



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

**PROPOSICIÓN DE PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL NORMATIVO  
PARA ESTIMAR LA VELOCIDAD DE CARBONIZACIÓN DE LA  
MADERA LAMINADA ENCOLADA DE PINO RADIATA**

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

ESTEBAN EDUARDO REYES VERGARA

**PROFESOR GUÍA:**  
MARIO WAGNER MUÑOZ

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**  
MIGUEL PÉREZ ARIAS  
ALEJANDRO RAMÍREZ CALVO

SANTIAGO DE CHILE  
2015

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
POR: ESTEBAN REYES V.  
FECHA: 21/09/2015  
PROF. GUÍA: Sr. MARIO WAGNER M.

## PROPOSICIÓN DE PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL NORMATIVO PARA ESTIMAR LA VELOCIDAD DE CARBONIZACIÓN DE LA MADERA LAMIANA DE PINO RADIATA

Siendo Chile un país aventajado en la obtención y por ende producción de piezas de madera con fines constructivos y estructurales, llama la atención que se encuentre poca información normativa referente a su comportamiento frente al fuego. Si bien existe estandarización de ensayos para componentes que incorporan este material, no la hay en lo referente a la determinación de la velocidad de penetración del proceso de carbonización hacia el interior de las piezas de madera desde la o las caras expuestas a fuentes de calor importantes.

El diseño de elementos de madera con resistencia al fuego se realiza a partir de datos y normativas extranjeras, las que en muchos casos responden a las propiedades de los materiales que se disponen en la región correspondiente.

El objetivo de este trabajo de título es proponer una secuencia coherente de procedimientos de carácter normativo que permitan determinar la velocidad de carbonización en elementos de madera laminada encolada, específicamente de pino radiata, dada su importancia a nivel forestal y comercial en nuestro país.

El método planteado se realiza sobre la base de antecedentes y estructuraciones de ensayos obtenidos de una revisión de bibliografía internacional, tratando de asemejar algunas de las condiciones en que se efectúan y empleando la tecnología disponible en nuestro medio para su cometido. Los procedimientos aplicados se han calibrado por medio de ensayos exploratorios, aplicándose correcciones cuando ha parecido pertinente, y han permitido estimar valores de las tasas de carbonización que podrían utilizarse en los métodos analíticos de diseño y verificación al fuego de piezas de madera laminada encolada de Pino radiata.

## AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas que de alguna u otra forma hacen posible el término satisfactorio de esta etapa y el comienzo de una nueva cuyas fundaciones se encuentran aquí.

En primer lugar agradecer a mis padres Luis y Cecilia por su cariño y sacrificio en todas las etapas de mi vida, gracias por ser ambos los pilares fundamentales de esta. Sin duda la ausencia de ellos hubiese hecho todo esto mucho más difícil.

A mis hermanos Rubén, Gabriel e Iván por la constante preocupación y compañía incondicional, que nunca dejemos de ser fraternales como lo hemos sido hasta ahora.

A Tamara por estar junto a mí en los momentos difíciles, frustrantes, de rabia y alegrías. Gracias por la compañía en noches interminables de estudio y trabajos, y la comprensión en la falta de tiempo que tanto te mereces. Sigamos siempre igual.

A mis abuelos, tíos, primos y sobrinos, por la preocupación y atención que tuvieron durante todo este período. Mención especial a mis primos Gonzalo y Natalia por la ayuda, compañía y entusiasmo en muchas ocasiones importantes. A mis tíos René y José por la ayuda recibida en la realización de una parte de esta memoria.

Agradezco a los profesores integrantes de mi comisión, que sin interés alguno se dieron el tiempo de revisar y guiar este trabajo de la mejor manera posible.

A mi profesor guía, Mario Wagner, por su disposición a responder consultas referentes a esta memoria. Por ser quien promovió mi gusto en el diseño y construcción en madera y ser un profesor permanente, estando siempre dispuesto a saciar mi curiosidad profesional en el tema.

A Jorge Becerra y Camilo Prieto por la buena disposición a colaborar en el desarrollo de este trabajo en cuanto a tiempo y suministro de las probetas utilizadas. Agradezco también la oportunidad que me han dado para iniciar mi carrera profesional en la empresa INGELAM de forma completamente satisfactoria.

De manera muy especial a todas las personas que trabajan en el laboratorio de incendios del IDIEM por su tiempo y ayuda: Andrés Santis, Richard Inostroza, José Curaqueo y todos los laboratoristas colaboradores.

A todas las personas quienes de alguna u otra forma ayudaron a que esto fuera posible.

# TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
TABLA DE CONTENIDO.....	iv
ÍNDICE DE TABLAS .....	vii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	x
<b>CAPITULO I INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos.....	2
1.1.1. Objetivo Principal .....	2
1.1.2. Objetivos Específicos.....	2
1.2. Madera Laminada y comportamiento al fuego.....	3
<b>CAPITULO II MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>7</b>
2.1. Resistencia al fuego.....	7
2.2. Carbonización en la madera.....	11
2.3. Velocidad de carbonización.....	13
2.4. Propiedades influyentes en la carbonización de la madera.....	15
2.4.1. Contenido de Humedad.....	15
2.4.2. Densidad.....	17
2.5. Ensayos.....	20
<b>CAPITULO III ANTECEDENTES.....</b>	<b>22</b>
3.1. Antecedentes Internacionales.....	22
3.1.1. Gardner y Syme (1991), Australia.....	22
3.1.2. Collier, P.C.R. (1992), Nueva Zelanda.....	28
3.1.3. White y Nordheim (1992), Estados Unidos.....	31
3.1.4. Ligens, Albert (2003), Alemania.....	34
3.1.5. Fonseca y Barreira (2009), Portugal.....	38
3.2. Antecedentes Nacionales.....	43
3.2.1. Ramírez, Alejandro (2001), Chile.....	43

<b>CAPÍTULO IV PROCEDIMIENTO PLANTEADO.....</b>	<b>47</b>
4.1. Equipos e Implementos.....	47
4.1.1. Termocuplas.....	47
4.1.2. Tarjeta de Adquisición de Datos.....	49
4.1.3. Horno.....	49
4.1.4. Material aislante.....	50
4.2. Procedimiento propuesto.....	51
4.2.1. Probetas de procedimiento propuesto.....	51
4.2.2. Metodología de procedimiento propuesto.....	58
4.2.3. Obtención de resultados aplicando el procedimiento propuesto.....	60
4.2.4. Aclaraciones.....	62
<b>CAPÍTULO V REALIZACIÓN DE ENSAYOS.....</b>	<b>64</b>
5.1. Equipos e implementos utilizados.....	64
5.1.1. Termopares utilizados en ensayo.....	64
5.1.2. Tarjetas de adquisición utilizadas en ensayo.....	64
5.1.3. Horno utilizado en ensayo.....	65
5.1.4. Materiales aislantes utilizados.....	67
5.2. Procedimiento realizado.....	67
5.2.1. Probetas de ensayo realizado.....	67
5.2.2. Metodología utilizada en ensayo.....	73
5.2.3. Resultados de ensayo realizado.....	76
<b>CAPÍTULO VI ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>92</b>
6.1. Densidad y contenido de humedad.....	92
6.2. Captación de datos.....	93
6.3. Temperatura dentro del horno.....	94
6.4. Velocidades de Carbonización obtenidas.....	96
6.4.1. Análisis Método de Regresión Lineal.....	96
6.4.2. Análisis Método de Ancho Residual.....	100
6.4.3. Análisis de resultados de probetas macizas.....	102
6.4.4. Comparación de resultados.....	103
6.5. Comentarios sobre método experimental propuesto.....	107

