521	492	380	404	338	310	296	305	87	-	-	-	-	688	565	474	543
37	534	504	387	412	344	314	301	308	88	-	-	-	-	694	572	478	549
38	547	516	392	419	352	318	303	312	89	-	-	-	-	692	579	479	555
39	556	528	401	427	359	321	306	315	90	-	-	-	-	-	-	482	562
40	-	-	407	435	367	325	309	319	91	-	-	-	-	-	-	486	568
41	-	-	413	443	374	329	311	322	92	-	-	-	-	-	-	492	575
42	-	-	423	451	381	333	314	326	93	-	-	-	-	-	-	495	581
43	-	-	429	460	387	337	318	330	94	-	-	-	-	-	-	498	588
44	-	-	437	468	395	341	322	334	95	-	-	-	-	-	-	503	594
45	-	-	442	477	403	345	325	337	96	-	-	-	-	-	-	510	601
46	-	-	453	486	409	349	325	341	97	-	-	-	-	-	-	512	608
47	-	-	461	495	415	353	329	345	98	-	-	-	-	-	-	518	615
48	-	-	469	504	422	357	331	349	99	-	-	-	-	-	-	523	622
49	-	-	472	513	429	362	334	353	100	-	-	-	-	-	-	521	629
50	-	-	481	522	435	366	337	357									

## 6 MODELO 2: EUROCÓDIGO 3 PARTE 1.2

### 6.1 Introducción

El segundo modelo desarrollado consiste en un modelo basado en la fórmula (4.22) del Eurocódigo 3 [6], la que permite determinar el aumento de la temperatura de la sección transversal de un elemento de acero protegido, durante un intervalo de tiempo. Esta fórmula considera la geometría del perfil de acero, el espesor del material de protección, la conductividad térmica y calor específico de ambos materiales, sus densidades y la temperatura del incendio.

Para el desarrollo del modelo se define un intervalo de tiempo, con el que se determina el aumento de temperatura respecto de la temperatura inicial del perfil. Este procedimiento se repite para el siguiente intervalo de tiempo, considerando como temperatura inicial la temperatura final del intervalo anterior. Con esta serie de cálculos para cada intervalo, se obtiene la temperatura cada cierto tiempo, con la que se determina la curva tiempo-temperatura para cada perfil.

El paso previo del modelo es determinar el parámetro faltante, el cual es la conductividad térmica de la PI. Para esto se reordena la fórmula del Eurocódigo, se utilizan los resultados de los ensayos y se obtiene la conductividad térmica en cada intervalo de tiempo. Esto permite obtener la conductividad térmica de la PI en función de la temperatura.

### 6.2 Fórmula (4.22) del Eurocódigo 3 Parte 1.2

El Eurocódigo 3 Parte 1.2 [6], en su página 31, presenta una fórmula para determinar el aumento de temperatura  $\Delta T_{a,t}$  de un perfil de acero protegido con algún material aislante, expuesto a un incendio durante un intervalo de tiempo  $\Delta t$ . Dicha fórmula es:

$$\Delta T_{a,t} = \frac{k_p \cdot M_a}{e_p \cdot C p_a \cdot \rho_a} \cdot \frac{(T_{f,t} - T_{a,t})}{(1 + \Phi/3)} \cdot \Delta t - (exp^{\Phi/10} - 1) \cdot \Delta T_{f,t} \quad (52)$$

Con

$$\Phi = \frac{C p_p \cdot \rho_p}{C p_a \cdot \rho_a} \cdot e_p \cdot M_a \quad (53)$$

Dónde:

$M_a$  : Masividad del perfil de acero protegido [ $m^{-1}$ ]

$C p_a$  : Calor específico del acero [J/kgK]

$C p_p$  : Calor específico del material de protección [J/kgK]

$e_p$  : Espesor del material de protección [m]

$\Delta t$  : Intervalo de tiempo [s]

$T_{a,t}$  : Temperatura del acero en el instante t [°C]

$T_{f,t}$  : Temperatura del incendio en el instante t [°C]

$\Delta T_{f,t}$  : Aumento de temperatura del incendio durante el intervalo de tiempo  $\Delta t$

$k_p$  : Conductividad térmica del material de protección [W/mK]

$\rho_a$  : Densidad del acero [Kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_p$  : Densidad del material de protección [Kg/m<sup>3</sup>]

Esta fórmula solo es válida para aumentos de temperatura del acero, es decir,  $\Delta T_{a,t} \geq 0$ . Además, el intervalo de análisis debe ser menor a 30 [s].

### 6.3 Determinación de la Conductividad Térmica de la PI

#### 6.3.1 Metodología

La conductividad térmica del material de protección, que en este caso es pintura intumescente, es un dato necesario para determinar la variación de temperatura del acero. Dado lo anterior y como no se posee esta información, es necesario calcularla mediante algún procedimiento teórico. Este procedimiento consiste despejar la conductividad desde la fórmula (52) y determinarla utilizando los datos y resultados de los ensayos.

Al despejar la conductividad desde la fórmula (52), se obtiene la siguiente expresión:

$$k_{PI} = \frac{(\Delta T_{a,t} + (\exp^{\Phi/10} - 1) \cdot \Delta T_{f,t}) \cdot (e_{PI} \cdot Cp_a \cdot \rho_a) \cdot (1 + \Phi/3)}{M_a \cdot (T_{f,t} - T_{a,t}) \cdot \Delta t} \quad (54)$$

Con esta nueva fórmula se determina la conductividad térmica de la PI para cada probeta, como función de la temperatura promedio entre el horno y el perfil. Todos estos valores son agrupados para obtener una conductividad promedio que permita cumplir con el objetivo del modelo.

Para el cálculo de las conductividades térmicas de la PI de cada probeta, se considera que:

- El espesor de protección  $e_{PI}$  es el espesor final estimado de la PI para cada probeta, según la Tabla 4-3.
- El intervalo de tiempo  $\Delta t$  es 10 [s].
- Las temperaturas del horno y de la probeta para cada intervalo de tiempo, se obtiene mediante interpolación lineal de los resultados de los ensayos presentados en el Anexo A.
- La conductividad térmica de la PI depende de su temperatura, pero como esta no se conoce, se considera dependiente de la temperatura promedio entre el horno y la probeta.

Es importante mencionar que para el cálculo de la conductividad térmica se considera un espesor fijo de PI, lo que no es representativo de la realidad, ya que el espesor real varía aumentado cerca de 50 veces su tamaño. Por esta razón, la conductividad determinada se denomina “Conductividad Térmica Relativa”.

#### 6.3.2 Conductividades térmicas relativas de la PI para cada perfil

Con la fórmula (54) y sus consideraciones se procede a calcular las conductividades térmicas para cada perfil. De estos resultados se descartan los valores negativos, ya que significan variaciones negativas de la temperatura del horno, lo que se explica por posibles problemas en la medición al inicio de los ensayos; los valores nulos, como consecuencia de que posiblemente no se registraron variaciones sensibles en la temperatura del horno o de la probeta; y valores muy altos, que pueden significar posibles errores en las mediciones de las temperaturas por problemas en las termocuplas de los perfiles, ya que en algunas ocasiones de despegan y toman lectura de la temperatura del horno, la que es muy superior.

En la Tabla 6-1 se presentan las conductividades térmicas relativas  $k$  de la PI y la temperatura promedio horno-perfil  $T_p$  para la probeta P1. Las otras conductividades se presentan en el Anexo C. Posteriormente, se muestran los gráficos de las conductividades de todas las probetas.

**Tabla 6-1: Conductividad térmica relativa de la PI para P1.**

<b>t [s]</b>	<b>T<sub>p</sub> [°C]</b>	<b>k PI [W/m°C]</b>	<b>t [s]</b>	<b>T<sub>p</sub> [°C]</b>	<b>k PI [W/m°C]</b>	<b>t [s]</b>	<b>T<sub>p</sub> [°C]</b>	<b>k PI [W/m°C]</b>	<b>t [s]</b>	<b>T<sub>p</sub> [°C]</b>	<b>k PI [W/m°C]</b>
0	48	-102,097	600	406	0,703	1200	549	0,384	1800	639	0,371
10	62	5,898	610	409	0,701	1210	551	0,384	1810	640	0,372
20	76	2,874	620	412	0,700	1220	553	0,384	1820	641	0,373
30	90	1,903	630	415	0,699	1230	555	0,384	1830	643	0,373
40	105	1,425	640	418	0,697	1240	556	0,384	1840	644	0,374
50	119	1,139	650	421	0,696	1250	558	0,384	1850	645	0,375
60	133	1,458	660	424	0,927	1260	560	0,379	1860	646	0,584
70	143	1,335	670	431	0,907	1270	561	0,380	1870	647	0,587
80	153	1,232	680	438	0,888	1280	563	0,380	1880	649	0,590
90	163	1,145	690	445	0,869	1290	564	0,381	1890	650	0,593
100	173	1,069	700	452	0,852	1300	565	0,382	1900	652	0,596
110	183	1,002	710	459	0,835	1310	566	0,383	1910	654	0,599
120	192	0,907	720	466	0,581	1320	568	0,310	1920	655	0,611
130	199	0,881	730	470	0,578	1330	569	0,311	1930	657	0,614
140	205	0,857	740	473	0,575	1340	570	0,311	1940	658	0,617
150	212	0,833	750	477	0,573	1350	571	0,312	1950	660	0,621
160	218	0,812	760	480	0,570	1360	572	0,312	1960	661	0,624
170	225	0,792	770	483	0,567	1370	573	0,313	1970	663	0,627
180	231	0,937	780	487	0,455	1380	574	0,368	1980	664	0,676
190	235	0,937	790	490	0,453	1390	576	0,368	1990	666	0,681
200	239	0,936	800	493	0,452	1400	577	0,369	2000	667	0,686
210	243	0,936	810	495	0,450	1410	579	0,369	2010	668	0,691
220	247	0,936	820	498	0,448	1420	580	0,369	2020	670	0,696
230	251	0,935	830	501	0,446	1430	582	0,369	2030	671	0,702
240	254	0,905	840	504	0,273	1440	583	0,467	2040	672	0,475
250	258	0,908	850	506	0,272	1450	585	0,468	2050	674	0,475
260	261	0,912	860	508	0,271	1460	587	0,469	2060	676	0,476
270	264	0,915	870	510	0,270	1470	588	0,471	2070	677	0,476
280	267	0,918	880	512	0,269	1480	590	0,472	2080	679	0,477
290	270	0,921	890	513	0,269	1490	591	0,473	2090	680	0,478
300	273	1,243	900	515	0,369	1500	593	0,458	2100	682	0,594
310	281	1,218	910	517	0,369	1510	594	0,459	2110	683	0,596
320	289	1,193	920	519	0,369	1520	596	0,461	2120	685	0,598
330	297	1,169	930	520	0,370	1530	597	0,462	2130	686	0,600
340	304	1,146	940	522	0,370	1540	598	0,464	2140	688	0,603
350	312	1,125	950	523	0,370	1550	600	0,465	2150	689	0,605
360	320	0,912	960	525	0,326	1560	601	0,371	2160	691	0,736
370	324	0,912	970	525	0,328	1570	602	0,371	2170	692	0,741
380	328	0,914	980	525	0,331	1580	604	0,372	2180	694	0,747
390	331	0,915	990	525	0,333	1590	605	0,373	2190	695	0,753
400	335	0,916	1000	525	0,336	1600	606	0,374	2200	697	0,758
410	339	0,917	1010	525	0,339	1610	607	0,374	2210	698	0,764
420	343	1,144	1020	525	0,283	1620	609	0,512	2220	700	0,709
430	347	1,152	1030	527	0,283	1630	610	0,512	2230	701	0,712
440	350	1,16	1040	528	0,283	1640	612	0,514	2240	703	0,715
450	354	1,167	1050	530	0,283	1650	614	0,515	2250	705	0,718
460	358	1,175	1060	531	0,282	1660	616	0,516	2260	707	0,722
470	362	1,182	1070	532	0,282	1670	617	0,518	2270	709	0,725
480	366	1,082	1080	534	0,241	1680	619	0,496	2280	710	0,527
490	369	1,089	1090	535	0,240	1690	621	0,498	2290	711	0,529
500	373	1,095	1100	536	0,240	1700	622	0,499	2300	712	0,532
510	376	1,101	1110	538	0,240	1710	624	0,500	2310	714	0,534
520	380	1,107	1120	539	0,239	1720	625	0,502	2320	715	0,537
530	383	1,113	1130	540	0,239	1730	627	0,503	2330	716	0,539
540	387	1,022	1140	542	0,379	1740	629	0,558	2340	717	0,862
550	390	1,027	1150	543	0,380	1750	630	0,560	2350	720	0,861
560	393	1,033	1160	544	0,381	1760	632	0,561	2360	723	0,298
570	396	1,039	1170	545	0,382	1770	634	0,563			
580	400	1,044	1180	547	0,383	1780	636	0,565			
590	403	1,051	1190	548	0,384	1790	637	0,567			

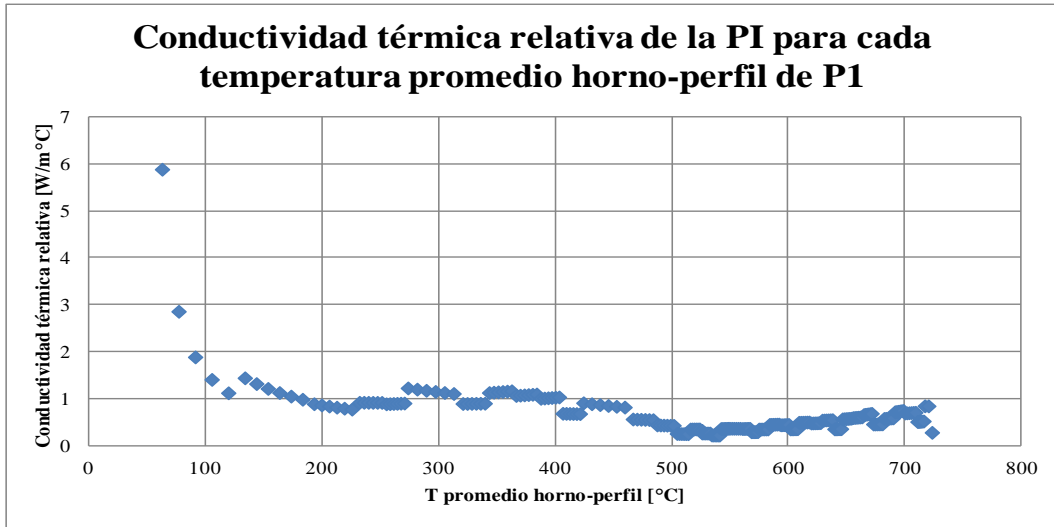


Figura 6-1: Conductividad térmica relativa de la PI para P1.

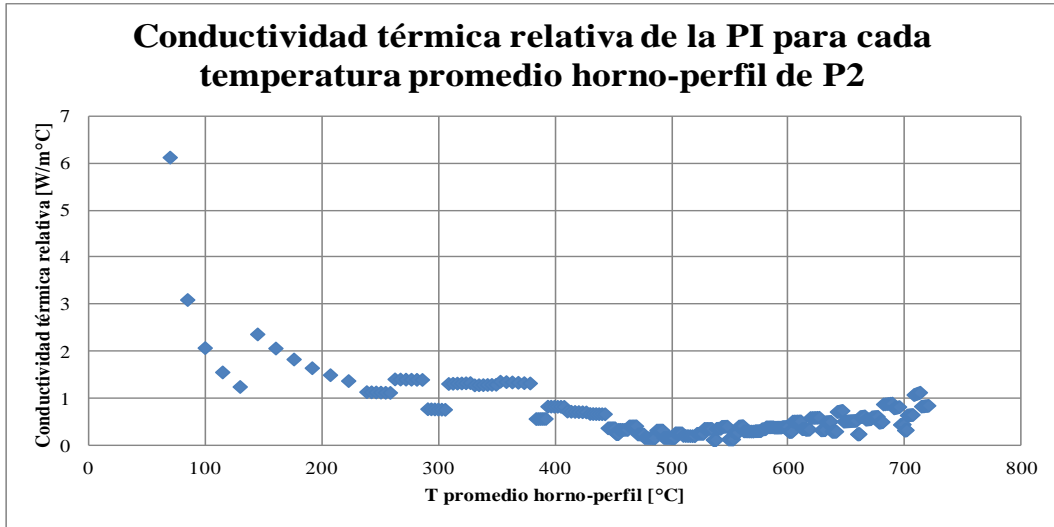


Figura 6-2: Conductividad térmica relativa de la PI para P2.

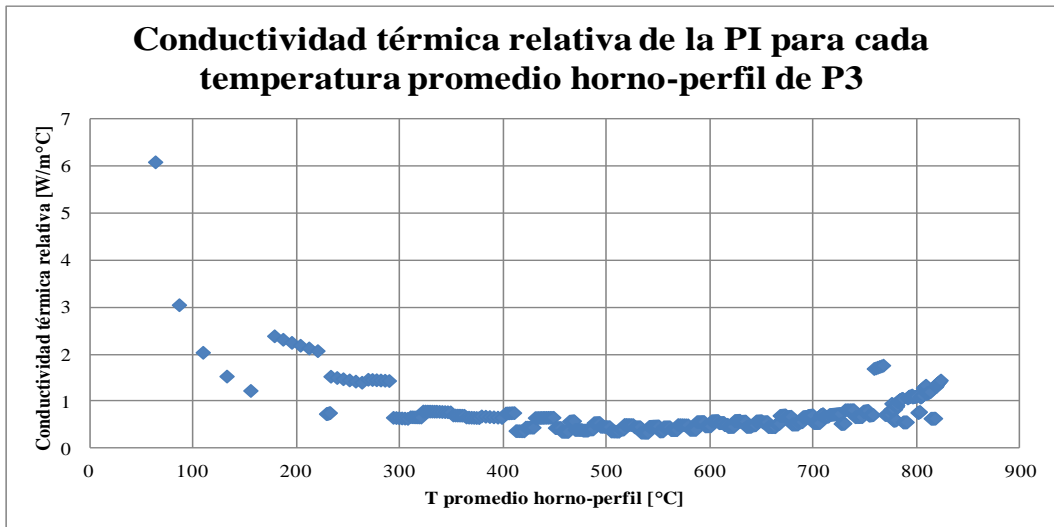


Figura 6-3: Conductividad térmica relativa de la PI para P3.

### Conductividad térmica relativa de la PI para cada temperatura promedio horno-perfil de P4

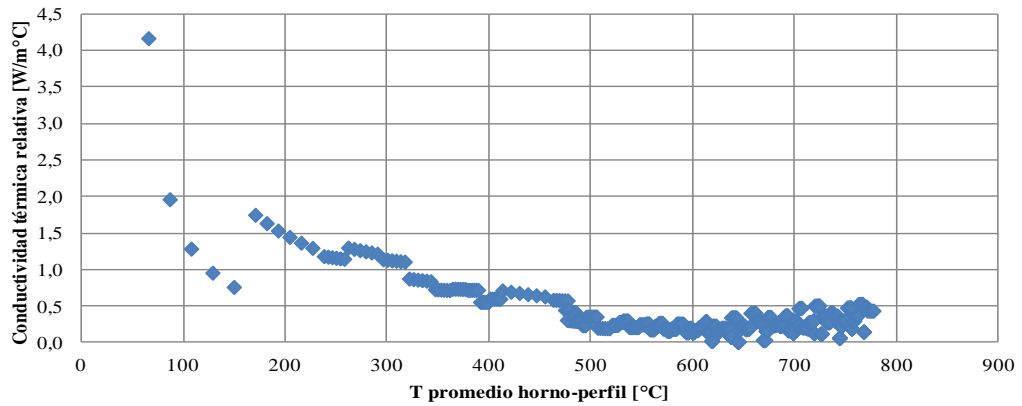


Figura 6-4: Conductividad térmica relativa de la PI para P4.

### Conductividad térmica relativa de la PI para cada temperatura promedio horno-perfil de P5

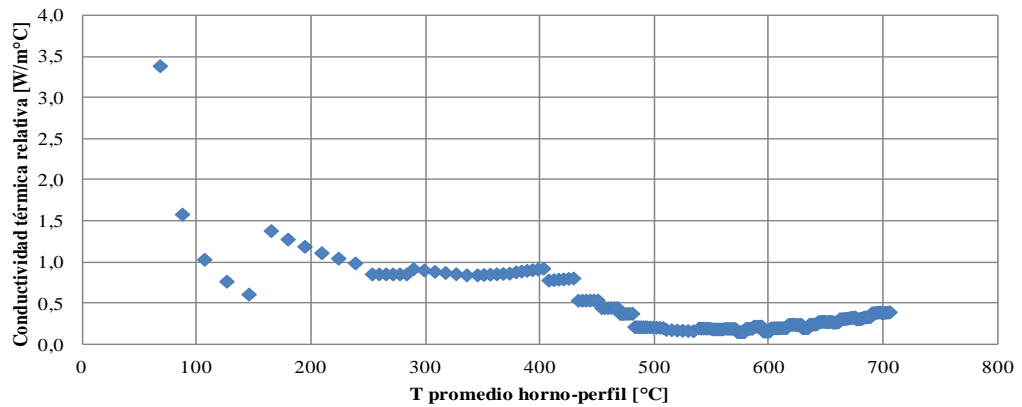


Figura 6-5: Conductividad térmica relativa de la PI para P5.

### Conductividad térmica relativa de la PI para cada temperatura promedio horno-perfil de P6

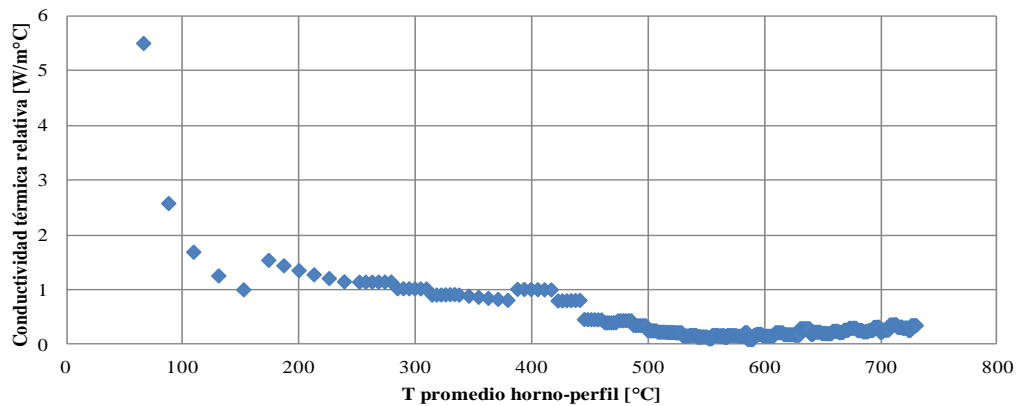


Figura 6-6: Conductividad térmica relativa de la PI para P6.

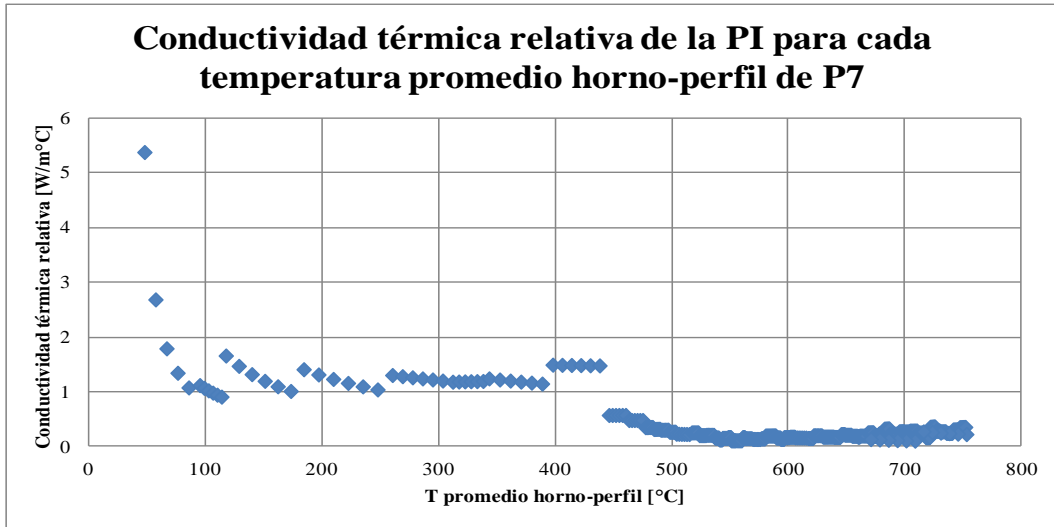


Figura 6-7: Conductividad térmica relativa de la PI para P7.

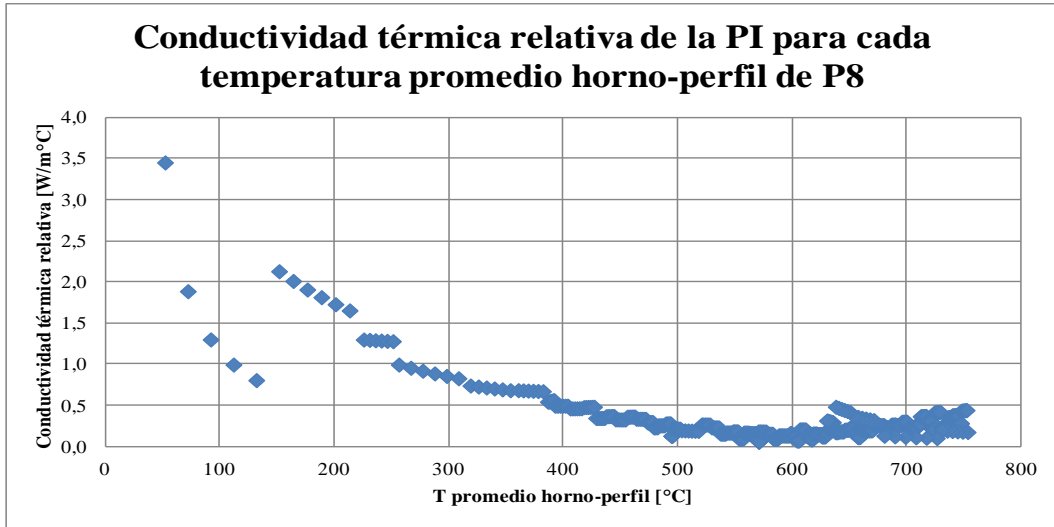


Figura 6-8: Conductividad térmica relativa de la PI para P8.

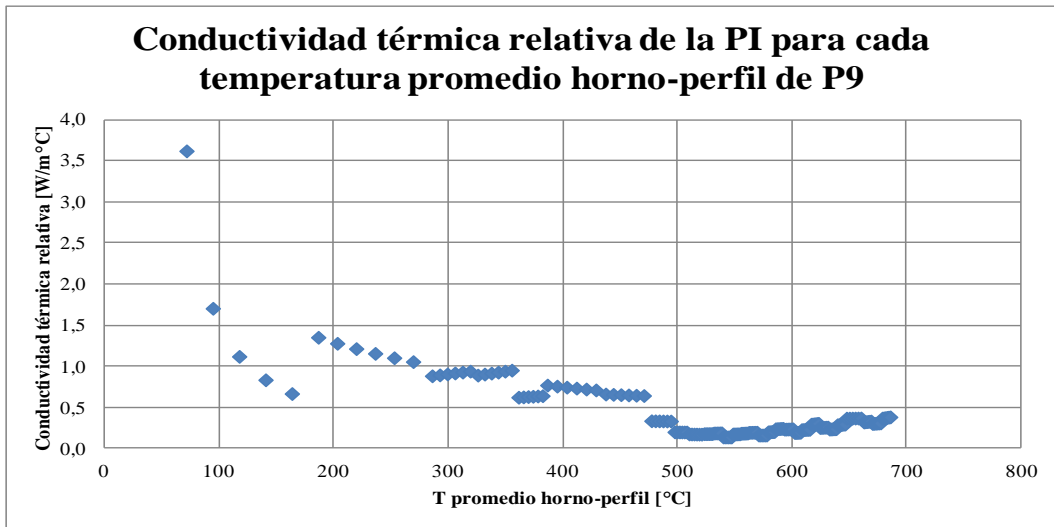


Figura 6-9: Conductividad térmica relativa de la PI para P9.

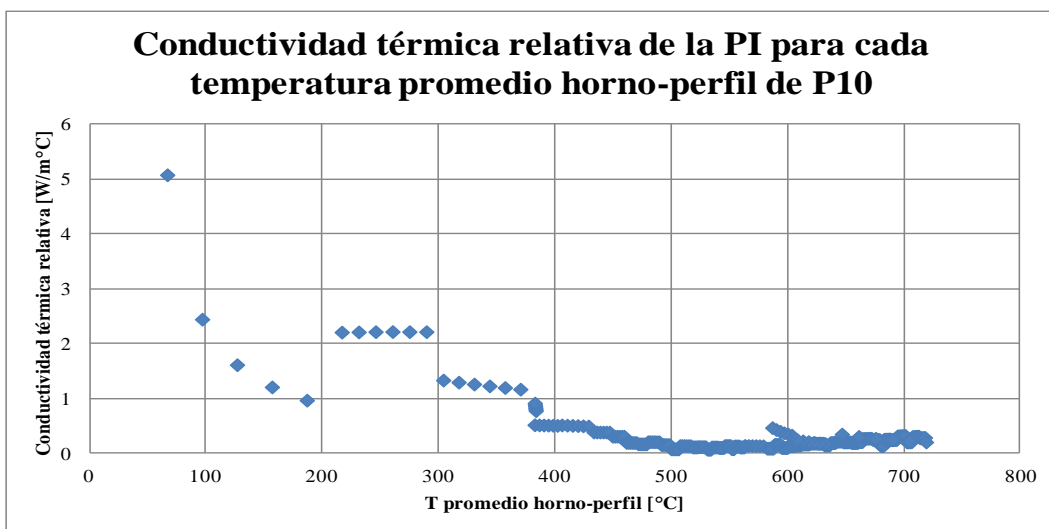


Figura 6-10: Conductividad térmica relativa de la PI para P10.

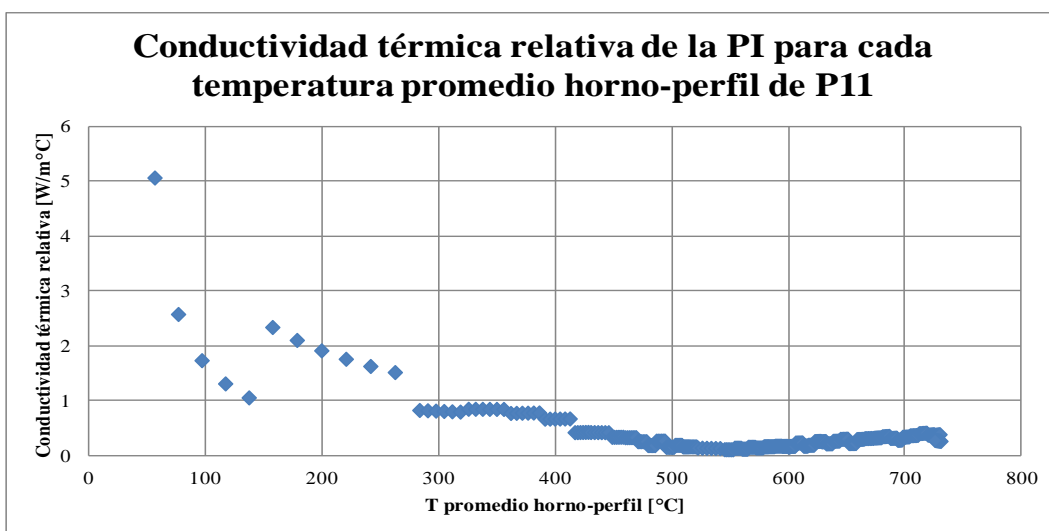


Figura 6-11: Conductividad térmica relativa de la PI para P11.

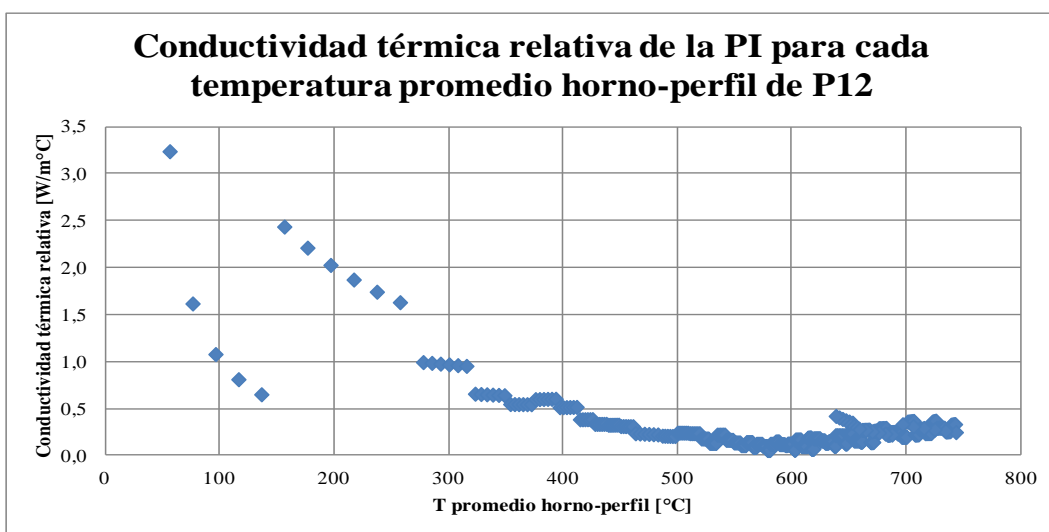


Figura 6-12: Conductividad térmica relativa de la PI para P12.



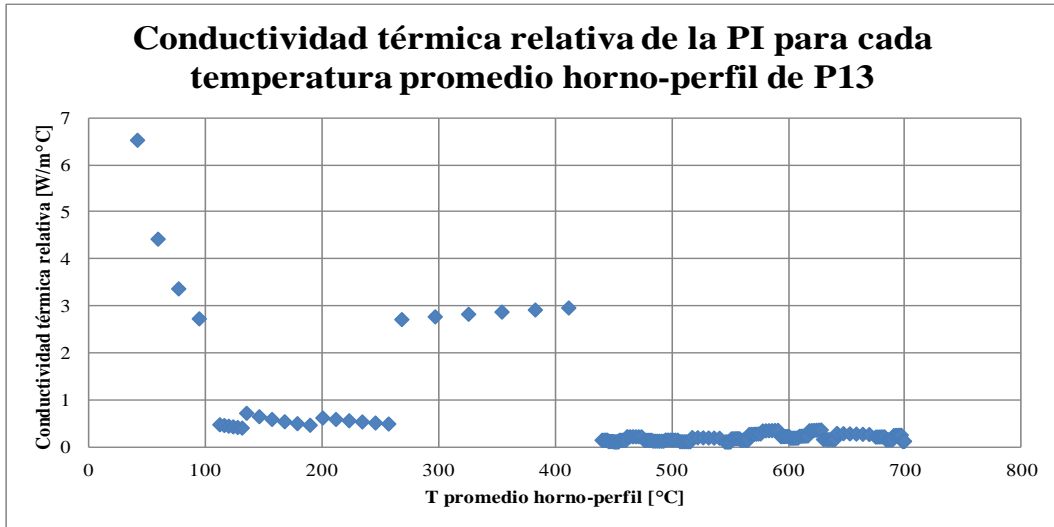


Figura 6-13: Conductividad térmica relativa de la PI para P13.

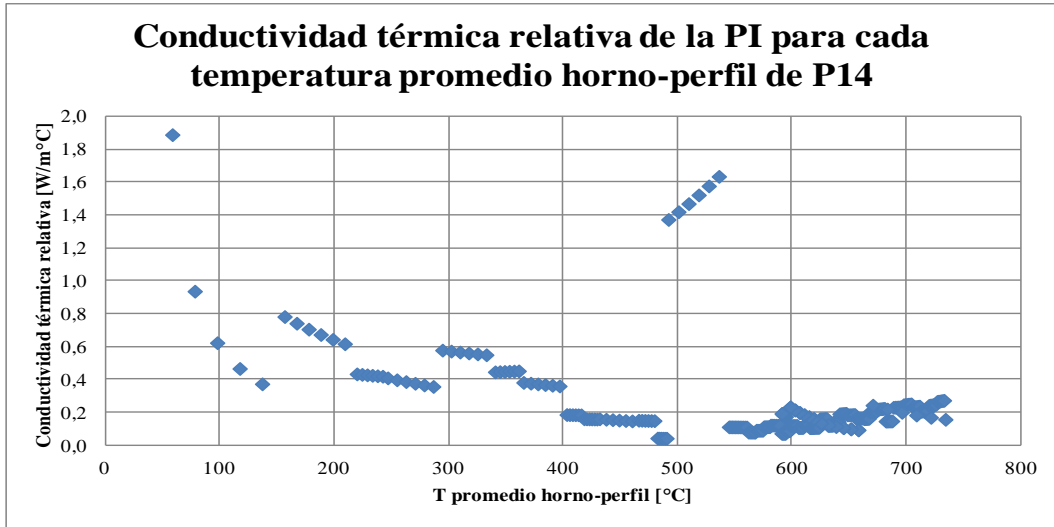


Figura 6-14: Conductividad térmica relativa de la PI para P14.

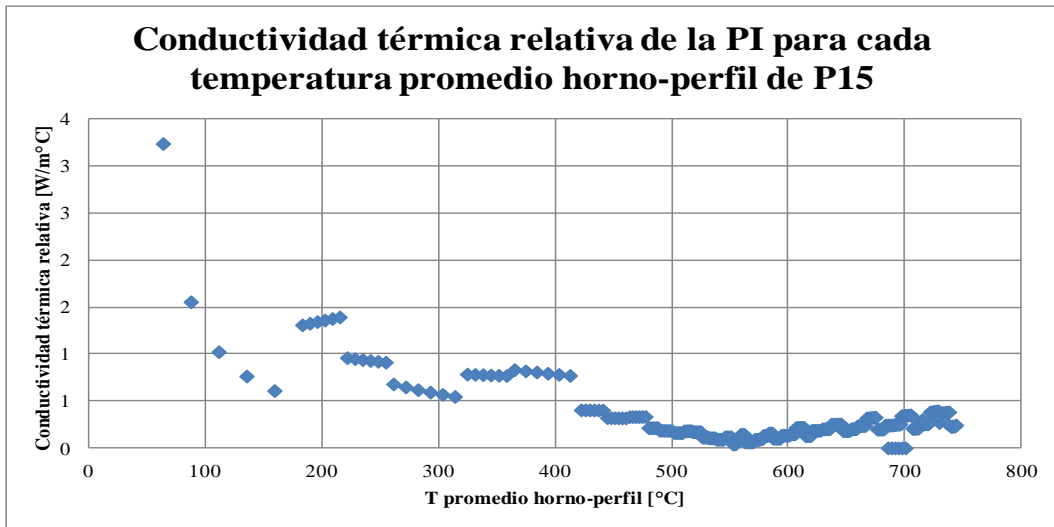


Figura 6-15: Conductividad térmica relativa de la PI para P15.

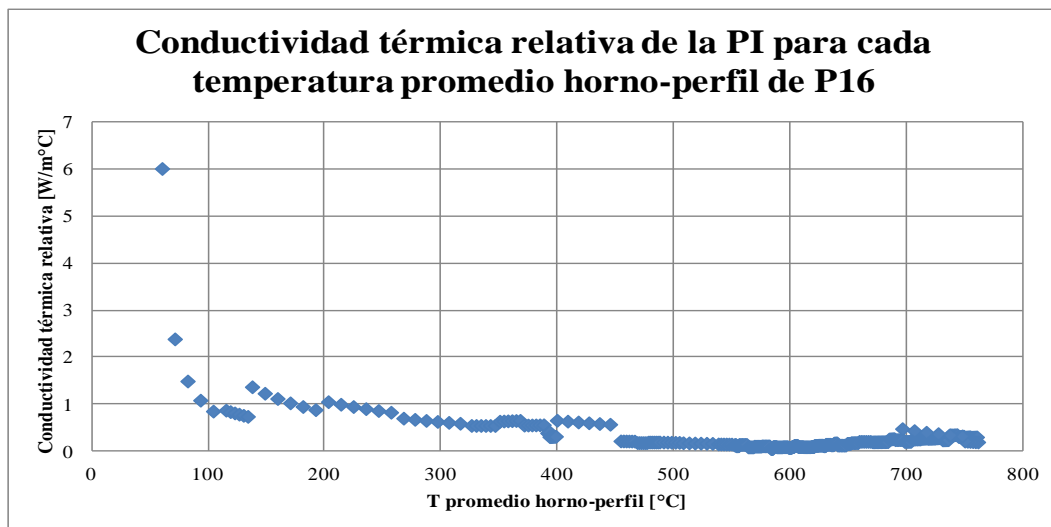


Figura 6-16: Conductividad térmica relativa de la PI para P16.

### 6.3.3 Promedio de conductividades térmicas relativas de la PI

Una vez calculadas todas las conductividades térmicas relativas con su respectiva temperatura asociada, es necesario determinar un promedio de estas mismas. Para esto, se agrupan las conductividades y se redondean sus temperaturas hasta la decena más cercana. Con esto se obtienen varias conductividades para una temperatura, las que se promedian. Todo este procedimiento entrega una conductividad térmica relativa cada 10 °C. En la Figura 6-17 se muestran todas las conductividades calculadas y su promedio.