6.6.	Horno Propuesto para ensayos.....	108
6.6.1.	Cámara de Combustión.....	108
6.6.2.	Equipo de medición.....	110
<b>CAPÍTULO VII CONCLUSIONES.....</b>		<b>111</b>
<b>GLOSARIO .....</b>		<b>114</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>116</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>1</b>
A.	Anexos Marco Teórico.....	A-1
B.	Anexos Antecedentes.....	B-1
B.1.1.-	Anexos Gardner y Syme (1991).....	B-1
B.1.2.-	Anexos Collier, P.C.R. (1992). .....	B-4
B.1.3.-	Anexos White & Nordheim (1992).....	B-7
B.1.4.-	Anexos Ligen, Albert (2003).....	B-7
C.	Anexos Procedimiento.....	C-1
C.1.1.	Contenido de Humedad ensayo realizado.....	C-1
C.1.2.	Densidad en ensayo realizado.....	C-5
C.1.3.	Resultados de ensayo con método de Regresión Lineal. ....	C-11
C.1.4.	Resultados de ensayos de probetas macizas. ....	C-22
D.	Anexos Análisis.....	D-1

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1:</b> Clases de resistencia al fuego.....	8
<b>Tabla 2.2:</b> Resistencia al fuego requerida para los elementos de construcción de edificios.....	8
<b>Tabla 2.3:</b> Clasificación de materiales de construcción, DIN 4102-1.....	9
<b>Tabla 2.4:</b> Clasificación de materiales de construcción, EN-13501-1:2002.....	10
<b>Tabla 2.5:</b> Valores de $\rho_0$ y $\rho_n$ según Eurocódigo.....	14
<b>Tabla 2.6:</b> Razón de carbonización con respecto a la densidad nominal, Collier (1992).....	20
<b>Tabla 2.7:</b> Tolerancias de desviación media de temperatura de incendio estándar.....	21
<b>Tabla 3.1:</b> Profundidad y tasa de carbonización de pino radiata, Gardner y Syme (1991).....	26
<b>Tabla 3.2:</b> Valores de regresión lineal para ensayos de probetas de pino radiata, Gardner y Syme (1991).....	27
<b>Tabla 3.3:</b> Características de las probetas aserradas ensayadas, Ramírez (2001).....	43
<b>Tabla 3.4:</b> Características probetas MLE ensayadas, Ramírez (2001).....	44
<b>Tabla 3.5:</b> Cuadro Resumen tasas de carbonización probetas de madera, Ramírez (2001).....	46
<b>Tabla 4.1:</b> Características termopares, norma IEC 584-1982.....	49
<b>Tabla 4.2:</b> Anchos mínimos de acuerdo a tiempos de exposición.....	54
<b>Tabla 5.1:</b> Masa y contenido de humedad de probeta compuesta.....	70
<b>Tabla 5.2:</b> Masa y contenido de humedad de probeta macizas.....	70
<b>Tabla 5.3:</b> Densidades de probetas compuestas.....	71
<b>Tabla 5.4:</b> Densidades de probetas macizas.....	71
<b>Tabla 5.5:</b> Cuadro resumen densidad y humedad probetas compuestas.....	72
<b>Tabla 5.6:</b> Cuadro resumen densidad y humedad probetas macizas.....	72
<b>Tabla 5.7:</b> Sistemas de medición en probetas compuestas.....	75
<b>Tabla 5.8:</b> Registro de tiempos de carbonización en probeta PC3.....	77
<b>Tabla 5.9:</b> Registro de tiempos de carbonización en probeta PC4.....	77
<b>Tabla 5.10:</b> Registro de tiempos de carbonización en probeta PC2.....	78
<b>Tabla 5.11:</b> Velocidad de carbonización ( $v_i$ ) de cada probeta unitaria M. R. Lineal.....	82
<b>Tabla 5.12:</b> Tasa de carbonización promedio de probetas compuestas M. R. Lineal.....	83
<b>Tabla 5.13:</b> Profundidades residuales promedio de probetas compuestas.....	85
<b>Tabla 5.14:</b> Velocidad de carbonización probetas, M. Ancho Residual.....	86
<b>Tabla 5.15:</b> Altura y ancho residual promedio por probetas macizas.....	87
<b>Tabla 5.16:</b> Velocidad y profundidad de carbonización para probetas macizas.....	88
<b>Tabla 5.17:</b> Dimensiones de probetas macizas para método de rectángulo equivalente.....	90
<b>Tabla 5.18:</b> Velocidad de carbonización de probetas macizas con el método del rectángulo equivalente.....	91
<b>Tabla 6.1:</b> Velocidades de carbonización de M. R. Lineal sin parámetro b, para PC2 y PC4.....	99
<b>Tabla 6.2:</b> Velocidades de carbonización de probetas compuestas con método de rectángulo equivalente.....	101
<b>Tabla 6.3:</b> Velocidades de carbonización con cada método empleado.....	103
<b>Tabla 6.4:</b> Velocidades de carbonización de probetas compuestas totales y macizas.....	105
<b>Tabla 6.5:</b> Resumen de valores en procedimientos nacionales e internacionales.....	106

<b>Tabla 6.6:</b> Velocidad de carbonización promedio de probetas ensayadas según exposición....	106
<b>Tabla 7.1:</b> Valores promedio de la velocidad de carbonización.....	112
<b>Tabla A.1.1:</b> Tipo de edificio según superficie edificada.....	A-1
<b>Tabla A.1.2:</b> Tipo de edificio según máximo de ocupantes.....	A-2
<b>Tabla A.1.3:</b> Tipo de edificio según densidad de carga combustible.....	A-2
<b>Tabla A.2.1:</b> Rango, promedio y desviación estándar de la densidad de las especies ensayadas, Gardner y Syme (1991).....	B-1
<b>Tabla A.2.2:</b> Rango, promedio y desviación estándar del contenido de humedad de las muestras de las especies ensayadas, Gardner y Syme (1991).....	B-1
<b>Tabla A.2.3:</b> Profundidad de carbonización y tasa de carbonización de probetas de especies ensayadas. Método Sección Residual, Gardner y Syme (1991).....	B-2
<b>Tabla A.2.4:</b> Valores de Regresión Lineal para ensayos de probetas de las especies ensayadas, Gardner y Syme (1991).....	B-3
<b>Tabla A.2.5:</b> Resultados ensayo 1, probetas expuestas durante los primeros 29 minutos, Collier (1992).....	B-4
<b>Tabla A.2.6:</b> Resultados ensayo 1, probetas expuestas durante los 31 minutos restantes, Collier (1992).....	B-4
<b>Tabla A.2.7:</b> Resultados ensayo 1, probetas expuestas durante los 60 minutos, Collier (1992).....	B-5
<b>Tabla A.2.8:</b> Resultados ensayo 1, probetas equipadas con termocuplas, Collier (1992).....	B-5
<b>Tabla A.2.9:</b> Resultados ensayo 2, probetas de MLE Pino Radiata, Collier (1992).....	B-6
<b>Tabla A.2.10:</b> Tasas de carbonización y propiedades de especies utilizadas en ensayos.....	B-7
<b>Tabla A.2.11:</b> Resultados velocidad de carbonización dos métodos, Ligens (2003).....	B-7
<b>Tabla A.3.1:</b> Mediciones de masa para determinar contenido de humedad Probeta PC3.....	C-1
<b>Tabla A.3.2:</b> Mediciones de masa para determinar contenido de humedad Probeta PC4.....	C-2
<b>Tabla A.3.3:</b> Mediciones de masa para determinar contenido de humedad Probeta PC1.....	C-2
<b>Tabla A.3.4:</b> Mediciones de masa para determinar contenido de humedad Probeta PC2.....	C-3
<b>Tabla A.3.5:</b> Mediciones de masa para determinar contenido de humedad Probetas macizas PM3 y PM4.....	C-3
<b>Tabla A.3.6:</b> Mediciones de masa para determinar contenido de humedad Probetas macizas PM1 y PM2.....	C-4
<b>Tabla A.3.7:</b> Dimensiones Probeta PC3 estado húmedo.....	C-5
<b>Tabla A.3.8:</b> Dimensiones Probeta PC3 estado seco.....	C-5
<b>Tabla A.3.9:</b> Dimensiones Probeta PC4 estado húmedo.....	C-6
<b>Tabla A.3.10:</b> Dimensiones Probeta PC4 estado seco.....	C-6
<b>Tabla A.3.11:</b> Dimensiones Probeta PC1 estado húmedo.....	C-7
<b>Tabla A.3.12:</b> Dimensiones Probeta PC1 estado seco.....	C-7
<b>Tabla A.3.13:</b> Dimensiones Probeta PC2 estado húmedo.....	C-8
<b>Tabla A.3.14:</b> Dimensiones Probeta PC2 estado seco.....	C-8
<b>Tabla A.3.15:</b> Dimensiones Probetas macizas PM3 y PM4 estado húmedo.....	C-9
<b>Tabla A.3.16:</b> Dimensiones Probetas macizas PM3 y PM4 estado seco.....	C-9
<b>Tabla A.3.17:</b> Dimensiones Probetas macizas PM1 y PM2 estado húmedo.....	C-9



<b>Tabla A.3.18:</b> Dimensiones Probetas macizas PM1 y PM2 estado seco.....	C-10
<b>Tabla A.3.19:</b> Temperaturas registradas por termocuplas de PC3 en TAD digital.....	C-11
<b>Tabla A.3.20:</b> Relación profundidad de medición con canal, probeta PC3.....	C-16
<b>Tabla A.3.21:</b> Mediciones de ancho o espesor residual Probeta PC3.....	C-21
<b>Tabla A.3.22:</b> Mediciones de ancho o espesor residual Probeta PC4.....	C-21
<b>Tabla A.3.23:</b> Mediciones de ancho o espesor residual Probeta PC1.....	C-21
<b>Tabla A.3.24:</b> Mediciones de ancho o espesor residual Probeta PC2.....	C-22
<b>Tabla A.3.25:</b> Mediciones de ancho y alto transversal residual de probetas macizas PM3 y PM4.....	C-22
<b>Tabla A.3.26:</b> Mediciones de ancho y alto transversal residual de probetas macizas PM1 y PM2.....	C-22
<b>Tabla A.4.1:</b> Medidas método rectángulo equivalente para probeta compuestas PC1 y PC2.....	D-1
<b>Tabla A.4.2:</b> Medidas método rectángulo equivalente para probeta compuestas PC3 y PC4.....	D-2

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Figura 1.1:</b> Ejemplos de estructuras de MLE.....	3
<b>Figura 1.2:</b> Incendio Planta de Piscicultura Invertek, Ensenada, Puerto Varas, 2011.....	5
<b>Figura 1.3:</b> Incendio Mall Plaza El Trébol, Talcahuano, 2012.....	5
<b>Figura 2.1:</b> Zonas durante carbonización en una sección de madera, Fonseca y Barreira (2009).....	11
<b>Figura 2.2:</b> Desarrollo de temperaturas a través de pieza de madera.....	12
<b>Figura 2.3:</b> HEH en función de temperatura ambiente (TA) y humedad relativa del ambiente (HRA), Kollman(1959).....	16
<b>Figura 2.4:</b> Relación entre Densidad nominal, básica y contenido de humedad en la madera.....	18
<b>Figura 2.5:</b> Relación densidad anhidra, referencia y contenido de humedad, Kollman (1985)...	19
<b>Figura 2.6:</b> Curva Tiempo-Temperatura de incendio estándar y tolerancias según NCh935/1 – ISO 834.....	21
<b>Figura 3.1:</b> Probeta con protección Y-C, Gardner y Syme (1991).....	23
<b>Figura 3.2:</b> Esquema localización termocuplas, Gardner y Syme (1991) .....	23
<b>Figura 3.3:</b> Muestra con termocuplas insertas, Gardner y Syme (1991).....	24
<b>Figura 3.4:</b> Localización de termocuplas dentro del horno, Gardner y syme (1991).....	24
<b>Figura 3.5:</b> Probeta situada en la tapa del horno (Izquierda), Tapa con probeta y horno ensamblados (Derecha), Gardner y Syme (1991).....	25
<b>Figura 3.6:</b> Horno Piloto BRANZ con probetas para ensayo N°1, Collier (1992).....	29
<b>Figura 3.7:</b> Esquema de localización de termocuplas ensayo N°2, Collier (1992).....	30
<b>Figura 3.8:</b> Bloque de probetas, Ligens (2003).....	34
<b>Figura 3.9:</b> Cámara de combustión a escala reducida con bloque de probetas montado Ligens (2003).....	35
<b>Figura 3.10:</b> Principio de la medición continua de la carbonización, Ligens (2003).....	36
<b>Figura 3.11:</b> Bloque de probetas con implementos, Ligens (2003).....	37
<b>Figura 3.12:</b> Sistema electro-cerámico de calentamiento (izquierda); Unidad Térmica (Derecha), Fonseca y Barreira (2009).....	38
<b>Figura 3.13:</b> Aislamiento de probeta, Fonseca y Barreira(2009).....	39
<b>Figura 3.14:</b> Aplicación de calor a probeta, Fonseca y Barreira (2009).....	40
<b>Figura 3.15:</b> Probetas ensayadas con capas de carbonización, Fonseca y Barreira (2009).....	40
<b>Figura 3.16:</b> Temperatura a 1 cm de la cara superior, Fonseca y Barreira (2009) .....	41
<b>Figura 3.17:</b> Temperatura a 2 cm de la cara superior, Fonseca y Barreira (2009) .....	41
<b>Figura 3.18:</b> Temperatura a 3 cm de la cara superior, Fonseca y Barreira (2009) .....	42
<b>Figura 3.19:</b> Horno cilíndrico IDIEM.....	44
<b>Figura 3.20:</b> Esquema horno cilíndrico.....	45
<b>Figura 4.1:</b> Esquema Termocupla.....	47
<b>Figura 4.2:</b> Esquema Probeta conpuesta.....	51
<b>Figura 4.3:</b> Separaciones entre termocuplas y bordes.....	52
<b>Figura 4.4:</b> Distancia mínima entre termocupla y borde.....	53