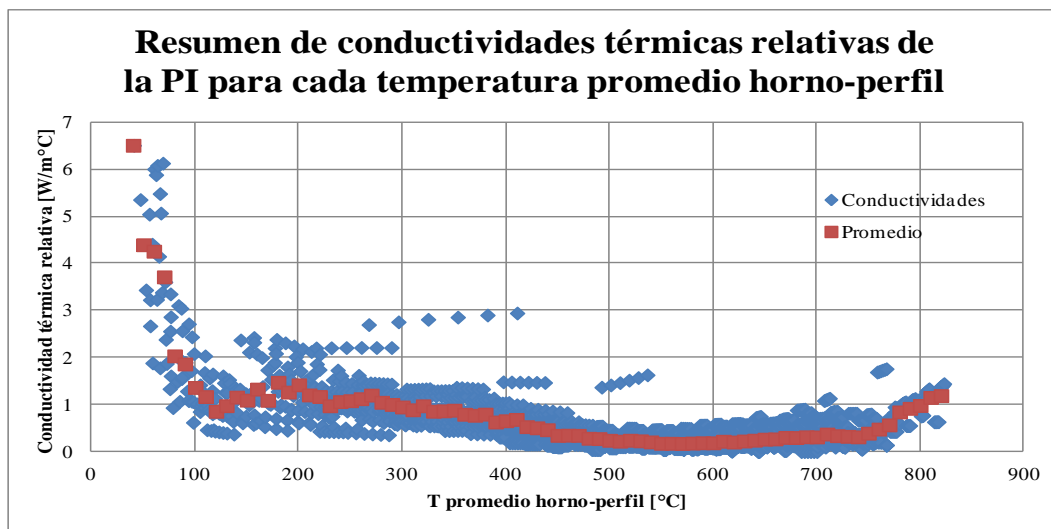


Figura 6-17: Conductividades térmicas relativas y su promedio cada 10 °C.

Con este promedio es posible obtener una función, a partir de regresiones numericas, con la que se puede determinar la conductividad termica relativa dependiendo de la temperatura promedio horno – perfil.

Del analisis se obtiene que dividiendo las conductividades en tres tramos, es posible realizar regresiones con un mejor ajuste tal como se muestra en la Figura 6-18.

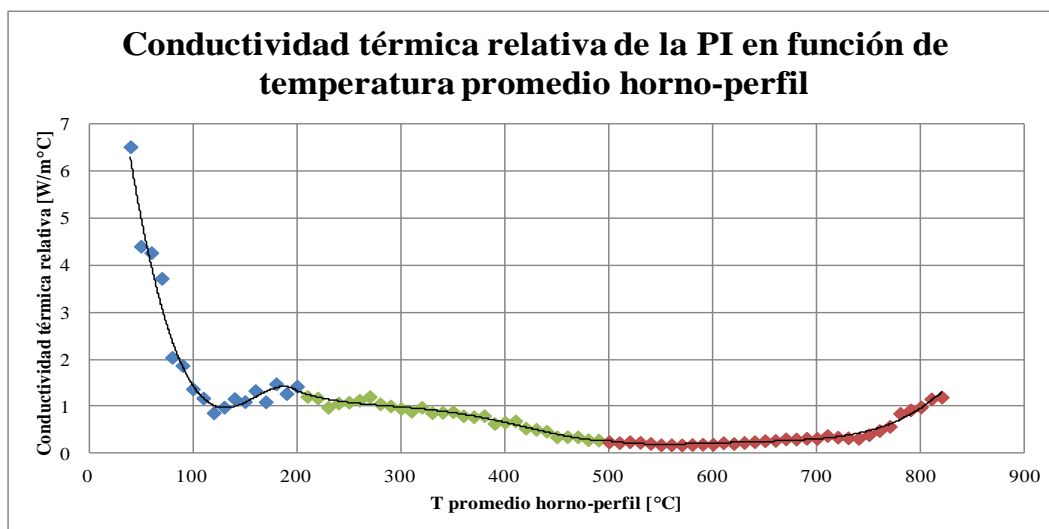


Figura 6-18: Regresiones sobre el promedio de las conductividades térmicas relativas.

Los tramos considerados son de 20 °C a 199 °C, de 200 °C a 499 °C y de 500 °C a 1000 °C. Las funciones que logran el mejor ajuste para cada tramo son polinomios de grado 4.

#### 6.3.4 Validación de la conductividad térmica relativa de la PI

Con estas funciones que determinan la conductividad térmica de la PI, es posible utilizar la formula (54) para determinar el aumento de la temperatura del perfil en un intervalo de tiempo, lo realizado de manera consecutiva permite obtener las temperaturas del perfil durante el tiempo que duró cada ensayo, lo que a su vez entrega la curva tiempo-temperatura.

A continuación se presentan las curvas determinadas por el modelo y las entregadas por el ensayo para cada perfil, con el objetivo de analizar la desviación de la temperatura entre ambas curvas y discutir la posibilidad de calcular nuevamente la conductividad térmica relativa de la PI, descartando algunas probetas.

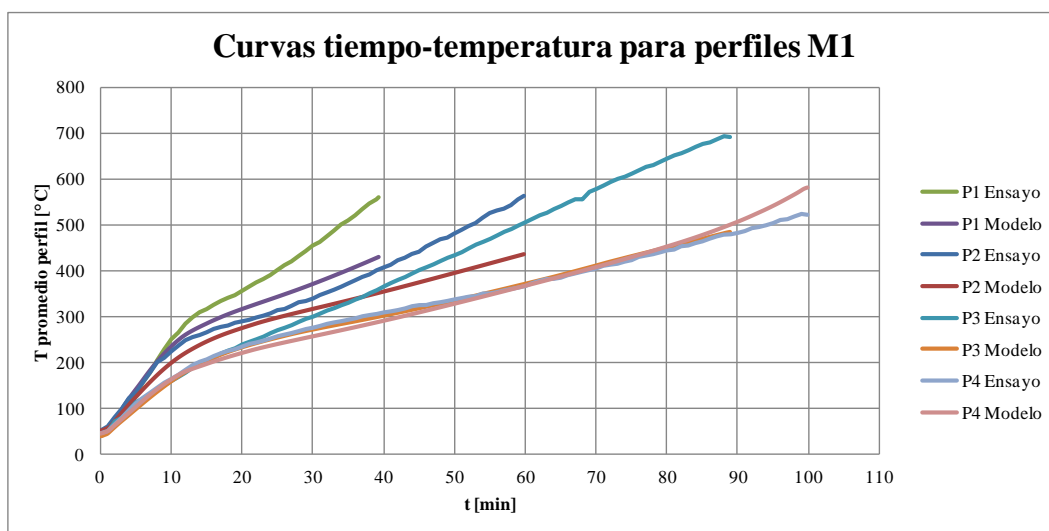


Figura 6-19: Curvas tiempo-temperatura para perfiles M1, según ensayo y modelo 2 previo.

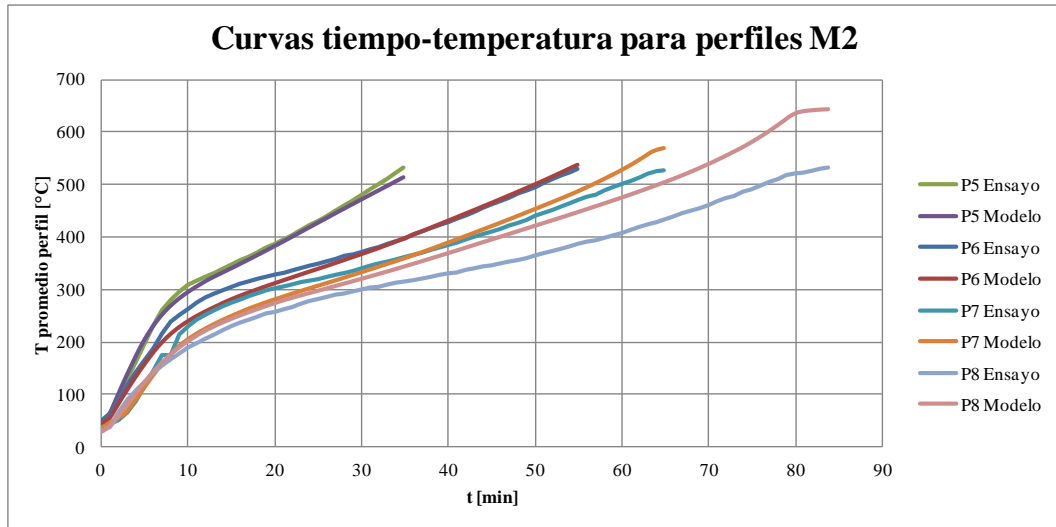


Figura 6-20: Curvas tiempo-temperatura para perfiles M2, según ensayo y modelo 2 previo.

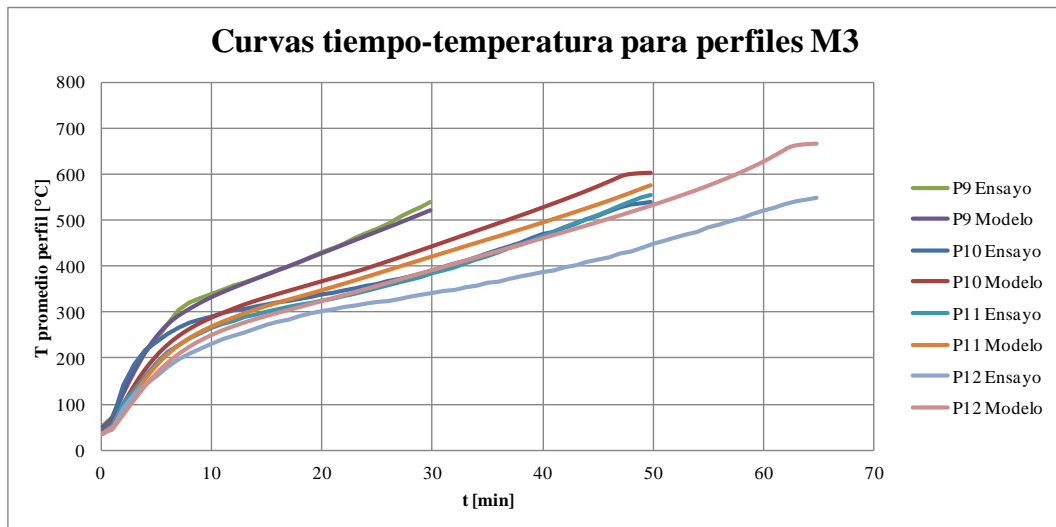


Figura 6-21: Curvas tiempo-temperatura para perfiles M3, según ensayo y modelo 2 previo.

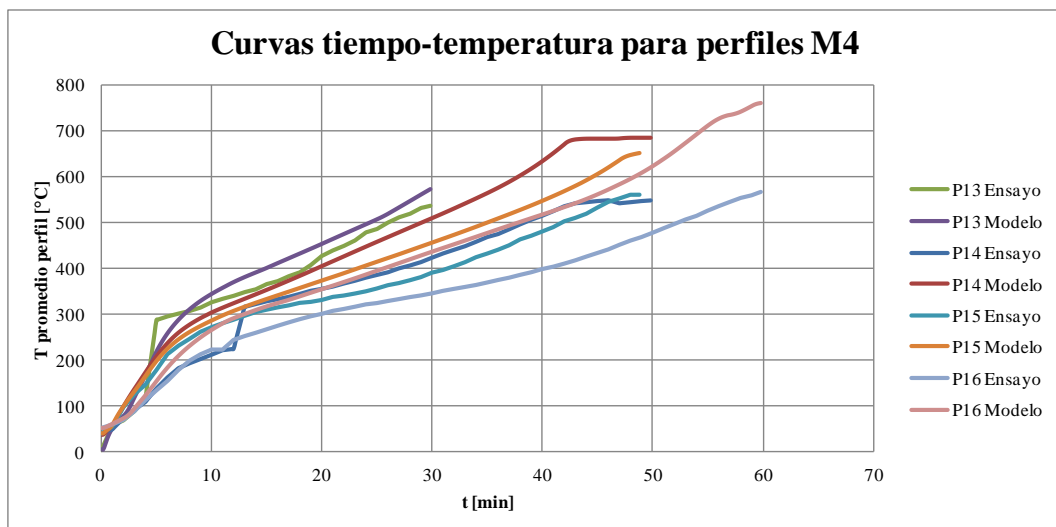


Figura 6-22: Curvas tiempo-temperatura para perfiles M4, según ensayo y modelo 2 previo.

Según lo indicado anteriormente, se analiza cada perfil calculando la diferencia absoluta entre la temperatura entregada por el modelo y la entregada por el ensayo, cada 10 segundos. Esta diferencia es considerada como una desviación de la temperatura, que permite comparar el ajuste del modelo en cada probeta. Se asume que en aquellas probetas en que la desviación es superior al doble del promedio de todas las desviaciones, el modelo no presenta buen ajuste, por lo que es conveniente no considerar dichas probetas en el cálculo de la conductividad térmica relativa de la PI. En la Figura 6-23 se presentan las desviaciones, su promedio y el límite hasta cuanto se considera un buen ajuste.

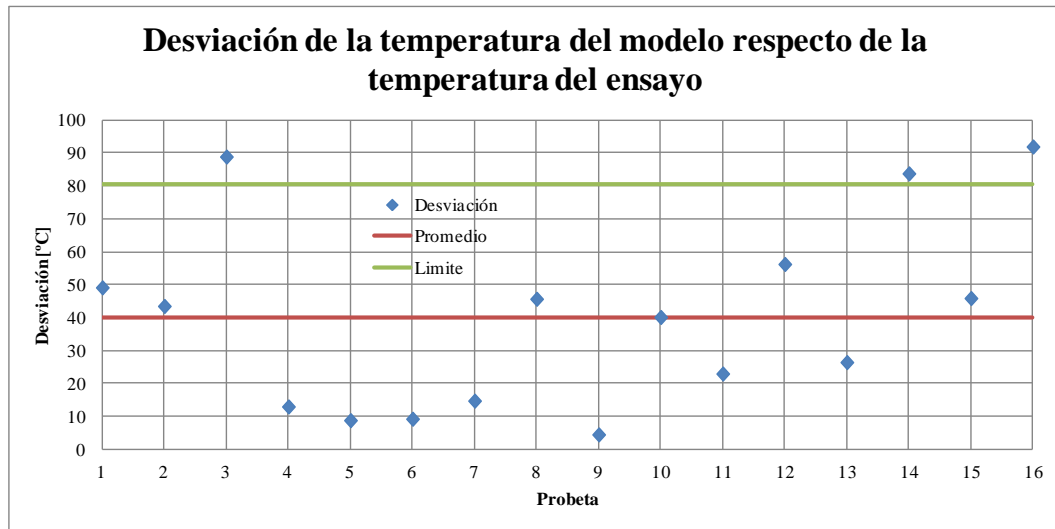


Figura 6-23: Desviación entre las temperaturas de ensayos y modelo.

### 6.3.5 Nuevo promedio de conductividades térmicas relativas de la PI

Según el criterio definido en el párrafo anterior, es conveniente descartar las conductividades térmicas relativas entregadas por las probetas P3, P14 y P16. Dado lo anterior, se repite toda la operación y se obtiene un nuevo resumen de conductividades térmicas relativas y su respectivo promedio.

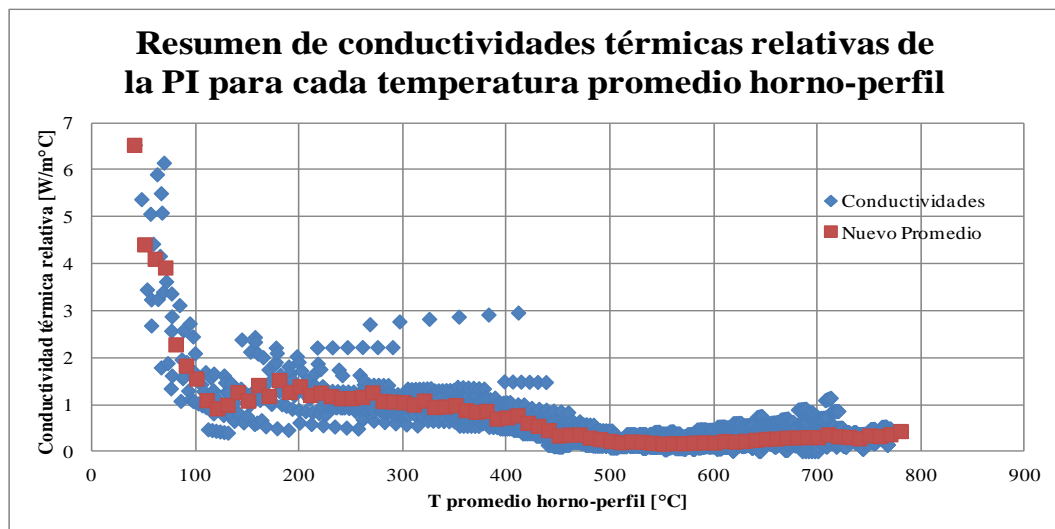


Figura 6-24: Conductividades térmicas relativas y su nuevo promedio cada 10 °C.

Sobre este nuevo promedio se realizan regresiones numéricas, considerando los mismos tres tramos. Estas regresiones nuevamente entregan funciones polinómicas de grado 4.

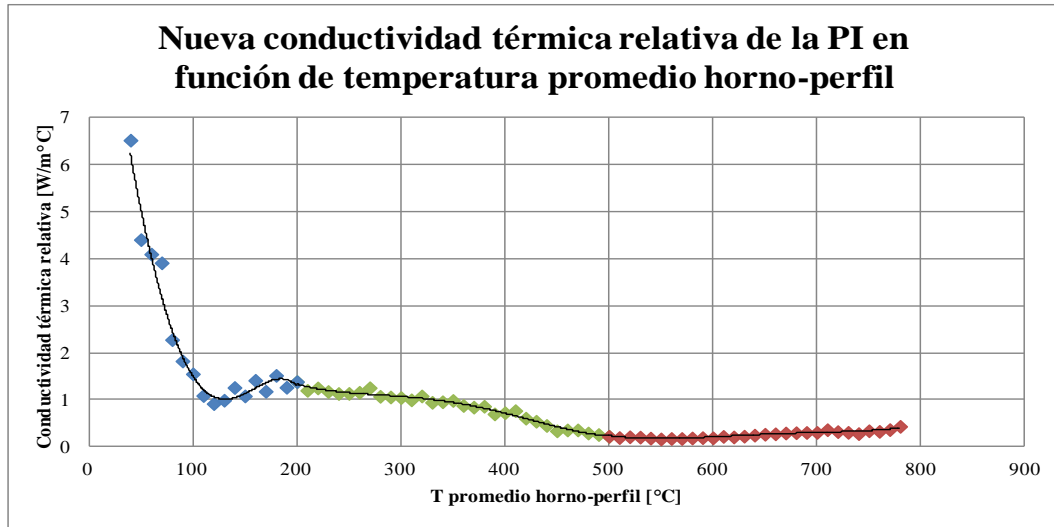


Figura 6-25: Nuevas regresiones sobre el promedio de las conductividades térmicas relativas.

### 6.3.6 Nueva validación de la conductividad térmica de la PI

Con las funciones obtenidas en el punto anterior, se calculan nuevamente las curvas tiempo – temperatura de todas las probetas y se comparan con las curvas de los ensayos. Se calculan las diferencias absolutas entre ambas curvas y se determinan las desviaciones de la temperatura para cada probeta, las que son analizadas bajo el mismo criterio utilizado anteriormente.

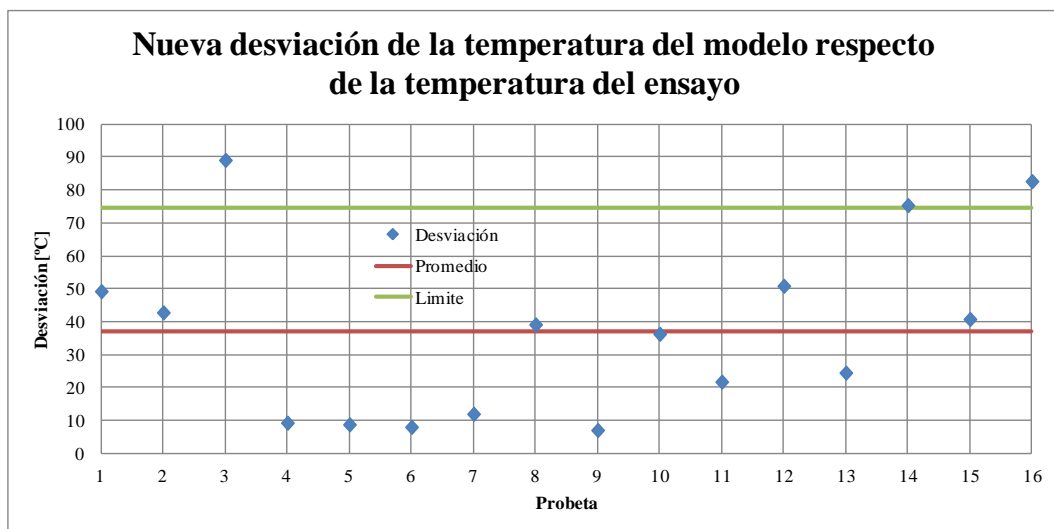


Figura 6-26: Nueva desviación de las temperaturas de ensayos y modelo.

Como nuevamente las probetas P3, P14 y P16 son las únicas que no presentan buen ajuste, según el criterio definido, y como la conductividad térmica relativa determinada no contiene los datos de dichas probetas, se considera que ésta como la Conductividad Térmica de la PI.

### 6.3.7 Función de la conductividad térmica de la PI

Del cálculo desarrollado anteriormente, se tiene que la conductividad térmica de la PI es una función que depende de la temperatura promedio horno – perfil. Sin embargo, cabe recordar que en el punto 6.3.1, se consideró dicha temperatura promedio como la temperatura de la PI, al no existir información de esta. Dado lo anterior, se presentan las funciones que permiten determinar la conductividad térmica de la PI dependiendo de su temperatura.

- Para  $20\text{ °C} \leq T < 200\text{ °C}$

$$\begin{aligned}k_{PI} &= -1,599 \times 10^{-8} \cdot T^4 + 4,489 \times 10^{-6} \cdot T^3 + 2,910 \times 10^{-4} \cdot T^2 \\ &\quad -1,637 \times 10^{-1} \cdot T + 12,07513 \\ R^2 &= 0,96827\end{aligned}\tag{55}$$

- Para  $200\text{ °C} \leq T < 500\text{ °C}$

$$\begin{aligned}k_{PI} &= 6,843 \times 10^{-10} \cdot T^4 - 9,636 \times 10^{-7} \cdot T^3 + 4,863 \times 10^{-4} \cdot T^2 \\ &\quad -1,072 \times 10^{-1} \cdot T + 9,93321 \\ R^2 &= 0,97860\end{aligned}\tag{56}$$

- Para  $500\text{ °C} \leq T \leq 1000\text{ °C}$

$$\begin{aligned}k_{PI} &= 3,540 \times 10^{-10} \cdot T^4 - 9,305 \times 10^{-7} \cdot T^3 + 9,129 \times 10^{-4} \cdot T^2 \\ &\quad -3,953 \times 10^{-1} \cdot T + 63,84723 \\ R^2 &= 0,91383\end{aligned}\tag{57}$$

Estas funciones se presentan de manera gráfica a continuación:

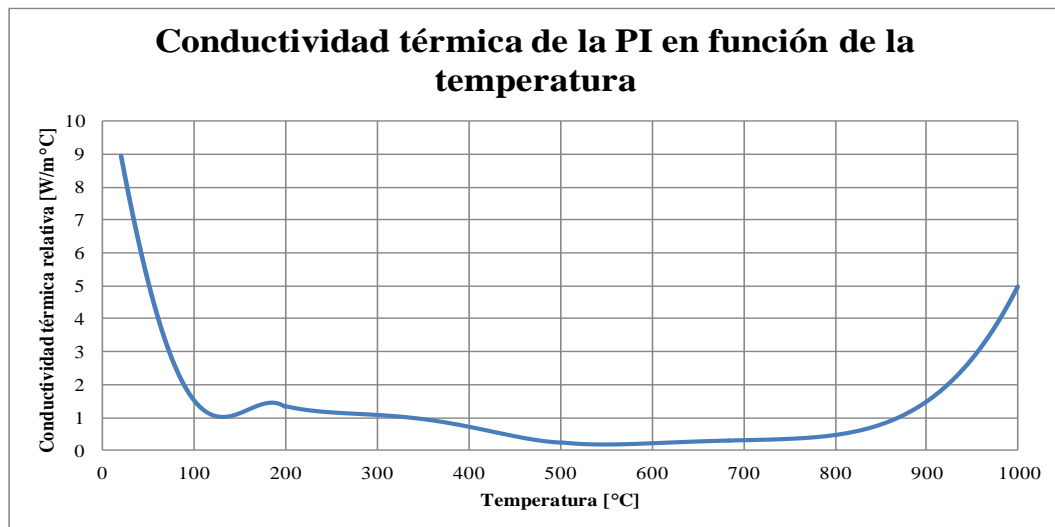


Figura 6-27: Conductividad térmica de la PI en función de la temperatura.

## 6.4 Temperaturas según Eurocódigo 3 Parte 1.2

Finalmente, es posible determinar el aumento de la temperatura del perfil de acero en un intervalo de tiempo, utilizando la fórmula (4.22) del Eurocódigo 3 Parte 1.2. Al realizar este cálculo de manera sucesiva para cada probeta, se obtienen las temperaturas y con esto las curvas tiempo-temperatura. En la Tabla 6-2 se muestran las temperaturas cada un minuto durante el ensayo y las calculadas con el modelo para los perfiles M1. Las temperaturas de los otros perfiles se presentan en el Anexo D.

**Tabla 6-2: Temperaturas del perfil según ensayos y modelo 2, probetas P1, P2, P3 y P4.**

t [min]	P1		P2		P3		P4		t [min]	P1		P2		P3		P4	
	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]		TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]
0	49	49	53	53	40	40	46	46	50	-	-	481	392	435	332	337	325
1	59	57	62	59	50	46	51	51	51	-	-	489	396	441	336	340	329
2	76	75	82	74	72	60	66	64	52	-	-	497	400	450	339	343	333
3	92	99	101	93	80	74	80	78	53	-	-	504	404	458	343	344	337
4	112	123	124	112	97	87	96	93	54	-	-	515	409	464	347	350	341
5	131	145	136	130	114	101	112	107	55	-	-	526	413	470	350	350	345
6	157	167	158	148	122	115	124	122	56	-	-	531	417	478	354	353	349
7	178	189	180	165	131	128	134	135	57	-	-	535	422	486	358	357	353
8	205	209	202	180	141	141	145	148	58	-	-	543	426	492	362	360	357
9	229	227	211	195	151	154	156	160	59	-	-	555	431	500	366	363	361
10	251	243	225	208	161	166	165	171	60	-	-	-	-	507	369	366	366
11	265	257	238	220	169	177	174	180	61	-	-	-	-	514	373	373	370
12	285	269	250	230	179	187	184	188	62	-	-	-	-	522	377	377	374
13	298	278	256	239	190	196	194	194	63	-	-	-	-	527	381	381	378
14	310	285	261	247	195	204	202	199	64	-	-	-	-	535	385	382	383
15	316	291	267	254	201	212	207	203	65	-	-	-	-	542	390	384	387
16	326	297	274	261	211	218	214	208	66	-	-	-	-	550	394	390	391
17	334	303	278	267	220	225	220	213	67	-	-	-	-	557	398	394	395
18	341	309	281	272	227	230	225	218	68	-	-	-	-	557	402	397	400
19	347	314	287	277	232	235	229	222	69	-	-	-	-	573	407	401	404
20	356	319	291	282	240	240	235	226	70	-	-	-	-	579	411	405	408
21	365	323	294	286	246	244	240	229	71	-	-	-	-	587	415	410	412
22	375	328	299	290	251	248	244	233	72	-	-	-	-	595	419	413	417
23	382	333	303	294	257	252	248	236	73	-	-	-	-	601	423	415	421
24	391	338	308	298	265	256	252	239	74	-	-	-	-	606	427	419	425
25	402	342	315	301	271	259	257	243	75	-	-	-	-	613	431	423	430
26	412	347	317	305	277	263	261	246	76	-	-	-	-	620	435	430	434
27	421	352	324	308	282	266	264	249	77	-	-	-	-	627	439	433	438
28	432	357	332	311	290	269	268	252	78	-	-	-	-	631	443	435	442
29	443	363	335	315	296	272	273	254	79	-	-	-	-	639	447	439	447
30	455	368	340	318	301	274	276	257	80	-	-	-	-	646	450	444	451
31	463	374	348	321	308	277	280	260	81	-	-	-	-	653	454	446	455
32	475	380	353	324	314	280	284	263	82	-	-	-	-	657	458	453	459
33	487	386	359	328	319	282	287	266	83	-	-	-	-	664	462	454	463
34	501	392	366	331	326	285	290	269	84	-	-	-	-	671	465	460	467
35	510	399	373	335	331	288	293	272	85	-	-	-	-	677	469	463	472
36	521	405	380	338	338	290	296	276	86	-	-	-	-	681	472	469	476
37	534	412	387	341	344	293	301	279	87	-	-	-	-	688	476	474	480
38	547	419	392	345	352	296	303	282	88	-	-	-	-	694	480	478	484
39	556	426	401	349	359	298	306	285	89	-	-	-	-	-	-	479	488
40	-	-	407	352	367	301	309	289	90	-	-	-	-	-	-	482	493
41	-	-	413	356	374	304	311	292	91	-	-	-	-	-	-	486	497
42	-	-	423	360	381	307	314	295	92	-	-	-	-	-	-	492	501
43	-	-	429	364	387	310	318	299	93	-	-	-	-	-	-	495	505
44	-	-	437	368	395	313	322	302	94	-	-	-	-	-	-	498	510
45	-	-	442	371	403	316	325	306	95	-	-	-	-	-	-	503	514
46	-	-	453	375	409	319	325	310	96	-	-	-	-	-	-	510	518
47	-	-	461	379	415	322	329	313	97	-	-	-	-	-	-	512	522
48	-	-	469	384	422	326	331	317	98	-	-	-	-	-	-	518	527
49	-	-	472	388	429	329	334	321	99	-	-	-	-	-	-	523	531



## **7 MODELO 3: MODELACIÓN COMPUTACIONAL**

### **7.1 Introducción**

El tercer modelo desarrollado consiste en una modelación computacional en elementos finitos que simula la transferencia de calor entre un incendio y un perfil de acero protegido con PI. Esta modelación se realiza con un software de elementos finitos llamado “COMSOL Multiphysics” versión 4.0. Dicho software posee variados tipos de análisis, pero el utilizado para el presente trabajo corresponde a la “Transferencia de Calor en Sólidos”.

En este software se crean los modelos computacionales en 2 dimensiones de los perfiles, que posteriormente son simulados. Para la creación de los modelos, se debe ingresar la información del perfil de acero, de la PI y del incendio, utilizados en los modelos anteriores. Esta información corresponde principalmente a la geometría y a las propiedades térmicas de los materiales, y a los parámetros del incendio.

De las simulaciones se obtiene variada información, como por ejemplo el gradiente térmico de una probeta, las temperaturas puntuales o promedio de la probeta o los bordes, los flujos de calor, etc., al cabo de un determinado tiempo o en un intervalo. Para efectos de este trabajo, solamente se extrae la información de la temperatura promedio en el perfil de acero cada 10 [s], la que permite determinar la curva tiempo-temperatura y los gradientes térmicos para efectos ilustrativos.

Para el desarrollo de los modelos computacionales se presenta el paso a paso de la utilización del software. Previamente a esto, se presenta la teoría de la transferencia de calor mediante elementos finitos.

### **7.2 Método de Elementos Finitos**

El método de elementos finitos permite obtener soluciones numéricas sobre un cuerpo expuesto a distintos problemas, como por ejemplo mecánicos, acústicos, térmicos y estructurales. Este método divide el cuerpo en un número elevado de elementos finitos no intersectados entre sí (celdas), en los que se identifica una serie de puntos llamados “nodos”, los que pueden pertenecer a distintos elementos, por ser estos vecinos, y que en conjunto conforman una “malla”. Sobre esta malla de nodos, se realizan los cálculos asociados a la física en cuestión, obteniendo soluciones de manera individual en los nodos y de manera global en la malla.

Es importante mencionar una propiedad del método, la convergencia, que dependiendo de la cantidad y del tamaño de los elementos finitos, permite soluciones numéricas convergentes en forma rápida hacia la solución exacta del problema.

Existen varios software, gratuitos y pagados, que utilizan este método para resolver distintos problemas de físicas, individuales o múltiples. Algunos de estos son COMSOL Multiphysics, Abaqus y ANSYS, que fueron identificados en publicaciones de estudios internacionales de Ingeniería Contra Incendios.

### 7.3 Transferencia de Calor mediante Elementos Finitos

La transferencia de calor entre cuerpos puede ser calculada mediante un software de elementos finitos, el que realiza un cálculo similar al extraído desde [10] y descrito a continuación.

#### 7.3.1 Transferencia de calor al interior de un sólido

El modelo de transferencia de calor unidimensional explícito de un cuerpo, se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$T_m^{i+1} = Fo \cdot (T_{m-1}^i + T_{m+1}^i) + (1 - 2 \cdot Fo) \cdot T_m^i \quad (58)$$

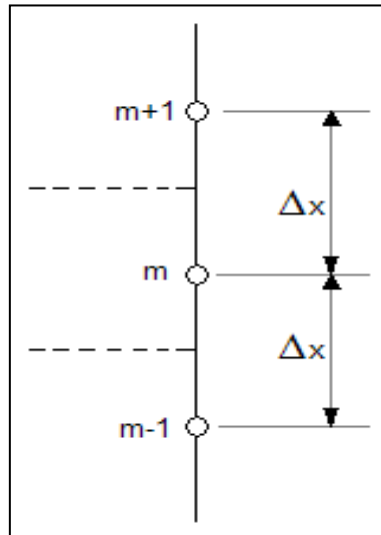


Figura 7-1: Esquema unidimensional de celdas para modelo de transferencia de calor.

Dónde:

$T_m^{i+1}$  : es la temperatura de la celda m (que representa un volumen de control de ancho  $\Delta x$ ), en el instante  $i+1$ .

$T_{m-1}^i$  : es la temperatura de la celda m-1, en el instante i.

$T_{m+1}^i$  : es la temperatura de la celda m+1, en el instante i.

$T_m^i$  : es la temperatura de la celda m, en el instante i.

$Fo = \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$  : es el número de Fourier de la malla.

$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$  : es la difusividad térmica del material.

$k$  : es la conductividad del material.

$\rho$  : es la densidad del material.

$C_p$  : es el calor específico del material.

$\Delta t$  : es el incremento de tiempo para el cálculo.

$\Delta x$  : es el ancho de cada celda.

Este método explícito requiere que el parámetro de Fourier sea menor o igual a 0,5, para asegurar la convergencia del modelo. Esto se logra con un  $\Delta t$  pequeño.

### 7.3.2 Transferencia de calor al borde de un sólido

La expresión anterior representa el calentamiento mediante conducción térmica de celdas del material adyacentes a otras celdas del material, la que se complementa con la expresión (59) para las condiciones de borde. Esta nueva expresión se aplica para la cara expuesta al fuego, la que sufre el calentamiento por radiación y convección proveniente del incendio. También se aplica para la cara no expuesta al incendio la que se considera hacia un recinto a 20 °C.

$$T_0^{i+1} = 2 \cdot Fo \cdot \left( T_1^i + \frac{q_{inc} \cdot \Delta x}{k} \right) + (1 - 2 \cdot Fo) \cdot T_0^i \quad (59)$$

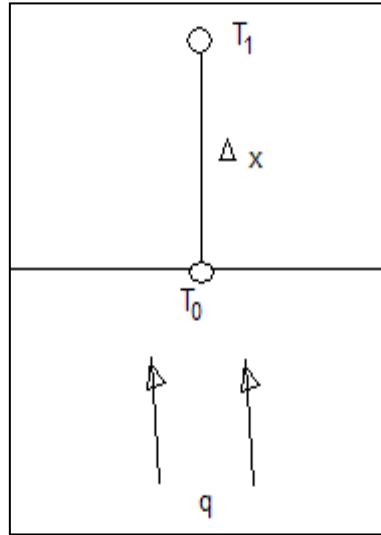


Figura 7-2: Condición de borde, modelo de transferencia de calor.

Dónde:

- $T_0^{i+1}$  : es la temperatura de la pared del material en el instante  $i+1$ .
- $T_0^i$  : es la temperatura de la pared del material en el instante  $i$ .
- $T_1^i$  : es la temperatura de la celda adyacente a la pared del material en el instante  $i$ .
- $q_{inc}$  : es el flujo de calor total, radiación más convección, según sea el caso.

El calor total transferido  $q_{inc}$ , se compone del calor por radiación y convección. Los valores de los parámetros de cada expresión se detallan a continuación.

$$q_{inc} = \dot{q}''_{conv} + \dot{q}''_{rad} = h \cdot \Delta T + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{incendio}^4 - T_{pared}^4) \quad (60)$$

- i. Para la cara expuesta los flujos de calor por convección y radiación corresponden a:
  - Coeficiente convectivo,  $h = 25$  [W/m<sup>2</sup>K]
  - Emisividad media  $\varepsilon = 0.5$
- ii. Para la cara no expuesta los flujos de calor por convección y radiación corresponden a:
  - Coeficiente convectivo,  $h = 4$  [W/m<sup>2</sup>K]
  - Emisividad media  $\varepsilon = 0.82$

## 7.4 Modelación Computacional

### 7.4.1 Parámetros del modelo

El primer paso de la modelación, es ingresar los parámetros geométricos del perfil de acero y la PI. Para esto se crean “Parámetros” en las “Definiciones Globales”, y se ingresan uno a uno las dimensiones. Este se realiza con el objetivo de parametrizar la geometría, permitiendo modificar sin problemas algunos de sus datos.

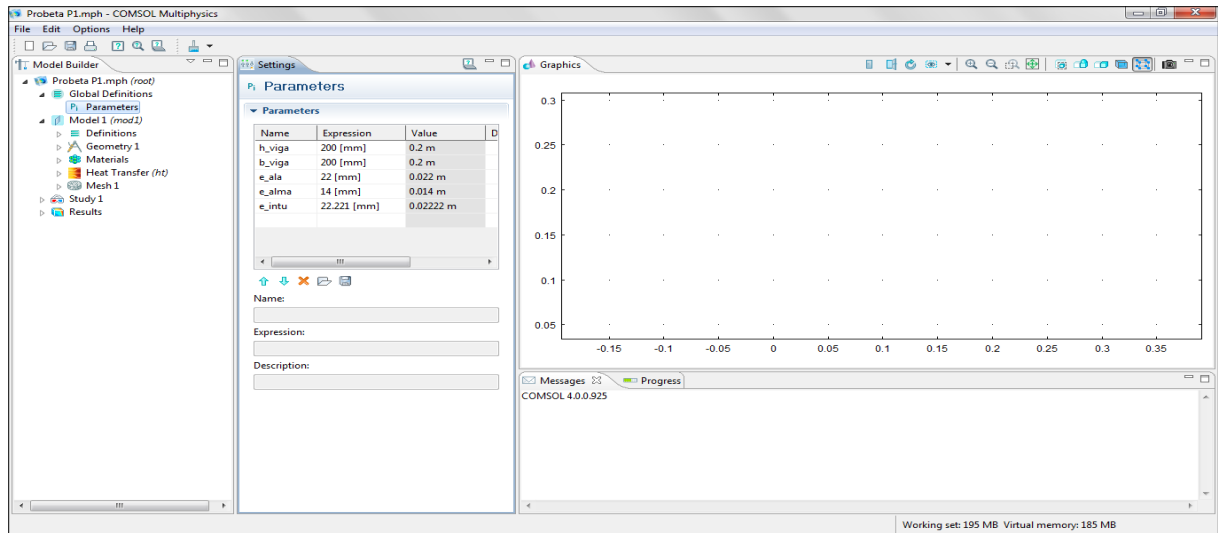


Figura 7-3: Definición de los parámetros geométricos en COMSOL.

Luego se ingresan las propiedades de los materiales que dependen de la temperatura, esto se realiza en “Definiciones”, creando funciones de “Interpolación”. Las propiedades están para cada grado de temperatura, por lo que el software interpola linealmente entre ellas cuando lo necesita. Para valores fuera de los rangos, puede extrapolar o considerarlo constante.

- Calor específico del acero

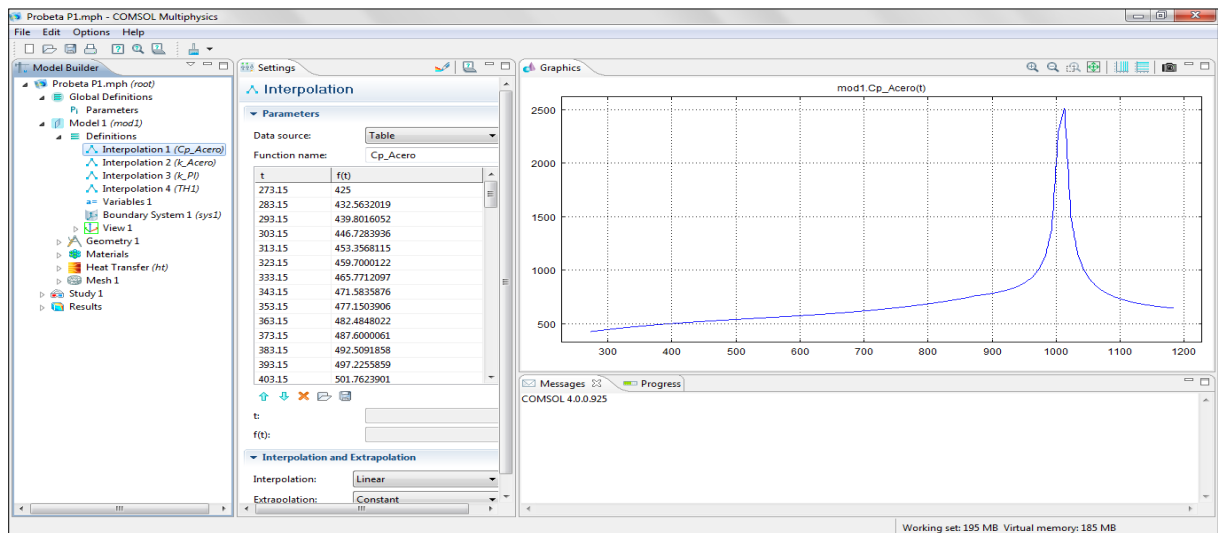


Figura 7-4: Calor específico del acero en COMSOL.