<b>Figura 4.5:</b> Profundidades de puntos de medición.....	55
<b>Figura 4.6:</b> Método ancho residual.....	61
<b>Figura 5.1:</b> Termocupla utilizada en ensayo.....	64
<b>Figura 5.2:</b> Sistemas de adquisición de datos.....	65
<b>Figura 5.3:</b> Horno vertical laboratorio de incendios IDIEM.....	65
<b>Figura 5.4:</b> Sistema de medición de temperaturas dentro del horno y medidas.....	66
<b>Figura 5.5:</b> Probetas compuestas utilizadas en ensayo.....	67
<b>Figura 5.6:</b> Esquema Ensamblaje de probetas compuestas.....	69
<b>Figura 5.7:</b> Posicionamiento de probetas.....	73
<b>Figura 5.8:</b> Curva experimental de horno.....	74
<b>Figura 5.9:</b> Profundidad de carbonización en función del tiempo para P31.....	78
<b>Figura 5.10:</b> Profundidad de carbonización en función del tiempo para P32.....	79
<b>Figura 5.11:</b> Profundidad de carbonización en función del tiempo para P33.....	79
<b>Figura 5.12:</b> Profundidad de carbonización en función del tiempo para P34.....	79
<b>Figura 5.13:</b> Profundidad de carbonización en función del tiempo para P41.....	80
<b>Figura 5.14:</b> Profundidad de carbonización en función del tiempo para P42.....	80
<b>Figura 5.15:</b> Profundidad de carbonización en función del tiempo para P43.....	80
<b>Figura 5.16:</b> Profundidad de carbonización en función del tiempo para P44.....	81
<b>Figura 5.17:</b> Profundidad de carbonización en función del tiempo para P21.....	81
<b>Figura 5.18:</b> Profundidad de carbonización en función del tiempo para P22.....	81
<b>Figura 5.19:</b> Profundidad de carbonización en función del tiempo para P23.....	82
<b>Figura 5.20:</b> Profundidad de carbonización en función del tiempo para P24.....	82
<b>Figura 5.21:</b> Secciones residuales de probeta PC3.....	83
<b>Figura 5.22:</b> Secciones residuales de probeta PC4.....	84
<b>Figura 5.23:</b> Secciones residuales de probeta PC1.....	84
<b>Figura 5.24:</b> Secciones residuales de probeta PC2.....	85
<b>Figura 5.25:</b> Esquema de área residual de pieza con 4 caras expuestas.....	87
<b>Figura 5.26:</b> Probetas residuales PM3 (izquierda) y PM4 (derecha) seccionadas.....	88
<b>Figura 5.27:</b> Probetas residuales PM1 (izquierda) y PM2 (derecha) seccionadas.....	89
<b>Figura 5.28:</b> Método del rectángulo equivalente probetas macizas.....	89
<b>Figura 5.29:</b> Esquema Método del rectángulo equivalente para PM3.....	90
<b>Figura 6.1:</b> Sello y fijación de termocuplas post-ensayo.....	94
<b>Figura 6.2:</b> Curvas de termopares del horno A y E.....	95
<b>Figura 6.3:</b> Determinación de tasa de carbonización sin parámetro b. Para probeta P41.....	97
<b>Figura 6.4:</b> Determinación de tasa de carbonización sin parámetro b. Para probeta P42.....	97
<b>Figura 6.5:</b> Determinación de tasa de carbonización sin parámetro b. Para probeta P43.....	97
<b>Figura 6.6:</b> Determinación de tasa de carbonización sin parámetro b. Para probeta P44.....	98
<b>Figura 6.7:</b> Determinación de tasa de carbonización sin parámetro b. Para probeta P21.....	98
<b>Figura 6.8:</b> Determinación de tasa de carbonización sin parámetro b. Para probeta P22.....	98
<b>Figura 6.9:</b> Determinación de tasa de carbonización sin parámetro b. Para probeta P23.....	99
<b>Figura 6.10:</b> Determinación de tasa de carbonización sin parámetro b. Para probeta P24.....	99
<b>Figura 6.11:</b> Método del rectángulo equivalente probetas compuestas.....	101

<b>Figura 6.12:</b> Esquema del Horno a pequeña escala según norma DIN 4102-2:2003.....	109
<b>Figura 6.13:</b> Termocupla para medición de temperaturas dentro del horno.....	110
<b>Figura A.3.1:</b> Desarrollo de temperaturas en termopares de probeta unitaria P31.....	C-17
<b>Figura A.3.2:</b> Desarrollo de temperaturas en termopares de probeta unitaria P32.....	C-18
<b>Figura A.3.3:</b> Desarrollo de temperaturas en termopares de probeta unitaria P33.....	C-19
<b>Figura A.3.4:</b> Desarrollo de temperaturas en termopares de probeta unitaria P34.....	C-20

# **CAPITULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

En el estudio de la madera laminada como material estructural de edificaciones, resulta relevante el conocimiento de su respuesta frente a la exposición al fuego. En comparación con el acero, que al quedar expuesto a temperaturas elevadas pierde rápidamente su rigidez, y con ello su capacidad de resistir cargas, las piezas de madera dependiendo de sus dimensiones se comportan de forma más favorable ya que producto del efecto protector de su carbonización superficial mantiene en su interior reservas resistentes que se pueden prolongar considerablemente en el tiempo.

La velocidad de avance del proceso de carbonización hacia el interior de las piezas de madera depende de factores propios, como la especie maderera y dimensiones, y de factores externos, como las condiciones de evolución de la temperatura, tipo de exposición al fuego, disponibilidad de oxígeno y distancia al foco del incendio. La cuantificación de este proceso fundamenta los principales métodos de verificación y diseño de estructuras de madera ante el evento de fuego, por lo que se hace necesario disponer de un procedimiento experimental normalizado para llevar a cabo ensayos que determinen esta tasa de carbonización.

El objetivo de esta investigación es proponer un método experimental de medición de la velocidad de carbonización con el propósito de establecer una secuencia de procedimientos de laboratorio que unifiquen el criterio de estimación cuantitativa de esta propiedad. Se recurrirá para estos efectos de antecedentes disponibles a nivel nacional y de investigaciones y normativas realizadas en el extranjero y en regiones con mayor desarrollo en este tema. El estudio se complementará con una fase experimental en la infraestructura de Ensayos al Fuego del IDIEM, cuyos resultados se procesarán y analizarán de acuerdo con la metodología que se defina como la más adecuada para las condiciones locales.

## **1.1. Objetivos.**

### **1.1.1. Objetivo Principal**

- El objetivo principal de esta memoria es cuantificar la velocidad de carbonización de la madera laminada encolada de Pino radiata de acuerdo con los criterios unidimensionales y nominales definidos en la norma EN 1995 1-2

### **1.1.2. Objetivos Específicos.**

- Proponer una secuencia coherente de procedimientos de laboratorio para cuantificar la velocidad de carbonización en piezas de madera laminada encolada que reflejen las condiciones reales de un incendio en naves que cubran luces típicas de edificaciones deportivas, industriales, comerciales y similares.
- Ensayar probetas con el procedimiento propuesto y comparar los resultados con la teoría utilizada para el cálculo de esta propiedad en nuestro país. También resaltar las diferencias y similitudes entre los estudios y métodos de ensayo extranjeros con los realizados anteriormente en Chile.

## 1.2. Madera Laminada y comportamiento al fuego.

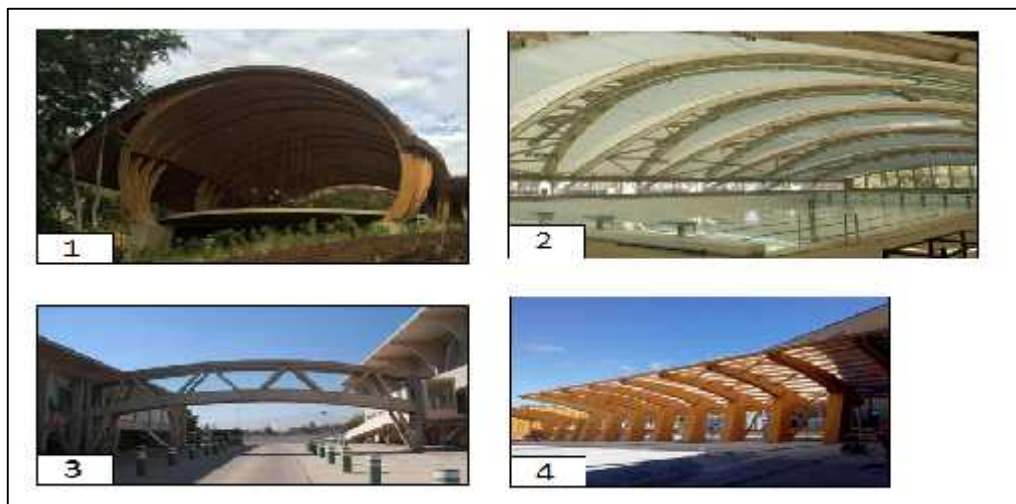
La madera laminada encolada (MLE) es un material compuesto, como su nombre lo dice, de láminas de madera de escuadrías comerciales unidas mediante adhesivos estructurales variados. La finalidad de esto es crear un elemento de dimensiones mucho mayores a las que se encuentran en el mercado de la madera aserrada, cuyos tamaños quedan limitados por el diámetro de los troncos de los bosques cosechados. En nuestro país se pueden encontrar escuadrías de no más de 10"x4" y largos máximos de 4.8 metros, siendo estos productos muy difíciles de encontrar. Es por esta razón que la construcción en este tipo de material está restringida a estructuras de tamaño relativamente pequeño.