- Conductividad térmica de la PI

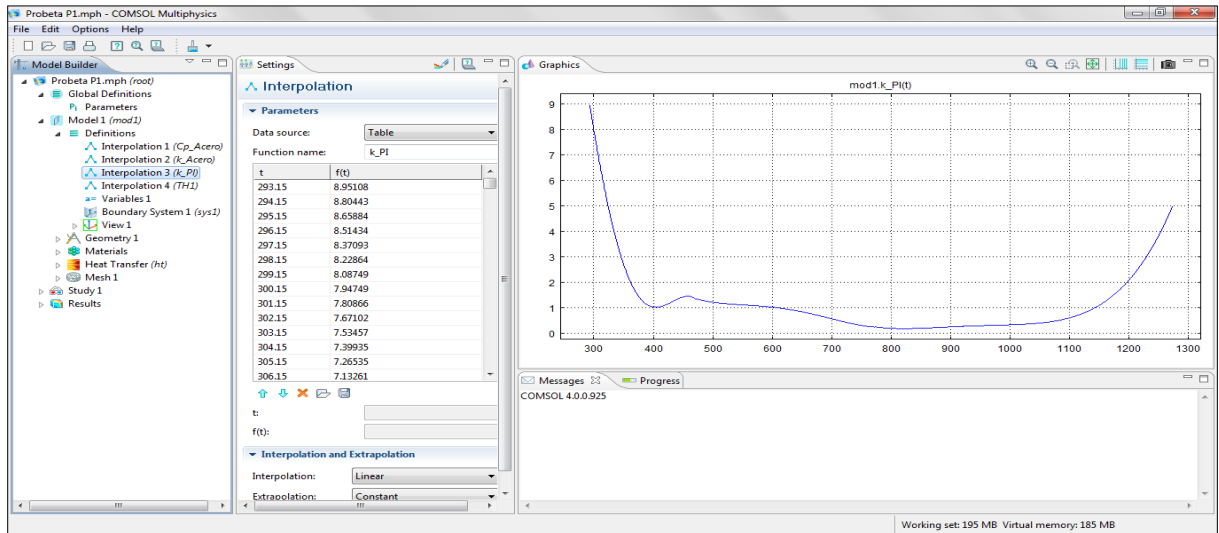


Figura 7-5: Conductividad térmica de la PI en COMSOL.

El siguiente paso es ingresar la curva tiempo-temperatura del horno, de igual manera que las propiedades anteriores. Luego se ingresan como “Variables” los calores generados por el incendio, calor por radiación y el calor por convección, junto a sus parámetros.

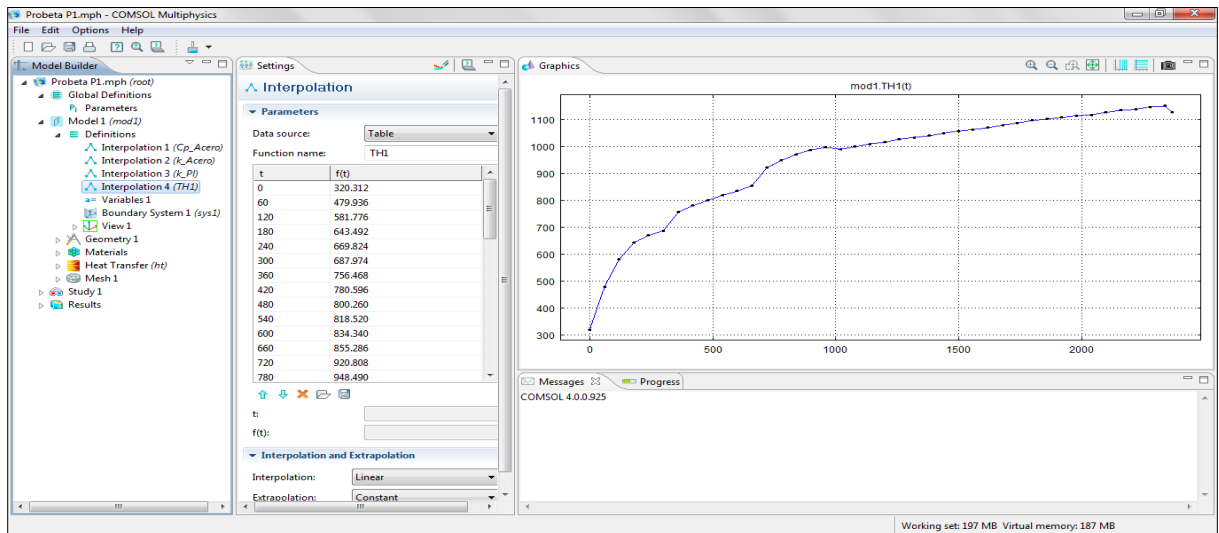


Figura 7-6: Curva tiempo – temperatura del horno para la probeta P1 en COMSOL.

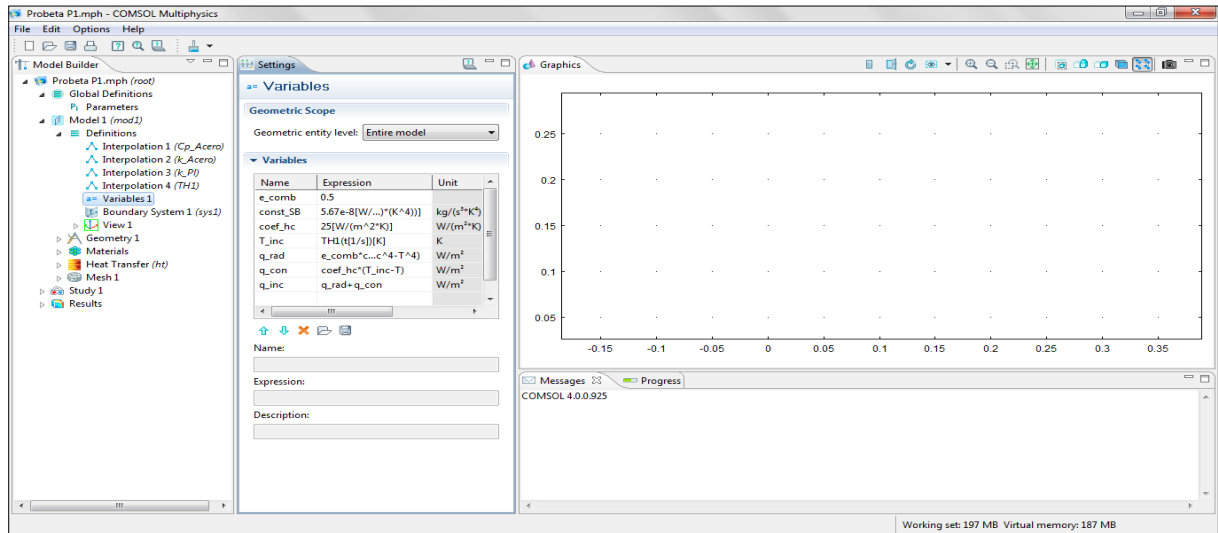


Figura 7-7: Parámetros del flujo de calor generado un incendio en COMSOL.

## 7.4.2 Construcción de la geometría

Con los parámetros geométricos definidos anteriormente, se construye la geometría del perfil de acero y de la PI. Esto se realiza mediante la construcción de geometrías simples, las que posteriormente se unen.

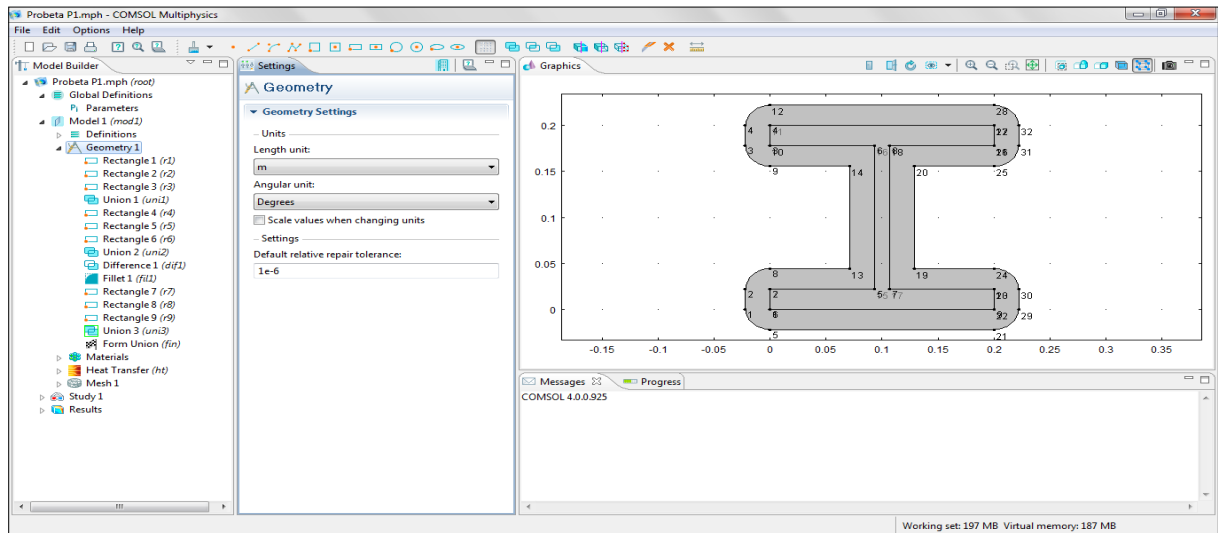


Figura 7-8: Construcción de la geometría de la PI en COMSOL.

### 7.4.3 Definición de los materiales

Definidas las propiedades de los materiales y construidas las geometrías, se procede a crear los materiales, asignándoles las propiedades como funciones de la temperatura o ingresándolas manualmente según corresponda. Luego estos materiales se asocian a la geometría correspondiente.

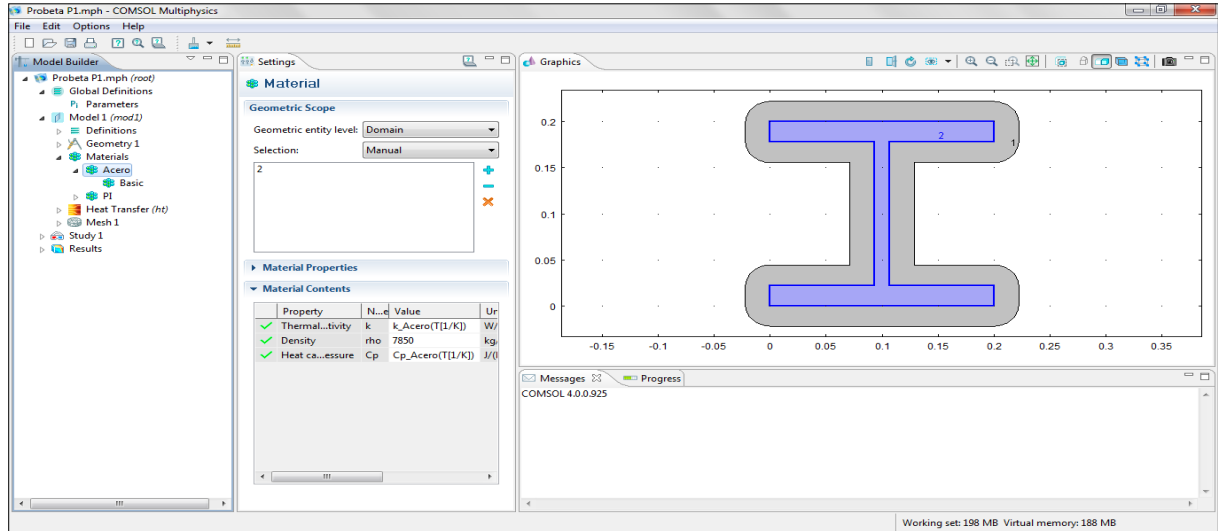


Figura 7-9: Definición del material “Acero” y sus propiedades en COMSOL.

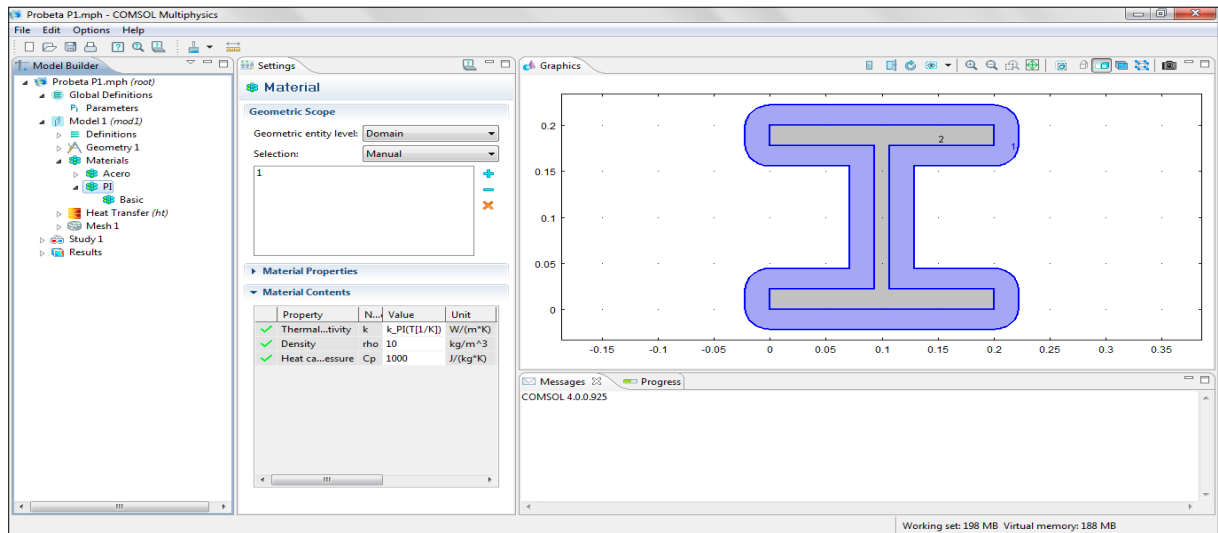


Figura 7-10: Definición del material “PI” y sus propiedades en COMSOL.

#### 7.4.4 Definición de las condiciones de borde

El siguiente paso es definir las condiciones térmicas a las que se expondrán en la simulación. Estas son la temperatura inicial de ambos elementos y el flujo de calor desde el incendio sobre todo el contorno de la PI.

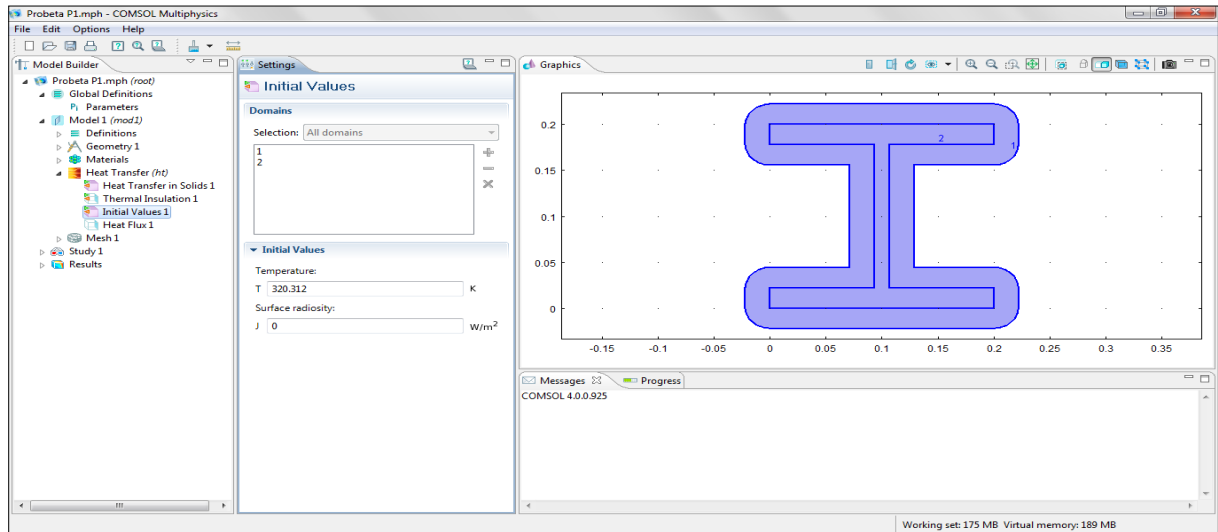


Figura 7-11: Temperatura inicial de la probeta y la PI en COMSOL.

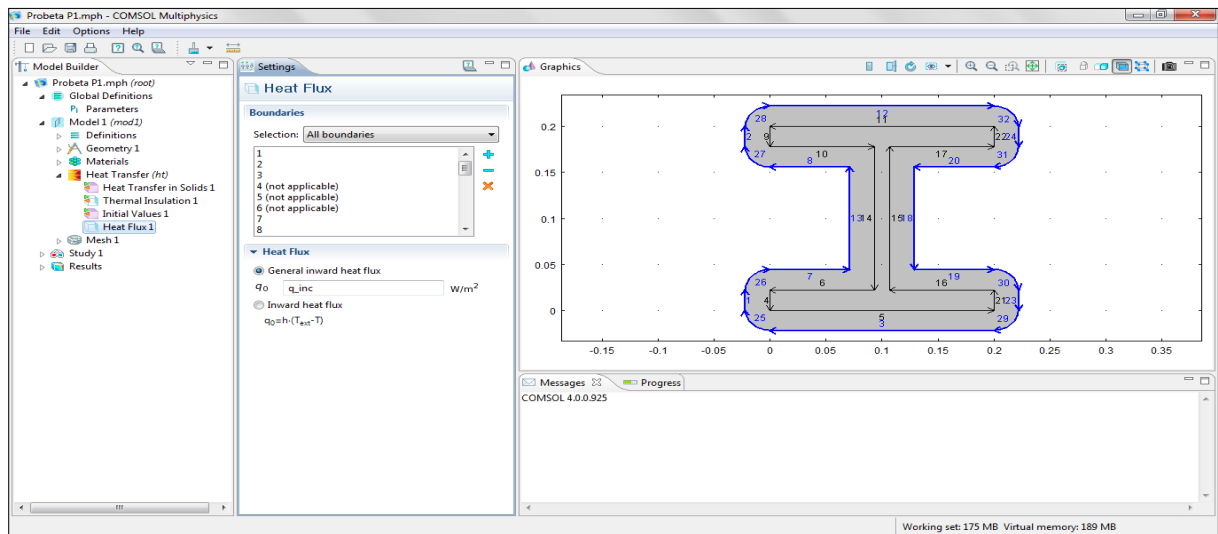


Figura 7-12: Bordes expuestos al flujo de calor en COMSOL.



## 7.4.5 Mallado de las geometrías

Construidas las geometrías, se realiza el mallado del perfil de acero, en la que se generan cerca de 5.000 nodos. En tanto el mallado de la PI genera más de 10.000 nodos.

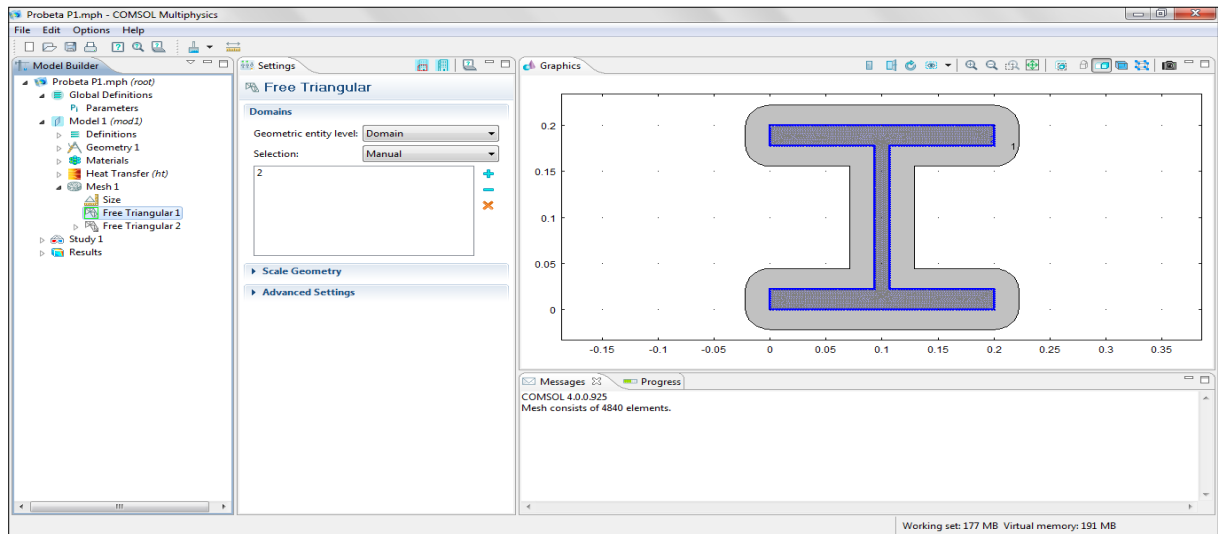


Figura 7-13: Mallado de la geometría del perfil en COMSOL.

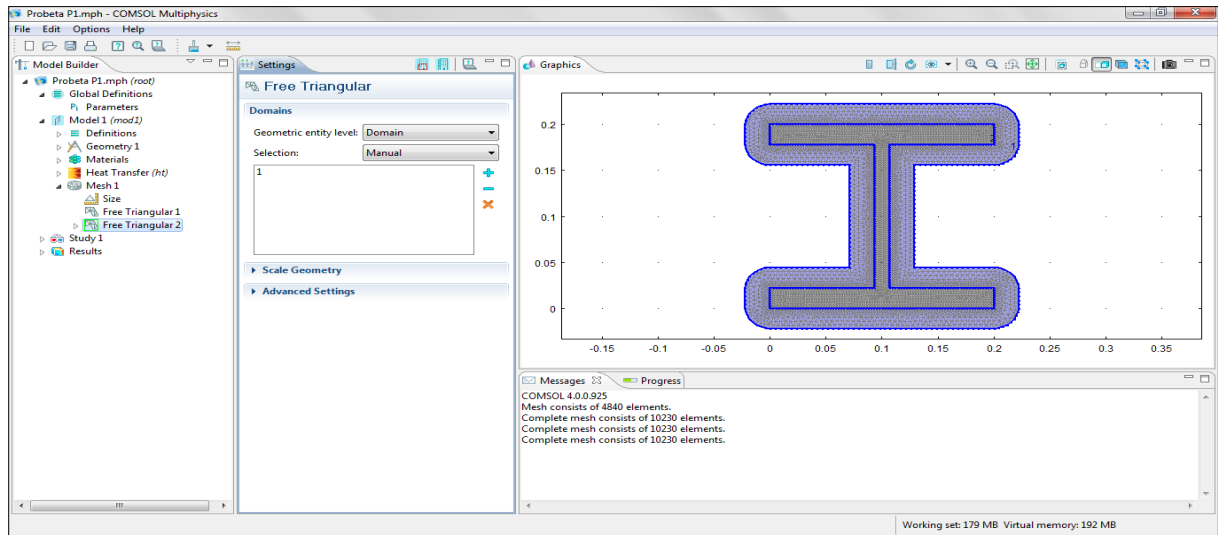


Figura 7-14: Mallado de la geometría de la PI en COMSOL.

## 7.4.6 Ejecución de la simulación

El último paso antes de ejecutar la simulación, es definir la duración de la simulación y el intervalo de tiempo de análisis. La duración considerada corresponde al tiempo de duración del ensayo, a diferencia del intervalo de tiempo de análisis, el que se considera de 1 [s] con el objetivo de que la simulación converja hacia una solución más cercana a la realidad.

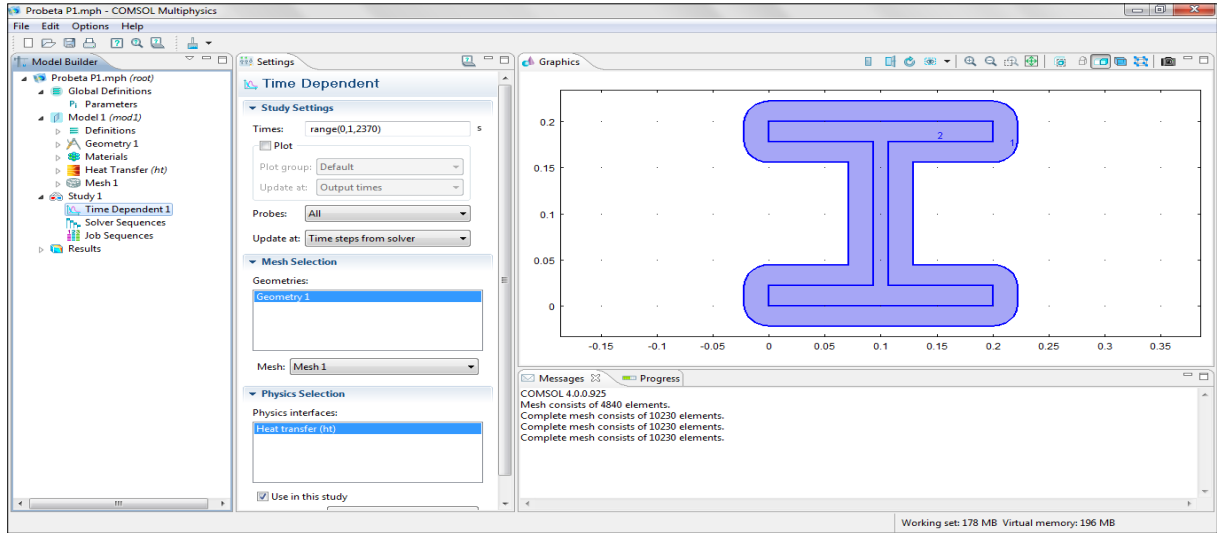


Figura 7-15: Definición del tiempo de simulación y del intervalo de análisis en COMSOL.

Con todo esto, se ejecuta la simulación.

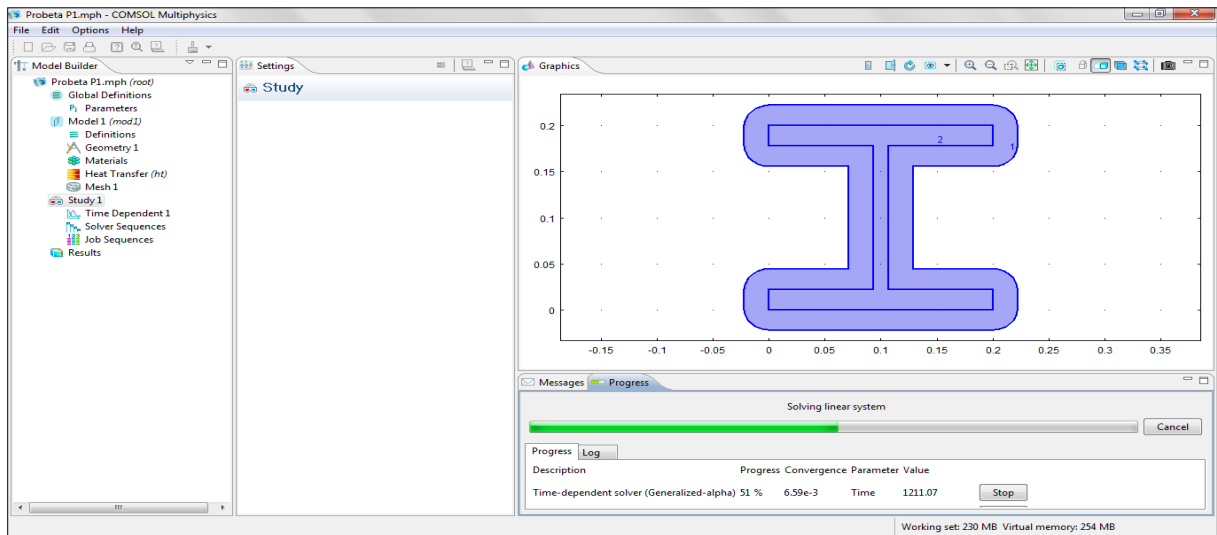


Figura 7-16: Ejecución de la simulación en COMSOL.

### 7.4.7 Resultado de la simulación

El primer resultado entregado por la simulación es una imagen del gradiente térmico al interior del perfil y de la PI.

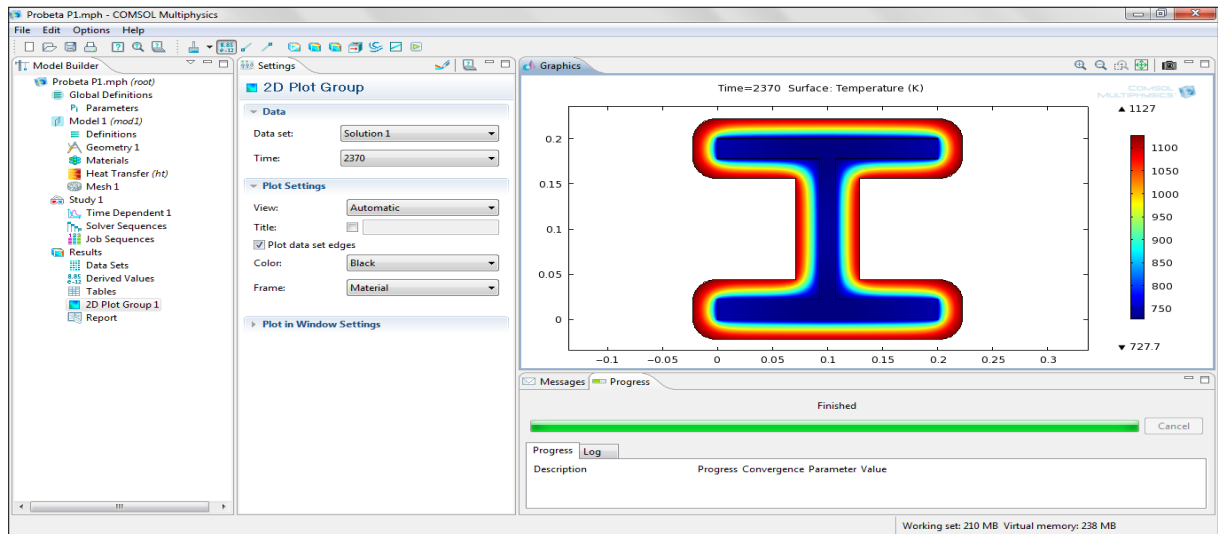


Figura 7-17: Resultado de la simulación en COMSOL.

### 7.4.8 Extracción de las temperaturas

Para obtener las temperaturas promedio del perfil durante la simulación, se realiza una “Integración Superficial” sobre el elemento requerido. De esto se obtiene la temperatura cada cierto tiempo, lo que permite obtener la curva tiempo-temperatura de la probeta.

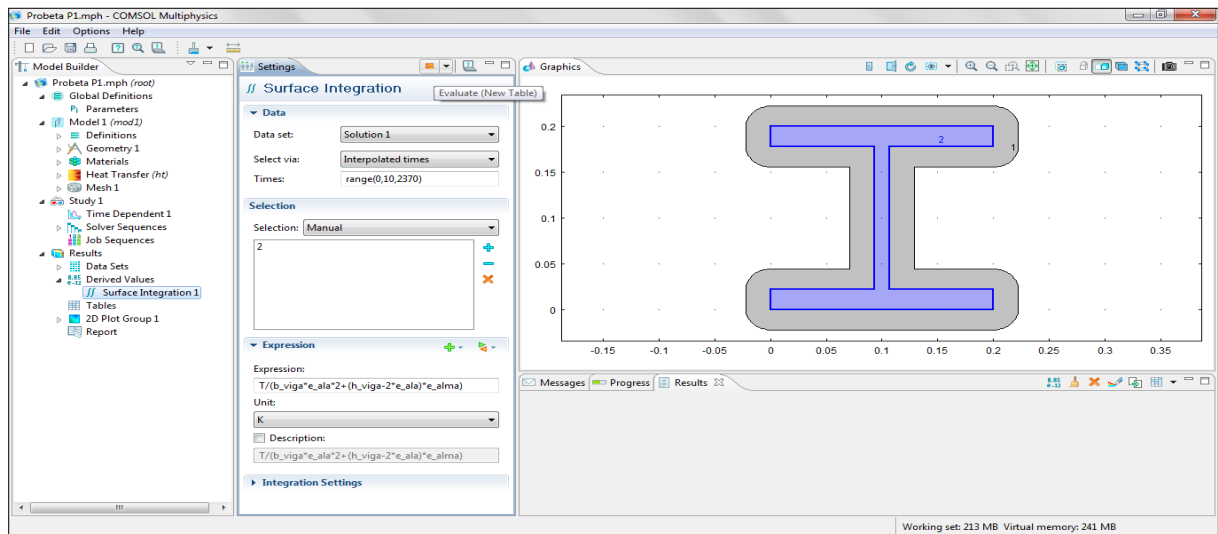


Figura 7-18: Selección de los resultados requeridos en COMSOL.

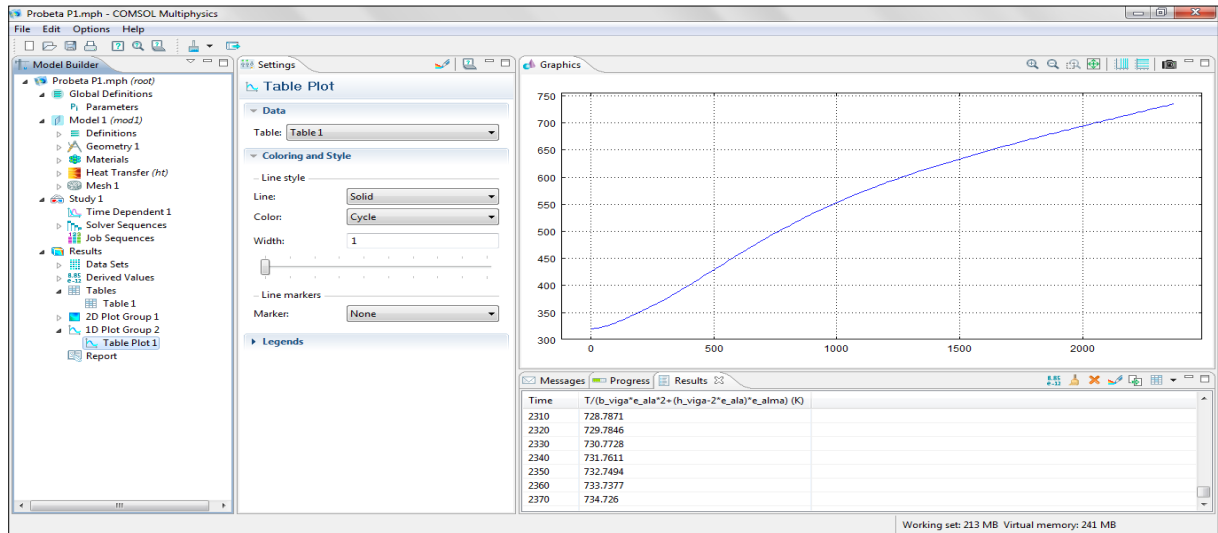


Figura 7-19: Curva tiempo – temperatura según la simulación en COMSOL.

## 7.4.9 Gradientes térmicos

Al realizar las simulaciones de todos los perfiles, junto con las curvas tiempo-temperatura, se obtienen los gradientes térmicos. Estos permiten observar gráficamente la distribución de las temperaturas en la sección transversal del acero y de la PI.

### 7.4.9.1 Perfiles M1

De manera ilustrativa se presenta el gradiente térmico de la probeta P1, en donde se puede observar que la PI, en su interior, experimenta la mayor variación de temperaturas a diferencia del acero que presenta una temperatura relativamente homogénea.

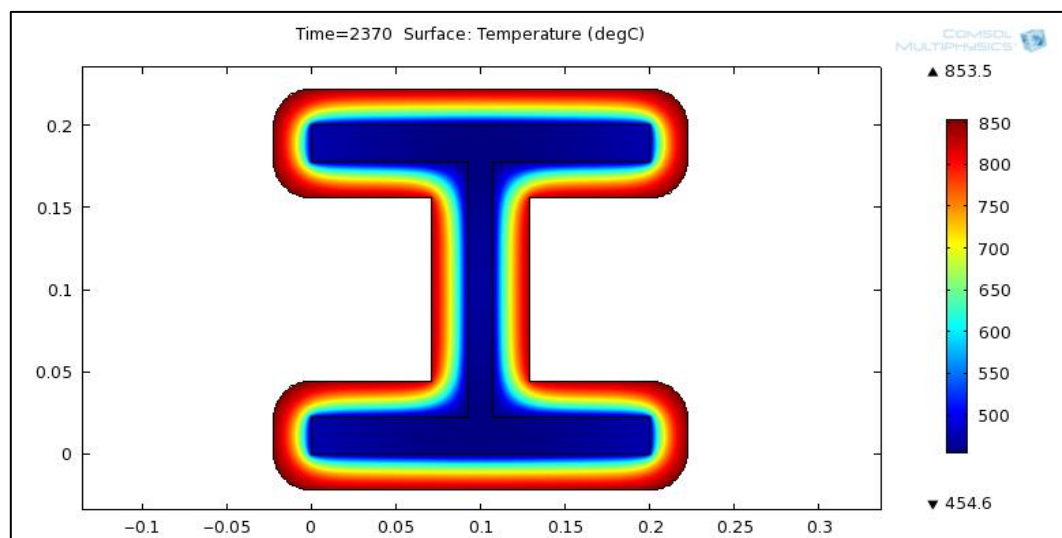


Figura 7-20: Gradiente térmico de la probeta P1, al término de la simulación.

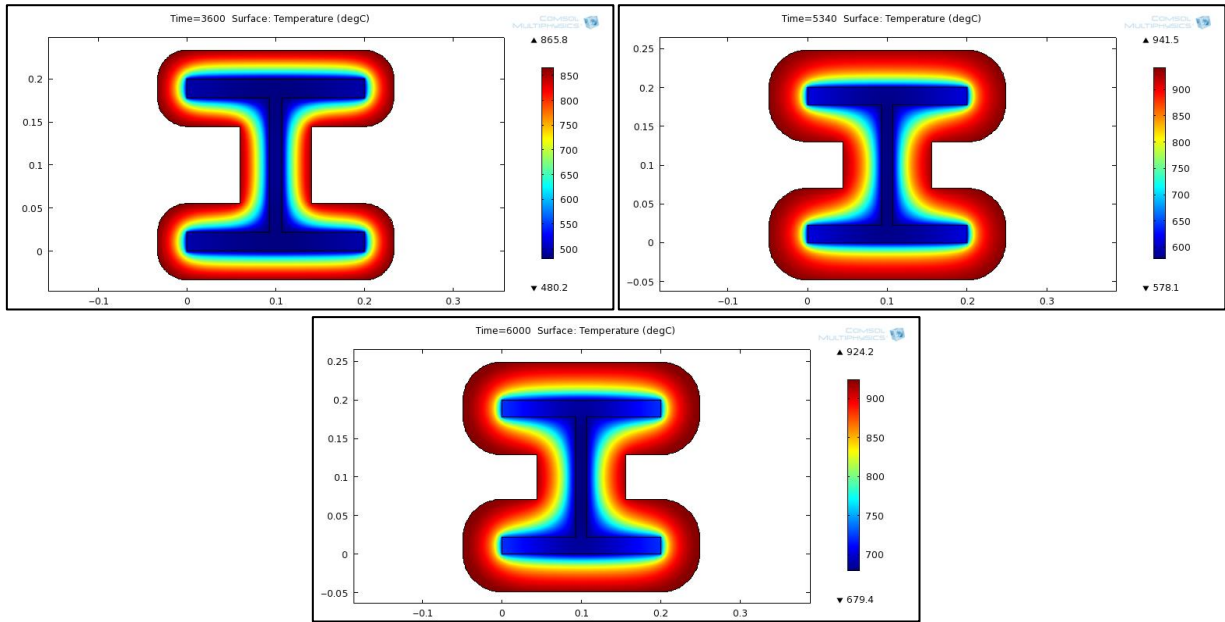


Figura 7-21: Gradientes térmicos de probetas P2, P3 y P4, al término de la simulación.