La madera laminada permite llevar a cabo proyectos de mayores dimensiones que su par aserrada, ya que no tiene límites de longitud ni de sección transversal. Con vigas y pilares de MLE se pueden alcanzar luces y alturas similares a las de acero. Una peculiaridad de este material constructivo es que permite realizar elementos curvos como arcos, vigas y columnas de forma continua; siempre y cuando se restrinja adecuadamente y según norma el radio de curvatura y el espesor de las láminas que lo componen.

Por lo mencionado en el párrafo anterior es que cada vez este tipo de material es más utilizado en estructuras en donde desde siempre se ha preferido el acero y/u hormigón. Como por ejemplo recintos industriales, deportivos, educacionales, de culto, etc.

En la siguiente imagen se muestran algunas aplicaciones de la madera laminada encolada en estructuras de gran envergadura elaborados con madera de pino radiata chileno.

**Figura 1.1** “Ejemplos de estructuras de MLE”



En la figura anterior: (1) Arcos de MLE Hotel Papagallo, Costa Rica, (2) Arcos reticulados de MLE Piscina Parque O'Higgins, Santiago, Chile, (3) Pasarela Centro Maderas Arauco, Santiago, Chile, (4) Paseo Peatonal Hospital de Puerto Montt, Puerto Montt, Chile.

Dada la incorporación de componentes de madera laminada encolada en la construcción industrial y en edificaciones con capacidad de acoger grandes masas de gente como recintos deportivos y de culto, resulta interesante disponer de información confiable respecto a la capacidad que tiene la madera de soportar cargas durante y después de un incendio. Aun cuando la llama de fuego actúa directamente sobre los elementos la carbonización que experimentan las caras expuestas a las altas temperaturas genera una aislación térmica que puede condicionar brechas de hasta casi 800°C entre el interior de la pieza y el ambiente incendiado. Es esta característica por la cual se hace tan competente la madera laminada encolada frente al acero.

Si bien la velocidad de carbonización de la madera se ha medido y existe un valor estimativo, incendios en nuestro país han dejado ver que existe la posibilidad de que este valor no sea del todo preciso, siendo posiblemente sobreestimado. Es el caso de dos eventos en los cuales se vieron comprometidos elementos de MLE, uno de ellos es la planta de Piscicultura Invertek en Ensenada, Puerto Varas; y el Mall Plaza el Trébol de Talcahuano.

En ambos casos, las estructuras soportaron el incendio mayor tiempo del que se esperaba, resultando mayores daños en las zonas donde había presencia de elementos conectores de acero. De todas formas estas no colapsaron aun cuando los eventos duraron más de 4 horas. En las siguientes figuras se muestran imágenes de estos.

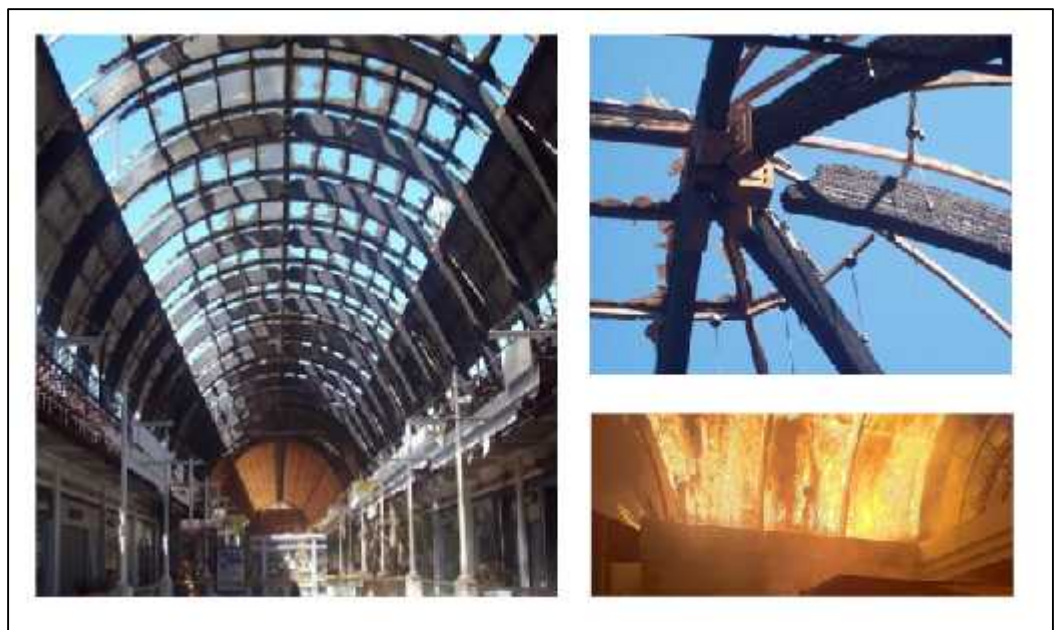


**Figura 1.2** “Incendio Planta de Piscicultura Invertek, Ensenada, Puerto Varas, 2011”



En Figura 1.2, a la derecha, se puede observar que el puntal compuesto de Madera Laminada estuvo expuesto al fuego y su exterior está completamente carbonizado, pero sigue colaborando en el soporte de la estructura de techo. En el lado izquierdo se aprecia que la estructura en general no colapsó después de un incendio de larga duración. Cabe destacar que esta planta estructuralmente está compuesta sólo de elementos de MLE.

**Figura 1.3** “Incendio Mall Plaza El Trébol, Talcahuano, 2012 “



Si bien para un análisis más minucioso es imprescindible disponer de datos concretos como la penetración de la carbonización en los elementos y el tiempo efectivo de exposición al fuego de las zonas afectadas, se observa a simple vista en la Figura 1.3 como el fuego actuó en los arcos de MLE de forma directa y estos no colapsaron. En la zona superior derecha, se ve que las zonas más críticas son las que se encuentran cercanas a herrajes de acero, producto de la gran conductividad térmica de este material.

Son muchos los factores que influyen en el nivel de destrucción de un incendio, como la carga combustible presente en el recinto, el grado de confinamiento o ventilación del mismo o el tiempo de acción directa y con máxima intensidad del fuego sobre un elemento. Para el caso de estructuras de madera, se suma una más: la velocidad de carbonización, cuyos valores para especies nacionales medidos con metodologías tradicionales son del orden de 0.6 a 1.1 [mm/min].