#### 7.4.9.2 Perfiles M2

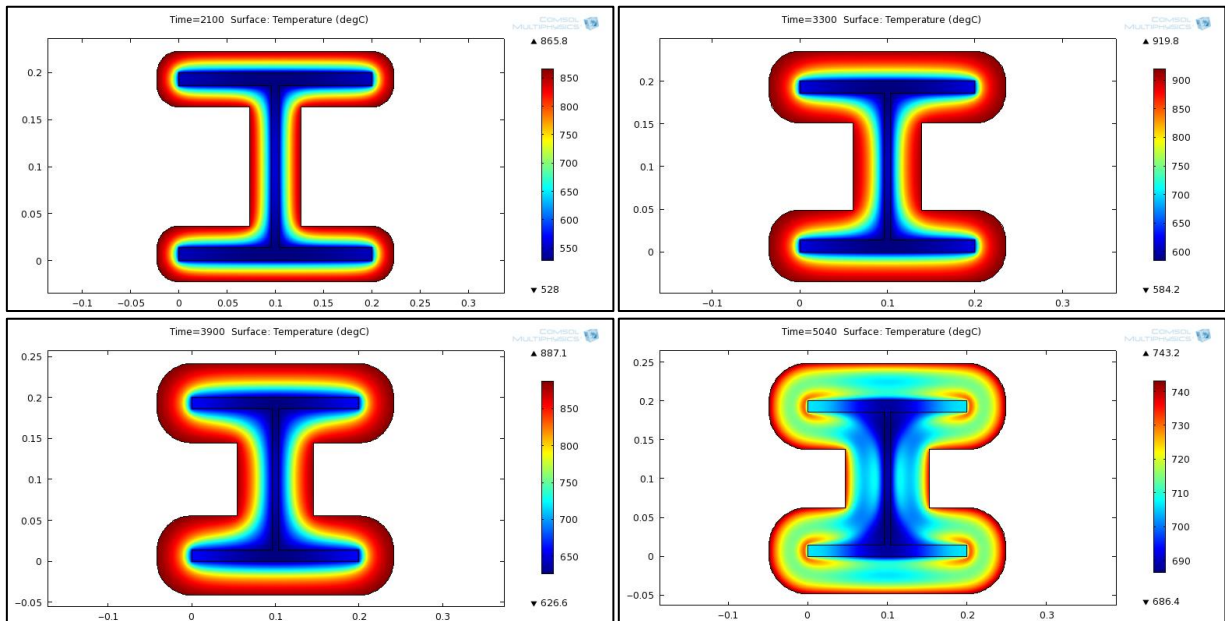


Figura 7-22: Gradientes térmicos de probetas P5, P6, P7 y P8, al término de la simulación.

### 7.4.9.3 Perfiles M3

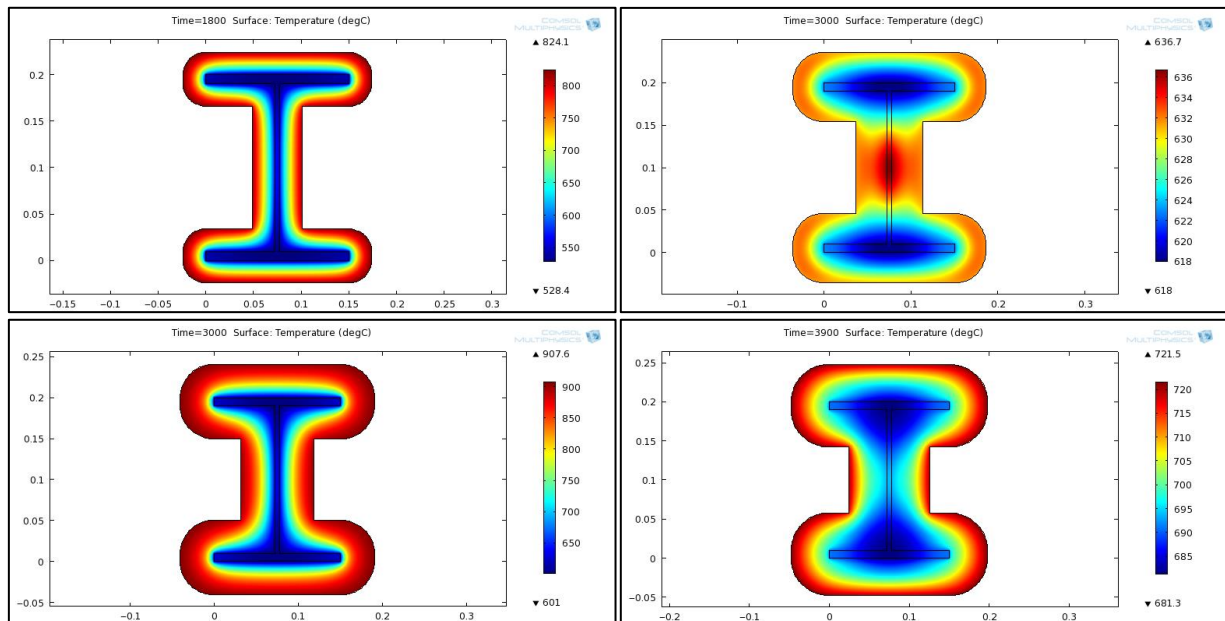


Figura 7-23: Gradientes térmicos de probetas P9, P10, P11 y P12, al término de la simulación.

### 7.4.9.4 Perfiles M4

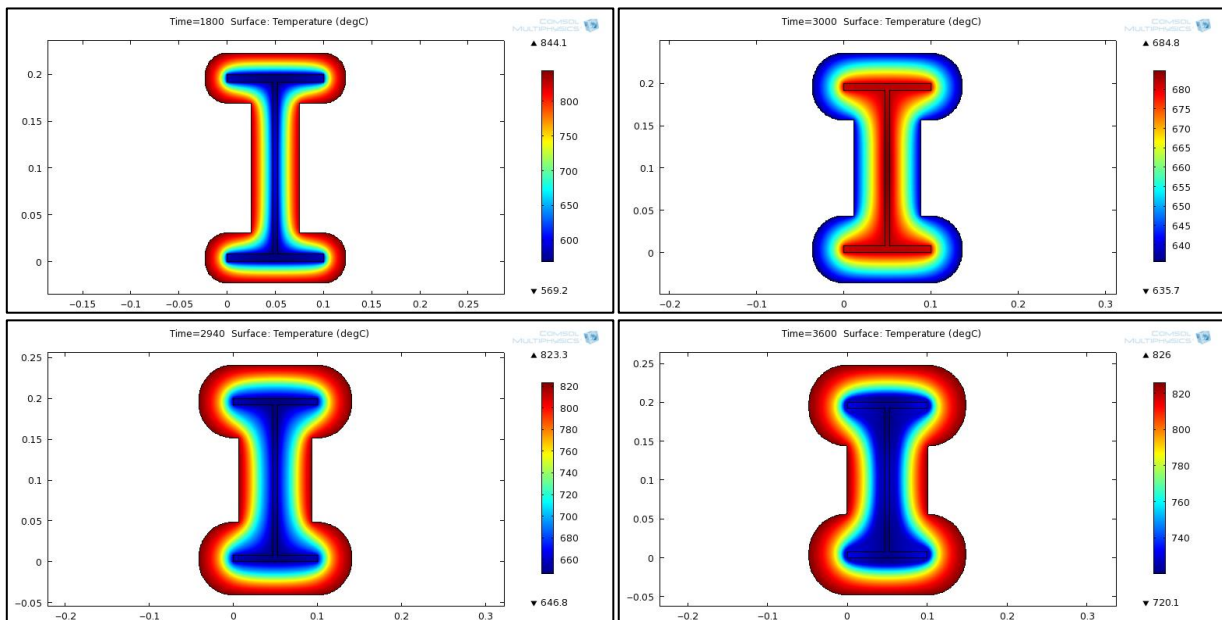


Figura 7-24: Gradientes térmicos de probetas P13, P14, P15 y P16, al término de la simulación.

## 7.5 Temperaturas según Modelación Computacional

Con el software de elementos finitos es posible determinar, sin cálculos adicionales, las temperaturas de cada probeta simulada, lo que deriva en las curvas tiempo-temperatura. En la Tabla 7-1 se muestran las temperaturas cada un minuto durante el ensayo y la simulación del modelo computacional para los perfiles M1. Las temperaturas de los otros perfiles se presentan en el Anexo E.

Tabla 7-1: Temperaturas del perfil según ensayos y modelo 3, probetas P1, P2, P3 y P4.

t [min]	P1		P2		P3		P4		t [min]	P1		P2		P3		P4	
	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]		TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]
0	49	47	53	54	40	40	46	42	51	-	-	489	448	441	396	340	417
1	59	51	62	58	50	46	51	46	52	-	-	497	452	450	400	343	422
2	76	62	82	67	72	55	66	56	53	-	-	504	457	458	405	344	427
3	92	74	101	79	80	65	80	67	54	-	-	515	461	464	410	350	433
4	112	87	124	92	97	75	96	78	55	-	-	526	465	470	415	350	438
5	131	100	136	105	114	86	112	89	56	-	-	531	469	478	419	353	443
6	157	117	158	119	122	96	124	101	57	-	-	535	474	486	424	357	449
7	178	133	180	132	131	107	134	112	58	-	-	543	478	492	429	360	454
8	205	150	202	146	141	118	145	123	59	-	-	555	482	500	434	363	460
9	229	167	211	159	151	128	156	134	60	-	-	564	486	507	439	366	465
10	251	184	225	172	161	138	165	144	61	-	-	-	-	514	443	373	471
11	265	200	238	184	169	148	174	154	62	-	-	-	-	522	449	377	476
12	285	216	250	197	179	157	184	165	63	-	-	-	-	527	455	381	482
13	298	231	256	208	190	166	194	175	64	-	-	-	-	535	460	382	488
14	310	245	261	218	195	176	202	184	65	-	-	-	-	542	466	384	494
15	316	259	267	229	201	185	207	193	66	-	-	-	-	550	471	390	500
16	326	272	274	239	211	194	214	202	67	-	-	-	-	557	477	394	505
17	334	284	278	248	220	201	220	211	68	-	-	-	-	557	483	397	511
18	341	295	281	257	227	209	225	218	69	-	-	-	-	573	490	401	517
19	347	306	287	265	232	217	229	226	70	-	-	-	-	579	496	405	524
20	356	316	291	274	240	225	235	234	71	-	-	-	-	587	503	410	530
21	365	326	294	282	246	233	240	241	72	-	-	-	-	595	509	413	537
22	375	335	299	290	251	240	244	249	73	-	-	-	-	601	515	415	543
23	382	344	303	298	257	246	248	256	74	-	-	-	-	606	520	419	549
24	391	352	308	305	265	253	252	263	75	-	-	-	-	613	525	423	556
25	402	360	315	312	271	259	257	269	76	-	-	-	-	620	530	430	562
26	412	369	317	319	277	266	261	276	77	-	-	-	-	627	535	433	569
27	421	376	324	326	282	272	264	283	78	-	-	-	-	631	541	435	575
28	432	384	332	333	290	278	268	289	79	-	-	-	-	639	545	439	581
29	443	391	335	339	296	284	273	295	80	-	-	-	-	646	550	444	588
30	455	398	340	345	301	290	276	301	81	-	-	-	-	653	555	446	594
31	463	405	348	350	308	296	280	307	82	-	-	-	-	657	559	453	601
32	475	412	353	356	314	301	284	313	83	-	-	-	-	664	564	454	607
33	487	419	359	362	319	307	287	319	84	-	-	-	-	671	569	460	613
34	501	426	366	368	326	312	290	325	85	-	-	-	-	677	573	463	620
35	510	432	373	373	331	318	293	331	86	-	-	-	-	681	578	469	627
36	521	439	380	378	338	323	296	336	87	-	-	-	-	688	582	474	633
37	534	446	387	383	344	328	301	342	88	-	-	-	-	694	587	478	640
38	547	452	392	388	352	333	303	347	89	-	-	-	-	692	592	479	647
39	556	459	401	393	359	339	306	353	90	-	-	-	-	-	-	482	653
40	-	-	407	398	367	343	309	358	91	-	-	-	-	-	-	486	660
41	-	-	413	403	374	348	311	364	92	-	-	-	-	-	-	492	666
42	-	-	423	408	381	353	314	369	93	-	-	-	-	-	-	495	673
43	-	-	429	412	387	358	318	374	94	-	-	-	-	-	-	498	680
44	-	-	437	417	395	363	322	380	95	-	-	-	-	-	-	503	684
45	-	-	442	422	403	368	325	385	96	-	-	-	-	-	-	510	686
46	-	-	453	426	409	372	325	390	97	-	-	-	-	-	-	512	689
47	-	-	461	431	415	377	329	395	98	-	-	-	-	-	-	518	692
48	-	-	469	435	422	382	331	401	99	-	-	-	-	-	-	523	695
49	-	-	472	439	429	386	334	406	100	-	-	-	-	-	-	521	697
50	-	-	481	444	435	391	337	411									

## 8 COMPARACIÓN DE LAS CURVAS DE LOS MODELOS

Al comparar la curva tiempo-temperatura cada ensayo con las determinadas por cada modelo, es posible realizar un análisis individual del comportamiento de los modelos respecto a los ensayos.

### 8.1 Probeta P1

Para P1, todos los modelos a partir de los 300 °C, predicen temperaturas inferiores a las desarrolladas durante el ensayo. El modelo 2 es el que presenta una mayor diferencia, cercana a los 100 °C a los 35 [min], en tanto, el modelo que presenta mejor ajuste es el 1.

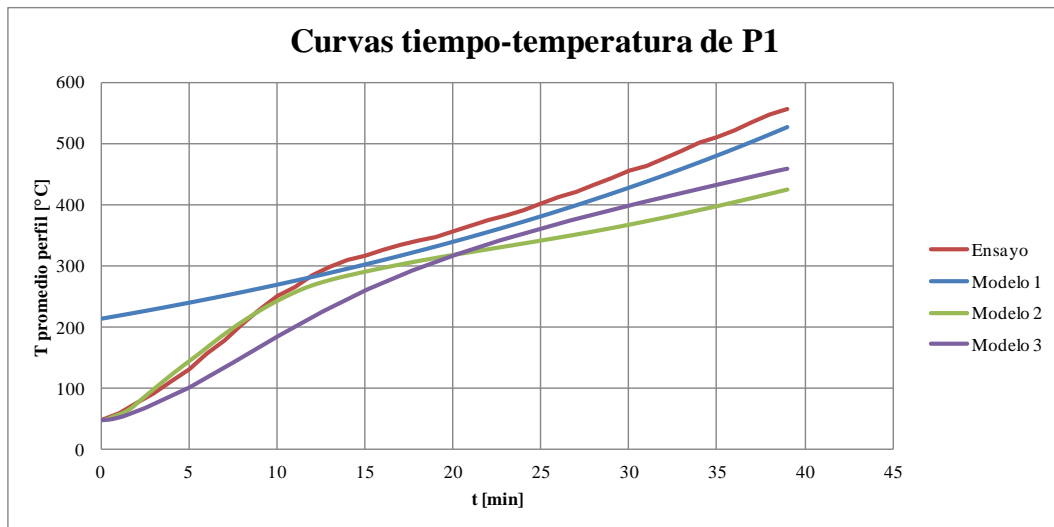


Figura 8-1: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P1, según ensayo y modelos.

### 8.2 Probeta P2

Para P2, los modelos 2 y 3 predicen temperaturas menores a las del ensayo, al contrario del modelo 1. Las diferencias de temperatura al final son cercanas a los 50 °C para modelos 1 y 3.

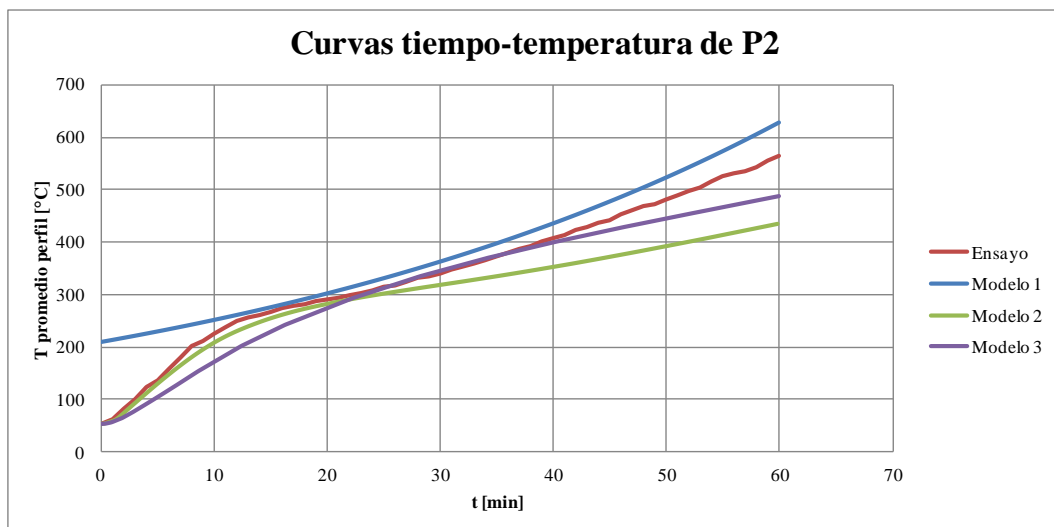


Figura 8-2: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P2, según ensayo y modelos.



### 8.3 Probeta P3

Para P3, todos los modelos predicen temperaturas inferiores al ensayo. Se observa que la curva del ensayo no presenta la curvatura de las probetas anteriores. El modelo 2 difiere en casi 100 °C a partir de los 70 [min] de ensayos. Los modelos 1 y 3 presentan un comportamiento similar sobre los 300 °C.

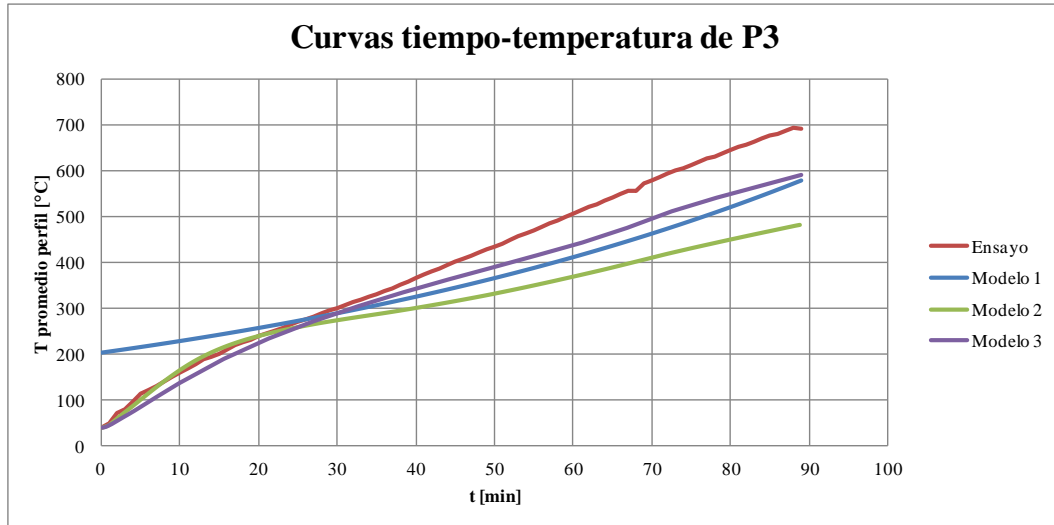


Figura 8-3: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P3, según ensayo y modelos.

### 8.4 Probeta P4

Para P4, el modelo 2 presenta el mejor ajuste, prácticamente sigue el mismo desarrollo a lo largo de todo el tiempo. En cambio los modelos 1 y 3, predicen temperaturas mayores que las del ensayo, cercanas a los 50 °C de diferencia el modelo 1 y a los 100 °C el modelo 3.

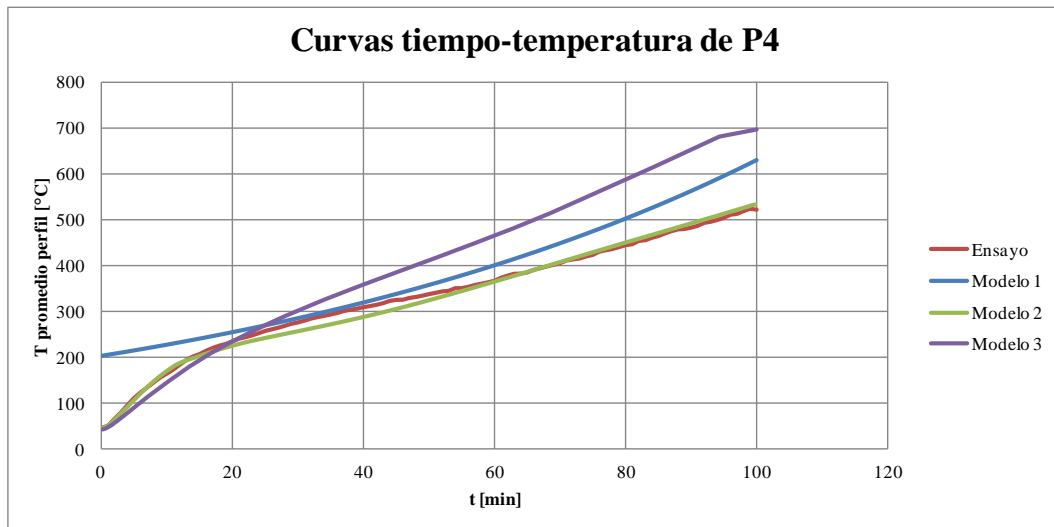


Figura 8-4: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P4, según ensayo y modelos.

## 8.5 Probeta P5

Para P5, los modelos 1 y 2 presentan los mejores ajustes sobre la curva del ensayo. Ambos modelos desarrollan la misma evolución en el tiempo a partir de los 300° C. El modelo 3, también presenta un buen ajuste a partir de los 350°C aprox., a pesar de comenzar por debajo del ensayo.

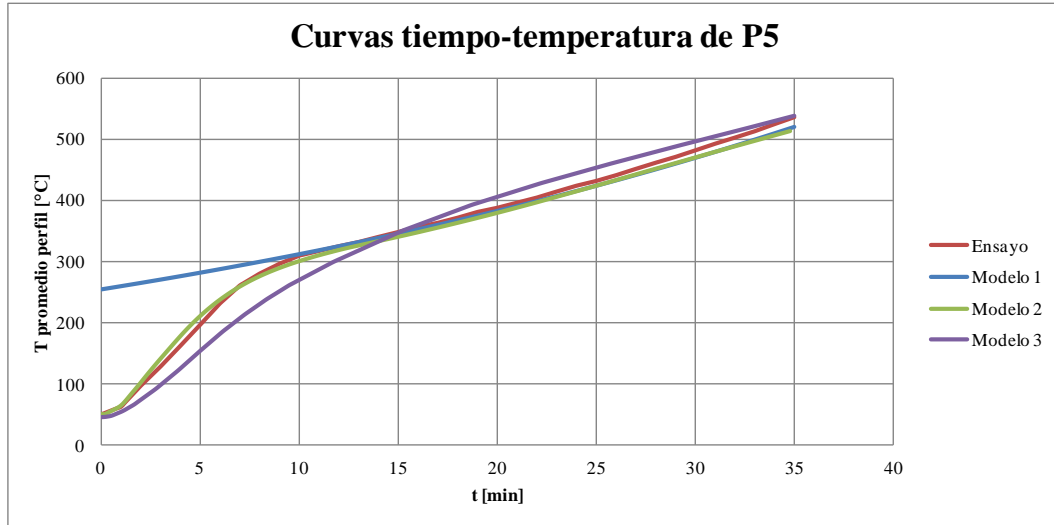


Figura 8-5: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P5, según ensayo y modelos.

## 8.6 Probeta P6

Para P6, el modelo 2 es el que presenta el mejor ajuste durante todo el tiempo. El modelo 1 se desarrolla cercano al ensayo entre los 300 °C y los 400 °C para luego presentar una diferencia cercana a los 20 °C. El modelo 3 predice temperaturas mayores de las del ensayo, manteniendo una diferencia cercana a los 50 °C, a partir de los 300 °C del ensayo.

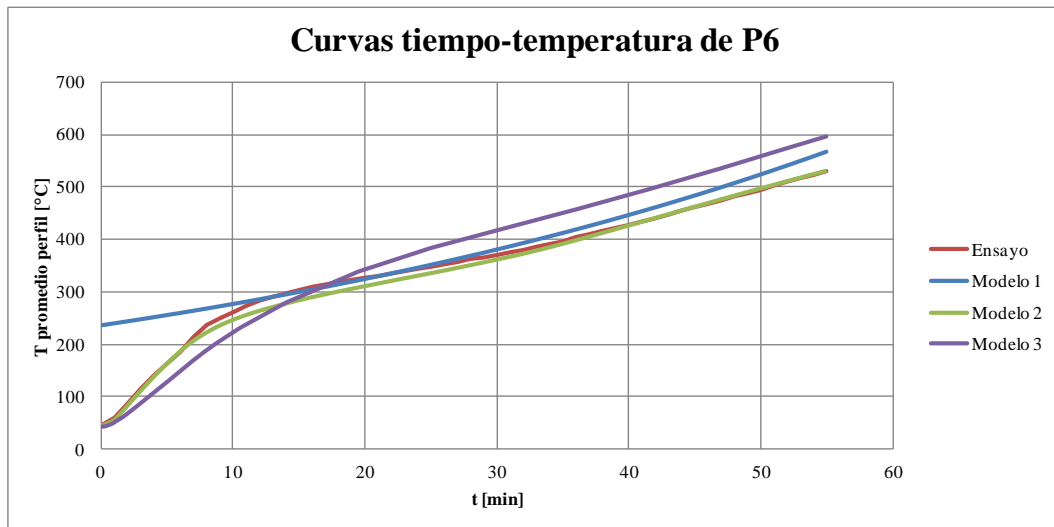


Figura 8-6: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P6, según ensayo y modelos.

## 8.7 Probeta P7

Para P7, los modelos 1 y 2 son los que mejor se ajustan a los resultados obtenidos con el ensayo. El modelo 3 presenta diferencias, desde los 300 °C predice temperaturas mayores, cercanas a los 100 °C.

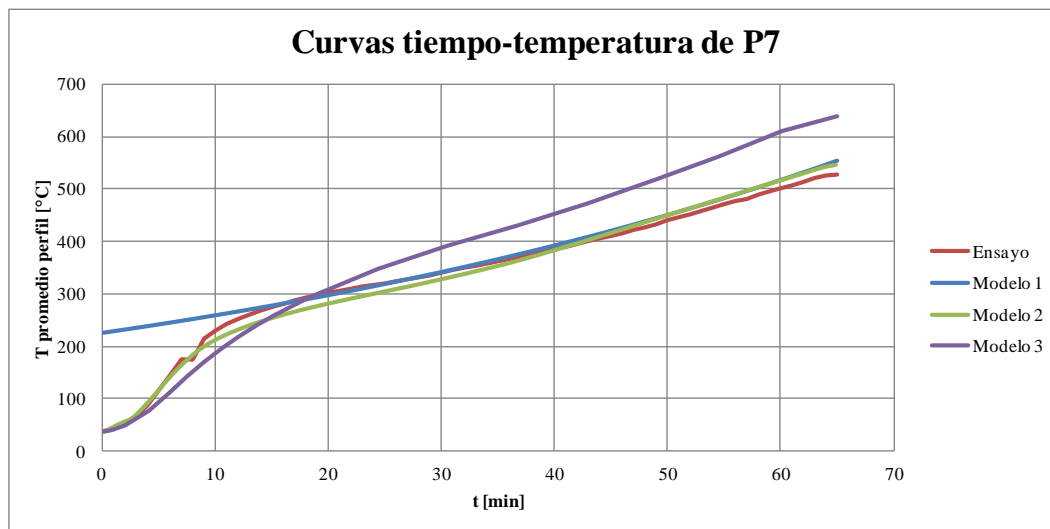


Figura 8-7: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P7, según ensayo y modelos.

## 8.8 Probeta P8

Para P8, el modelo que tiene mejor ajuste es el 1, desarrollándose conjuntamente con el ensayo a partir de los 250 °C. El modelo 2 difiere, a partir de los 300 °C, en casi 100 °C de manera constante. El modelo 3 tampoco se ajusta, desarrollando temperaturas superiores a los 100 °C.

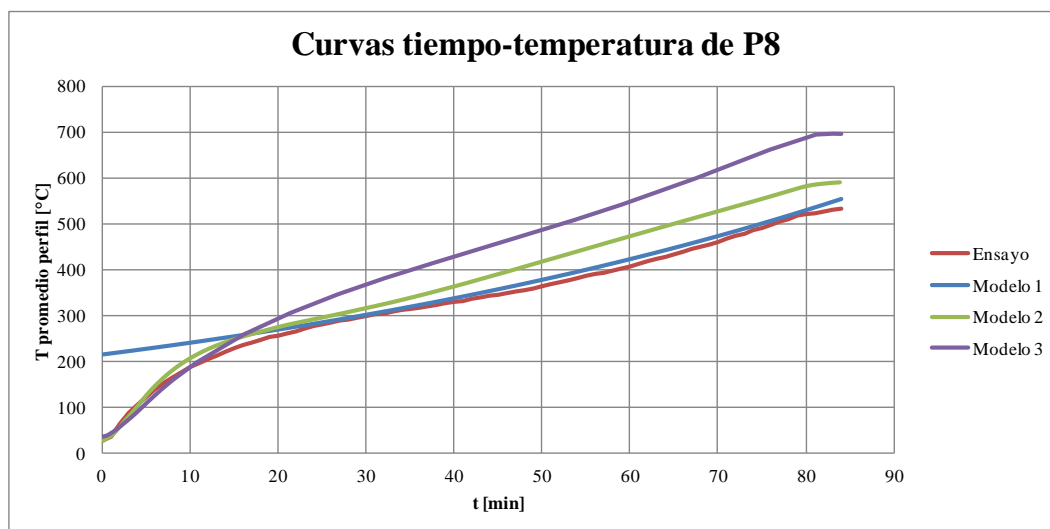


Figura 8-8: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P8, según ensayo y modelos.

## 8.9 Probeta P9

Para P9, los tres modelos presentan un buen ajuste, desarrollándose cerca del ensayo durante todo el tiempo. El modelo 2 es el que presenta el mejor ajuste, lo sigue el modelo 1 con temperaturas menores a las del ensayo en casi 50 °C, y finalmente el modelo 3, que primero predice temperaturas inferiores a las del ensayo, y luego de los 300 °C, temperaturas mayores.

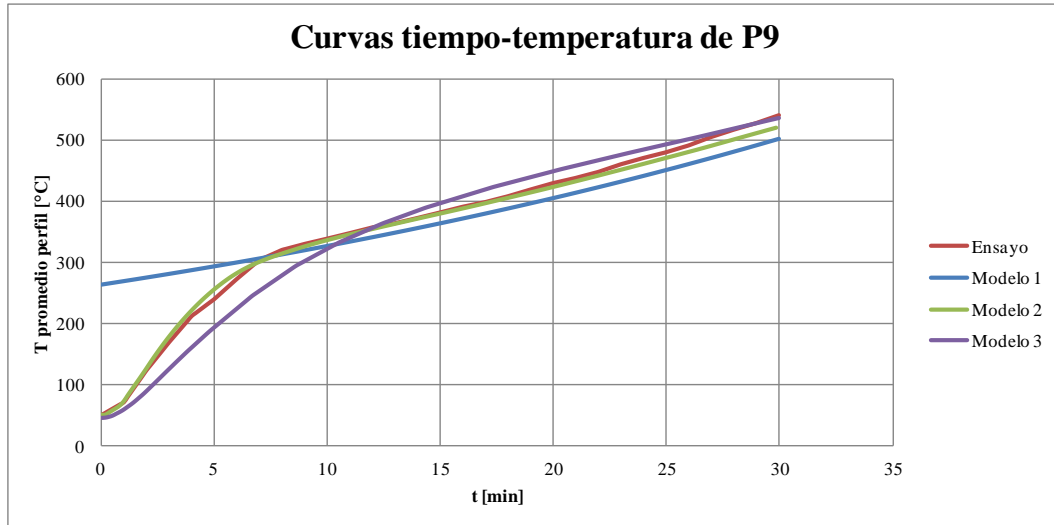


Figura 8-9: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P9, según ensayo y modelos.

## 8.10 Probeta P10

Para P10, el modelo que presenta mejor ajuste es el 1, prediciendo temperaturas levemente mayores que las del ensayo, en comparación a los otros modelos. El modelo 2 desarrolla una curvatura similar al ensayo pero mayor en cerca de 50 °C. El modelo 3 predice temperaturas mucho mayores que el ensayo, cercanas a los 100 °C durante la mayoría del tiempo.

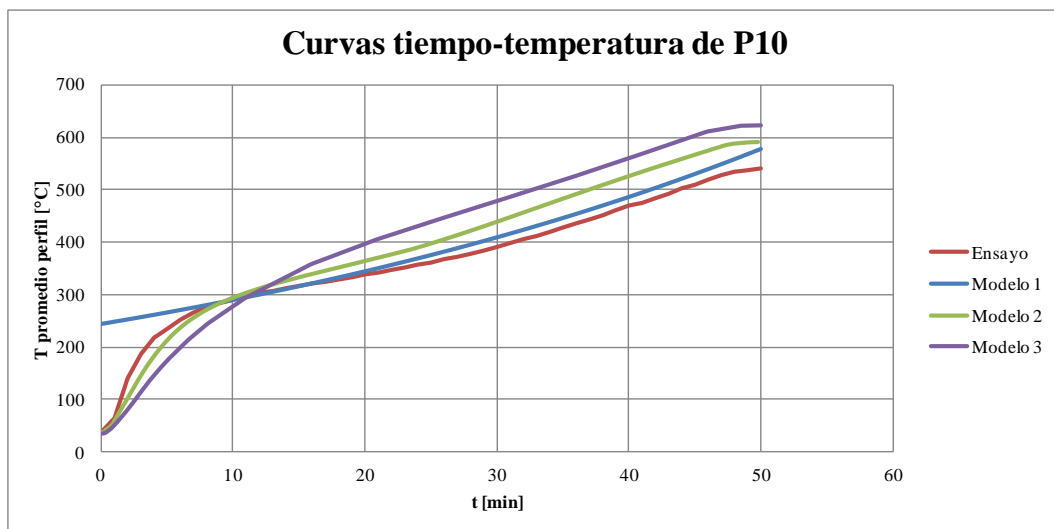


Figura 8-10: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P10, según ensayo y modelos.

## 8.11 Probeta P11

Para P11, el modelo que tiene mejor ajuste es el 1, a pesar que después de los 400 °C existe una diferencia y que predice temperaturas menores que el ensayo. El modelo 2 desarrolla una curvatura similar pero con una diferencia mantenida por un tiempo considerable. El modelo 3 predice temperaturas superiores a las del ensayo durante casi todo el tiempo.

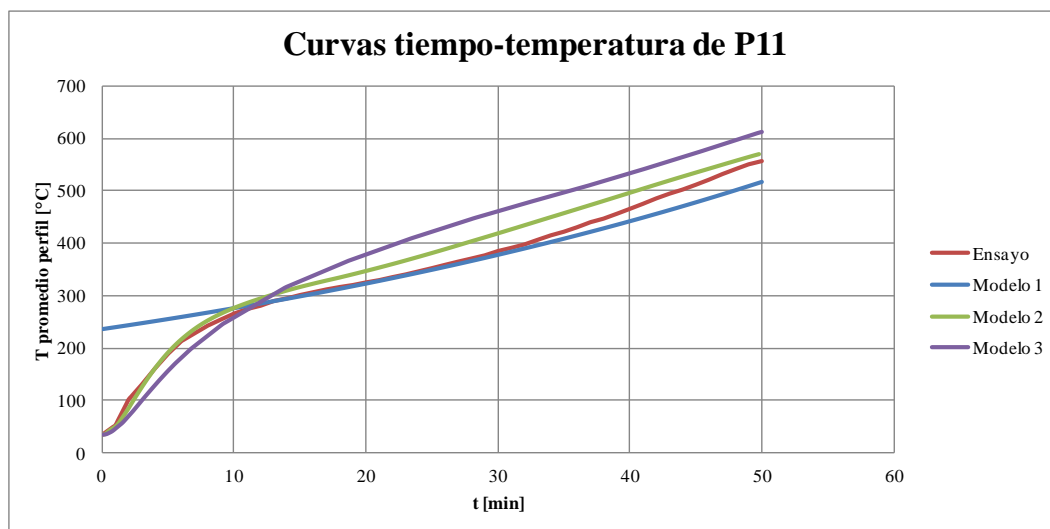


Figura 8-11: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P11, según ensayo y modelos.

## 8.12 Probeta P12

Para P12, la curva del modelo 1 es la que presenta un mejor ajuste, a pesar de estar levemente por debajo de la curva del ensayo. Los modelos 2 y 3 desarrollan curvas con marcadas diferencias respecto de la curva del ensayo, siendo el modelo 3 el que predice las mayores temperaturas.

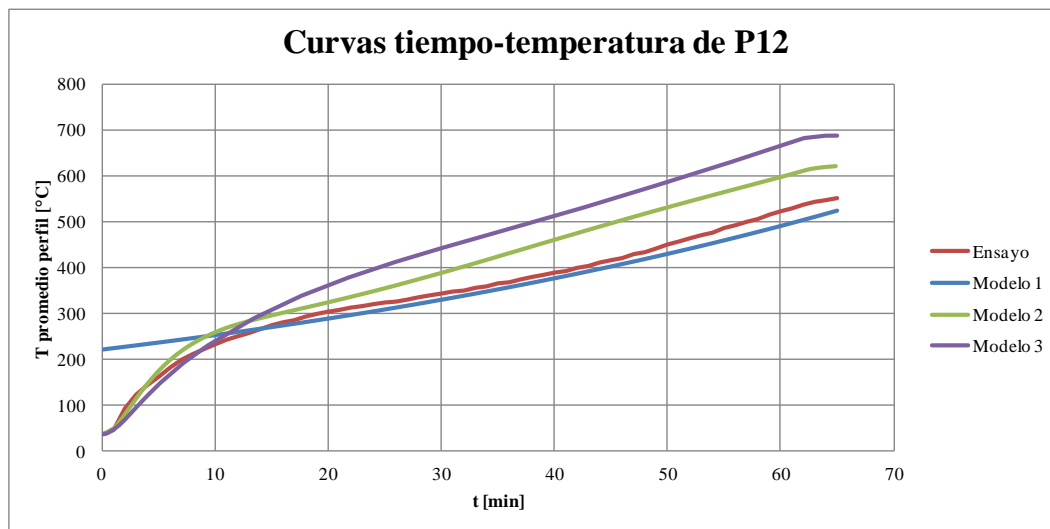


Figura 8-12: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P12, según ensayo y modelos.

### 8.13 Probeta P13

Para P13, los tres modelos presentan un ajuste aceptable para el ensayo. El modelo 1 se desarrolla prácticamente por la curva del ensayo a partir de los 300 °C. Los modelos 2 y 3 se desarrollan de manera similar a partir de los 350 °C aproximadamente, prediciendo temperatura superiores al ensayo en unos 30 °C, a partir de los 300 °C.

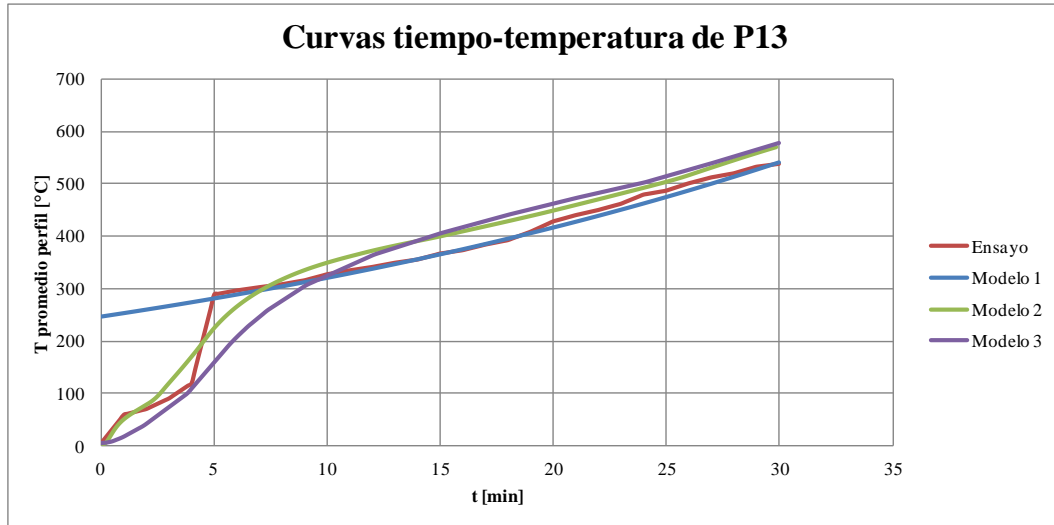


Figura 8-13: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P13, según ensayo y modelos.

### 8.14 Probeta P14

Para P14, el modelo 1 presenta el mejor ajuste, a pesar de no reproducir la meseta en la temperatura al final del ensayo. Este efecto es desarrollado por los modelos 2 y 3, pero siempre manteniéndose por sobre la curva del ensayo, en aproximadamente 100 °C.

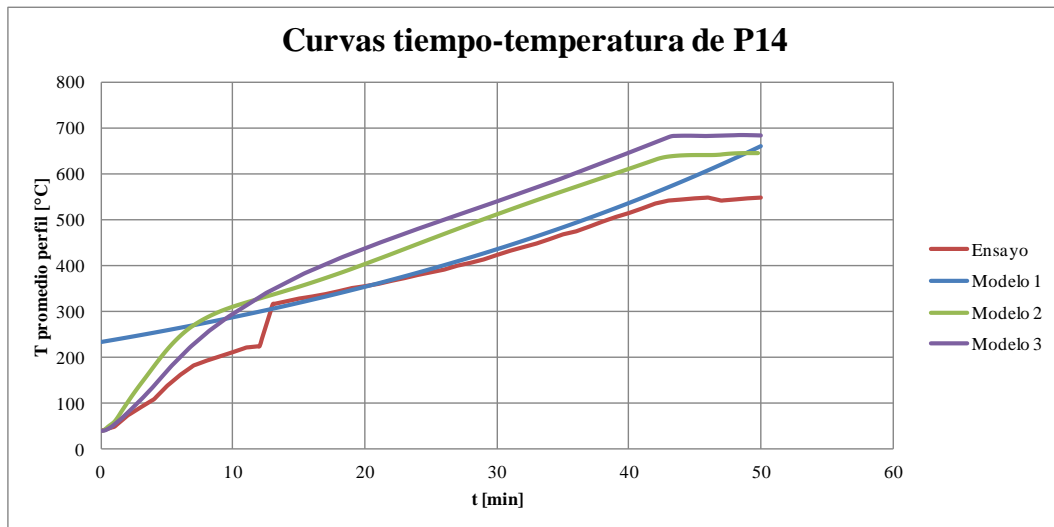


Figura 8-14: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P14, según ensayo y modelos.