El colapso de una estructura de madera laminada expuesta al fuego durante un incendio depende en gran medida de la tasa de avance del proceso de carbonización hacia el interior de las piezas en el tiempo, por lo que resulta relevante poder cuantificar este valor de forma empírica ya sea en el laboratorio o a través de mediciones de carbonización en piezas de madera expuestas al fuego con posterioridad a un incendio. En lo siguiente se revisarán procedimientos experimentales para la cuantificación de la tasa de carbonización descrita en informes de investigación desarrollados durante las últimas décadas en Estados Unidos, Europa y Oceanía, los que se compararán con los aplicados tradicionalmente y que han usado en estudios realizados anteriormente en nuestro país.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Resistencia al fuego.

La resistencia al fuego es la cualidad que posee un elemento para no perder de manera significativa su capacidad funcional durante un evento de incendio estándar. Esta capacidad se refiere a estabilidad mecánica, estanquidad de las llamas, aislamiento térmico y cantidad de gases inflamables emitidos.<sup>1</sup>

La Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC)<sup>2</sup>, en su Título 4 - Capítulo 3 – Artículo 4.3.1, impone condiciones que se deben cumplir en el diseño de los edificios, con el fin de garantizar seguridad frente a un siniestro de esta índole.

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

La norma NCh 935/1. Of. 1997<sup>1</sup> indica la nomenclatura para identificar la resistencia al fuego de un elemento, previa realización del ensayo pertinente. Esta denominación es de la forma FXX, en donde XX representa el tiempo en minutos desde que se inicia el ensayo hasta que el elemento pierde la capacidad de mantener los aspectos mencionados en el párrafo anterior. Este valor se muestra en la Tabla 2.1.

---

<sup>1</sup> INN (CHILE). Prevención de incendio en edificios - Ensayo de resistencia al fuego – Parte 1: Elementos de construcción en general. NCh 935/1. Of. 1997. 29p.

<sup>2</sup> MINISTERIO de Vivienda y Urbanismo (Chile). Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. Actualizada a Abril de 2011.

**Tabla 2.1** “Clases de resistencia al fuego”.

Clase	Duración	
	Mínima [min]	Máxima [min]
F 0	0	14
F 15	15	29
F 30	30	59
F 60	60	89
F 90	90	119
F 120	120	149
F 150	150	179
F 180	180	239
F 240	240	---

Fuente: NCh 935/1. Of. 1997.

El artículo 4.3.3 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC)<sup>2</sup>, indica que las edificaciones que requieran protección al fuego deben proyectarse y construirse según alguno de los cuatro tipos establecidos en ella, designados por las letras a, b, c y d. Esta clasificación dependerá de los siguientes aspectos: Destino del edificio, superficie edificada, máximo de ocupantes, densidad de carga combustible y número de pisos. Las tablas 1, 2 y 3 presentes en la OGUC y que clasifican los edificios se muestran en la sección de Anexos A.1

Se señala también que los componentes de las estructuras deben cumplir con una resistencia al fuego mínima dependiendo del tipo de edificación y elemento, condición que se presenta en la siguiente tabla.

**Tabla 2.2** “Resistencia al fuego requerida para los elementos de construcción de edificios”

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

Fuente: OGUC 2011.

La simbología de los elementos se explica a continuación.

- Elementos Verticales.
  - (1) Muros Cortafuego
  - (2) Muros zona vertical de seguridad y caja de escalera.
  - (3) Muros caja ascensores.
  - (4) Muros divisorios entre unidades (hasta la cubierta).
  - (5) Elementos soportantes verticales.
  - (6) Muros no soportantes y tabiques.
  
- Elementos verticales y horizontales.
  - (7) Escaleras.
  
- Elementos horizontales.
  - (8) Elementos soportantes horizontales.
  - (9) Techumbre incluido cielo falso.

La norma alemana DIN 4102-1: 1998<sup>3</sup> realiza una clasificación de los materiales de construcción basándose en su combustibilidad. Se muestra en la Tabla 2.3 dicha categorización.

**Tabla 2.3** “Clasificación de materiales de construcción, DIN 4102-1”

Clase	Subclase	Característica
<b>A</b>	A1	Material No Combustible
	A2	
<b>B</b>	B1	Difícilmente Combustible
	B2	Normalmente Combustible
	B3	Fácilmente Combustible

Fuente: DIN 4102-1: 1998.

Dado que la madera es un material combustible, se tiene, según la tabla anterior, que pertenece a la clase B. con esto, un elemento de madera, con una resistencia al fuego de XX minutos, se puede representar de la forma F XX – B.

---

<sup>3</sup> DIN (Deutsches Institut für Normung) (GERMANY). Fire behaviour of building materials and elements. Part 1: Classification of building materials – Requirements and testing. DIN 1402-1: 1998.

Hoy en día existe una clasificación europea imperante en todo el continente denominada EUROCLASES, Norma europea EN 13501 parte1<sup>4</sup>, que supera lo impuesto por la norma DIN, en ella se ven distinciones más específicas las cuales se muestran en la Tabla 2.4

**Tabla 2.4** “Clasificación de materiales de construcción EN-13501-1:2002”

Clase	Combustible	Contribución al fuego
A1	NO	Grado máximo
A2	NO	Grado menor
B	SI	Muy limitada
C	SI	Limitada
D	SI	Mediana
E	SI	Alta
F	Sin clasificar	

Fuente: UNE EN 13501-1: 2002.

Dentro de esta clasificación, la madera se encuentra entre las clases C y E. Para especies muy ligeras y humedad bordeando el 12% caen en la categoría E, mientras que para elementos con contenido de humedad y densidad muy alta, se clasifican con la letra C. En los casos más corrientes, la madera se considera medianamente inflamable, por lo que corresponden a la clase D.

---

<sup>4</sup> EUROPEAN STANDARD. Fire classification of construction products and building elements. Part 1: Classification using data from reaction to fire tests.. EN 13501-1: 2002. 53p.

## 2.2. Carbonización en la madera.

La exposición de la madera a altas temperaturas genera un proceso químico y físico propio de este material. Los componentes de la madera como la lignina, celulosa y hemicelulosa se descomponen al quedar sometidos a altas temperaturas, lo que genera la emanación de gases y la transformación de la madera en carbón. La carbonización comienza desde las superficies expuestas al calor, desarrollándose hacia el interior de la pieza a una tasa que comúnmente se asume constante. La capa de carbón genera una aislación térmica entre la porción no carbonizada (interior) y el ambiente agresivo exterior, fenómeno que perdura pese al degradamiento parcial que puede experimentar por desprendimientos producto de su casi nula resistencia a esfuerzos mecánicos, inducidos por ejemplo, por la gravedad. En todo caso, siempre existirá un espesor prácticamente constante de capa aislante. Fonseca y Barreira (2009)<sup>5</sup>, representan las capas presentes durante el proceso de carbonización en la Figura 2.1.

**Figura 2.1** “Zonas durante carbonización en una sección de madera, Fonseca y Barreira (2009)”



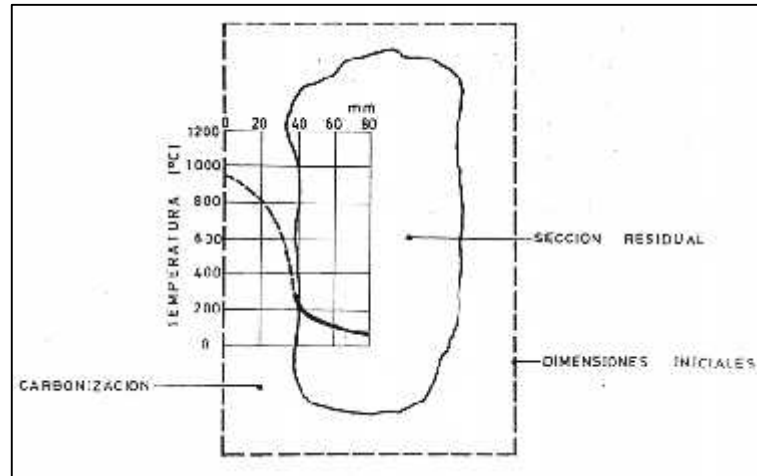
Fuente: Fonseca y Barreira 2009.