## 8.15 Probeta P15

Para P15, el modelo 1 predice temperaturas similares a las del ensayo a partir de los 250 °C aproximadamente, lo que permite un mejor ajuste que los otros modelos. Estos desarrollan temperaturas superiores a las del ensayo durante casi todo el tiempo, con una diferencia superior a los 50 °C.

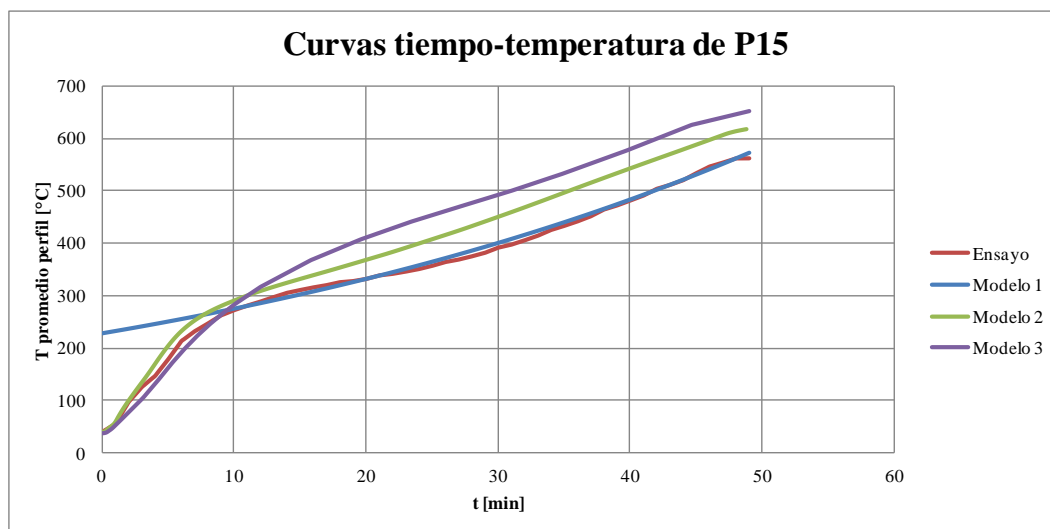


Figura 8-15: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P15, según ensayo y modelos.

## 8.16 Probeta P16

Para P16, el modelo que mejor predice las temperaturas del ensayo es el 1. Este ajuste se desarrolla a partir de los 250 °C aproximadamente. Los modelos 2 y 3 predicen temperaturas superiores al ensayo a partir de los 200 °C. Esta diferencia es superior a los 100 °C al final del ensayo.

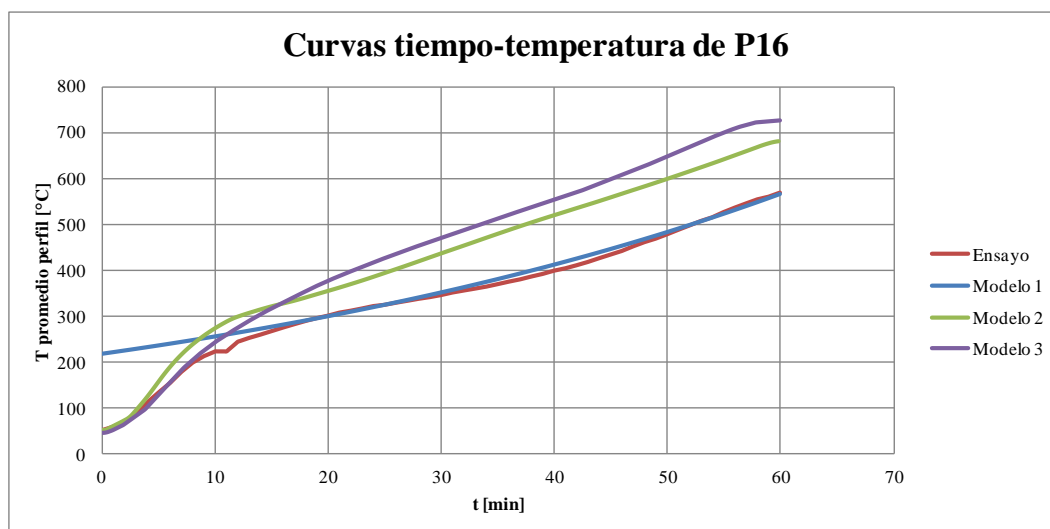


Figura 8-16: Curvas tiempo-temperatura de la probeta P16, según ensayo y modelos.

## 9 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

En el presente trabajo se estudiaron tres modelos computacionales capaces de abordar problemas de transferencia de calor dinámico que normalmente se presentan en las obras civiles y que actualmente son difíciles de abordar, especialmente cuando se protegen contra el fuego los elementos estructurales de acero, esto debido al desconocimiento técnico y al tiempo que significa un análisis experimental.

Aunque las tres modelaciones resuelven el problema planteado por distintas metodologías, la respuesta final resulta ser similar. En el modelo 1 se determina una fórmula en base a los resultados de una serie de ensayos experimentales, en el modelo 2 se valida la aplicación de una ecuación existente que no consideraba la pintura intumescente dentro de las opciones de solución de protección, y en el modelo 3 se valida el uso de un software que simula la transferencia de calor dinámica entre cualquier elemento.

Los modelos 1 y 2 resuelven problemas relativamente simples, tales como la protección con pintura intumescente de un pilar o viga de acero. Con estos modelos se puede estudiar el comportamiento al fuego, observando la variación de la temperatura promedio en la sección transversal y determinando el momento en que se alcanzan las temperaturas críticas que se estipulan en la norma chilena NCh 935/1 Of. 1997.

El modelo 3 en cambio, es capaz de determinar el comportamiento térmico de un elemento complejo como puede ser una viga protegida con pintura intumescente, más un cielo falso de yeso-cartón. El resultado que entrega este modelo, es más conservador ya que sus temperaturas, en general, son del orden de un 10% superior a las entregadas por los ensayos experimentales.

De estos tres modelos, su aplicabilidad dependerá de la configuración del elemento a estudiar, de la disponibilidad de información y herramientas computacionales requeridas y de los conocimientos y experiencia de quien realice el estudio.



## 10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] INN, Chile. NCh 933 Of. 97 Prevención de incendios en edificios – Terminología.
- [2] INN, Chile. NCh 935/1 Of. 97 Prevención de incendio en edificios – Ensayo de resistencia al fuego – Parte 1: Elementos de construcción en general.
- [3] INN, Chile. NCh 3040 Of.2007 Prevención de incendio en edificios - Pinturas intumescentes aplicadas en elementos estructurales de acero – Inspección.
- [4] MINVU, Chile. Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. Diciembre 2011.
- [5] Andrew H. Buchanan, “Structural Design for Fire Safety”, University of Canterbury, New Zealand, 2000.
- [6] Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1.2: General rules – Structural fire design.
- [7] Ericson Encina Z, “Clase 11 - Acero Estructural Análisis Incendio (EE) - 28-Ago-12”, IDIEM Universidad de Chile, 2012.
- [8] Y. Zhang, Y. C. Wang, C. G. Bailey, A. P. Taylor. Global modeling of fire protection performance of intumescent coating under different cone calorimeter heating conditions. Fire Safety Journal, 3 March 2012.
- [9] R. R. Krishnamoorthy & C. G. Bailey. Temperature distribution of intumescent coated steel framed connection at elevated temperature. September 2009.
- [10] Unidad de Ingeniería Contra Incendios, Informes de Ingeniería. IDIEM Universidad de Chile, 2012.

# 11 ANEXO A: RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Tabla 11-1: Temperaturas durante el ensayo, probetas P1, P2, P3 y P4.

t [min]	P1		P2		t [min]	P3		P4	
	T Horno [°C]	T Perfil [°C]	T Horno [°C]	T Perfil [°C]		T Horno [°C]	T Perfil [°C]	T Horno [°C]	T Perfil [°C]
0	47	49	54	53	0	40	40	42	46
1	207	59	225	62	1	307	50	288	51
2	309	76	393	82	2	385	72	409	66
3	370	92	423	101	3	386	80	442	80
4	397	112	456	124	4	441	97	495	96
5	415	131	479	136	5	473	114	530	112
6	483	157	502	158	6	498	122	569	124
7	507	178	525	180	7	514	131	593	134
8	527	205	564	202	8	530	141	611	145
9	545	229	574	211	9	552	151	625	156
10	561	251	594	225	10	568	161	636	165
11	582	265	621	238	11	588	169	651	174
12	648	285	640	250	12	626	179	741	184
13	675	298	647	256	13	635	190	764	194
14	698	310	647	261	14	648	195	769	202
15	714	316	659	267	15	660	201	741	207
16	724	326	666	274	16	669	211	745	214
17	717	334	674	278	17	680	220	749	220
18	726	341	691	281	18	686	227	757	225
19	737	347	698	287	19	696	232	760	229
20	742	356	707	291	20	698	240	766	235
21	755	365	711	294	21	708	246	772	240
22	761	375	720	299	22	714	251	796	244
23	767	382	739	303	23	718	257	806	248
24	776	391	747	308	24	723	265	809	252
25	784	402	755	315	25	737	271	816	257
26	790	412	758	317	26	750	277	821	261
27	797	421	760	324	27	752	282	830	264
28	806	432	764	332	28	764	290	838	268
29	814	443	771	335	29	770	296	841	273
30	823	455	774	340	30	781	301	849	276
31	829	463	775	348	31	783	308	852	280
32	835	475	789	353	32	788	314	856	284
33	841	487	794	359	33	791	319	861	287
34	844	501	795	366	34	798	326	866	290
35	854	510	802	373	35	806	331	869	293
36	861	521	809	380	36	822	338	871	296
37	865	534	813	387	37	830	344	882	301
38	874	547	814	392	38	838	352	882	303
39	878	556	821	401	39	844	359	885	306
40	-	-	821	407	40	850	367	889	309
41	-	-	823	413	41	853	374	891	311
42	-	-	832	423	42	853	381	896	314
43	-	-	834	429	43	860	387	905	318
44	-	-	837	437	44	864	395	904	322
45	-	-	841	442	45	867	403	910	325
46	-	-	841	453	46	872	409	912	325
47	-	-	845	461	47	874	415	917	329
48	-	-	849	469	48	879	422	917	331
49	-	-	850	472	49	883	429	921	334
50	-	-	851	481	50	893	435	927	337
51	-	-	853	489	51	893	441	927	340
52	-	-	857	497	52	897	450	929	343
53	-	-	858	504	53	900	458	930	344
54	-	-	865	515	54	907	464	936	350
55	-	-	866	526	55	909	470	939	350
56	-	-	867	531	56	911	478	938	353
57	-	-	868	535	57	914	486	945	357
58	-	-	872	543	58	922	492	945	360
59	-	-	872	555	59	919	500	946	363

t [min]	P1		P2		t [min]	P3		P4	
	T Horno [°C]	T Perfil [°C]	T Horno [°C]	T Perfil [°C]		T Horno [°C]	T Perfil [°C]	T Horno [°C]	T Perfil [°C]
60	-	-	877	564	60	923	507	946	366
61	-	-	-	-	61	927	514	951	373
62	-	-	-	-	62	931	522	957	377
63	-	-	-	-	63	934	527	955	381
64	-	-	-	-	64	945	535	960	382
65	-	-	-	-	65	954	542	961	384
66	-	-	-	-	66	957	550	963	390
67	-	-	-	-	67	960	557	968	394
68	-	-	-	-	68	960	557	972	397
69	-	-	-	-	69	965	573	972	401
70	-	-	-	-	70	971	579	975	405
71	-	-	-	-	71	972	587	975	410
72	-	-	-	-	72	955	595	982	413
73	-	-	-	-	73	953	601	982	415
74	-	-	-	-	74	954	606	985	419
75	-	-	-	-	75	949	613	984	423
76	-	-	-	-	76	946	620	984	430
77	-	-	-	-	77	946	627	991	433
78	-	-	-	-	78	950	631	990	435
79	-	-	-	-	79	947	639	995	439
80	-	-	-	-	80	945	646	992	444
81	-	-	-	-	81	949	653	992	446
82	-	-	-	-	82	949	657	997	453
83	-	-	-	-	83	948	664	998	454
84	-	-	-	-	84	947	671	1.002	460
85	-	-	-	-	85	949	677	1.005	463
86	-	-	-	-	86	956	681	1.005	469
87	-	-	-	-	87	952	688	1.011	474
88	-	-	-	-	88	953	694	1.008	478
89	-	-	-	-	89	848	692	1.010	479
90	-	-	-	-	90	-	-	1.010	482
91	-	-	-	-	91	-	-	1.016	486
92	-	-	-	-	92	-	-	1.019	492
93	-	-	-	-	93	-	-	1.016	495
94	-	-	-	-	94	-	-	1.019	498
95	-	-	-	-	95	-	-	1.020	503
96	-	-	-	-	96	-	-	1.024	510
97	-	-	-	-	97	-	-	1.024	512
98	-	-	-	-	98	-	-	1.024	518
99	-	-	-	-	99	-	-	1.033	523
100	-	-	-	-	100	-	-	911	521

Tabla 11-2: Temperaturas durante el ensayo, probetas P5, P6, P7 y P8.

t [min]	P5		P6		t [min]	P7		P8	
	T Horno [°C]	T Perfil [°C]	T Horno [°C]	T Perfil [°C]		T Horno [°C]	T Perfil [°C]	T Horno [°C]	T Perfil [°C]
0	46	51	42	47	0	37	38	36	29
1	267	63	286	61	1	145	44	267	37
2	409	98	415	88	2	182	51	386	66
3	450	129	452	116	3	302	66	424	89
4	528	163	486	142	4	432	87	532	107
5	561	197	510	164	5	507	116	599	124
6	584	232	588	186	6	540	145	633	141
7	606	261	629	215	7	620	175	632	155
8	628	280	652	237	8	620	175	646	167
9	644	296	675	250	9	677	214	659	178
10	656	310	686	262	10	696	230	669	189
11	670	317	700	274	11	711	243	678	197
12	696	325	715	284	12	716	252	686	206
13	746	332	725	291	13	720	260	699	214
14	761	340	734	297	14	727	268	706	222
15	775	348	742	304	15	732	275	718	230
16	788	357	749	310	16	753	281	722	237
17	796	363	757	314	17	759	287	725	242
18	802	372	765	319	18	766	293	732	248

t [min]	P5		P6		t [min]	P7		P8	
	T Horno [°C]	T Perfil [°C]	T Horno [°C]	T Perfil [°C]		T Horno [°C]	T Perfil [°C]	T Horno [°C]	T Perfil [°C]
19	810	381	767	323	19	775	298	736	254
20	816	388	776	327	20	778	302	734	257
21	822	396	779	330	21	780	306	746	262
22	829	404	785	335	22	786	310	777	266
23	833	414	787	340	23	787	314	787	273
24	835	424	786	344	24	792	317	797	278
25	839	432	787	348	25	801	320	804	282
26	845	441	801	353	26	800	324	812	286
27	849	451	808	357	27	810	328	818	290
28	851	461	807	363	28	821	331	824	292
29	853	471	815	366	29	825	335	830	296
30	859	481	815	370	30	829	340	829	300
31	861	492	820	376	31	833	346	839	304
32	863	502	838	380	32	836	350	837	305
33	868	513	847	386	33	839	353	848	310
34	874	524	860	391	34	844	358	855	313
35	879	536	864	396	35	849	362	860	315
36	-	-	875	405	36	867	366	860	318
37	-	-	873	410	37	872	370	867	321
38	-	-	881	416	38	883	376	873	324
39	-	-	882	422	39	887	380	872	328
40	-	-	889	427	40	893	385	878	331
41	-	-	893	434	41	900	389	882	333
42	-	-	896	440	42	901	395	889	338
43	-	-	898	447	43	908	401	889	341
44	-	-	904	455	44	913	406	889	344
45	-	-	907	462	45	911	410	891	346
46	-	-	911	468	46	920	415	896	350
47	-	-	913	474	47	924	422	899	353
48	-	-	916	482	48	928	427	904	356
49	-	-	915	488	49	931	433	904	360
50	-	-	921	494	50	933	441	906	365
51	-	-	926	502	51	935	446	907	370
52	-	-	927	510	52	938	452	908	374
53	-	-	930	517	53	940	458	915	378
54	-	-	929	522	54	944	464	919	382
55	-	-	932	530	55	951	471	921	388
56	-	-	-	-	56	958	477	924	392
57	-	-	-	-	57	962	481	926	394
58	-	-	-	-	58	963	489	929	399
59	-	-	-	-	59	965	495	931	403
60	-	-	-	-	60	969	501	935	408
61	-	-	-	-	61	975	507	939	414
62	-	-	-	-	62	980	513	944	419
63	-	-	-	-	63	984	521	943	424
64	-	-	-	-	64	891	526	946	429
65	-	-	-	-	65	798	527	949	434
66	-	-	-	-	66	-	-	953	440
67	-	-	-	-	67	-	-	957	446
68	-	-	-	-	68	-	-	960	451
69	-	-	-	-	69	-	-	964	455
70	-	-	-	-	70	-	-	965	461
71	-	-	-	-	71	-	-	968	469
72	-	-	-	-	72	-	-	971	475
73	-	-	-	-	73	-	-	971	479
74	-	-	-	-	74	-	-	975	487
75	-	-	-	-	75	-	-	982	492
76	-	-	-	-	76	-	-	983	498
77	-	-	-	-	77	-	-	987	506
78	-	-	-	-	78	-	-	986	511
79	-	-	-	-	79	-	-	989	519
80	-	-	-	-	80	-	-	932	522
81	-	-	-	-	81	-	-	820	524
82	-	-	-	-	82	-	-	775	527
83	-	-	-	-	83	-	-	741	531
84	-	-	-	-	84	-	-	726	534

**Tabla 11-3: Temperaturas durante el ensayo, probetas P9, P10, P11 y P12.**

t [min]	P9		P10		t [min]	P11		P12	
	T Horno [°C]	T Perfil [°C]	T Horno [°C]	T Perfil [°C]		T Horno [°C]	T Perfil [°C]	T Horno [°C]	T Perfil [°C]
0	46	50	35	39	0	36	35	36	37
1	300	71	368	66	1	260	53	267	46
2	447	124	466	142	2	464	102	463	93
3	481	169	580	187	3	519	131	524	123
4	509	212	547	218	4	561	161	565	144
5	532	240	577	235	5	592	189	591	162
6	600	273	614	253	6	619	213	613	182
7	649	304	633	266	7	632	228	632	198
8	673	321	645	277	8	654	243	645	211
9	689	330	659	284	9	665	254	658	222
10	706	339	670	290	10	675	266	669	232
11	714	348	685	298	11	684	274	685	242
12	721	357	696	304	12	692	280	724	250
13	731	364	708	307	13	700	289	744	257
14	737	373	724	312	14	710	294	757	265
15	742	382	730	317	15	717	301	769	274
16	749	391	740	321	16	722	306	777	280
17	758	399	745	324	17	732	311	785	285
18	762	408	753	329	18	773	316	793	293
19	766	419	758	333	19	787	320	801	298
20	773	430	765	339	20	795	325	809	303
21	777	438	766	342	21	801	329	814	307
22	784	448	771	347	22	809	335	821	312
23	787	461	775	352	23	817	340	824	315
24	793	471	807	357	24	819	346	830	320
25	798	480	816	361	25	824	352	835	323
26	802	492	822	368	26	830	358	838	325
27	819	505	829	372	27	834	364	843	329
28	822	517	835	378	28	833	370	844	335
29	828	528	840	384	29	835	376	850	339
30	832	541	848	391	30	841	384	851	343
31	-	-	853	398	31	843	390	858	347
32	-	-	858	405	32	847	397	858	349
33	-	-	862	411	33	850	406	863	355
34	-	-	864	419	34	850	414	870	358
35	-	-	868	428	35	855	421	870	365
36	-	-	875	435	36	859	430	872	367
37	-	-	879	443	37	864	439	878	373
38	-	-	879	451	38	871	446	880	379
39	-	-	886	460	39	875	455	882	383
40	-	-	891	469	40	882	465	887	388
41	-	-	891	474	41	886	474	886	391
42	-	-	895	483	42	890	485	895	398
43	-	-	897	491	43	893	494	895	403
44	-	-	903	502	44	894	501	899	410
45	-	-	906	509	45	898	511	905	415
46	-	-	909	518	46	903	520	904	420
47	-	-	911	527	47	908	531	910	428
48	-	-	731	533	48	910	540	911	433
49	-	-	671	536	49	911	549	912	441
50	-	-	627	540	50	893	556	919	449
51	-	-	-	-	51	-	-	918	456
52	-	-	-	-	52	-	-	922	463
53	-	-	-	-	53	-	-	923	470
54	-	-	-	-	54	-	-	928	475
55	-	-	-	-	55	-	-	931	485
56	-	-	-	-	56	-	-	932	491
57	-	-	-	-	57	-	-	935	499
58	-	-	-	-	58	-	-	941	505
59	-	-	-	-	59	-	-	940	514
60	-	-	-	-	60	-	-	948	521
61	-	-	-	-	61	-	-	951	528
62	-	-	-	-	62	-	-	952	536
63	-	-	-	-	63	-	-	834	542
64	-	-	-	-	64	-	-	761	546

**Tabla 11-4: Temperaturas durante el ensayo, probetas P13, P14, P15 y P16.**

t [min]	P13		P14		t [min]	P15		P16	
	T Horno [°C]	T Perfil [°C]	T Horno [°C]	T Perfil [°C]		T Horno [°C]	T Perfil [°C]	T Horno [°C]	T Perfil [°C]
0	5	5	39	39	0	37	41	46	53
1	164	59	265	49	1	309	56	170	61
2	199	70	367	73	2	344	98	205	71
3	309	90	403	91	3	395	126	317	89
4	416	119	481	108	4	501	147	423	114
5	590	288	544	138	5	550	179	518	135
6	594	296	570	162	6	630	214	546	155
7	597	302	625	182	7	656	232	564	179
8	601	308	645	192	8	680	247	584	200
9	606	316	663	202	9	697	262	574	214
10	624	327	722	211	10	706	272	576	224
11	632	335	745	221	11	722	281	576	224
12	647	341	761	224	12	731	289	665	245
13	664	349	775	315	13	738	297	685	253
14	678	355	785	321	14	746	305	697	260
15	723	367	797	328	15	752	311	708	268
16	728	373	806	332	16	760	316	741	276
17	733	384	814	337	17	770	320	794	283
18	739	392	820	344	18	778	325	815	290
19	746	408	832	350	19	782	328	812	296
20	758	428	836	355	20	785	332	811	302
21	762	440	838	360	21	786	338	820	308
22	768	450	846	366	22	800	341	827	312
23	773	462	849	372	23	805	346	835	317
24	780	479	853	379	24	805	351	845	322
25	795	487	855	385	25	808	357	846	325
26	848	501	859	391	26	809	364	848	330
27	855	512	864	399	27	819	369	855	334
28	860	520	868	406	28	828	375	860	338
29	863	532	871	413	29	831	382	862	342
30	860	538	875	423	30	837	391	861	346
31	-	-	881	432	31	842	397	862	352
32	-	-	887	440	32	852	405	868	356
33	-	-	889	448	33	859	414	876	360
34	-	-	894	457	34	868	425	878	365
35	-	-	897	467	35	874	433	880	370
36	-	-	904	474	36	877	441	883	376
37	-	-	911	484	37	883	451	881	381
38	-	-	917	495	38	888	464	884	387
39	-	-	921	505	39	894	472	884	392
40	-	-	926	514	40	901	481	883	399
41	-	-	931	524	41	903	490	894	405
42	-	-	934	535	42	909	503	895	411
43	-	-	776	541	43	914	511	901	418
44	-	-	695	543	44	923	520	916	427
45	-	-	644	546	45	927	533	922	434
46	-	-	634	548	46	933	545	929	442
47	-	-	776	541	47	934	553	929	452
48	-	-	695	543	48	839	561	936	461
49	-	-	644	546	49	803	561	941	469
50	-	-	634	548	50	-	-	949	478
51	-	-	-	-	51	-	-	950	488
52	-	-	-	-	52	-	-	955	498
53	-	-	-	-	53	-	-	955	507
54	-	-	-	-	54	-	-	959	515
55	-	-	-	-	55	-	-	964	527
56	-	-	-	-	56	-	-	964	536
57	-	-	-	-	57	-	-	966	546
58	-	-	-	-	58	-	-	969	554
59	-	-	-	-	59	-	-	936	560
60	-	-	-	-	60	-	-	804	569

## 12 ANEXO B: TEMPERATURAS DE LOS PERFILES SEGÚN MÓDELO 1

Tabla 12-1: Temperaturas perfil según ensayos y modelo 1, probetas P5, P6, P7 y P8.

t [min]	P5		P6		P7		P8		t [min]	P5		P6		P7		P8	
	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]		TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]
0	51	253	47	235	38	226	29	216	43	-	-	447	469	401	408	341	349
1	63	259	61	239	44	229	37	218	44	-	-	455	476	406	414	344	353
2	98	264	88	243	51	232	66	221	45	-	-	462	484	410	420	346	357
3	129	270	116	247	66	236	89	223	46	-	-	468	492	415	426	350	361
4	163	275	142	251	87	239	107	226	47	-	-	474	500	422	432	353	365
5	197	281	164	255	116	242	124	228	48	-	-	482	508	427	438	356	370
6	232	287	186	259	145	246	141	231	49	-	-	488	516	433	444	360	374
7	261	293	215	263	175	249	155	233	50	-	-	494	524	441	450	365	378
8	280	299	237	267	175	252	167	236	51	-	-	502	533	446	456	370	382
9	296	305	250	272	214	256	178	239	52	-	-	510	542	452	462	374	386
10	310	311	262	276	230	259	189	241	53	-	-	517	550	458	469	378	391
11	317	318	274	281	243	263	197	244	54	-	-	522	559	464	475	382	395
12	325	324	284	285	252	267	206	247	55	-	-	530	568	471	482	388	400
13	332	331	291	290	260	270	214	250	56	-	-	-	-	477	489	392	404
14	340	338	297	294	268	274	222	252	57	-	-	-	-	481	495	394	409
15	348	345	304	299	275	278	230	255	58	-	-	-	-	489	502	399	413
16	357	352	310	304	281	282	237	258	59	-	-	-	-	495	509	403	418
17	363	359	314	309	287	286	242	261	60	-	-	-	-	501	516	408	423
18	372	367	319	314	293	290	248	264	61	-	-	-	-	507	523	414	427
19	381	375	323	319	298	294	254	267	62	-	-	-	-	513	531	419	432
20	388	382	327	324	302	298	257	270	63	-	-	-	-	521	538	424	437
21	396	390	330	329	306	302	262	273	64	-	-	-	-	526	545	429	442
22	404	398	335	335	310	306	266	276	65	-	-	-	-	527	553	434	447
23	414	407	340	340	314	310	273	279	66	-	-	-	-	-	-	440	452
24	424	415	344	346	317	315	278	282	67	-	-	-	-	-	-	446	457
25	432	424	348	351	320	319	282	286	68	-	-	-	-	-	-	451	462
26	441	433	353	357	324	323	286	289	69	-	-	-	-	-	-	455	468
27	451	442	357	363	328	328	290	292	70	-	-	-	-	-	-	461	473
28	461	451	363	369	331	332	292	295	71	-	-	-	-	-	-	469	478
29	471	460	366	375	335	337	296	299	72	-	-	-	-	-	-	475	484
30	481	470	370	381	340	342	300	302	73	-	-	-	-	-	-	479	489
31	492	479	376	387	346	346	304	305	74	-	-	-	-	-	-	487	495
32	502	489	380	393	350	351	305	309	75	-	-	-	-	-	-	492	500
33	513	499	386	399	353	356	310	312	76	-	-	-	-	-	-	498	506
34	524	510	391	406	358	361	313	316	77	-	-	-	-	-	-	506	511
35	536	520	396	412	362	366	315	319	78	-	-	-	-	-	-	511	517
36	-	-	405	419	366	371	318	323	79	-	-	-	-	-	-	519	523
37	-	-	410	426	370	376	321	327	80	-	-	-	-	-	-	522	529
38	-	-	416	433	376	381	324	330	81	-	-	-	-	-	-	524	535
39	-	-	422	440	380	387	328	334	82	-	-	-	-	-	-	527	541
40	-	-	427	447	385	392	331	338	83	-	-	-	-	-	-	531	547
41	-	-	434	454	389	397	333	342	84	-	-	-	-	-	-	534	553
42	-	-	440	461	395	403	338	345									

Tabla 12-2: Temperaturas perfil según ensayos y modelo 1, probetas P9, P10, P11 y P12.

t [min]	P9		P10		P11		P12		t [min]	P9		P10		P11		P12	
	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]		TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]
0	50	264	39	243	35	236	37	223	33	-	-	411	430	406	395	355	344
1	71	270	66	248	53	239	46	226	34	-	-	419	438	414	401	358	348
2	124	275	142	252	102	243	93	229	35	-	-	428	445	421	408	365	353
3	169	281	187	256	131	247	123	232	36	-	-	435	453	430	414	367	357
4	212	287	218	261	161	251	144	235	37	-	-	443	461	439	421	373	362
5	240	294	235	265	189	255	162	238	38	-	-	451	469	446	427	379	367
6	273	300	253	270	213	259	182	241	39	-	-	460	477	455	434	383	372
7	304	307	266	275	228	263	198	244	40	-	-	469	485	465	441	388	377
8	321	313	277	279	243	267	211	248	41	-	-	474	494	474	448	391	382
9	330	320	284	284	254	271	222	251	42	-	-	483	502	485	455	398	387
10	339	327	290	289	266	276	232	254	43	-	-	491	511	494	462	403	392

t [min]	P9		P10		P11		P12		t [min]	P9		P10		P11		P12	
	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]		TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]
11	348	334	298	294	274	280	242	258	44	-	-	502	520	501	469	410	397
12	357	341	304	299	280	284	250	261	45	-	-	509	529	511	477	415	402
13	364	349	307	305	289	289	257	264	46	-	-	518	538	520	484	420	407
14	373	356	312	310	294	293	265	268	47	-	-	527	548	531	492	428	413
15	382	364	317	315	301	298	274	271	48	-	-	533	557	540	500	433	418
16	391	372	321	321	306	303	280	275	49	-	-	536	567	549	508	441	424
17	399	380	324	326	311	307	285	279	50	-	-	540	577	556	516	449	429
18	408	388	329	332	316	312	293	282	51	-	-	-	-	-	-	456	435
19	419	397	333	338	320	317	298	286	52	-	-	-	-	-	-	463	441
20	430	405	339	344	325	322	303	290	53	-	-	-	-	-	-	470	447
21	438	414	342	350	329	327	307	294	54	-	-	-	-	-	-	475	453
22	448	423	347	356	335	333	312	297	55	-	-	-	-	-	-	485	459
23	461	432	352	362	340	338	315	301	56	-	-	-	-	-	-	491	465
24	471	442	357	368	346	343	320	305	57	-	-	-	-	-	-	499	471
25	480	451	361	375	352	349	323	309	58	-	-	-	-	-	-	505	477
26	492	461	368	381	358	354	325	314	59	-	-	-	-	-	-	514	483
27	505	471	372	388	364	360	329	318	60	-	-	-	-	-	-	521	490
28	517	481	378	395	370	365	335	322	61	-	-	-	-	-	-	528	496
29	528	492	384	401	376	371	339	326	62	-	-	-	-	-	-	536	503
30	541	502	391	408	384	377	343	330	63	-	-	-	-	-	-	542	509
31	-	-	398	416	390	383	347	335	64	-	-	-	-	-	-	546	516
32	-	-	405	423	397	389	349	339	65	-	-	-	-	-	-	550	523

Tabla 12-3: Temperaturas del perfil según ensayos y modelo 1, probetas P13, P14, P15 y P16.

t [min]	P13		P14		P15		P16		t [min]	P13		P14		P15		P16	
	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]		TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]
0	5	247	39	233	41	228	53	219	31	-	-	432	444	397	408	352	358
1	59	254	49	238	56	232	61	223	32	-	-	440	453	405	416	356	364
2	70	261	73	243	98	236	71	227	33	-	-	448	463	414	424	360	370
3	90	267	91	248	126	241	89	230	34	-	-	457	473	425	432	365	376
4	119	274	108	253	147	246	114	234	35	-	-	467	483	433	440	370	382
5	288	282	138	259	179	250	135	238	36	-	-	474	493	441	448	376	388
6	296	289	162	264	214	255	155	241	37	-	-	484	503	451	457	381	394
7	302	297	182	270	232	260	179	245	38	-	-	495	514	464	466	387	400
8	308	305	192	275	247	265	200	249	39	-	-	505	524	472	474	392	406
9	316	313	202	281	262	270	214	253	40	-	-	514	536	481	483	399	413
10	327	321	211	287	272	275	224	257	41	-	-	524	547	490	493	405	419
11	335	329	221	293	281	280	224	261	42	-	-	535	558	503	502	411	426
12	341	338	224	299	289	285	245	265	43	-	-	541	570	511	511	418	433
13	349	347	315	305	297	291	253	270	44	-	-	543	582	520	521	427	440
14	355	356	321	312	305	296	260	274	45	-	-	546	594	533	531	434	447
15	367	365	328	318	311	302	268	278	46	-	-	548	607	545	541	442	454
16	373	375	332	325	316	308	276	283	47	-	-	541	619	553	551	452	461
17	384	385	337	332	320	314	283	287	48	-	-	543	632	561	562	461	469
18	392	395	344	339	325	320	290	292	49	-	-	546	646	561	573	469	476
19	408	405	350	346	328	326	296	296	50	-	-	548	659	-	-	478	484
20	428	416	355	353	332	332	302	301	51	-	-	-	-	-	-	488	491
21	440	427	360	361	338	338	308	306	52	-	-	-	-	-	-	498	499
22	450	438	366	368	341	344	312	311	53	-	-	-	-	-	-	507	507
23	462	450	372	376	346	351	317	316	54	-	-	-	-	-	-	515	515
24	479	462	379	384	351	358	322	321	55	-	-	-	-	-	-	527	523
25	487	474	385	392	357	365	325	326	56	-	-	-	-	-	-	536	532
26	501	486	391	400	364	371	330	331	57	-	-	-	-	-	-	546	540
27	512	499	399	409	369	378	334	336	58	-	-	-	-	-	-	554	549
28	520	512	406	417	375	386	338	342	59	-	-	-	-	-	-	560	557
29	532	526	413	426	382	393	342	347	60	-	-	-	-	-	-	569	566
30	538	540	423	435	391	400	346	353									



# 13 ANEXO C: CONDUCTIVIDADES TÉRMICAS RELATIVAS DE LA PI

Tabla 13-1: Conductividad térmica relativa de la PI para P2.

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
0	54	255,212	900	463	0,424	1800	557	0,419	2700	641	0,729
10	69	6,145	910	464	0,424	1810	558	0,421	2710	642	0,733
20	84	3,114	920	465	0,424	1820	558	0,422	2720	643	0,738
30	99	2,089	930	466	0,424	1830	559	0,423	2730	644	0,743
40	114	1,572	940	468	0,425	1840	560	0,425	2740	645	0,748
50	129	1,263	950	469	0,425	1850	561	0,426	2750	646	0,753
60	144	2,381	960	470	0,252	1860	561	0,317	2760	647	0,525
70	159	2,081	970	471	0,251	1870	563	0,316	2770	648	0,526
80	175	1,847	980	472	0,251	1880	564	0,315	2780	649	0,527
90	191	1,662	990	473	0,251	1890	566	0,314	2790	650	0,529
100	206	1,513	1000	474	0,251	1900	568	0,314	2800	651	0,531
110	222	1,388	1010	475	0,250	1910	569	0,313	2810	652	0,532
120	237	1,153	1020	476	0,174	1920	571	0,321	2820	653	0,534
130	242	1,149	1030	478	0,173	1930	572	0,321	2830	654	0,536
140	246	1,146	1040	480	0,172	1940	573	0,321	2840	655	0,537
150	250	1,142	1050	481	0,171	1950	574	0,322	2850	656	0,539
160	254	1,139	1060	483	0,170	1960	575	0,322	2860	657	0,540
170	258	1,136	1070	485	0,169	1970	576	0,322	2870	658	0,541
180	262	1,424	1080	486	0,334	1980	577	0,359	2880	659	0,254
190	266	1,421	1090	487	0,335	1990	577	0,360	2890	659	0,255
200	271	1,419	1100	488	0,335	2000	578	0,361	2900	659	0,255
210	276	1,417	1110	489	0,335	2010	578	0,362	2910	660	0,256
220	280	1,415	1120	490	0,335	2020	579	0,363	2920	660	0,256
230	285	1,413	1130	491	0,335	2030	580	0,364	2930	661	0,257
240	290	0,789	1140	492	0,177	2040	580	0,403	2940	661	0,619
250	293	0,787	1150	494	0,177	2050	582	0,404	2950	662	0,623
260	296	0,784	1160	495	0,177	2060	583	0,404	2960	663	0,626
270	299	0,782	1170	496	0,176	2070	584	0,404	2970	663	0,629
280	302	0,779	1180	497	0,176	2080	585	0,405	2980	664	0,632
290	305	0,777	1190	498	0,175	2090	586	0,405	2990	665	0,636
300	308	1,326	1200	499	0,175	2100	587	0,396	3000	666	0,566
310	311	1,331	1210	499	0,175	2110	589	0,396	3010	667	0,568
320	315	1,335	1220	500	0,175	2120	590	0,397	3020	668	0,571
330	319	1,338	1230	501	0,175	2130	591	0,397	3030	668	0,573
340	323	1,342	1240	501	0,175	2140	592	0,397	3040	669	0,574
350	326	1,345	1250	502	0,175	2150	593	0,398	3050	670	0,577
360	330	1,297	1260	502	0,276	2160	594	0,408	3060	671	0,616
370	334	1,300	1270	504	0,276	2170	595	0,408	3070	672	0,618
380	337	1,302	1280	505	0,276	2180	596	0,409	3080	673	0,621
390	341	1,305	1290	506	0,275	2190	597	0,410	3090	674	0,623
400	345	1,307	1300	507	0,275	2200	598	0,411	3100	675	0,625
410	348	1,309	1310	508	0,275	2210	599	0,412	3110	676	0,627
420	352	1,375	1320	509	0,220	2220	600	0,307	3120	677	0,503
430	357	1,367	1330	511	0,219	2230	600	0,308	3130	678	0,505
440	362	1,359	1340	513	0,218	2240	601	0,309	3140	678	0,507
450	367	1,352	1350	515	0,217	2250	601	0,310	3150	679	0,510
460	373	1,344	1360	517	0,215	2260	602	0,310	3160	680	0,512
470	378	1,337	1370	519	0,214	2270	603	0,311	3170	680	0,514
480	383	0,580	1380	521	0,266	2280	603	0,526	3180	681	0,890
490	385	0,580	1390	522	0,265	2290	604	0,527	3190	682	0,894
500	386	0,581	1400	523	0,265	2300	606	0,528	3200	684	0,898
510	388	0,581	1410	524	0,265	2310	607	0,529	3210	685	0,902
520	390	0,581	1420	525	0,265	2320	609	0,530	3220	687	0,906
530	391	0,582	1430	526	0,265	2330	610	0,531	3230	689	0,909
540	393	0,843	1440	527	0,370	2340	611	0,364	3240	690	0,807
550	396	0,843	1450	529	0,371	2350	612	0,365	3250	691	0,813
560	398	0,842	1460	530	0,371	2360	612	0,367	3260	692	0,818
570	401	0,841	1470	531	0,371	2370	613	0,368	3270	693	0,823
580	404	0,840	1480	532	0,371	2380	613	0,369	3280	694	0,829
590	407	0,839	1490	534	0,371	2390	614	0,370	3290	695	0,834
600	410	0,739	1500	535	0,133	2400	614	0,352	3300	696	0,455

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
610	413	0,735	1510	535	0,133	2410	615	0,352	3310	696	0,456
620	416	0,731	1520	536	0,133	2420	616	0,353	3320	697	0,457
630	419	0,728	1530	536	0,133	2430	616	0,354	3330	697	0,459
640	423	0,725	1540	537	0,133	2440	617	0,355	3340	698	0,460
650	426	0,721	1550	537	0,133	2450	618	0,356	3350	698	0,461
660	429	0,688	1560	538	0,371	2460	618	0,601	3360	699	0,337
670	432	0,687	1570	538	0,372	2470	620	0,602	3370	699	0,338
680	434	0,685	1580	539	0,373	2480	621	0,603	3380	700	0,338
690	437	0,684	1590	540	0,374	2490	623	0,605	3390	700	0,339
700	439	0,683	1600	541	0,375	2500	624	0,606	3400	701	0,340
710	442	0,682	1610	541	0,376	2510	626	0,607	3410	701	0,341
720	445	0,383	1620	542	0,413	2520	627	0,340	3420	701	0,655
730	446	0,383	1630	543	0,414	2530	628	0,341	3430	702	0,657
740	447	0,383	1640	544	0,415	2540	629	0,342	3440	703	0,660
750	448	0,383	1650	545	0,416	2550	629	0,342	3450	704	0,662
760	449	0,384	1660	546	0,417	2560	630	0,343	3460	705	0,664
770	450	0,384	1670	547	0,418	2570	631	0,344	3470	706	0,666
780	452	0,259	1680	548	0,146	2580	631	0,511	3480	707	1,091
790	452	0,259	1690	549	0,146	2590	632	0,513	3490	708	1,101
800	452	0,260	1700	550	0,146	2600	633	0,515	3500	709	1,110
810	453	0,261	1710	550	0,145	2610	634	0,517	3510	710	1,120
820	453	0,261	1720	551	0,145	2620	635	0,518	3520	711	1,130
830	453	0,262	1730	552	0,145	2630	636	0,520	3530	713	1,140
840	454	0,351	1740	553	0,289	2640	637	0,309	3540	714	0,844
850	455	0,350	1750	554	0,289	2650	638	0,309	3550	715	0,848
860	457	0,350	1760	554	0,290	2660	638	0,310	3560	716	0,851
870	458	0,349	1770	555	0,290	2670	639	0,310	3570	717	0,855
880	460	0,348	1780	555	0,291	2680	640	0,310	3580	718	0,858
890	461	0,348	1790	556	0,291	2690	641	0,311	3590	720	0,862

Tabla 13-2: Conductividad térmica relativa de la PI para P3.

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
0	40	3922,558	1340	484	0,411	2680	633	0,578	4020	758	0,000
10	63	6,096	1350	485	0,412	2690	634	0,579	4030	758	0,000
20	86	3,055	1360	486	0,412	2700	635	0,465	4040	758	0,000
30	109	2,042	1370	487	0,413	2710	636	0,466	4050	758	0,000
40	132	1,536	1380	487	0,543	2720	637	0,466	4060	758	0,000
50	156	1,231	1390	489	0,544	2730	638	0,467	4070	758	0,000
60	179	2,393	1400	490	0,545	2740	639	0,467	4080	758	1,698
70	187	2,320	1410	491	0,546	2750	639	0,468	4090	760	1,710
80	195	2,254	1420	492	0,546	2760	640	0,494	4100	762	1,725
90	204	2,192	1430	493	0,548	2770	641	0,495	4110	764	1,740
100	212	2,134	1440	494	0,466	2780	642	0,497	4120	765	1,753
110	220	2,077	1450	496	0,465	2790	642	0,498	4130	767	1,768
120	229	0,736	1460	497	0,464	2800	643	0,499	4140	769	0,718
130	229	0,741	1470	499	0,463	2810	644	0,500	4150	770	0,719
140	230	0,745	1480	501	0,462	2820	644	0,581	4160	771	0,720
150	231	0,749	1490	502	0,461	2830	645	0,582	4170	772	0,721
160	232	0,754	1500	504	0,366	2840	647	0,583	4180	773	0,722
170	232	0,758	1510	506	0,365	2850	648	0,584	4190	774	0,724
180	233	1,533	1520	507	0,364	2860	649	0,585	4200	775	0,817
190	239	1,506	1530	509	0,364	2870	650	0,586	4210	776	0,822
200	245	1,480	1540	510	0,363	2880	651	0,561	4220	777	0,825
210	251	1,454	1550	512	0,362	2890	652	0,562	4230	777	0,828
220	257	1,429	1560	513	0,407	2900	652	0,563	4240	778	0,832
230	263	1,405	1570	514	0,408	2910	653	0,564	4250	779	0,835
240	269	1,468	1580	514	0,408	2920	654	0,566	4260	780	0,895
250	273	1,463	1590	515	0,409	2930	655	0,567	4270	779	0,906
260	277	1,458	1600	516	0,410	2940	656	0,460	4280	778	0,918
270	281	1,453	1610	516	0,411	2950	657	0,460	4290	777	0,931
280	285	1,448	1620	517	0,507	2960	659	0,460	4300	776	0,943
290	289	1,441	1630	519	0,506	2970	660	0,459	4310	775	0,956
300	293	0,658	1640	520	0,506	2980	661	0,459	4320	775	0,827
310	296	0,654	1650	522	0,505	2990	663	0,459	4330	775	0,831

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
320	299	0,649	1660	524	0,504	3000	664	0,525	4340	775	0,836
330	302	0,645	1670	525	0,504	3010	665	0,526	4350	776	0,840
340	305	0,641	1680	527	0,456	3020	665	0,528	4360	776	0,845
350	307	0,636	1690	528	0,456	3030	666	0,530	4370	777	0,850
360	310	0,670	1700	529	0,457	3040	666	0,531	4380	777	0,598
370	312	0,669	1710	530	0,457	3050	667	0,533	4390	778	0,599
380	314	0,668	1720	531	0,458	3060	667	0,700	4400	778	0,601
390	316	0,667	1730	532	0,458	3070	668	0,702	4410	779	0,602
400	318	0,665	1740	533	0,341	3080	669	0,704	4420	779	0,603
410	320	0,664	1750	534	0,341	3090	670	0,707	4430	780	0,605
420	322	0,793	1760	536	0,340	3100	672	0,708	4440	780	0,887
430	324	0,792	1770	537	0,340	3110	673	0,710	4450	780	0,893
440	327	0,791	1780	538	0,339	3120	674	0,671	4460	780	0,899
450	329	0,790	1790	540	0,339	3130	675	0,673	4470	781	0,905
460	331	0,790	1800	541	0,465	3140	675	0,675	4480	781	0,911
470	333	0,788	1810	542	0,466	3150	676	0,677	4490	781	0,919
480	335	0,788	1820	542	0,467	3160	677	0,679	4500	781	0,993
490	338	0,786	1830	543	0,468	3170	678	0,682	4510	781	0,999
500	341	0,782	1840	544	0,469	3180	679	0,513	4520	782	1,005
510	343	0,780	1850	545	0,470	3190	680	0,514	4530	782	1,012
520	346	0,777	1860	545	0,472	3200	681	0,514	4540	782	1,019
530	349	0,774	1870	546	0,472	3210	682	0,514	4550	783	1,026
540	351	0,708	1880	547	0,473	3220	683	0,514	4560	783	1,033
550	353	0,707	1890	548	0,474	3230	685	0,515	4570	784	1,038
560	356	0,706	1900	549	0,475	3240	686	0,557	4580	784	1,044
570	358	0,705	1910	550	0,475	3250	686	0,559	4590	785	1,051
580	360	0,703	1920	551	0,369	3260	687	0,561	4600	785	1,057
590	362	0,703	1930	552	0,369	3270	688	0,562	4610	786	1,063
600	364	0,665	1940	552	0,370	3280	688	0,564	4620	786	0,559
610	367	0,662	1950	553	0,370	3290	689	0,566	4630	787	0,560
620	369	0,659	1960	554	0,371	3300	689	0,669	4640	788	0,560
630	371	0,657	1970	554	0,371	3310	690	0,672	4650	789	0,560
640	374	0,655	1980	555	0,456	3320	691	0,674	4660	789	0,560
650	376	0,653	1990	556	0,456	3330	692	0,676	4670	790	0,561
660	379	0,688	2000	557	0,456	3340	693	0,678	4680	791	1,071
670	383	0,682	2010	558	0,457	3350	694	0,681	4690	791	1,079
680	387	0,674	2020	560	0,457	3360	695	0,698	4700	791	1,088
690	391	0,668	2030	561	0,457	3370	695	0,700	4710	792	1,096
700	394	0,662	2040	562	0,397	3380	696	0,703	4720	792	1,104
710	398	0,655	2050	563	0,397	3390	697	0,705	4730	792	1,112
720	402	0,750	2060	564	0,397	3400	698	0,707	4740	793	1,097
730	404	0,752	2070	565	0,396	3410	699	0,710	4750	793	1,104
740	406	0,753	2080	567	0,396	3420	700	0,545	4760	794	1,111
750	407	0,755	2090	568	0,396	3430	701	0,546	4770	794	1,118
760	409	0,757	2100	569	0,505	3440	702	0,546	4780	795	1,126
770	410	0,758	2110	571	0,503	3450	703	0,546	4790	795	1,133
780	412	0,375	2120	573	0,502	3460	705	0,546	4800	796	1,090
790	414	0,374	2130	575	0,501	3470	706	0,547	4810	796	1,095
800	415	0,373	2140	576	0,500	3480	707	0,713	4820	797	1,099
810	417	0,372	2150	578	0,499	3490	707	0,717	4830	798	1,103
820	418	0,371	2160	580	0,402	3500	708	0,720	4840	799	1,108
830	420	0,370	2170	581	0,402	3510	708	0,725	4850	800	1,112
840	422	0,450	2180	583	0,402	3520	708	0,729	4860	801	0,764
850	423	0,449	2190	584	0,402	3530	709	0,733	4870	801	0,766
860	425	0,449	2200	585	0,402	3540	709	0,675	4880	801	0,769
870	426	0,448	2210	586	0,402	3550	710	0,677	4890	802	0,773
880	428	0,448	2220	587	0,567	3560	711	0,678	4900	802	0,777
890	429	0,447	2230	588	0,568	3570	712	0,680	4910	803	0,778
900	431	0,652	2240	590	0,568	3580	713	0,681	4920	803	1,089
910	432	0,653	2250	591	0,569	3590	714	0,684	4930	804	1,097
920	434	0,654	2260	592	0,569	3600	715	0,717	4940	804	1,104
930	435	0,655	2270	594	0,570	3610	716	0,719	4950	805	1,112
940	437	0,656	2280	595	0,475	3620	717	0,721	4960	805	1,122
950	438	0,656	2290	596	0,476	3630	718	0,724	4970	805	1,130
960	440	0,658	2300	597	0,476	3640	719	0,726	4980	806	1,284
970	442	0,658	2310	598	0,477	3650	720	0,727	4990	806	1,295
980	443	0,658	2320	599	0,477	3660	721	0,729	5000	807	1,305

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
990	445	0,659	2330	600	0,478	3670	722	0,732	5010	807	1,315
1000	447	0,659	2340	601	0,586	3680	723	0,734	5020	808	1,330
1010	448	0,659	2350	603	0,587	3690	724	0,736	5030	808	1,342
1020	450	0,439	2360	604	0,588	3700	724	0,738	5040	809	1,169
1030	451	0,440	2370	605	0,589	3710	725	0,741	5050	810	1,176
1040	452	0,440	2380	606	0,590	3720	726	0,529	5060	810	1,183
1050	453	0,441	2390	607	0,591	3730	727	0,530	5070	811	1,190
1060	454	0,441	2400	609	0,543	3740	728	0,531	5080	812	1,197
1070	455	0,441	2410	609	0,545	3750	728	0,532	5090	813	1,204
1080	456	0,361	2420	610	0,546	3760	729	0,533	5100	813	0,639
1090	458	0,360	2430	611	0,547	3770	730	0,534	5110	814	0,640
1100	459	0,360	2440	612	0,549	3780	730	0,820	5120	815	0,639
1110	460	0,359	2450	613	0,550	3790	732	0,821	5130	816	0,640
1120	461	0,359	2460	614	0,502	3800	734	0,821	5140	817	0,642
1130	463	0,359	2470	614	0,504	3810	735	0,821	5150	818	0,640
1140	464	0,577	2480	615	0,505	3820	737	0,822	5160	818	1,313
1150	465	0,578	2490	615	0,507	3830	739	0,822	5170	819	1,328
1160	466	0,580	2500	616	0,509	3840	740	0,671	5180	819	1,342
1170	467	0,582	2510	617	0,510	3850	741	0,671	5190	819	1,358
1180	467	0,583	2520	617	0,463	3860	743	0,672	5200	819	1,373
1190	468	0,585	2530	618	0,463	3870	744	0,672	5210	820	1,389
1200	469	0,400	2540	619	0,463	3880	745	0,672	5220	820	1,380
1210	470	0,400	2550	620	0,463	3890	747	0,673	5230	821	1,393
1220	472	0,399	2560	621	0,464	3900	748	0,790	5240	821	1,407
1230	473	0,399	2570	623	0,464	3910	749	0,792	5250	822	1,421
1240	474	0,399	2580	624	0,589	3920	750	0,796	5260	822	1,436
1250	476	0,398	2590	625	0,591	3930	751	0,798	5270	823	1,451
1260	477	0,386	2600	626	0,592	3940	752	0,801	5280	823	-0,493
1270	478	0,386	2610	626	0,594	3950	753	0,805	5290	815	-0,528
1280	479	0,386	2620	627	0,595	3960	754	0,704	5300	806	-0,564
1290	480	0,386	2630	628	0,597	3970	754	0,706	5310	797	-0,611
1300	481	0,387	2640	629	0,573	3980	755	0,708	5320	788	-0,666
1310	482	0,387	2650	630	0,574	3990	756	0,710	5330	779	-0,728
1320	483	0,410	2660	631	0,576	4000	757	0,713			
1330	483	0,410	2670	632	0,577	4010	758	0,716			

Tabla 13-3: Conductividad térmica relativa de la PI para P4.

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
0	44	-32,520	1500	537	0,209	3000	632	0,168	4500	703	0,466
10	65	4,161	1510	537	0,209	3010	632	0,169	4510	704	0,467
20	86	1,958	1520	538	0,209	3020	633	0,169	4520	704	0,469
30	107	1,281	1530	539	0,209	3030	633	0,169	4530	705	0,470
40	128	0,953	1540	539	0,209	3040	633	0,169	4540	706	0,471
50	149	0,758	1550	540	0,209	3050	633	0,169	4550	706	0,473
60	170	1,745	1560	541	0,209	3060	634	0,179	4560	707	0,204
70	181	1,631	1570	542	0,209	3070	634	0,180	4570	708	0,204
80	192	1,529	1580	543	0,209	3080	634	0,180	4580	709	0,204
90	204	1,442	1590	544	0,208	3090	635	0,180	4590	709	0,203
100	215	1,363	1600	545	0,208	3100	635	0,180	4600	710	0,203
110	226	1,293	1610	546	0,208	3110	636	0,180	4610	711	0,203
120	237	1,179	1620	547	0,247	3120	636	0,080	4620	712	0,191
130	241	1,171	1630	548	0,247	3130	636	0,080	4630	712	0,191
140	245	1,164	1640	549	0,247	3140	636	0,080	4640	712	0,192
150	249	1,156	1650	550	0,246	3150	637	0,080	4650	712	0,192
160	253	1,148	1660	551	0,246	3160	637	0,080	4660	712	0,192
170	257	1,142	1670	552	0,246	3170	637	0,080	4670	713	0,193
180	261	1,296	1680	553	0,255	3180	637	0,341	4680	713	0,273
190	267	1,279	1690	554	0,255	3190	638	0,341	4690	714	0,273
200	273	1,261	1700	555	0,256	3200	639	0,341	4700	714	0,273
210	278	1,245	1710	555	0,256	3210	640	0,341	4710	715	0,273
220	284	1,230	1720	556	0,256	3220	641	0,342	4720	716	0,273
230	290	1,213	1730	556	0,256	3230	642	0,342	4730	717	0,273
240	295	1,136	1740	557	0,178	3240	643	0,010	4740	717	0,295
250	300	1,130	1750	558	0,178	3250	643	0,010	4750	717	0,296

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
260	304	1,122	1760	559	0,177	3260	644	0,010	4760	718	0,297
270	308	1,116	1770	560	0,177	3270	644	0,010	4770	718	0,298
280	312	1,110	1780	561	0,177	3280	644	0,010	4780	718	0,299
290	317	1,104	1790	561	0,177	3290	645	0,010	4790	718	0,300
300	321	0,872	1800	562	0,225	3300	645	0,170	4800	718	0,127
310	325	0,865	1810	563	0,226	3310	645	0,170	4810	718	0,127
320	329	0,857	1820	563	0,226	3320	645	0,170	4820	718	0,127
330	334	0,850	1830	564	0,226	3330	645	0,171	4830	718	0,128
340	338	0,843	1840	565	0,226	3340	645	0,171	4840	719	0,128
350	342	0,836	1850	565	0,226	3350	645	0,171	4850	719	0,128
360	346	0,726	1860	566	0,265	3360	646	0,232	4860	719	0,501
370	349	0,723	1870	567	0,265	3370	646	0,232	4870	720	0,502
380	352	0,721	1880	567	0,266	3380	647	0,232	4880	721	0,502
390	355	0,719	1890	568	0,266	3390	648	0,232	4890	722	0,503
400	358	0,717	1900	569	0,266	3400	649	0,232	4900	723	0,504
410	361	0,714	1910	569	0,266	3410	650	0,232	4910	724	0,505
420	364	0,733	1920	570	0,188	3420	651	0,181	4920	725	0,118
430	366	0,733	1930	571	0,188	3430	651	0,181	4930	725	0,118
440	368	0,732	1940	571	0,188	3440	651	0,181	4940	725	0,118
450	371	0,731	1950	572	0,188	3450	652	0,182	4950	726	0,118
460	373	0,731	1960	573	0,188	3460	652	0,182	4960	726	0,118
470	376	0,730	1970	573	0,188	3470	652	0,182	4970	726	0,118
480	378	0,717	1980	574	0,158	3480	652	0,183	4980	726	0,365
490	380	0,717	1990	575	0,158	3490	653	0,183	4990	727	0,366
500	382	0,718	2000	575	0,158	3500	653	0,183	5000	728	0,366
510	384	0,718	2010	576	0,158	3510	653	0,183	5010	728	0,367
520	387	0,718	2020	577	0,158	3520	654	0,183	5020	729	0,368
530	389	0,718	2030	577	0,158	3530	654	0,183	5030	730	0,368
540	391	0,553	2040	578	0,187	3540	654	0,204	5040	731	0,274
550	392	0,553	2050	578	0,187	3550	655	0,204	5050	731	0,274
560	394	0,553	2060	579	0,187	3560	655	0,204	5060	732	0,274
570	396	0,553	2070	580	0,187	3570	655	0,205	5070	732	0,274
580	397	0,553	2080	580	0,187	3580	656	0,205	5080	733	0,274
590	399	0,553	2090	581	0,187	3590	656	0,205	5090	734	0,275
600	400	0,598	2100	581	0,187	3600	656	0,401	5100	734	0,405
610	402	0,597	2110	582	0,187	3610	657	0,401	5110	735	0,407
620	404	0,597	2120	582	0,187	3620	658	0,402	5120	735	0,408
630	406	0,596	2130	582	0,188	3630	659	0,402	5130	736	0,409
640	408	0,596	2140	583	0,188	3640	660	0,403	5140	736	0,410
650	410	0,595	2150	583	0,188	3650	661	0,403	5150	737	0,411
660	412	0,710	2160	584	0,258	3660	662	0,290	5160	737	0,364
670	421	0,692	2170	585	0,257	3670	663	0,290	5170	738	0,365
680	429	0,675	2180	586	0,257	3680	664	0,290	5180	739	0,365
690	437	0,659	2190	587	0,257	3690	665	0,290	5190	740	0,365
700	446	0,644	2200	589	0,256	3700	665	0,290	5200	741	0,365
710	454	0,628	2210	590	0,256	3710	666	0,290	5210	742	0,365
720	462	0,581	2220	591	0,157	3720	667	0,248	5220	743	0,280
730	465	0,580	2230	591	0,157	3730	667	0,249	5230	743	0,281
740	468	0,578	2240	592	0,157	3740	668	0,250	5240	743	0,281
750	471	0,576	2250	592	0,157	3750	668	0,250	5250	743	0,282
760	474	0,575	2260	592	0,157	3760	668	0,251	5260	743	0,283
770	477	0,573	2270	592	0,158	3770	668	0,251	5270	743	0,283
780	479	0,411	2280	593	0,138	3780	668	0,032	5280	743	0,062
790	480	0,412	2290	593	0,138	3790	669	0,032	5290	743	0,062
800	481	0,413	2300	594	0,138	3800	669	0,032	5300	743	0,062
810	482	0,413	2310	594	0,138	3810	670	0,032	5310	744	0,062
820	483	0,414	2320	594	0,138	3820	670	0,032	5320	744	0,062
830	484	0,415	2330	595	0,138	3830	671	0,032	5330	744	0,062
840	485	0,291	2340	595	0,198	3840	671	0,156	5340	744	0,223
850	483	0,294	2350	596	0,198	3850	671	0,156	5350	744	0,223
860	482	0,296	2360	596	0,198	3860	672	0,157	5360	745	0,223
870	480	0,300	2370	597	0,198	3870	672	0,157	5370	745	0,223
880	478	0,303	2380	598	0,198	3880	672	0,157	5380	745	0,224
890	476	0,306	2390	598	0,198	3890	672	0,157	5390	746	0,224
900	474	0,443	2400	599	0,139	3900	673	0,345	5400	746	0,300
910	475	0,443	2410	599	0,139	3910	673	0,346	5410	747	0,299
920	476	0,444	2420	600	0,139	3920	674	0,347	5420	748	0,300

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
930	477	0,445	2430	600	0,139	3930	675	0,347	5430	748	0,300
940	478	0,446	2440	600	0,139	3940	675	0,348	5440	749	0,300
950	479	0,447	2450	601	0,139	3950	676	0,349	5450	750	0,300
960	480	0,366	2460	601	0,169	3960	676	0,233	5460	751	0,474
970	481	0,366	2470	602	0,169	3970	677	0,233	5470	752	0,475
980	481	0,367	2480	602	0,168	3980	678	0,233	5480	752	0,476
990	482	0,367	2490	603	0,168	3990	678	0,233	5490	753	0,477
1000	483	0,368	2500	604	0,168	4000	679	0,233	5500	754	0,479
1010	484	0,368	2510	605	0,168	4010	680	0,233	5510	755	0,480
1020	485	0,308	2520	605	0,208	4020	681	0,244	5520	755	0,189
1030	486	0,308	2530	606	0,208	4030	681	0,244	5530	755	0,190
1040	487	0,308	2540	607	0,207	4040	682	0,244	5540	755	0,190
1050	488	0,308	2550	608	0,207	4050	683	0,244	5550	755	0,191
1060	489	0,308	2560	609	0,207	4060	683	0,244	5560	755	0,191
1070	490	0,307	2570	610	0,207	4070	684	0,244	5570	755	0,191
1080	491	0,236	2580	611	0,284	4080	685	0,223	5580	755	0,295
1090	492	0,236	2590	612	0,285	4090	685	0,223	5590	756	0,295
1100	492	0,236	2600	612	0,285	4100	685	0,223	5600	757	0,295
1110	493	0,236	2610	612	0,286	4110	686	0,224	5610	757	0,295
1120	493	0,236	2620	613	0,287	4120	686	0,224	5620	758	0,296
1130	494	0,236	2630	613	0,287	4130	686	0,225	5630	758	0,296
1140	495	0,349	2640	613	0,139	4140	686	0,236	5640	759	0,361
1150	496	0,349	2650	614	0,139	4150	687	0,236	5650	759	0,361
1160	496	0,350	2660	615	0,139	4160	687	0,236	5660	760	0,362
1170	497	0,350	2670	615	0,139	4170	688	0,236	5670	760	0,363
1180	498	0,350	2680	616	0,139	4180	689	0,236	5680	761	0,363
1190	499	0,350	2690	617	0,139	4190	689	0,237	5690	761	0,364
1200	500	0,351	2700	618	0,020	4200	690	0,365	5700	762	0,522
1210	501	0,351	2710	618	0,020	4210	690	0,366	5710	763	0,523
1220	502	0,351	2720	618	0,020	4220	691	0,367	5720	763	0,524
1230	503	0,351	2730	618	0,020	4230	691	0,368	5730	764	0,525
1240	504	0,351	2740	618	0,020	4240	692	0,369	5740	765	0,526
1250	505	0,351	2750	618	0,020	4250	692	0,370	5750	766	0,528
1260	506	0,198	2760	619	0,227	4260	693	0,164	5760	767	0,145
1270	508	0,197	2770	619	0,227	4270	693	0,164	5770	767	0,145
1280	511	0,196	2780	620	0,227	4280	694	0,164	5780	767	0,146
1290	513	0,194	2790	621	0,227	4290	695	0,164	5790	767	0,146
1300	515	0,193	2800	622	0,227	4300	696	0,163	5800	767	0,146
1310	518	0,192	2810	622	0,227	4310	697	0,163	5810	768	0,146
1320	520	0,240	2820	623	0,128	4320	698	0,130	5820	768	0,479
1330	521	0,239	2830	623	0,128	4330	698	0,130	5830	768	0,480
1340	522	0,239	2840	623	0,129	4340	698	0,130	5840	769	0,482
1350	523	0,239	2850	623	0,129	4350	698	0,130	5850	769	0,483
1360	525	0,238	2860	624	0,129	4360	698	0,131	5860	770	0,485
1370	526	0,238	2870	624	0,129	4370	698	0,131	5870	770	0,486
1380	527	0,277	2880	624	0,169	4380	698	0,295	5880	771	0,434
1390	527	0,277	2890	624	0,169	4390	699	0,295	5890	772	0,434
1400	528	0,277	2900	625	0,169	4400	699	0,295	5900	773	0,434
1410	529	0,277	2910	626	0,169	4410	700	0,296	5910	774	0,434
1420	529	0,278	2920	626	0,169	4420	701	0,296	5920	776	0,434
1430	530	0,278	2930	627	0,169	4430	701	0,296	5930	777	0,433
1440	531	0,298	2940	627	0,199	4440	702	0,220	5940	778	-0,185
1450	532	0,298	2950	628	0,199	4450	702	0,220	5950	768	-0,193
1460	533	0,298	2960	629	0,199	4460	702	0,220	5960	757	-0,201
1470	534	0,298	2970	630	0,199	4470	703	0,221	5970	747	-0,210
1480	535	0,298	2980	630	0,199	4480	703	0,221	5980	737	-0,219
1490	536	0,298	2990	631	0,198	4490	703	0,221	5990	726	-0,230

Tabla 13-4: Conductividad térmica relativa de la PI para P5.

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
0	49	-24,107	530	468	0,454	1060	584	0,201	1590	647	0,285
10	68	3,394	540	470	0,379	1070	586	0,201	1600	648	0,286
20	87	1,590	550	472	0,380	1080	587	0,226	1610	649	0,287
30	107	1,040	560	474	0,381	1090	588	0,226	1620	650	0,279

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
40	126	0,774	570	477	0,381	1100	590	0,226	1630	651	0,281
50	146	0,616	580	479	0,382	1110	591	0,227	1640	652	0,282
60	165	1,389	590	481	0,383	1120	592	0,227	1650	653	0,284
70	180	1,286	600	483	0,221	1130	594	0,227	1660	654	0,285
80	194	1,197	610	485	0,220	1140	595	0,167	1670	655	0,286
90	209	1,120	620	486	0,220	1150	596	0,167	1680	656	0,273
100	224	1,054	630	488	0,220	1160	597	0,167	1690	657	0,275
110	239	0,996	640	490	0,219	1170	598	0,167	1700	658	0,276
120	253	0,862	650	492	0,218	1180	600	0,168	1710	659	0,277
130	259	0,862	660	494	0,218	1190	601	0,168	1720	660	0,279
140	265	0,862	670	496	0,217	1200	602	0,205	1730	661	0,280
150	271	0,862	680	499	0,215	1210	603	0,205	1740	662	0,316
160	277	0,862	690	502	0,213	1220	604	0,206	1750	663	0,317
170	283	0,863	700	505	0,212	1230	605	0,206	1760	665	0,318
180	289	0,926	710	508	0,210	1240	606	0,207	1770	666	0,320
190	299	0,910	720	510	0,187	1250	608	0,207	1780	667	0,321
200	308	0,894	730	515	0,183	1260	609	0,207	1790	669	0,322
210	317	0,879	740	520	0,180	1270	610	0,208	1800	670	0,328
220	327	0,864	750	525	0,177	1280	611	0,208	1810	671	0,330
230	336	0,850	760	529	0,174	1290	613	0,208	1820	672	0,332
240	345	0,851	770	534	0,171	1300	614	0,209	1830	673	0,334
250	351	0,855	780	539	0,204	1310	616	0,209	1840	674	0,336
260	356	0,859	790	541	0,203	1320	617	0,247	1850	675	0,338
270	362	0,864	800	543	0,203	1330	618	0,248	1860	676	0,314
280	368	0,868	810	545	0,203	1340	619	0,249	1870	678	0,316
290	373	0,871	820	547	0,202	1350	620	0,249	1880	679	0,318
300	379	0,888	830	549	0,202	1360	621	0,250	1890	680	0,319
310	384	0,896	840	551	0,193	1370	623	0,251	1900	681	0,321
320	389	0,905	850	552	0,193	1380	624	0,244	1910	682	0,323
330	393	0,913	860	554	0,193	1390	625	0,245	1920	683	0,335
340	398	0,922	870	556	0,193	1400	626	0,246	1930	684	0,337
350	403	0,931	880	558	0,193	1410	627	0,247	1940	685	0,339
360	408	0,787	890	560	0,192	1420	627	0,248	1950	686	0,340
370	412	0,792	900	561	0,200	1430	628	0,249	1960	688	0,342
380	416	0,797	910	563	0,200	1440	629	0,206	1970	689	0,343
390	421	0,802	920	565	0,200	1450	630	0,207	1980	690	0,389
400	425	0,807	930	567	0,199	1460	631	0,207	1990	692	0,391
410	429	0,812	940	569	0,199	1470	632	0,208	2000	693	0,393
420	434	0,542	950	571	0,199	1480	633	0,209	2010	695	0,395
430	437	0,543	960	572	0,159	1490	634	0,209	2020	696	0,397
440	440	0,543	970	574	0,159	1500	635	0,250	2030	697	0,399
450	444	0,544	980	575	0,159	1510	637	0,250	2040	699	0,390
460	447	0,544	990	576	0,159	1520	638	0,251	2050	700	0,392
470	451	0,545	1000	577	0,159	1530	639	0,252	2060	702	0,394
480	454	0,451	1010	579	0,159	1540	641	0,253	2070	703	0,396
490	457	0,452	1020	580	0,199	1550	642	0,253	2080	704	0,398
500	459	0,452	1030	581	0,199	1560	643	0,281	2090	706	0,400
510	462	0,453	1040	582	0,200	1570	644	0,282			
520	465	0,454	1050	583	0,200	1580	645	0,284			

Tabla 13-5: Conductividad térmica relativa de la PI para P6.

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
0	44	-39,442	830	514	0,229	1660	584	0,215	2490	666	0,224
10	66	5,496	840	516	0,223	1670	585	0,216	2500	666	0,224
20	87	2,576	850	517	0,223	1680	585	0,097	2510	667	0,225
30	109	1,688	860	518	0,223	1690	586	0,097	2520	668	0,262
40	130	1,256	870	519	0,223	1700	587	0,096	2530	669	0,263
50	152	1,002	880	520	0,223	1710	588	0,096	2540	669	0,264
60	173	1,540	890	522	0,223	1720	589	0,096	2550	670	0,265
70	186	1,440	900	523	0,217	1730	590	0,096	2560	671	0,266
80	199	1,352	910	524	0,217	1740	591	0,167	2570	672	0,266
90	212	1,276	920	525	0,218	1750	591	0,167	2580	672	0,299
100	225	1,208	930	526	0,218	1760	591	0,168	2590	673	0,300
110	238	1,148	940	527	0,218	1770	592	0,168	2600	675	0,300

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
120	251	1,141	950	528	0,218	1780	592	0,169	2610	676	0,301
130	257	1,142	960	529	0,159	1790	592	0,169	2620	677	0,301
140	262	1,142	970	530	0,159	1800	592	0,188	2630	678	0,302
150	268	1,143	980	532	0,159	1810	593	0,188	2640	679	0,257
160	273	1,143	990	533	0,159	1820	594	0,188	2650	680	0,258
170	279	1,144	1000	534	0,159	1830	595	0,188	2660	681	0,258
180	284	1,021	1010	535	0,158	1840	596	0,188	2670	682	0,259
190	289	1,021	1020	536	0,170	1850	597	0,188	2680	683	0,260
200	294	1,020	1030	537	0,170	1860	598	0,159	2690	683	0,260
210	299	1,019	1040	538	0,170	1870	600	0,158	2700	684	0,235
220	304	1,019	1050	539	0,170	1880	602	0,157	2710	685	0,236
230	309	1,018	1060	540	0,170	1890	603	0,157	2720	686	0,236
240	314	0,904	1070	541	0,169	1900	605	0,156	2730	687	0,236
250	318	0,906	1080	542	0,140	1910	607	0,155	2740	687	0,237
260	322	0,908	1090	542	0,140	1920	609	0,219	2750	688	0,237
270	326	0,911	1100	543	0,140	1930	610	0,219	2760	689	0,257
280	329	0,913	1110	543	0,140	1940	611	0,219	2770	690	0,258
290	333	0,915	1120	544	0,141	1950	613	0,219	2780	691	0,259
300	337	0,906	1130	544	0,141	1960	614	0,219	2790	691	0,259
310	345	0,885	1140	545	0,141	1970	615	0,219	2800	692	0,260
320	354	0,865	1150	546	0,141	1980	616	0,184	2810	693	0,261
330	362	0,845	1160	547	0,141	1990	618	0,183	2820	693	0,315
340	371	0,827	1170	548	0,141	2000	619	0,183	2830	694	0,316
350	379	0,810	1180	549	0,140	2010	621	0,183	2840	695	0,317
360	387	1,010	1190	550	0,140	2020	622	0,182	2850	696	0,318
370	393	1,008	1200	551	0,111	2030	624	0,182	2860	697	0,319
380	399	1,007	1210	552	0,111	2040	625	0,175	2870	698	0,320
390	405	1,005	1220	553	0,111	2050	626	0,175	2880	699	0,232
400	410	1,002	1230	553	0,111	2060	627	0,175	2890	699	0,233
410	416	1,000	1240	554	0,111	2070	628	0,176	2900	700	0,234
420	422	0,798	1250	554	0,111	2080	629	0,176	2910	700	0,235
430	426	0,800	1260	555	0,169	2090	629	0,176	2920	700	0,236
440	430	0,802	1270	556	0,169	2100	630	0,293	2930	701	0,237
450	433	0,804	1280	556	0,169	2110	632	0,294	2940	701	0,266
460	437	0,806	1290	557	0,169	2120	633	0,294	2950	702	0,266
470	441	0,808	1300	558	0,170	2130	635	0,294	2960	703	0,266
480	445	0,459	1310	559	0,169	2140	637	0,294	2970	704	0,267
490	448	0,458	1320	560	0,158	2150	638	0,294	2980	705	0,267
500	451	0,457	1330	560	0,158	2160	640	0,188	2990	706	0,267
510	454	0,456	1340	561	0,158	2170	640	0,188	3000	707	0,359
520	456	0,454	1350	562	0,158	2180	640	0,189	3010	708	0,360
530	459	0,453	1360	562	0,159	2190	640	0,190	3020	709	0,361
540	462	0,399	1370	563	0,159	2200	641	0,190	3030	711	0,362
550	464	0,399	1380	563	0,159	2210	641	0,191	3040	712	0,364
560	466	0,400	1390	564	0,159	2220	641	0,228	3050	713	0,365
570	468	0,400	1400	564	0,160	2230	642	0,228	3060	714	0,315
580	470	0,401	1410	564	0,160	2240	644	0,228	3070	715	0,317
590	472	0,401	1420	565	0,160	2250	645	0,228	3080	715	0,318
600	474	0,438	1430	565	0,161	2260	646	0,228	3090	716	0,319
610	476	0,438	1440	565	0,137	2270	648	0,228	3100	717	0,320
620	478	0,438	1450	566	0,138	2280	649	0,204	3110	718	0,321
630	480	0,438	1460	566	0,138	2290	649	0,204	3120	718	0,301
640	483	0,438	1470	566	0,138	2300	650	0,205	3130	719	0,302
650	485	0,438	1480	567	0,138	2310	650	0,205	3140	720	0,302
660	487	0,350	1490	567	0,138	2320	651	0,206	3150	721	0,303
670	489	0,349	1500	568	0,169	2330	651	0,207	3160	722	0,304
680	491	0,349	1510	569	0,169	2340	652	0,201	3170	722	0,305
690	493	0,349	1520	571	0,168	2350	653	0,201	3180	723	0,261
700	495	0,348	1530	572	0,168	2360	654	0,201	3190	724	0,262
710	497	0,348	1540	574	0,168	2370	655	0,201	3200	724	0,263
720	499	0,254	1550	575	0,167	2380	656	0,202	3210	724	0,264
730	501	0,253	1560	577	0,155	2390	657	0,201	3220	725	0,265
740	502	0,253	1570	578	0,154	2400	658	0,244	3230	725	0,266
750	504	0,253	1580	579	0,154	2410	659	0,244	3240	725	0,344
760	505	0,253	1590	580	0,154	2420	660	0,245	3250	726	0,345
770	506	0,253	1600	580	0,154	2430	661	0,246	3260	727	0,346
780	508	0,230	1610	581	0,154	2440	662	0,246	3270	728	0,347



t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
790	509	0,230	1620	582	0,213	2450	663	0,246	3280	729	0,348
800	510	0,229	1630	583	0,213	2460	664	0,222	3290	730	0,350
810	512	0,229	1640	583	0,214	2470	664	0,223			
820	513	0,229	1650	584	0,215	2480	665	0,223			

Tabla 13-6: Conductividad térmica relativa de la PI para P7.

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
0	37	-904,326	980	519	0,254	1960	595	0,135	2940	682	0,321
10	47	5,369	990	520	0,254	1970	595	0,136	2950	683	0,322
20	56	2,680	1000	521	0,255	1980	596	0,168	2960	683	0,323
30	66	1,788	1010	522	0,255	1990	597	0,168	2970	684	0,324
40	75	1,342	1020	523	0,204	2000	598	0,168	2980	685	0,325
50	85	1,075	1030	524	0,204	2010	598	0,168	2990	686	0,326
60	94	1,117	1040	525	0,204	2020	599	0,168	3000	687	0,225
70	98	1,067	1050	526	0,204	2030	600	0,168	3010	687	0,226
80	102	1,021	1060	527	0,204	2040	601	0,175	3020	688	0,226
90	106	0,979	1070	528	0,204	2050	602	0,175	3030	689	0,227
100	109	0,942	1080	529	0,210	2060	602	0,175	3040	689	0,227
110	113	0,907	1090	531	0,210	2070	603	0,175	3050	690	0,228
120	117	1,657	1100	532	0,210	2080	604	0,175	3060	691	0,228
130	128	1,468	1110	533	0,210	2090	605	0,175	3070	691	0,228
140	139	1,317	1120	534	0,210	2100	606	0,163	3080	692	0,229
150	150	1,195	1130	535	0,210	2110	607	0,162	3090	693	0,229
160	161	1,095	1140	537	0,159	2120	609	0,162	3100	693	0,230
170	172	1,010	1150	537	0,159	2130	611	0,161	3110	694	0,230
180	184	1,407	1160	538	0,159	2140	613	0,160	3120	695	0,272
190	196	1,311	1170	538	0,159	2150	615	0,160	3130	695	0,273
200	209	1,230	1180	539	0,159	2160	616	0,152	3140	696	0,274
210	222	1,157	1190	540	0,159	2170	617	0,152	3150	697	0,274
220	234	1,094	1200	540	0,127	2180	618	0,152	3160	698	0,275
230	247	1,038	1210	541	0,128	2190	619	0,152	3170	698	0,276
240	260	1,301	1220	541	0,128	2200	620	0,152	3180	699	0,269
250	268	1,279	1230	542	0,128	2210	620	0,152	3190	700	0,270
260	277	1,259	1240	542	0,128	2220	621	0,203	3200	701	0,270
270	286	1,239	1250	543	0,128	2230	623	0,203	3210	702	0,271
280	294	1,220	1260	543	0,154	2240	624	0,202	3220	702	0,272
290	303	1,200	1270	544	0,154	2250	625	0,202	3230	703	0,272
300	311	1,179	1280	545	0,154	2260	627	0,202	3240	704	0,287
310	317	1,182	1290	545	0,154	2270	628	0,202	3250	705	0,287
320	322	1,185	1300	546	0,154	2280	629	0,176	3260	706	0,288
330	327	1,188	1310	547	0,154	2290	630	0,176	3270	707	0,288
340	332	1,190	1320	548	0,166	2300	631	0,176	3280	709	0,288
350	337	1,192	1330	548	0,167	2310	632	0,176	3290	710	0,289
360	343	1,240	1340	549	0,167	2320	632	0,176	3300	711	0,253
370	352	1,219	1350	549	0,167	2330	633	0,176	3310	712	0,253
380	361	1,200	1360	550	0,167	2340	634	0,177	3320	713	0,253
390	370	1,181	1370	550	0,168	2350	635	0,177	3330	714	0,253
400	379	1,162	1380	550	0,110	2360	635	0,177	3340	715	0,253
410	388	1,145	1390	551	0,110	2370	636	0,177	3350	716	0,253
420	397	0,000	1400	552	0,110	2380	637	0,177	3360	718	0,167
430	397	0,000	1410	552	0,110	2390	638	0,177	3370	718	0,167
440	397	0,000	1420	553	0,110	2400	639	0,171	3380	719	0,167
450	397	0,000	1430	554	0,110	2410	640	0,171	3390	719	0,167
460	397	0,000	1440	554	0,110	2420	641	0,171	3400	720	0,167
470	397	0,000	1450	555	0,110	2430	642	0,171	3410	721	0,167
480	397	1,490	1460	556	0,110	2440	643	0,171	3420	721	0,356
490	405	1,486	1470	557	0,109	2450	644	0,171	3430	722	0,357
500	413	1,484	1480	558	0,109	2460	645	0,221	3440	723	0,359
510	421	1,482	1490	559	0,109	2470	645	0,221	3450	724	0,360
520	429	1,478	1500	560	0,166	2480	646	0,222	3460	724	0,361
530	438	1,476	1510	561	0,166	2490	646	0,222	3470	725	0,363
540	446	0,571	1520	561	0,166	2500	647	0,223	3480	726	0,283
550	448	0,572	1530	561	0,167	2510	648	0,223	3490	727	0,283
560	451	0,572	1540	562	0,167	2520	648	0,211	3500	727	0,284

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
570	454	0,572	1550	562	0,167	2530	649	0,211	3510	728	0,285
580	457	0,572	1560	562	0,149	2540	650	0,211	3520	729	0,286
590	460	0,572	1570	563	0,149	2550	651	0,211	3530	729	0,286
600	463	0,479	1580	564	0,148	2560	652	0,212	3540	730	0,272
610	465	0,480	1590	566	0,148	2570	653	0,212	3550	731	0,273
620	467	0,480	1600	567	0,148	2580	654	0,192	3560	732	0,273
630	470	0,480	1610	568	0,148	2590	655	0,193	3570	733	0,274
640	472	0,480	1620	569	0,135	2600	656	0,193	3580	733	0,274
650	474	0,480	1630	570	0,134	2610	657	0,193	3590	734	0,275
660	477	0,349	1640	571	0,134	2620	658	0,193	3600	735	0,245
670	478	0,350	1650	573	0,134	2630	658	0,193	3610	736	0,245
680	479	0,351	1660	574	0,134	2640	659	0,180	3620	737	0,245
690	480	0,352	1670	575	0,133	2650	659	0,180	3630	738	0,245
700	482	0,353	1680	576	0,145	2660	660	0,181	3640	739	0,245
710	483	0,353	1690	577	0,145	2670	660	0,181	3650	740	0,246
720	484	0,316	1700	577	0,145	2680	660	0,182	3660	741	0,307
730	485	0,317	1710	578	0,145	2690	661	0,182	3670	742	0,308
740	486	0,318	1720	579	0,146	2700	661	0,196	3680	743	0,308
750	487	0,319	1730	579	0,146	2710	662	0,196	3690	744	0,309
760	488	0,319	1740	580	0,196	2720	663	0,196	3700	745	0,309
770	489	0,320	1750	581	0,197	2730	664	0,196	3710	746	0,310
780	490	0,302	1760	582	0,197	2740	665	0,196	3720	747	0,349
790	491	0,302	1770	582	0,197	2750	667	0,196	3730	748	0,350
800	493	0,303	1780	583	0,197	2760	668	0,254	3740	749	0,351
810	494	0,303	1790	584	0,197	2770	669	0,254	3750	749	0,352
820	495	0,303	1800	585	0,197	2780	670	0,255	3760	750	0,353
830	496	0,304	1810	586	0,197	2790	670	0,255	3770	751	0,354
840	498	0,265	1820	586	0,198	2800	671	0,256	3780	752	0,223
850	499	0,266	1830	587	0,198	2810	672	0,256	3790	745	0,231
860	500	0,266	1840	588	0,198	2820	673	0,191	3800	738	0,240
870	501	0,266	1850	589	0,198	2830	674	0,191	3810	730	0,250
880	501	0,267	1860	589	0,160	2840	674	0,191	3820	723	0,261
890	502	0,267	1870	590	0,160	2850	675	0,192	3830	716	0,272
900	503	0,229	1880	591	0,160	2860	676	0,192	3840	708	0,103
910	506	0,228	1890	591	0,160	2870	677	0,192	3850	701	0,108
920	508	0,227	1900	592	0,161	2880	677	0,232	3860	693	0,113
930	510	0,226	1910	592	0,161	2890	678	0,232	3870	685	0,119
940	512	0,225	1920	593	0,135	2900	679	0,233	3880	678	0,125
950	514	0,224	1930	594	0,135	2910	680	0,233	3890	670	0,132
960	517	0,254	1940	594	0,135	2920	680	0,234			
970	518	0,254	1950	594	0,135	2930	681	0,234			

Tabla 13-7: Conductividad térmica relativa de la PI para P8.