En la Figura 2.2<sup>6</sup> se muestra el desarrollo de temperaturas en una probeta de madera expuesta al fuego. En ella se evidencia lo explicado en el párrafo anterior respecto a la aislación térmica que produce el carbón y la baja conductividad de calor en la madera.

<sup>5</sup> FONSECA, E. M. M. y Barreira, L. M. S. Charring rate determination of Wood pine profiles submitted to high temperatures. Polytechnic Institute of Bragança. Portugal, 2009.

<sup>6</sup> RAMÍREZ C., Alejandro. Comportamiento de la madera frente al fuego y su protección. Tesis (Ingeniero Civil). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2001.

**Figura 2.2** “Desarrollo típico de temperaturas a través de pieza de madera”



Fuente: Ramírez 2001.

Se entiende que la interfaz carbón/madera, o base de zona de pirolisis en Figura 2.1, tiene una temperatura asociada entre los 200 y 300°C. Schaffer (1984)<sup>7</sup>, a través de ensayos con probetas de madera de distintas escuadrías e implementadas con termocuplas embebidas dentro de ellas, determinó que la temperatura conveniente para determinar el frente de carbonización correspondía a 288°C (550°F). Previamente, Hadvig (1981)<sup>8</sup>, asociaba esta zona con un valor de 300°C.

<sup>7</sup> SCHAFFER, E.L. Structural fire design: Wood Research Note. FPL 450. Forest Products Laboratory. U.S. Department of Agriculture, 1984.

<sup>8</sup> HADVIG, S. Charring of Wood in building fires. Technical report. Technical University of Denmark. Lynby 1981.



### 2.3. Velocidad de carbonización.

La velocidad o tasa de carbonización es el término que representa el avance del frente carbonizado en el tiempo. Su modelamiento puede hacerse de distas maneras, White (1992) consideró distintos modelos que representan de buena forma el evento, las cuales se presentan a continuación:

$$- t = m \cdot x_c \quad (2.1)$$

$$- t = m \cdot x_c - b \quad (2.2)$$

$$- t = m \cdot x_c^a \quad (2.3)$$

$$- t = d \cdot x_c + g \cdot x_c^2 \quad (2.4)$$

Dónde:

- t: Tiempo de exposición al fuego.
- $x_c$ : profundidad de carbonización.
- m: inverso de la velocidad de carbonización ( $s^{-1}$ ).
- a, b, d y g: parámetros generales sin interpretación específica.

La ecuación (2.1) representa una relación lineal entre la profundidad de carbonización y el tiempo transcurrido. La ecuación (2.2) tiene la misma interpretación que la anterior, pero considerando una rápida carbonización inicial al incorporar parámetro “b”. En el primer modelo se razona que el retardo de la carbonización de la superficie se contrapone numéricamente a la ignición inicial más rápida, por lo que no se agrega. Las ecuaciones (2.3) y (2.4) pueden representar tasas constantemente más lentas o rápidas dependiendo de los valores asignados a las variables respectivas. El modelo más utilizado hoy en día es el mostrado por la primera ecuación, pero de la forma:

$$d_{cha} = \beta \cdot t \quad (2.5)$$

Dónde:

- $d_{char}$ : Profundidad de carbonización.
- $\beta$ : Tasa de carbonización.
- t: Tiempo de exposición al fuego.

El Eurocódigo EN 1995-1-2: 2004<sup>9</sup> presenta dos maneras de ver el parámetro  $\beta$  de la ecuación (2.5), de forma nominal ( $\beta_n$ ) o unidimensional ( $\beta_o$ ). La segunda se utiliza cuando

---

<sup>9</sup> EUROPEAN STANDARD. Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural Fire design. EN 1995-1-2: 2004. 69p.

se considera en el cálculo el efecto de redondeo en las aristas, mientras que la nominal no lo hace y es por ello que los valores de esta son mayores para incorporarlos de manera implícita. En la Tabla 2.5 se muestra la traducción de su homónima 3.1 de la norma EN 1995-1-2 2004, que muestra los valores de  $\beta_o$  y  $\beta_n$  a considerar para el diseño al fuego de elementos de madera.

**Tabla 2.5** “Valores de  $\beta_o$  y  $\beta_n$  según Eurocódigo”

	$\beta_o$ [mm/min]	$\beta_n$ [mm/min]
<b>a) Coníferas y Haya</b>		
MIF con dens. característica $\geq 290$ kg/m <sup>3</sup>	0.55	0.70
Madera Aserrada con dens. característica $\geq 290$ kg/m <sup>3</sup>	0.55	0.80
<b>b) Latifoliada</b>		
Madera Aserrada o MIF con dens. característica $\geq 290$ kg/m <sup>3</sup>	0.55	0.70
Madera Aserrada o MIF con dens. característica $\geq 450$ kg/m <sup>3</sup>	0.50	0.55
<b>c) LVL</b>		
con densidad característica $\geq 450$ kg/m <sup>3</sup>	0.55	0.70
<b>d) Paneles</b>		
Paneles de madera	0.90 (a)	-
Tableros Contrachapados	1.00 (a)	-
Tableros a base de madera, que no sean de madera contrachapada	0.90 (a)	-
(a) Los valores aplican con dens. Característica de 450 kg/m <sup>3</sup> y a paneles de espesor 20mm		

Fuente: Tabla 3.1 EN 1995-1-2, 2004.

La aplicación de la velocidad de carbonización unidimensional,  $\beta_o$ , requiere cumplir con los siguientes requisitos de espesor mínimo.

$$-b_{\min} = 2 \cdot d_{\text{char},o} + 80\text{mm} \quad \text{para } d_{\text{char},o} \geq 13\text{mm.}$$

$$-b_{\min} = 8.15 \cdot d_{\text{char},o} \quad \text{para } d_{\text{char},o} < 13\text{mm.}$$

El redondeo de las aristas se puede modelar mediante un cuarto de círculo de radio igual a la carbonización efectiva  $d_{\text{char},0} = \beta_o \cdot t$ .

## 2.4. Propiedades influyentes en la carbonización de la madera.

Una especie maderera puede crecer en distintos lugares del planeta, y sus propiedades pueden variar de gran manera producto de las diferencias climáticas y geográficas de las regiones de crecimiento. A diferencia de otros materiales de construcción, sus propiedades físicas y mecánicas obedecen a un orden natural y no de manufactura, es por ello que en la mayoría de los estudios de resistencia al fuego se busca obtener este valor en función de las propiedades que lo ameritan.

Excluyendo factores externos como el desarrollo de temperaturas del evento de incendio y condiciones de ventilación en el recinto donde se produce, las propiedades más determinantes corresponden a la densidad, contenido de humedad, morfología del tejido leñoso, presencia de imperfecciones como nudosidades y grietas, permeabilidad, volumen de pieza expuesta y composición química. Varios estudios determinan que las dos primeras, densidad y humedad, de los elementos de madera, son por lejos los factores más influyentes en la velocidad a la que se carbonizan.