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
0	32	21,232	1260	504	0,189	2520	613	0,119	3780	684	0,187
10	52	3,446	1270	507	0,187	2530	614	0,119	3790	684	0,187
20	72	1,880	1280	510	0,185	2540	614	0,119	3800	685	0,187
30	92	1,293	1290	513	0,184	2550	614	0,119	3810	686	0,188
40	112	0,988	1300	516	0,182	2560	614	0,119	3820	686	0,188
50	132	0,799	1310	519	0,181	2570	615	0,119	3830	687	0,188
60	152	2,123	1320	521	0,259	2580	615	0,146	3840	687	0,256
70	164	2,005	1330	523	0,259	2590	615	0,146	3850	688	0,256
80	177	1,901	1340	524	0,259	2600	615	0,146	3860	689	0,257
90	189	1,807	1350	526	0,259	2610	616	0,147	3870	689	0,257
100	201	1,722	1360	527	0,259	2620	616	0,147	3880	690	0,258
110	214	1,646	1370	529	0,258	2630	616	0,147	3890	691	0,258
120	226	1,292	1380	530	0,224	2640	617	0,080	3900	691	0,251
130	231	1,288	1390	531	0,224	2650	617	0,081	3910	692	0,252
140	236	1,283	1400	533	0,224	2660	617	0,081	3920	693	0,252
150	241	1,280	1410	534	0,224	2670	618	0,081	3930	694	0,252
160	246	1,276	1420	535	0,223	2680	618	0,081	3940	695	0,252
170	252	1,272	1430	536	0,223	2690	618	0,081	3950	696	0,253
180	257	0,988	1440	538	0,149	2700	619	0,148	3960	696	0,291
190	267	0,949	1450	539	0,149	2710	619	0,148	3970	697	0,292

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
200	278	0,913	1460	539	0,148	2720	620	0,148	3980	698	0,292
210	288	0,880	1470	540	0,148	2730	621	0,148	3990	699	0,293
220	298	0,850	1480	541	0,148	2740	621	0,148	4000	700	0,293
230	309	0,821	1490	542	0,148	2750	622	0,148	4010	701	0,294
240	319	0,733	1500	543	0,162	2760	623	0,141	4020	702	0,217
250	326	0,721	1510	544	0,162	2770	623	0,141	4030	702	0,217
260	333	0,709	1520	545	0,161	2780	624	0,141	4040	703	0,218
270	340	0,697	1530	546	0,161	2790	625	0,141	4050	703	0,218
280	347	0,686	1540	547	0,161	2800	625	0,141	4060	704	0,218
290	354	0,676	1550	548	0,161	2810	626	0,141	4070	705	0,218
300	361	0,676	1560	549	0,174	2820	626	0,115	4080	705	0,219
310	365	0,674	1570	550	0,174	2830	627	0,115	4090	706	0,219
320	370	0,671	1580	550	0,174	2840	628	0,115	4100	707	0,219
330	374	0,668	1590	551	0,174	2850	628	0,115	4110	708	0,219
340	378	0,666	1600	552	0,174	2860	629	0,115	4120	708	0,220
350	383	0,664	1610	553	0,174	2870	629	0,115	4130	709	0,220
360	387	0,536	1620	554	0,087	2880	630	0,148	4140	710	0,266
370	388	0,540	1630	555	0,087	2890	630	0,148	4150	710	0,267
380	389	0,543	1640	555	0,087	2900	631	0,148	4160	711	0,268
390	390	0,547	1650	556	0,087	2910	631	0,148	4170	711	0,269
400	391	0,551	1660	557	0,087	2920	631	0,149	4180	712	0,269
410	392	0,555	1670	558	0,087	2930	632	0,149	4190	712	0,270
420	393	0,486	1680	558	0,160	2940	632	0,203	4200	713	0,359
430	396	0,487	1690	559	0,160	2950	632	0,204	4210	714	0,360
440	398	0,487	1700	560	0,160	2960	633	0,204	4220	715	0,361
450	400	0,487	1710	561	0,159	2970	634	0,204	4230	716	0,362
460	402	0,488	1720	562	0,159	2980	634	0,205	4240	717	0,362
470	404	0,488	1730	563	0,159	2990	635	0,205	4250	717	0,363
480	406	0,455	1740	563	0,146	3000	635	0,192	4260	718	0,300
490	408	0,455	1750	564	0,146	3010	636	0,192	4270	719	0,300
500	410	0,455	1760	564	0,146	3020	636	0,192	4280	720	0,301
510	412	0,456	1770	564	0,146	3030	637	0,193	4290	720	0,302
520	414	0,456	1780	564	0,147	3040	637	0,193	4300	721	0,302
530	416	0,456	1790	564	0,147	3050	638	0,193	4310	722	0,303
540	418	0,470	1800	565	0,155	3060	638	0,166	4320	723	0,205
550	420	0,471	1810	566	0,155	3070	639	0,166	4330	723	0,205
560	422	0,472	1820	567	0,154	3080	639	0,166	4340	723	0,206
570	424	0,473	1830	568	0,154	3090	640	0,167	4350	724	0,206
580	426	0,473	1840	569	0,154	3100	640	0,167	4360	724	0,207
590	427	0,474	1850	570	0,154	3110	640	0,167	4370	725	0,207
600	429	0,338	1860	572	0,053	3120	641	0,175	4380	725	0,407
610	431	0,338	1870	572	0,053	3130	642	0,175	4390	726	0,408
620	432	0,338	1880	571	0,053	3140	643	0,175	4400	727	0,409
630	434	0,338	1890	571	0,053	3150	644	0,175	4410	728	0,411
640	435	0,339	1900	571	0,053	3160	645	0,174	4420	729	0,412
650	436	0,339	1910	571	0,053	3170	645	0,174	4430	730	0,413
660	438	0,359	1920	571	0,175	3180	646	0,195	4440	731	0,229
670	439	0,360	1930	572	0,174	3190	647	0,195	4450	732	0,229
680	441	0,360	1940	574	0,174	3200	648	0,195	4460	733	0,229
690	442	0,361	1950	575	0,174	3210	649	0,195	4470	734	0,229
700	443	0,361	1960	576	0,174	3220	649	0,196	4480	735	0,229
710	445	0,362	1970	578	0,173	3230	650	0,196	4490	736	0,229
720	446	0,321	1980	579	0,146	3240	651	0,217	4500	737	0,346
730	448	0,321	1990	580	0,146	3250	651	0,217	4510	737	0,348
740	450	0,320	2000	581	0,146	3260	652	0,217	4520	738	0,349
750	451	0,320	2010	582	0,146	3270	653	0,218	4530	739	0,350
760	453	0,320	2020	582	0,146	3280	653	0,218	4540	739	0,351
770	455	0,319	2030	583	0,146	3290	654	0,218	4550	740	0,352
780	456	0,353	2040	584	0,086	3300	654	0,169	4560	740	0,371
790	458	0,354	2050	585	0,086	3310	655	0,170	4570	741	0,372
800	459	0,354	2060	585	0,086	3320	656	0,170	4580	742	0,373
810	460	0,355	2070	586	0,086	3330	656	0,170	4590	743	0,373
820	462	0,355	2080	586	0,086	3340	657	0,170	4600	744	0,374
830	463	0,356	2090	587	0,086	3350	657	0,170	4610	745	0,375
840	464	0,329	2100	587	0,099	3360	658	0,106	4620	746	0,271
850	466	0,328	2110	588	0,099	3370	658	0,106	4630	747	0,271
860	468	0,328	2120	588	0,099	3380	659	0,106	4640	747	0,272

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
870	469	0,328	2130	588	0,099	3390	659	0,107	4650	747	0,273
880	471	0,328	2140	588	0,099	3400	659	0,107	4660	748	0,274
890	472	0,328	2150	589	0,099	3410	660	0,107	4670	748	0,275
900	474	0,285	2160	589	0,126	3420	660	0,199	4680	749	0,427
910	475	0,286	2170	590	0,126	3430	661	0,200	4690	749	0,428
920	476	0,286	2180	590	0,126	3440	661	0,200	4700	750	0,430
930	477	0,287	2190	591	0,126	3450	662	0,200	4710	751	0,432
940	478	0,287	2200	592	0,126	3460	663	0,200	4720	752	0,433
950	479	0,288	2210	593	0,126	3470	663	0,200	4730	753	0,434
960	480	0,225	2220	594	0,126	3480	664	0,201	4740	754	0,168
970	480	0,225	2230	595	0,126	3490	664	0,201	4750	749	0,171
980	481	0,226	2240	595	0,125	3500	665	0,201	4760	745	0,175
990	481	0,226	2250	596	0,125	3510	666	0,201	4770	740	0,179
1000	482	0,226	2260	597	0,125	3520	666	0,202	4780	736	0,184
1010	483	0,227	2270	598	0,125	3530	667	0,202	4790	732	0,188
1020	483	0,249	2280	599	0,151	3540	667	0,188	4800	727	0,094
1030	484	0,249	2290	599	0,151	3550	668	0,188	4810	718	0,098
1040	486	0,249	2300	599	0,151	3560	668	0,188	4820	709	0,103
1050	487	0,249	2310	599	0,152	3570	669	0,189	4830	699	0,109
1060	488	0,249	2320	600	0,152	3580	670	0,189	4840	690	0,115
1070	489	0,249	2330	600	0,152	3590	670	0,189	4850	681	0,122
1080	490	0,270	2340	600	0,113	3600	671	0,262	4860	672	0,313
1090	491	0,270	2350	601	0,113	3610	672	0,262	4870	668	0,321
1100	492	0,271	2360	601	0,113	3620	673	0,262	4880	665	0,331
1110	492	0,271	2370	602	0,113	3630	674	0,263	4890	661	0,341
1120	493	0,271	2380	603	0,113	3640	674	0,263	4900	658	0,352
1130	494	0,272	2390	604	0,113	3650	675	0,264	4910	655	0,364
1140	495	0,122	2400	604	0,066	3660	676	0,249	4920	651	0,412
1150	495	0,122	2410	605	0,066	3670	677	0,250	4930	649	0,424
1160	495	0,122	2420	605	0,066	3680	678	0,250	4940	646	0,435
1170	495	0,122	2430	606	0,066	3690	679	0,250	4950	644	0,447
1180	495	0,122	2440	606	0,066	3700	680	0,250	4960	641	0,461
1190	495	0,123	2450	607	0,066	3710	681	0,250	4970	639	0,475
1200	496	0,211	2460	607	0,198	3720	682	0,221	4980	636	0,286
1210	497	0,210	2470	608	0,198	3730	682	0,221	4990	635	0,290
1220	498	0,210	2480	609	0,198	3740	682	0,222	5000	634	0,294
1230	500	0,210	2490	610	0,198	3750	683	0,222	5010	633	0,299
1240	501	0,209	2500	611	0,198	3760	683	0,223	5020	632	0,303
1250	502	0,209	2510	612	0,198	3770	684	0,224	5030	631	0,308

Tabla 13-8: Conductividad térmica relativa de la PI para P9.

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
0	48	-27,083	450	487	0,332	900	562	0,193	1350	620	0,299
10	71	3,617	460	490	0,332	910	563	0,193	1360	621	0,301
20	94	1,702	470	494	0,331	920	565	0,194	1370	622	0,303
30	117	1,117	480	497	0,199	930	566	0,194	1380	624	0,252
40	140	0,833	490	499	0,198	940	567	0,195	1390	625	0,253
50	163	0,665	500	501	0,198	950	569	0,195	1400	626	0,254
60	186	1,350	510	503	0,198	960	570	0,160	1410	628	0,255
70	202	1,276	520	505	0,198	970	572	0,161	1420	629	0,256
80	219	1,212	530	507	0,197	980	573	0,161	1430	631	0,257
90	236	1,154	540	510	0,174	990	574	0,161	1440	632	0,233
100	252	1,101	550	512	0,173	1000	576	0,161	1450	633	0,234
110	269	1,054	560	514	0,173	1010	577	0,161	1460	634	0,235
120	285	0,881	570	516	0,172	1020	579	0,199	1470	635	0,236
130	292	0,892	580	518	0,172	1030	580	0,200	1480	637	0,237
140	299	0,904	590	520	0,171	1040	581	0,201	1490	638	0,238
150	305	0,915	600	523	0,177	1050	582	0,202	1500	639	0,286
160	312	0,926	610	524	0,177	1060	583	0,202	1510	640	0,287
170	318	0,938	620	525	0,177	1070	584	0,203	1520	642	0,289
180	325	0,890	630	527	0,178	1080	585	0,236	1530	643	0,290
190	331	0,902	640	528	0,178	1090	586	0,237	1540	644	0,292
200	337	0,914	650	530	0,178	1100	588	0,239	1550	646	0,294
210	343	0,926	660	531	0,185	1110	589	0,240	1560	647	0,366

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
220	349	0,938	670	532	0,185	1120	590	0,241	1570	649	0,366
230	355	0,950	680	534	0,186	1130	591	0,242	1580	652	0,367
240	361	0,621	690	535	0,186	1140	593	0,232	1590	655	0,367
250	365	0,625	700	537	0,187	1150	594	0,233	1600	657	0,368
260	369	0,628	710	538	0,187	1160	596	0,234	1610	660	0,368
270	373	0,632	720	539	0,137	1170	597	0,234	1620	662	0,319
280	377	0,636	730	541	0,137	1180	599	0,235	1630	663	0,321
290	382	0,639	740	542	0,137	1190	600	0,236	1640	665	0,324
300	386	0,768	750	544	0,137	1200	602	0,191	1650	666	0,326
310	394	0,756	760	545	0,137	1210	603	0,192	1660	667	0,328
320	403	0,743	770	546	0,137	1220	604	0,193	1670	668	0,331
330	411	0,732	780	548	0,173	1230	605	0,193	1680	670	0,301
340	420	0,720	790	549	0,174	1240	606	0,194	1690	671	0,302
350	428	0,709	800	550	0,174	1250	607	0,195	1700	672	0,304
360	437	0,659	810	551	0,175	1260	608	0,226	1710	674	0,305
370	443	0,655	820	553	0,175	1270	609	0,227	1720	675	0,307
380	450	0,652	830	554	0,175	1280	611	0,228	1730	677	0,308
390	457	0,648	840	555	0,182	1290	612	0,228	1740	678	0,367
400	463	0,645	850	556	0,183	1300	613	0,229	1750	679	0,369
410	470	0,641	860	557	0,184	1310	615	0,230	1760	681	0,372
420	477	0,334	870	558	0,184	1320	616	0,293	1770	682	0,375
430	480	0,334	880	559	0,185	1330	617	0,295	1780	684	0,378
440	483	0,333	890	561	0,185	1340	619	0,296	1790	685	0,381

Tabla 13-9: Conductividad térmica relativa de la PI para P10.

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
0	37	-55,833	750	504	0,081	1500	589	0,161	2250	663	0,214
10	67	5,082	760	505	0,081	1510	590	0,161	2260	663	0,215
20	97	2,447	770	506	0,080	1520	591	0,162	2270	664	0,216
30	127	1,617	780	507	0,142	1530	592	0,162	2280	665	0,272
40	157	1,211	790	509	0,141	1540	593	0,162	2290	666	0,273
50	187	0,970	800	511	0,141	1550	594	0,162	2300	667	0,274
60	217	2,212	810	513	0,140	1560	595	0,106	2310	669	0,274
70	231	2,215	820	515	0,140	1570	596	0,106	2320	670	0,275
80	246	2,219	830	516	0,139	1580	597	0,106	2330	672	0,276
90	260	2,221	840	518	0,116	1590	598	0,106	2340	673	0,248
100	275	2,220	850	519	0,117	1600	599	0,105	2350	674	0,249
110	289	2,219	860	520	0,117	1610	600	0,105	2360	676	0,250
120	304	1,336	870	521	0,117	1620	601	0,138	2370	677	0,250
130	317	1,299	880	522	0,117	1630	602	0,138	2380	678	0,251
140	330	1,264	890	522	0,117	1640	602	0,138	2390	679	0,252
150	344	1,231	900	523	0,121	1650	603	0,138	2400	680	0,143
160	357	1,200	910	524	0,121	1660	604	0,138	2410	680	0,143
170	370	1,171	920	526	0,121	1670	605	0,138	2420	681	0,144
180	383	0,778	930	527	0,121	1680	606	0,150	2430	681	0,144
190	383	0,803	940	528	0,120	1690	607	0,151	2440	682	0,145
200	383	0,829	950	529	0,120	1700	608	0,151	2450	682	0,145
210	383	0,857	960	531	0,077	1710	609	0,151	2460	683	0,257
220	383	0,886	970	531	0,077	1720	610	0,151	2470	684	0,258
230	383	0,917	980	532	0,077	1730	611	0,151	2480	685	0,259
240	382	0,521	990	533	0,077	1740	612	0,168	2490	686	0,260
250	386	0,519	1000	533	0,077	1750	613	0,168	2500	687	0,260
260	390	0,516	1010	534	0,077	1760	615	0,168	2510	688	0,261
270	394	0,514	1020	535	0,115	1770	616	0,168	2520	689	0,247
280	398	0,512	1030	536	0,115	1780	617	0,168	2530	690	0,248
290	402	0,509	1040	537	0,115	1790	618	0,168	2540	691	0,249
300	406	0,517	1050	538	0,115	1800	619	0,185	2550	692	0,250
310	410	0,513	1060	539	0,115	1810	620	0,185	2560	693	0,251
320	415	0,509	1070	540	0,115	1820	622	0,185	2570	693	0,252
330	420	0,506	1080	541	0,106	1830	623	0,185	2580	694	0,319
340	424	0,502	1090	542	0,106	1840	624	0,186	2590	696	0,321
350	429	0,498	1100	543	0,106	1850	625	0,186	2600	697	0,322
360	433	0,389	1110	543	0,106	1860	626	0,182	2610	698	0,323
370	436	0,389	1120	544	0,106	1870	627	0,183	2620	700	0,324

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
380	439	0,388	1130	545	0,106	1880	628	0,183	2630	701	0,326
390	441	0,388	1140	546	0,140	1890	629	0,184	2640	702	0,208
400	444	0,388	1150	547	0,140	1900	630	0,184	2650	703	0,208
410	447	0,387	1160	548	0,140	1910	630	0,184	2660	704	0,209
420	449	0,311	1170	549	0,140	1920	631	0,151	2670	705	0,209
430	451	0,311	1180	550	0,140	1930	632	0,151	2680	706	0,210
440	453	0,311	1190	551	0,140	1940	633	0,152	2690	706	0,211
450	455	0,312	1200	552	0,085	1950	634	0,152	2700	707	0,306
460	457	0,312	1210	552	0,085	1960	635	0,152	2710	708	0,308
470	459	0,312	1220	553	0,085	1970	636	0,152	2720	709	0,309
480	461	0,199	1230	553	0,085	1980	637	0,195	2730	710	0,310
490	463	0,198	1240	553	0,085	1990	638	0,195	2740	711	0,312
500	465	0,198	1250	553	0,085	2000	638	0,196	2750	713	0,313
510	466	0,198	1260	554	0,133	2010	639	0,196	2760	714	0,282
520	468	0,197	1270	555	0,133	2020	640	0,197	2770	714	0,284
530	470	0,197	1280	555	0,133	2030	641	0,198	2780	715	0,285
540	471	0,173	1290	556	0,133	2040	642	0,220	2790	716	0,286
550	473	0,173	1300	557	0,133	2050	643	0,220	2800	717	0,287
560	474	0,172	1310	558	0,133	2060	644	0,221	2810	718	0,289
570	476	0,172	1320	559	0,116	2070	645	0,222	2820	719	0,207
580	477	0,172	1330	560	0,116	2080	646	0,223	2830	704	0,226
590	479	0,172	1340	560	0,116	2090	647	0,223	2840	690	0,248
600	480	0,213	1350	561	0,116	2100	648	0,206	2850	675	0,275
610	482	0,213	1360	562	0,116	2110	649	0,207	2860	661	0,308
620	484	0,212	1370	562	0,116	2120	650	0,207	2870	647	0,351
630	486	0,212	1380	563	0,144	2130	651	0,207	2880	632	0,179
640	488	0,211	1390	566	0,142	2140	653	0,208	2890	627	0,189
650	489	0,211	1400	569	0,141	2150	654	0,208	2900	623	0,201
660	491	0,160	1410	573	0,139	2160	655	0,195	2910	618	0,214
670	493	0,160	1420	576	0,138	2170	656	0,196	2920	613	0,228
680	494	0,159	1430	579	0,137	2180	657	0,196	2930	608	0,245
690	496	0,159	1440	582	0,094	2190	658	0,196	2940	603	0,331
700	497	0,159	1450	583	0,094	2200	659	0,197	2950	600	0,352
710	498	0,159	1460	584	0,094	2210	660	0,197	2960	597	0,375
720	500	0,082	1470	585	0,093	2220	661	0,211	2970	593	0,402
730	501	0,081	1480	586	0,093	2230	662	0,212	2980	590	0,433
740	502	0,081	1490	588	0,093	2240	662	0,213	2990	587	0,469

Tabla 13-10: Conductividad térmica relativa de la PI para P11.

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
0	35	221,852	750	490	0,259	1500	588	0,166	2250	655	0,214
10	56	5,058	760	492	0,259	1510	589	0,166	2260	656	0,214
20	76	2,569	770	493	0,260	1520	590	0,166	2270	657	0,214
30	96	1,726	780	495	0,145	1530	591	0,166	2280	658	0,287
40	116	1,302	790	496	0,145	1540	592	0,166	2290	659	0,288
50	136	1,047	800	497	0,144	1550	593	0,166	2300	661	0,289
60	157	2,332	810	498	0,144	1560	594	0,162	2310	662	0,290
70	178	2,095	820	500	0,144	1570	595	0,162	2320	663	0,291
80	199	1,906	830	501	0,144	1580	596	0,162	2330	664	0,292
90	220	1,751	840	502	0,181	1590	597	0,163	2340	665	0,304
100	241	1,620	850	503	0,181	1600	598	0,163	2350	667	0,305
110	262	1,509	860	504	0,181	1610	598	0,163	2360	668	0,305
120	283	0,818	870	506	0,182	1620	599	0,154	2370	669	0,306
130	290	0,812	880	507	0,182	1630	600	0,155	2380	671	0,307
140	297	0,806	890	508	0,182	1640	600	0,155	2390	672	0,307
150	304	0,799	900	509	0,153	1650	600	0,156	2400	674	0,313
160	311	0,793	910	510	0,153	1660	601	0,156	2410	675	0,315
170	318	0,788	920	511	0,153	1670	601	0,157	2420	676	0,316
180	325	0,839	930	512	0,153	1680	601	0,162	2430	677	0,317
190	331	0,839	940	512	0,153	1690	602	0,162	2440	678	0,318
200	337	0,838	950	513	0,153	1700	603	0,163	2450	679	0,320
210	343	0,838	960	514	0,154	1710	604	0,163	2460	680	0,338
220	349	0,837	970	515	0,154	1720	604	0,163	2470	681	0,339
230	355	0,836	980	517	0,153	1730	605	0,164	2480	682	0,341

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
240	361	0,763	990	518	0,153	1740	606	0,223	2490	684	0,342
250	366	0,765	1000	519	0,153	1750	607	0,224	2500	685	0,344
260	371	0,767	1010	520	0,153	1760	608	0,224	2510	686	0,345
270	376	0,769	1020	522	0,131	1770	609	0,225	2520	687	0,307
280	381	0,771	1030	525	0,129	1780	610	0,225	2530	688	0,308
290	386	0,772	1040	529	0,127	1790	611	0,226	2540	689	0,309
300	390	0,659	1050	533	0,126	1800	612	0,166	2550	690	0,311
310	395	0,660	1060	537	0,124	1810	613	0,166	2560	691	0,312
320	399	0,660	1070	541	0,122	1820	614	0,167	2570	692	0,313
330	403	0,661	1080	545	0,102	1830	615	0,167	2580	693	0,274
340	408	0,662	1090	546	0,101	1840	615	0,167	2590	694	0,275
350	412	0,663	1100	548	0,101	1850	616	0,168	2600	695	0,276
360	416	0,413	1110	549	0,101	1860	617	0,182	2610	695	0,277
370	418	0,413	1120	550	0,100	1870	617	0,183	2620	696	0,278
380	421	0,415	1130	552	0,100	1880	618	0,183	2630	697	0,280
390	423	0,416	1140	553	0,130	1890	619	0,183	2640	698	0,329
400	425	0,417	1150	554	0,130	1900	620	0,184	2650	699	0,330
410	428	0,418	1160	555	0,129	1910	621	0,184	2660	700	0,331
420	430	0,415	1170	557	0,129	1920	622	0,250	2670	701	0,333
430	433	0,414	1180	558	0,129	1930	623	0,251	2680	702	0,334
440	436	0,414	1190	559	0,129	1940	624	0,252	2690	703	0,335
450	439	0,413	1200	560	0,112	1950	625	0,252	2700	704	0,356
460	442	0,413	1210	561	0,112	1960	626	0,253	2710	705	0,357
470	445	0,412	1220	561	0,112	1970	627	0,254	2720	707	0,358
480	448	0,327	1230	562	0,112	1980	628	0,245	2730	708	0,359
490	450	0,327	1240	563	0,112	1990	629	0,246	2740	709	0,361
500	452	0,328	1250	564	0,112	2000	629	0,248	2750	710	0,362
510	454	0,328	1260	565	0,146	2010	630	0,249	2760	712	0,394
520	456	0,329	1270	566	0,146	2020	631	0,250	2770	713	0,396
530	458	0,329	1280	567	0,146	2030	631	0,251	2780	714	0,398
540	459	0,320	1290	568	0,146	2040	632	0,208	2790	715	0,400
550	461	0,321	1300	569	0,146	2050	633	0,208	2800	717	0,402
560	463	0,321	1310	571	0,146	2060	634	0,209	2810	718	0,404
570	465	0,322	1320	572	0,133	2070	635	0,209	2820	719	0,367
580	467	0,322	1330	573	0,133	2080	636	0,210	2830	720	0,369
590	469	0,323	1340	574	0,133	2090	637	0,210	2840	721	0,371
600	470	0,247	1350	575	0,133	2100	638	0,255	2850	722	0,372
610	472	0,247	1360	576	0,133	2110	639	0,256	2860	723	0,374
620	473	0,248	1370	577	0,133	2120	640	0,257	2870	724	0,376
630	475	0,248	1380	578	0,154	2130	641	0,257	2880	725	0,365
640	476	0,248	1390	579	0,154	2140	642	0,258	2890	726	0,367
650	478	0,248	1400	580	0,154	2150	643	0,259	2900	727	0,369
660	479	0,177	1410	581	0,155	2160	644	0,290	2910	728	0,371
670	480	0,177	1420	581	0,155	2170	645	0,291	2920	729	0,373
680	481	0,177	1430	582	0,155	2180	647	0,292	2930	729	0,376
690	483	0,177	1440	583	0,156	2190	648	0,293	2940	730	0,253
700	484	0,177	1450	584	0,156	2200	649	0,294	2950	729	0,256
710	485	0,177	1460	584	0,156	2210	650	0,295	2960	728	0,259
720	486	0,258	1470	585	0,156	2220	651	0,213	2970	727	0,262
730	488	0,258	1480	586	0,156	2230	653	0,213	2980	726	0,266
740	489	0,258	1490	587	0,157	2240	654	0,213	2990	725	0,269

Tabla 13-11: Conductividad térmica relativa de la PI para P12.

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
0	36	-393,720	980	531	0,131	1960	607	0,168	2940	676	0,288
10	56	3,235	990	532	0,131	1970	608	0,168	2950	678	0,289
20	76	1,615	1000	533	0,131	1980	609	0,096	2960	679	0,289
30	96	1,077	1010	534	0,131	1990	610	0,096	2970	680	0,290
40	117	0,809	1020	535	0,219	2000	611	0,096	2980	681	0,290
50	137	0,649	1030	536	0,219	2010	611	0,096	2990	683	0,291
60	157	2,434	1040	538	0,219	2020	612	0,096	3000	684	0,218
70	177	2,209	1050	539	0,220	2030	613	0,096	3010	684	0,219
80	197	2,025	1060	540	0,220	2040	614	0,186	3020	685	0,220
90	217	1,870	1070	542	0,220	2050	615	0,186	3030	685	0,221

<b>t [s]</b>	<b>Tp [°C]</b>	<b>k PI [W/m°C]</b>	<b>t [s]</b>	<b>Tp [°C]</b>	<b>k PI [W/m°C]</b>	<b>t [s]</b>	<b>Tp [°C]</b>	<b>k PI [W/m°C]</b>	<b>t [s]</b>	<b>Tp [°C]</b>	<b>k PI [W/m°C]</b>
100	237	1,740	1080	543	0,164	2060	615	0,187	3040	686	0,222
110	258	1,629	1090	544	0,164	2070	616	0,188	3050	686	0,222
120	278	0,991	1100	545	0,164	2080	616	0,188	3060	687	0,246
130	286	0,983	1110	546	0,164	2090	617	0,189	3070	688	0,247
140	293	0,975	1120	547	0,164	2100	617	0,068	3080	689	0,247
150	301	0,967	1130	549	0,164	2110	618	0,068	3090	690	0,248
160	308	0,959	1140	550	0,136	2120	618	0,068	3100	691	0,248
170	316	0,951	1150	551	0,136	2130	618	0,068	3110	692	0,249
180	323	0,655	1160	552	0,136	2140	619	0,068	3120	693	0,232
190	328	0,651	1170	553	0,136	2150	619	0,068	3130	693	0,233
200	334	0,649	1180	554	0,136	2160	619	0,181	3140	694	0,233
210	339	0,645	1190	555	0,136	2170	620	0,181	3150	694	0,234
220	344	0,642	1200	556	0,108	2180	621	0,181	3160	695	0,235
230	349	0,639	1210	557	0,108	2190	622	0,181	3170	696	0,236
240	354	0,545	1220	557	0,107	2200	623	0,181	3180	696	0,196
250	358	0,545	1230	558	0,107	2210	625	0,181	3190	697	0,196
260	361	0,544	1240	559	0,107	2220	626	0,157	3200	698	0,196
270	365	0,544	1250	560	0,107	2230	626	0,157	3210	699	0,196
280	369	0,543	1260	561	0,140	2240	627	0,157	3220	700	0,196
290	372	0,543	1270	562	0,140	2250	627	0,157	3230	700	0,197
300	376	0,597	1280	563	0,140	2260	628	0,158	3240	701	0,358
310	380	0,598	1290	564	0,140	2270	629	0,158	3250	702	0,359
320	383	0,599	1300	564	0,140	2280	629	0,134	3260	703	0,361
330	387	0,600	1310	565	0,140	2290	630	0,134	3270	705	0,362
340	390	0,600	1320	566	0,089	2300	630	0,134	3280	706	0,364
350	394	0,601	1330	567	0,089	2310	631	0,134	3290	707	0,365
360	397	0,511	1340	567	0,089	2320	631	0,134	3300	708	0,220
370	400	0,511	1350	568	0,089	2330	632	0,134	3310	708	0,221
380	403	0,512	1360	568	0,089	2340	633	0,150	3320	709	0,221
390	406	0,513	1370	569	0,089	2350	633	0,150	3330	710	0,222
400	409	0,514	1380	569	0,122	2360	634	0,150	3340	710	0,223
410	412	0,514	1390	570	0,122	2370	635	0,150	3350	711	0,223
420	415	0,382	1400	571	0,122	2380	636	0,150	3360	712	0,280
430	417	0,383	1410	572	0,122	2390	637	0,150	3370	713	0,281
440	419	0,383	1420	573	0,122	2400	637	0,100	3380	713	0,282
450	422	0,383	1430	574	0,122	2410	637	0,100	3390	714	0,282
460	424	0,384	1440	575	0,098	2420	638	0,100	3400	715	0,283
470	426	0,384	1450	576	0,098	2430	638	0,101	3410	716	0,284
480	428	0,333	1460	576	0,098	2440	638	0,101	3420	717	0,235
490	430	0,334	1470	577	0,098	2450	638	0,101	3430	718	0,235
500	432	0,334	1480	578	0,098	2460	638	0,213	3440	719	0,235
510	434	0,334	1490	578	0,098	2470	640	0,213	3450	720	0,236
520	436	0,334	1500	579	0,056	2480	641	0,213	3460	721	0,236
530	438	0,334	1510	579	0,056	2490	643	0,213	3470	722	0,236
540	440	0,324	1520	580	0,056	2500	644	0,213	3480	723	0,357
550	442	0,324	1530	580	0,056	2510	645	0,213	3490	724	0,359
560	444	0,324	1540	581	0,056	2520	647	0,126	3500	724	0,361
570	445	0,325	1550	581	0,056	2530	647	0,127	3510	725	0,363
580	447	0,325	1560	581	0,121	2540	647	0,127	3520	726	0,366
590	449	0,325	1570	582	0,121	2550	648	0,127	3530	726	0,368
600	451	0,310	1580	583	0,121	2560	648	0,128	3540	727	0,292
610	453	0,310	1590	584	0,121	2570	648	0,128	3550	728	0,292
620	455	0,310	1600	584	0,122	2580	649	0,231	3560	729	0,292
630	457	0,309	1610	585	0,122	2590	650	0,232	3570	731	0,293
640	459	0,309	1620	586	0,145	2600	651	0,232	3580	732	0,293
650	461	0,309	1630	587	0,145	2610	652	0,232	3590	733	0,293
660	463	0,234	1640	587	0,145	2620	653	0,233	3600	735	0,253
670	467	0,231	1650	588	0,145	2630	654	0,233	3610	736	0,253
680	471	0,229	1660	588	0,146	2640	655	0,156	3620	736	0,254
690	475	0,226	1670	589	0,146	2650	656	0,156	3630	737	0,255
700	479	0,224	1680	589	0,118	2660	656	0,156	3640	738	0,256
710	483	0,221	1690	590	0,118	2670	657	0,156	3650	739	0,256
720	487	0,208	1700	591	0,118	2680	658	0,156	3660	739	0,324
730	489	0,207	1710	592	0,118	2690	659	0,156	3670	740	0,326
740	491	0,206	1720	593	0,118	2700	660	0,145	3680	741	0,327
750	494	0,206	1730	594	0,118	2710	660	0,146	3690	741	0,329
760	496	0,205	1740	595	0,108	2720	661	0,146	3700	742	0,330



t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
770	498	0,204	1750	595	0,108	2730	661	0,147	3710	743	0,332
780	500	0,241	1760	595	0,109	2740	661	0,147	3720	744	0,246
790	502	0,240	1770	596	0,109	2750	662	0,147	3730	734	0,259
800	504	0,240	1780	596	0,109	2760	662	0,270	3740	725	0,274
810	506	0,240	1790	596	0,109	2770	663	0,270	3750	716	0,290
820	507	0,240	1800	597	0,124	2780	664	0,271	3760	706	0,309
830	509	0,240	1810	598	0,124	2790	666	0,272	3770	697	0,330
840	511	0,235	1820	599	0,124	2800	667	0,272	3780	688	0,220
850	513	0,235	1830	599	0,124	2810	668	0,273	3790	682	0,230
860	514	0,235	1840	600	0,124	2820	669	0,139	3800	676	0,241
870	516	0,235	1850	601	0,124	2830	670	0,139	3810	670	0,254
880	518	0,235	1860	602	0,062	2840	670	0,140	3820	665	0,267
890	519	0,234	1870	602	0,062	2850	670	0,140	3830	659	0,282
900	521	0,178	1880	603	0,062	2860	671	0,140	3840	653	0,346
910	522	0,178	1890	603	0,062	2870	671	0,140	3850	650	0,359
920	524	0,178	1900	603	0,062	2880	672	0,260	3860	647	0,372
930	525	0,178	1910	603	0,062	2890	673	0,261	3870	645	0,387
940	526	0,178	1920	603	0,167	2900	673	0,261	3880	642	0,402
950	527	0,178	1930	604	0,167	2910	674	0,263	3890	639	0,418
960	528	0,131	1940	605	0,168	2920	675	0,263			
970	529	0,131	1950	606	0,168	2930	676	0,264			

Tabla 13-12: Conductividad térmica relativa de la PI para P13.

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
0	5	974,714	450	452	0,104	900	545	0,103	1350	613	0,228
10	23	12,902	460	453	0,105	910	546	0,103	1360	615	0,229
20	41	6,525	470	454	0,105	920	547	0,103	1370	616	0,230
30	58	4,420	480	454	0,139	930	548	0,103	1380	617	0,343
40	76	3,362	490	455	0,139	940	549	0,103	1390	619	0,345
50	94	2,725	500	457	0,139	950	550	0,104	1400	621	0,348
60	111	0,470	510	458	0,140	960	551	0,170	1410	623	0,352
70	115	0,454	520	459	0,140	970	552	0,171	1420	625	0,355
80	119	0,439	530	460	0,140	980	553	0,171	1430	627	0,358
90	123	0,425	540	461	0,216	990	554	0,172	1440	629	0,155
100	127	0,411	550	463	0,215	1000	556	0,173	1450	631	0,155
110	130	0,399	560	466	0,214	1010	557	0,173	1460	633	0,154
120	134	0,713	570	468	0,214	1020	558	0,139	1470	635	0,154
130	145	0,641	580	471	0,213	1030	560	0,139	1480	637	0,153
140	156	0,583	590	473	0,213	1040	561	0,139	1490	639	0,153
150	167	0,534	600	476	0,138	1050	562	0,140	1500	641	0,285
160	178	0,493	610	477	0,139	1060	563	0,140	1510	647	0,280
170	189	0,458	620	478	0,139	1070	565	0,140	1520	652	0,275
180	200	0,614	630	479	0,139	1080	566	0,265	1530	658	0,270
190	211	0,583	640	481	0,139	1090	568	0,266	1540	663	0,266
200	222	0,555	650	482	0,139	1100	570	0,268	1550	669	0,261
210	234	0,530	660	483	0,121	1110	572	0,270	1560	674	0,207
220	245	0,507	670	485	0,120	1120	573	0,272	1570	676	0,208
230	256	0,485	680	487	0,120	1130	575	0,273	1580	677	0,209
240	267	2,708	690	488	0,119	1140	577	0,338	1590	679	0,210
250	296	2,767	700	490	0,119	1150	580	0,340	1600	680	0,211
260	325	2,821	710	492	0,118	1160	582	0,343	1610	682	0,212
270	353	2,868	720	494	0,145	1170	585	0,345	1620	683	0,147
280	382	2,912	730	496	0,145	1180	588	0,347	1630	684	0,148
290	411	2,955	740	498	0,144	1190	590	0,350	1640	685	0,148
300	439	0,139	750	500	0,143	1200	593	0,215	1650	686	0,148
310	440	0,139	760	502	0,143	1210	594	0,216	1660	688	0,149
320	441	0,140	770	504	0,142	1220	596	0,217	1670	689	0,149
330	442	0,140	780	506	0,109	1230	597	0,219	1680	690	0,239
340	443	0,141	790	508	0,109	1240	598	0,220	1690	691	0,241
350	444	0,141	800	510	0,109	1250	600	0,221	1700	692	0,242
360	445	0,111	810	512	0,108	1260	601	0,182	1710	694	0,244
370	446	0,112	820	513	0,108	1270	602	0,183	1720	695	0,246
380	446	0,112	830	515	0,107	1280	604	0,184	1730	696	0,248
390	447	0,112	840	517	0,197	1290	605	0,184	1740	697	0,113

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
400	448	0,112	850	521	0,194	1300	606	0,185	1750	698	0,114
410	449	0,113	860	526	0,191	1310	608	0,186	1760	698	0,114
420	450	0,104	870	531	0,188	1320	609	0,224	1770	698	0,115
430	450	0,104	880	535	0,185	1330	610	0,226	1780	699	0,115
440	451	0,104	890	540	0,183	1340	612	0,227	1790	699	0,116

Tabla 13-13: Conductividad térmica relativa de la PI para P14.

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
0	39	-126,225	750	519	1,526	1500	620	0,112	2250	702	0,253
10	59	1,892	760	528	1,580	1510	621	0,112	2260	703	0,254
20	78	0,940	770	536	1,638	1520	622	0,112	2270	705	0,255
30	98	0,627	780	545	0,115	1530	622	0,112	2280	706	0,236
40	118	0,470	790	547	0,115	1540	623	0,112	2290	707	0,237
50	137	0,377	800	548	0,115	1550	624	0,113	2300	708	0,238
60	157	0,786	810	549	0,115	1560	625	0,164	2310	709	0,239
70	167	0,745	820	551	0,115	1570	626	0,165	2320	711	0,240
80	178	0,709	830	552	0,115	1580	627	0,165	2330	712	0,241
90	188	0,677	840	553	0,115	1590	628	0,165	2340	713	0,210
100	199	0,647	850	555	0,115	1600	629	0,166	2350	714	0,211
110	209	0,620	860	556	0,115	1610	631	0,166	2360	715	0,211
120	220	0,437	870	558	0,114	1620	632	0,124	2370	717	0,212
130	225	0,434	880	559	0,114	1630	633	0,124	2380	718	0,212
140	229	0,431	890	561	0,114	1640	633	0,124	2390	719	0,213
150	234	0,429	900	562	0,083	1650	634	0,125	2400	720	0,246
160	238	0,426	910	563	0,083	1660	635	0,125	2410	721	0,248
170	243	0,423	920	565	0,083	1670	636	0,125	2420	722	0,248
180	247	0,413	930	566	0,083	1680	637	0,145	2430	724	0,250
190	255	0,401	940	567	0,083	1690	638	0,145	2440	725	0,251
200	263	0,390	950	568	0,083	1700	638	0,146	2450	726	0,252
210	271	0,380	960	569	0,095	1710	639	0,146	2460	727	0,270
220	279	0,370	970	570	0,095	1720	640	0,146	2470	728	0,271
230	287	0,361	980	571	0,095	1730	641	0,147	2480	730	0,272
240	295	0,582	990	572	0,095	1740	642	0,194	2490	731	0,274
250	302	0,576	1000	574	0,094	1750	643	0,195	2500	732	0,275
260	310	0,570	1010	575	0,094	1760	644	0,195	2510	733	0,277
270	318	0,564	1020	576	0,116	1770	645	0,196	2520	734	0,161
280	325	0,559	1030	577	0,116	1780	647	0,197	2530	722	0,173
290	333	0,553	1040	578	0,116	1790	648	0,197	2540	709	0,187
300	341	0,450	1050	579	0,116	1800	649	0,188	2550	696	0,204
310	345	0,451	1060	580	0,116	1810	650	0,188	2560	684	0,223
320	349	0,452	1070	581	0,116	1820	651	0,189	2570	671	0,247
330	353	0,453	1080	582	0,126	1830	653	0,189	2580	658	0,097
340	357	0,454	1090	583	0,126	1840	654	0,190	2590	652	0,103
350	362	0,456	1100	585	0,125	1850	655	0,190	2600	645	0,110
360	366	0,385	1110	587	0,125	1860	656	0,167	2610	639	0,118
370	372	0,381	1120	588	0,125	1870	658	0,167	2620	632	0,127
380	378	0,376	1130	590	0,125	1880	659	0,167	2630	626	0,138
390	385	0,372	1140	591	0,076	1890	660	0,167	2640	619	0,166
400	391	0,368	1150	592	0,076	1900	661	0,168	2650	615	0,177
410	397	0,364	1160	593	0,076	1910	662	0,168	2660	611	0,189
420	403	0,190	1170	593	0,076	1920	664	0,165	2670	607	0,202
430	406	0,190	1180	594	0,076	1930	664	0,165	2680	603	0,218
440	408	0,189	1190	595	0,076	1940	665	0,166	2690	599	0,236
450	411	0,189	1200	595	0,091	1950	666	0,166	2700	595	0,178
460	414	0,188	1210	596	0,092	1960	667	0,167	2710	594	0,181
470	416	0,188	1220	596	0,092	1970	668	0,167	2720	593	0,185
480	419	0,164	1230	597	0,092	1980	668	0,208	2730	593	0,189
490	421	0,164	1240	598	0,092	1990	670	0,208	2740	592	0,193
500	423	0,163	1250	598	0,092	2000	671	0,209	2750	592	0,197
510	425	0,163	1260	599	0,123	2010	672	0,210	2760	591	-0,759
520	428	0,163	1270	600	0,123	2020	673	0,210	2770	602	-0,590
530	430	0,163	1280	601	0,123	2030	674	0,211	2780	613	-0,482
540	432	0,164	1290	602	0,123	2040	675	0,223	2790	625	-0,408
550	438	0,161	1300	604	0,123	2050	677	0,224	2800	636	-0,353

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
560	444	0,159	1310	605	0,123	2060	678	0,225	2810	647	-0,311
570	449	0,156	1320	606	0,111	2070	679	0,226	2820	658	0,097
580	455	0,154	1330	607	0,111	2080	680	0,227	2830	652	0,103
590	461	0,151	1340	608	0,111	2090	681	0,228	2840	645	0,110
600	466	0,155	1350	608	0,112	2100	682	0,150	2850	639	0,118
610	469	0,155	1360	609	0,112	2110	683	0,150	2860	632	0,127
620	472	0,154	1370	610	0,112	2120	685	0,150	2870	626	0,138
630	475	0,154	1380	611	0,128	2130	686	0,151	2880	619	0,166
640	477	0,153	1390	612	0,128	2140	687	0,151	2890	615	0,177
650	480	0,153	1400	612	0,128	2150	688	0,151	2900	611	0,189
660	483	0,047	1410	613	0,128	2160	689	0,234	2910	607	0,202
670	484	0,047	1420	614	0,129	2170	690	0,235	2920	603	0,218
680	486	0,047	1430	615	0,129	2180	692	0,235	2930	599	0,236
690	488	0,046	1440	616	0,110	2190	693	0,236	2940	595	0,178
700	489	0,046	1450	617	0,110	2200	695	0,237	2950	594	0,181
710	491	0,046	1460	617	0,111	2210	696	0,238	2960	593	0,185
720	492	1,376	1470	618	0,111	2220	698	0,250	2970	593	0,189
730	501	1,423	1480	619	0,111	2230	699	0,251	2980	592	0,193
740	510	1,473	1490	619	0,111	2240	701	0,252	2990	592	0,197

Tabla 13-14: Conductividad térmica relativa de la PI para P15.

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
0	39	-36,612	740	512	0,185	1480	581	0,137	2220	667	0,322
10	63	3,243	750	514	0,186	1490	582	0,137	2230	668	0,324
20	87	1,559	760	515	0,186	1500	582	0,159	2240	670	0,325
30	111	1,027	770	516	0,186	1510	583	0,160	2250	671	0,327
40	135	0,768	780	517	0,176	1520	584	0,160	2260	673	0,328
50	158	0,613	790	519	0,176	1530	584	0,161	2270	674	0,330
60	182	1,313	800	520	0,176	1540	585	0,161	2280	676	0,203
70	189	1,330	810	522	0,176	1550	586	0,162	2290	677	0,203
80	195	1,347	820	523	0,176	1560	586	0,106	2300	678	0,203
90	202	1,364	830	524	0,176	1570	588	0,106	2310	679	0,204
100	208	1,380	840	526	0,118	1580	589	0,106	2320	680	0,204
110	215	1,397	850	527	0,118	1590	590	0,106	2330	681	0,205
120	221	0,964	860	528	0,118	1600	591	0,106	2340	683	0,245
130	228	0,953	870	529	0,118	1610	592	0,106	2350	684	0,245
140	234	0,944	880	529	0,118	1620	594	0,139	2360	685	0,246
150	241	0,934	890	530	0,118	1630	595	0,139	2370	687	0,246
160	247	0,925	900	531	0,111	1640	596	0,139	2380	688	0,247
170	254	0,915	910	532	0,110	1650	598	0,139	2390	689	0,248
180	261	0,684	920	534	0,110	1660	599	0,139	2400	691	0,253
190	271	0,653	930	535	0,110	1670	600	0,139	2410	692	0,254
200	282	0,623	940	536	0,110	1680	602	0,153	2420	693	0,255
210	292	0,597	950	537	0,110	1690	602	0,154	2430	694	0,256
220	303	0,573	960	538	0,096	1700	603	0,154	2440	695	0,257
230	313	0,551	970	539	0,096	1710	604	0,154	2450	696	0,258
240	324	0,789	980	540	0,095	1720	605	0,155	2460	697	0,346
250	331	0,786	990	541	0,095	1730	605	0,155	2470	698	0,348
260	337	0,783	1000	543	0,095	1740	606	0,220	2480	700	0,350
270	344	0,780	1010	544	0,095	1750	607	0,221	2490	701	0,351
280	351	0,776	1020	545	0,120	1760	609	0,221	2500	703	0,353
290	358	0,774	1030	546	0,120	1770	610	0,222	2510	705	0,355
300	365	0,837	1040	547	0,120	1780	611	0,222	2520	706	0,211
310	374	0,824	1050	548	0,120	1790	613	0,223	2530	707	0,212
320	384	0,811	1060	550	0,120	1800	614	0,135	2540	708	0,212
330	393	0,798	1070	551	0,120	1810	615	0,135	2550	709	0,213
340	403	0,786	1080	552	0,047	1820	616	0,135	2560	710	0,213
350	412	0,775	1090	552	0,047	1830	617	0,135	2570	711	0,214
360	422	0,409	1100	553	0,047	1840	618	0,135	2580	712	0,258
370	425	0,408	1110	553	0,047	1850	619	0,136	2590	714	0,258
380	429	0,408	1120	554	0,047	1860	620	0,190	2600	715	0,259
390	433	0,407	1130	554	0,047	1870	621	0,190	2610	717	0,259
400	437	0,407	1140	555	0,090	1880	623	0,190	2620	718	0,260
410	440	0,406	1150	555	0,090	1890	624	0,190	2630	720	0,260

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
420	444	0,325	1160	556	0,091	1900	626	0,190	2640	721	0,386
430	447	0,325	1170	556	0,091	1910	627	0,191	2650	722	0,388
440	450	0,324	1180	557	0,091	1920	629	0,206	2660	724	0,390
450	454	0,323	1190	558	0,091	1930	630	0,206	2670	725	0,393
460	457	0,323	1200	558	0,145	1940	631	0,207	2680	727	0,395
470	460	0,322	1210	559	0,145	1950	632	0,207	2690	728	0,398
480	463	0,336	1220	560	0,146	1960	634	0,208	2700	730	0,376
490	466	0,336	1230	560	0,146	1970	635	0,208	2710	731	0,378
500	469	0,336	1240	561	0,147	1980	636	0,256	2720	733	0,380
510	471	0,337	1250	562	0,147	1990	638	0,256	2730	734	0,382
520	474	0,337	1260	562	0,067	2000	640	0,257	2740	736	0,384
530	477	0,337	1270	564	0,067	2010	641	0,257	2750	737	0,386
540	480	0,218	1280	565	0,067	2020	643	0,258	2760	739	0,233
550	481	0,218	1290	566	0,066	2030	645	0,259	2770	740	0,234
560	483	0,218	1300	568	0,066	2040	646	0,187	2780	740	0,235
570	484	0,219	1310	569	0,066	2050	648	0,188	2790	741	0,236
580	486	0,219	1320	570	0,094	2060	649	0,188	2800	742	0,237
590	488	0,219	1330	571	0,094	2070	650	0,188	2810	743	0,238
600	489	0,191	1340	572	0,094	2080	651	0,189	2820	743	0,248
610	491	0,191	1350	573	0,094	2090	652	0,189	2830	736	0,260
620	493	0,190	1360	574	0,094	2100	653	0,205	2840	729	0,273
630	495	0,190	1370	575	0,094	2110	654	0,206	2850	722	0,288
640	497	0,189	1380	575	0,105	2120	655	0,207	2860	715	0,304
650	500	0,189	1390	576	0,105	2130	656	0,207	2870	707	0,323
660	502	0,166	1400	576	0,105	2140	657	0,208	2880	700	0,004
670	503	0,166	1410	577	0,105	2150	658	0,209	2890	697	0,004
680	504	0,167	1420	577	0,106	2160	659	0,238	2900	694	0,004
690	506	0,167	1430	578	0,106	2170	660	0,239	2910	691	0,004
700	507	0,167	1440	578	0,136	2180	661	0,240	2920	688	0,004
710	509	0,167	1450	579	0,136	2190	663	0,241	2930	685	0,004
720	510	0,185	1460	579	0,136	2200	664	0,241			
730	511	0,185	1470	580	0,136	2210	665	0,242			

Tabla 13-15: Conductividad térmica relativa de la PI para P16.

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
0	50	-11,592	900	488	0,199	1800	604	0,126	2700	678	0,204
10	61	6,020	910	492	0,197	1810	604	0,127	2710	680	0,204
20	71	2,393	920	495	0,195	1820	605	0,127	2720	681	0,204
30	82	1,497	930	498	0,194	1830	605	0,127	2730	682	0,205
40	93	1,089	940	502	0,192	1840	606	0,127	2740	683	0,205
50	104	0,856	950	505	0,190	1850	607	0,128	2750	684	0,205
60	115	0,876	960	508	0,182	1860	607	0,101	2760	685	0,262
70	119	0,845	970	513	0,180	1870	608	0,101	2770	686	0,263
80	123	0,817	980	518	0,177	1880	609	0,101	2780	687	0,265
90	127	0,791	990	524	0,174	1890	610	0,101	2790	688	0,266
100	130	0,766	1000	529	0,172	1900	610	0,101	2800	689	0,267
110	134	0,744	1010	534	0,169	1910	611	0,101	2810	690	0,268
120	138	1,374	1020	539	0,157	1920	612	0,098	2820	691	0,248
130	149	1,236	1030	541	0,156	1930	613	0,098	2830	692	0,248
140	160	1,124	1040	543	0,156	1940	614	0,097	2840	693	0,249
150	171	1,032	1050	546	0,155	1950	615	0,097	2850	695	0,249
160	182	0,953	1060	548	0,155	1960	616	0,097	2860	696	0,250
170	192	0,887	1070	550	0,154	1970	617	0,097	2870	697	0,251
180	203	1,057	1080	552	0,137	1980	618	0,100	2880	699	0,210
190	214	1,002	1090	553	0,138	1990	619	0,100	2890	700	0,211
200	225	0,953	1100	553	0,138	2000	619	0,101	2900	701	0,211
210	236	0,909	1110	553	0,139	2010	620	0,101	2910	702	0,211
220	246	0,869	1120	553	0,139	2020	620	0,101	2920	703	0,212
230	257	0,832	1130	554	0,140	2030	621	0,101	2930	704	0,212
240	268	0,706	1140	554	0,118	2040	621	0,125	2940	705	0,259
250	278	0,681	1150	554	0,119	2050	622	0,125	2950	707	0,260
260	288	0,658	1160	555	0,119	2060	622	0,125	2960	708	0,260
270	297	0,636	1170	555	0,119	2070	623	0,125	2970	709	0,261
280	307	0,617	1180	556	0,120	2080	624	0,125	2980	711	0,261

t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]	t [s]	Tp [°C]	k PI [W/m°C]
290	317	0,598	1190	556	0,120	2090	624	0,126	2990	712	0,262
300	326	0,551	1200	557	0,147	2100	625	0,130	3000	714	0,276
310	330	0,551	1210	558	0,147	2110	626	0,130	3010	714	0,277
320	335	0,551	1220	559	0,147	2120	626	0,130	3020	715	0,279
330	339	0,550	1230	560	0,147	2130	627	0,131	3030	716	0,280
340	343	0,550	1240	562	0,147	2140	628	0,131	3040	717	0,281
350	347	0,550	1250	563	0,147	2150	628	0,131	3050	718	0,283
360	351	0,641	1260	564	0,094	2160	629	0,119	3060	719	0,275
370	354	0,645	1270	565	0,094	2170	629	0,119	3070	720	0,276
380	358	0,649	1280	566	0,094	2180	630	0,119	3080	721	0,277
390	361	0,652	1290	567	0,094	2190	630	0,120	3090	723	0,278
400	365	0,656	1300	568	0,094	2200	630	0,120	3100	724	0,279
410	368	0,660	1310	569	0,094	2210	631	0,121	3110	725	0,280
420	372	0,558	1320	570	0,109	2220	631	0,149	3120	726	0,285
430	375	0,560	1330	571	0,109	2230	632	0,150	3130	727	0,286
440	378	0,561	1340	572	0,109	2240	632	0,150	3140	728	0,288
450	382	0,562	1350	573	0,109	2250	633	0,150	3150	729	0,290
460	385	0,564	1360	574	0,109	2260	634	0,150	3160	730	0,291
470	389	0,565	1370	575	0,109	2270	635	0,151	3170	730	0,293
480	392	0,391	1380	576	0,116	2280	636	0,138	3180	731	0,243
490	392	0,395	1390	577	0,116	2290	636	0,139	3190	732	0,244
500	392	0,400	1400	579	0,116	2300	636	0,139	3200	733	0,245
510	393	0,405	1410	580	0,116	2310	637	0,140	3210	734	0,246
520	393	0,410	1420	581	0,116	2320	637	0,140	3220	735	0,247
530	393	0,416	1430	582	0,116	2330	638	0,140	3230	736	0,247
540	394	0,312	1440	584	0,063	2340	638	0,174	3240	737	0,346
550	395	0,313	1450	584	0,063	2350	639	0,175	3250	738	0,348
560	396	0,315	1460	584	0,063	2360	639	0,175	3260	740	0,350
570	397	0,316	1470	585	0,063	2370	640	0,176	3270	741	0,351
580	398	0,318	1480	585	0,063	2380	640	0,177	3280	742	0,353
590	399	0,319	1490	585	0,063	2390	641	0,177	3290	744	0,355
600	400	0,000	1500	586	0,101	2400	641	0,132	3300	745	0,314
610	400	0,000	1510	586	0,101	2410	643	0,132	3310	746	0,315
620	400	0,000	1520	587	0,101	2420	644	0,132	3320	747	0,317
630	400	0,000	1530	587	0,101	2430	645	0,132	3330	748	0,318
640	400	0,000	1540	588	0,101	2440	647	0,131	3340	749	0,320
650	400	0,000	1550	588	0,101	2450	648	0,131	3350	749	0,322
660	400	0,662	1560	589	0,094	2460	649	0,168	3360	750	0,302
670	409	0,642	1570	590	0,094	2470	650	0,169	3370	751	0,304
680	418	0,625	1580	591	0,094	2480	651	0,169	3380	752	0,305
690	427	0,608	1590	592	0,094	2490	651	0,170	3390	753	0,307
700	436	0,592	1600	592	0,094	2500	652	0,170	3400	754	0,308
710	446	0,577	1610	593	0,094	2510	652	0,171	3410	755	0,309
720	455	0,222	1620	594	0,098	2520	653	0,184	3420	756	0,300
730	457	0,221	1630	595	0,098	2530	654	0,185	3430	757	0,301
740	459	0,220	1640	596	0,098	2540	655	0,185	3440	758	0,302
750	462	0,219	1650	597	0,098	2550	656	0,185	3450	759	0,304
760	464	0,218	1660	597	0,098	2560	657	0,185	3460	760	0,305
770	467	0,218	1670	598	0,098	2570	659	0,185	3470	761	0,306
780	469	0,186	1680	599	0,083	2580	660	0,212	3480	762	0,200
790	471	0,186	1690	599	0,083	2590	662	0,212	3490	760	0,203
800	472	0,186	1700	600	0,083	2600	664	0,212	3500	757	0,207
810	474	0,185	1710	600	0,083	2610	666	0,211	3510	755	0,210
820	475	0,185	1720	601	0,083	2620	667	0,211	3520	753	0,214
830	477	0,185	1730	601	0,083	2630	669	0,211	3530	750	0,218
840	479	0,197	1740	602	0,102	2640	671	0,202	3540	748	0,328
850	480	0,197	1750	602	0,102	2650	672	0,202	3550	738	0,351
860	482	0,197	1760	602	0,102	2660	674	0,202	3560	728	0,376
870	483	0,197	1770	603	0,103	2670	675	0,203	3570	717	0,406
880	485	0,197	1780	603	0,103	2680	676	0,203	3580	707	0,441
890	487	0,197	1790	603	0,103	2690	677	0,203	3590	697	0,482

# 14 ANEXO D: TEMPERATURAS DE LOS PERFILES SEGÚN MÓDELO 2

Tabla 14-1: Temperaturas del perfil según ensayos y modelo 2, probetas P5, P6, P7 y P8.

t [min]	P5		P6		P7		P8		t [min]	P5		P6		P7		P8	
	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]		TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]
0	51	51	47	47	38	38	29	29	42	-	-	440	442	395	396	338	375
1	63	65	61	57	44	46	37	39	43	-	-	447	449	401	403	341	381
2	98	103	88	84	51	56	66	59	44	-	-	455	456	406	410	344	386
3	129	142	116	112	66	69	89	81	45	-	-	462	463	410	416	346	391
4	163	178	142	139	87	92	107	104	46	-	-	468	470	415	423	350	397
5	197	211	164	165	116	117	124	127	47	-	-	474	477	422	430	353	402
6	232	238	186	188	145	141	141	148	48	-	-	482	484	427	437	356	408
7	261	259	215	208	175	164	155	166	49	-	-	488	491	433	444	360	413
8	280	276	237	224	175	183	167	182	50	-	-	494	498	441	450	365	419
9	296	290	250	237	214	200	178	196	51	-	-	502	505	446	457	370	424
10	310	301	262	248	230	212	189	208	52	-	-	510	512	452	464	374	430
11	317	311	274	257	243	223	197	219	53	-	-	517	519	458	470	378	435
12	325	319	284	265	252	232	206	228	54	-	-	522	525	464	477	382	441
13	332	327	291	272	260	240	214	236	55	-	-	-	-	471	484	388	446
14	340	334	297	279	268	247	222	243	56	-	-	-	-	477	490	392	452
15	348	341	304	285	275	254	230	250	57	-	-	-	-	481	497	394	458
16	357	348	310	291	281	260	237	255	58	-	-	-	-	489	504	399	463
17	363	356	314	296	287	266	242	261	59	-	-	-	-	495	510	403	469
18	372	364	319	302	293	271	248	266	60	-	-	-	-	501	517	408	474
19	381	372	323	307	298	277	254	271	61	-	-	-	-	507	523	414	479
20	388	380	327	312	302	281	257	276	62	-	-	-	-	513	530	419	485
21	396	388	330	317	306	286	262	281	63	-	-	-	-	521	537	424	490
22	404	397	335	322	310	291	266	285	64	-	-	-	-	526	543	429	496
23	414	406	340	327	314	296	273	289	65	-	-	-	-	-	-	434	501
24	424	415	344	332	317	300	278	293	66	-	-	-	-	-	-	440	507
25	432	424	348	336	320	305	282	297	67	-	-	-	-	-	-	446	512
26	441	433	353	341	324	309	286	301	68	-	-	-	-	-	-	451	517
27	451	443	357	347	328	314	290	305	69	-	-	-	-	-	-	455	523
28	461	452	363	352	331	318	292	309	70	-	-	-	-	-	-	461	528
29	471	461	366	357	335	323	296	313	71	-	-	-	-	-	-	469	534
30	481	470	370	362	340	328	300	317	72	-	-	-	-	-	-	475	539
31	492	479	376	368	346	333	304	322	73	-	-	-	-	-	-	479	544
32	502	489	380	374	350	338	305	326	74	-	-	-	-	-	-	487	550
33	513	497	386	380	353	343	310	330	75	-	-	-	-	-	-	492	555
34	524	506	391	386	358	348	313	335	76	-	-	-	-	-	-	498	561
35	-	-	396	393	362	353	315	340	77	-	-	-	-	-	-	506	566
36	-	-	405	399	366	359	318	345	78	-	-	-	-	-	-	511	572
37	-	-	410	406	370	365	321	349	79	-	-	-	-	-	-	519	578
38	-	-	416	413	376	371	324	354	80	-	-	-	-	-	-	522	583
39	-	-	422	420	380	377	328	359	81	-	-	-	-	-	-	524	586
40	-	-	427	427	385	383	331	365	82	-	-	-	-	-	-	527	588
41	-	-	434	435	389	390	333	370	83	-	-	-	-	-	-	531	590

Tabla 14-2: Temperaturas del perfil según ensayos y modelo 2, probetas P9, P10, P11 y P12.

t [min]	P9		P10		P11		P12		t [min]	P9		P10		P11		P12	
	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]		TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]
0	50	50	39	39	35	35	37	37	33	-	-	411	465	406	441	355	410
1	71	73	66	60	53	50	46	49	34	-	-	419	474	414	449	358	417
2	124	126	142	103	102	85	93	79	35	-	-	428	483	421	457	365	424
3	169	178	187	146	131	125	123	114	36	-	-	435	491	430	464	367	432
4	212	221	218	183	161	161	144	147	37	-	-	443	500	439	472	373	439
5	240	256	235	213	189	192	162	175	38	-	-	451	509	446	480	379	446
6	273	282	253	237	213	216	182	198	39	-	-	460	517	455	488	383	454
7	304	301	266	256	228	236	198	218	40	-	-	469	526	465	495	388	461
8	321	314	277	271	243	252	211	234	41	-	-	474	534	474	503	391	468
9	330	326	284	284	254	265	222	248	42	-	-	483	542	485	511	398	475
10	339	336	290	295	266	276	232	259	43	-	-	491	550	494	519	403	483
11	348	345	298	304	274	286	242	269	44	-	-	502	558	501	526	410	490

t [min]	P9		P10		P11		P12		t [min]	P9		P10		P11		P12	
	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]		TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]
12	357	354	304	312	280	294	250	276	45	-	-	509	566	511	534	415	497
13	364	363	307	320	289	302	257	283	46	-	-	518	574	520	541	420	504
14	373	371	312	327	294	309	265	290	47	-	-	527	582	531	549	428	511
15	382	380	317	333	301	316	274	296	48	-	-	533	588	540	556	433	518
16	391	388	321	340	306	322	280	302	49	-	-	536	590	549	564	441	525
17	399	396	324	346	311	328	285	307	50	-	-	-	-	-	-	449	532
18	408	405	329	352	316	334	293	313	51	-	-	-	-	-	-	456	539
19	419	414	333	358	320	340	298	319	52	-	-	-	-	-	-	463	545
20	430	423	339	364	325	347	303	324	53	-	-	-	-	-	-	470	552
21	438	432	342	370	329	353	307	330	54	-	-	-	-	-	-	475	559
22	448	442	347	377	335	360	312	336	55	-	-	-	-	-	-	485	565
23	461	451	352	383	340	367	315	342	56	-	-	-	-	-	-	491	572
24	471	461	357	390	346	374	320	349	57	-	-	-	-	-	-	499	578
25	480	471	361	397	352	381	323	355	58	-	-	-	-	-	-	505	585
26	492	481	368	405	358	388	325	362	59	-	-	-	-	-	-	514	591
27	505	491	372	413	364	396	329	368	60	-	-	-	-	-	-	521	598
28	517	501	378	422	370	403	335	375	61	-	-	-	-	-	-	528	605
29	528	511	384	430	376	411	339	382	62	-	-	-	-	-	-	536	612
30	-	-	391	439	384	418	343	389	63	-	-	-	-	-	-	542	617
31	-	-	398	447	390	426	347	396	64	-	-	-	-	-	-	546	620
32	-	-	405	456	397	433	349	403									

Tabla 14-3: Temperaturas perfil según ensayos y modelo 2, probetas P13, P14, P15 y P16.

t [min]	P13		P14		P15		P16		t [min]	P13		P14		P15		P16	
	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]		TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]
0	5	5	39	39	41	41	53	53	30	-	-	423	511	391	450	346	437
1	59	51	49	59	56	59	61	62	31	-	-	432	521	397	459	352	446
2	70	79	73	101	98	100	71	75	32	-	-	440	532	405	468	356	454
3	90	121	91	142	126	134	89	96	33	-	-	448	542	414	477	360	463
4	119	171	108	180	147	170	114	126	34	-	-	457	552	425	486	365	471
5	288	226	138	216	179	204	135	159	35	-	-	467	562	433	496	370	480
6	296	266	162	246	214	232	155	190	36	-	-	474	571	441	505	376	488
7	302	296	182	269	232	252	179	217	37	-	-	484	581	451	514	381	497
8	308	318	192	286	247	268	200	239	38	-	-	495	591	464	523	387	505
9	316	336	202	299	262	280	214	258	39	-	-	505	600	472	533	392	513
10	327	350	211	310	272	290	224	275	40	-	-	514	610	481	542	399	520
11	335	362	221	319	281	300	224	289	41	-	-	524	620	490	551	405	528
12	341	373	224	327	289	309	245	300	42	-	-	535	630	503	560	411	536
13	349	382	315	336	297	317	253	308	43	-	-	541	637	511	569	418	544
14	355	391	321	344	305	324	260	315	44	-	-	543	640	520	578	427	551
15	367	400	328	353	311	331	268	322	45	-	-	546	641	533	587	434	559
16	373	410	332	363	316	339	276	328	46	-	-	548	641	545	596	442	567
17	384	419	337	372	320	346	283	334	47	-	-	541	642	553	605	452	575
18	392	429	344	382	325	353	290	341	48	-	-	543	644	561	612	461	583
19	408	439	350	392	328	360	296	349	49	-	-	546	645	-	-	469	591
20	428	449	355	403	332	368	302	356	50	-	-	-	-	-	-	478	599
21	440	460	360	414	338	375	308	363	51	-	-	-	-	-	-	488	608
22	450	471	366	424	341	383	312	370	52	-	-	-	-	-	-	498	616
23	462	482	372	435	346	391	317	378	53	-	-	-	-	-	-	507	625
24	479	493	379	446	351	399	322	386	54	-	-	-	-	-	-	515	633
25	487	504	385	457	357	407	325	395	55	-	-	-	-	-	-	527	642
26	501	517	391	468	364	415	330	403	56	-	-	-	-	-	-	536	651
27	512	531	399	479	369	423	334	411	57	-	-	-	-	-	-	546	660
28	520	545	406	490	375	432	338	420	58	-	-	-	-	-	-	554	669
29	532	559	413	501	382	441	342	429	59	-	-	-	-	-	-	560	677

## 15 ANEXO E: TEMPERATURAS DE LOS PERFILES SEGÚN MÓDELO 3

Tabla 15-1: Temperaturas del perfil según ensayos y modelo 3, probetas P5, P6, P7 y P8.

t [min]	P5		P6		P7		P8		t [min]	P5		P6		P7		P8	
	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]		TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]
0	51	46	47	42	38	37	29	36	43	-	-	447	506	401	473	341	446
1	63	55	61	50	44	41	37	43	44	-	-	455	514	406	481	344	451
2	98	75	88	67	51	49	66	57	45	-	-	462	521	410	488	346	457
3	129	99	116	87	66	62	89	73	46	-	-	468	528	415	496	350	463
4	163	126	142	107	87	75	107	90	47	-	-	474	536	422	503	353	469
5	197	155	164	128	116	94	124	108	48	-	-	482	543	427	511	356	475
6	232	182	186	148	145	113	141	126	49	-	-	488	551	433	518	360	481
7	261	208	215	169	175	133	155	143	50	-	-	494	559	441	526	365	486
8	280	231	237	188	175	152	167	159	51	-	-	502	566	446	534	370	492
9	296	252	250	206	214	170	178	173	52	-	-	510	574	452	542	374	498
10	310	270	262	222	230	187	189	187	53	-	-	517	582	458	550	378	504
11	317	287	274	237	243	202	197	200	54	-	-	522	589	464	558	382	510
12	325	303	284	251	252	217	206	212	55	-	-	530	597	471	566	388	516
13	332	318	291	265	260	231	214	223	56	-	-	-	-	477	575	392	522
14	340	333	297	279	268	244	222	235	57	-	-	-	-	481	583	394	529
15	348	347	304	290	275	257	230	246	58	-	-	-	-	489	592	399	535
16	357	360	310	301	281	268	237	257	59	-	-	-	-	495	601	403	541
17	363	372	314	311	287	279	242	266	60	-	-	-	-	501	610	408	548
18	372	384	319	322	293	290	248	275	61	-	-	-	-	507	616	414	555
19	381	395	323	333	298	299	254	284	62	-	-	-	-	513	621	419	562
20	388	405	327	342	302	308	257	293	63	-	-	-	-	521	627	424	568
21	396	415	330	351	306	317	262	302	64	-	-	-	-	526	633	429	575
22	404	426	335	359	310	326	266	310	65	-	-	-	-	527	639	434	582
23	414	435	340	367	314	335	273	317	66	-	-	-	-	-	-	440	589
24	424	444	344	375	317	344	278	325	67	-	-	-	-	-	-	446	596
25	432	453	348	383	320	352	282	332	68	-	-	-	-	-	-	451	603
26	441	462	353	390	324	359	286	340	69	-	-	-	-	-	-	455	610
27	451	470	357	397	328	366	290	347	70	-	-	-	-	-	-	461	618
28	461	479	363	404	331	374	292	354	71	-	-	-	-	-	-	469	625
29	471	487	366	410	335	381	296	360	72	-	-	-	-	-	-	475	632
30	481	496	370	417	340	388	300	367	73	-	-	-	-	-	-	479	640
31	492	504	376	424	346	395	304	374	74	-	-	-	-	-	-	487	647
32	502	512	380	430	350	401	305	380	75	-	-	-	-	-	-	492	655
33	513	521	386	437	353	407	310	386	76	-	-	-	-	-	-	498	662
34	524	529	391	444	358	413	313	392	77	-	-	-	-	-	-	506	668
35	536	537	396	450	362	420	315	398	78	-	-	-	-	-	-	511	674
36	-	-	405	457	366	426	318	404	79	-	-	-	-	-	-	519	681
37	-	-	410	464	370	432	321	410	80	-	-	-	-	-	-	522	687
38	-	-	416	471	376	439	324	416	81	-	-	-	-	-	-	524	693
39	-	-	422	478	380	446	328	422	82	-	-	-	-	-	-	527	695
40	-	-	427	485	385	453	331	428	83	-	-	-	-	-	-	531	696
41	-	-	434	492	389	459	333	434	84	-	-	-	-	-	-	534	696
42	-	-	440	499	395	466	338	440									

Tabla 15-2: Temperaturas del perfil según ensayos y modelo 3, probetas P9, P10, P11 y P12.

t [min]	P9		P10		P11		P12		t [min]	P9		P10		P11		P12	
	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]		TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]
0	50	46	39	35	35	36	37	36	33	-	-	411	502	406	482	355	462
1	71	59	66	51	53	47	46	46	34	-	-	419	510	414	489	358	469
2	124	90	142	81	102	71	93	68	35	-	-	428	518	421	496	365	476
3	169	126	187	114	131	101	123	95	36	-	-	435	526	430	503	367	483
4	212	161	218	146	161	130	144	120	37	-	-	443	534	439	510	373	491
5	240	194	235	174	189	158	162	145	38	-	-	451	543	446	518	379	498
6	273	225	253	199	213	182	182	166	39	-	-	460	551	455	525	383	505
7	304	254	266	222	228	204	198	188	40	-	-	469	560	465	533	388	512
8	321	279	277	243	243	224	211	206	41	-	-	474	568	474	540	391	519
9	330	303	284	260	254	244	222	224	42	-	-	483	577	485	548	398	526
10	339	323	290	278	266	259	232	239	43	-	-	491	585	494	556	403	533



t [min]	P9		P10		P11		P12		t [min]	P9		P10		P11		P12	
	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]		TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]
11	348	341	298	294	274	273	242	254	44	-	-	502	594	501	563	410	540
12	357	357	304	307	280	288	250	268	45	-	-	509	602	511	571	415	548
13	364	372	307	320	289	303	257	283	46	-	-	518	611	520	579	420	555
14	373	385	312	333	294	317	265	296	47	-	-	527	615	531	587	428	563
15	382	397	317	346	301	327	274	307	48	-	-	533	619	540	595	433	570
16	391	409	321	358	306	338	280	319	49	-	-	536	622	549	603	441	578
17	399	420	324	368	311	349	285	331	50	-	-	540	622	556	611	449	586
18	408	430	329	377	316	359	293	341	51	-	-	-	-	-	-	456	593
19	419	440	333	387	320	369	298	351	52	-	-	-	-	-	-	463	601
20	430	450	339	396	325	378	303	360	53	-	-	-	-	-	-	470	609
21	438	459	342	406	329	387	307	370	54	-	-	-	-	-	-	475	616
22	448	468	347	414	335	396	312	379	55	-	-	-	-	-	-	485	624
23	461	477	352	422	340	405	315	387	56	-	-	-	-	-	-	491	632
24	471	485	357	430	346	413	320	396	57	-	-	-	-	-	-	499	640
25	480	494	361	438	352	422	323	404	58	-	-	-	-	-	-	505	648
26	492	502	368	446	358	430	325	412	59	-	-	-	-	-	-	514	656
27	505	511	372	454	364	438	329	419	60	-	-	-	-	-	-	521	664
28	517	520	378	462	370	446	335	427	61	-	-	-	-	-	-	528	672
29	528	528	384	470	376	453	339	434	62	-	-	-	-	-	-	536	680
30	541	537	391	478	384	460	343	441	63	-	-	-	-	-	-	542	684
31	-	-	398	486	390	468	347	448	64	-	-	-	-	-	-	546	686
32	-	-	405	494	397	475	349	455	65	-	-	-	-	-	-	550	686

Tabla 15-3: Temperaturas perfil según ensayos y modelo 3, probetas P13, P14, P15 y P16.

t [min]	P13		P14		P15		P16		t [min]	P13		P14		P15		P16	
	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]		TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]	TE [°C]	TM [°C]
0	5	5	39	39	41	37	53	46	31	-	-	432	549	397	500	352	478
1	59	18	49	53	56	53	61	53	32	-	-	440	559	405	508	356	487
2	70	42	73	78	98	77	71	66	33	-	-	448	569	414	517	360	495
3	90	74	91	107	126	103	89	83	34	-	-	457	579	425	525	365	503
4	119	109	108	137	147	132	114	103	35	-	-	467	590	433	533	370	512
5	288	160	138	170	179	162	135	129	36	-	-	474	601	441	543	376	520
6	296	208	162	200	214	192	155	156	37	-	-	484	612	451	552	381	528
7	302	246	182	228	232	218	179	182	38	-	-	495	623	464	561	387	537
8	308	277	192	252	247	242	200	204	39	-	-	505	634	472	570	392	545
9	316	305	202	274	262	263	214	225	40	-	-	514	645	481	579	399	553
10	327	325	211	294	272	283	224	243	41	-	-	524	656	490	589	405	561
11	335	344	221	312	281	300	224	259	42	-	-	535	667	503	599	411	569
12	341	364	224	330	289	317	245	275	43	-	-	541	679	511	609	418	578
13	349	378	315	347	297	330	253	290	44	-	-	543	682	520	619	427	588
14	355	392	321	361	305	343	260	303	45	-	-	546	682	533	628	434	597
15	367	406	328	376	311	357	268	317	46	-	-	548	681	545	634	442	607
16	373	418	332	389	316	370	276	329	47	-	-	541	682	553	640	452	617
17	384	429	337	402	320	380	283	342	48	-	-	543	683	561	646	461	626
18	392	441	344	414	325	390	290	354	49	-	-	546	683	561	652	469	636
19	408	452	350	425	328	401	296	366	50	-	-	548	682	-	-	478	647
20	428	463	355	436	332	411	302	377	51	-	-	-	-	-	-	488	657
21	440	473	360	447	338	420	308	387	52	-	-	-	-	-	-	498	668
22	450	483	366	458	341	428	312	397	53	-	-	-	-	-	-	507	678
23	462	493	372	468	346	437	317	407	54	-	-	-	-	-	-	515	689
24	479	503	379	479	351	446	322	416	55	-	-	-	-	-	-	527	698
25	487	515	385	489	357	453	325	426	56	-	-	-	-	-	-	536	708
26	501	527	391	499	364	461	330	435	57	-	-	-	-	-	-	546	715
27	512	540	399	509	369	469	334	444	58	-	-	-	-	-	-	554	721
28	520	553	406	519	375	477	338	453	59	-	-	-	-	-	-	560	723
29	532	566	413	529	382	484	342	461	60	-	-	-	-	-	-	569	725
30	538	579	423	539	391	492	346	470									