### 2.4.1. Contenido de Humedad.

El contenido de humedad de un elemento hace referencia al porcentaje de agua que este contiene, en relación a su masa.

$$H [\%] = \frac{m_H - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (2.6)$$

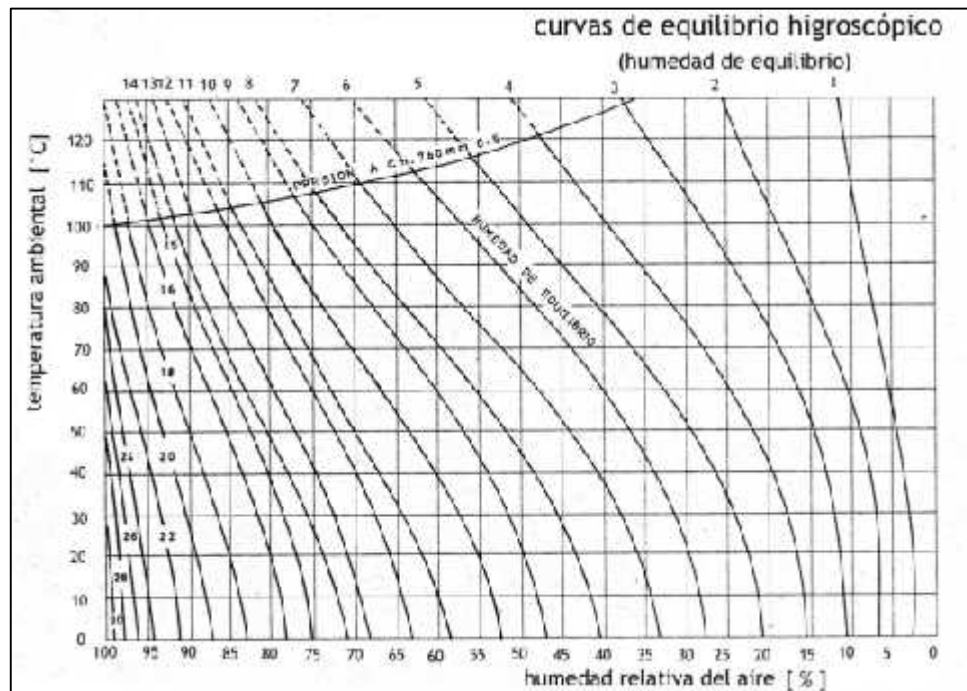
Dónde:

- H: Contenido de humedad, en %.
- $m_H$ : Masa del elemento con contenido de humedad inicial.
- $m_0$ : Masa del elemento con contenido de humedad cero (anhídrido).

La madera intercambia agua con el ambiente dependiendo de las condiciones en que se encuentre uno y otro. Cuando la madera libera agua al medio ambiente ( H negativo) se produce una contracción en ella y cuando la absorbe ( H positivo) una hinchazón. La diferencia de contenido de humedad se hace en relación al estado inicial de la madera y las condiciones de temperatura (T) y humedad relativa del ambiente (HRA) en que se encuentra.

Durante un periodo de tiempo suficientemente largo en un ambiente dado, la madera alcanza una Humedad de Equilibrio Higroscópico (HEH) producto del intercambio de agua con el medio, la que se puede determinar con el ábaco elaborado por Bollman (1959) y mostrado en la Figura 2.3.

**Figura 2.3** “HEH en función de temperatura ambiente (TA) y humedad relativa del ambiente (HRA), Bollman (1959)”



Fuente: Wagner 2013<sup>10</sup>.

En la norma chilena NCh 1198 Of2006.<sup>11</sup> Anexo D -Tabla D.1 se muestran datos de TA, HRA de estaciones meteorológicas del país y la HEH calculada para cada una.

En el mismo documento se definen dos estados de la madera en relación a su contenido de humedad: seco y verde. El primero corresponde a elementos en los que la humedad es menor o igual al 12%, mientras que el estado verde se refiere a cuando el porcentaje de agua iguala o supera el punto de saturación de la fibra (PSF), valor variable entre 24 y 35% para distintas especies madereras. Existe un tercer estado definido, anhidro, que considera un contenido de humedad igual a cero.

<sup>10</sup> WAGNER M., Mario. CI-5224-1. Diseño y Construcción en Madera. El agua en la madera. [Diapositiva]. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 2013.

<sup>11</sup> INN (CHILE). Madera – Construcción en madera – Cálculo. NCh 1198 Of2006. Santiago, Chile, 2006, 213p.

## 2.4.2. Densidad.

La densidad corresponde a la razón entre la masa de un determinado sólido y su volumen. En la madera se puede especificar de distintas formas, dependiendo principalmente del contenido de humedad que presenta. A continuación se muestran los distintos tipos de densidades que usualmente se utilizan para presentar esta propiedad en la madera.

1. **Densidad de Referencia ( $d_H$ )**: Corresponde a la masa que presenta un elemento con humedad H ( $m_H$ ) dividido por su volumen ( $V_H$ ), como se muestra en la ecuación (2.7). Específicamente, cuando la humedad corresponde a un 12%, se habla de Densidad normal ( $d_{12}$ ).

$$d_H = \frac{m_H}{V_H} \quad (2.7)$$

2. **Densidad Nominal ( $d_n$ )**: Hace referencia a la razón entre la masa anhidra ( $m_0$ ) y el volumen a un contenido de humedad H ( $V_H$ ) generalmente a un 12%, ecuación (2.8).

$$d_n = \frac{m_0}{V_H} \quad (2.8)$$

3. **Densidad Anhidra ( $d_0$ )**: Densidad medida en estado seco de la madera, es decir, con contenido de humedad igual a cero, como se expresa en la ecuación (2.9).

$$d_0 = \frac{m_0}{V_0} \quad (2.9)$$

4. **Densidad básica ( $d_b$ )**: Densidad calculada a partir de la razón entre la masa anhidra ( $m_0$ ) y el volumen en un estado verde ( $V_V$ ), es decir, con contenido de humedad mayores o iguales a 20 y 30%, para pino radiata y otras especies respectivamente.

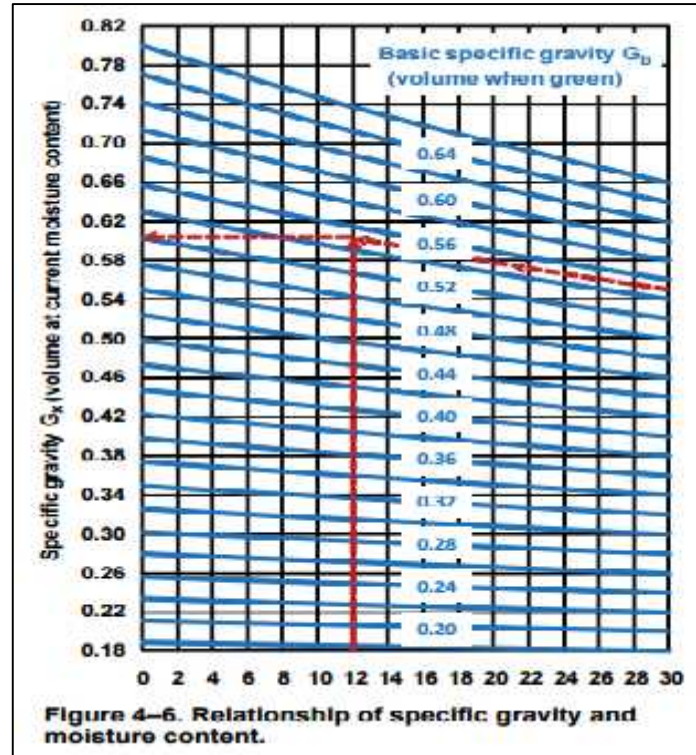
$$d_b = \frac{m_0}{V_V} \quad (2.10)$$

Existen ábacos en los cuales interactúan algunos de estos tipos de densidades junto con el contenido de humedad. En la Figura 2.4<sup>12</sup>, se muestra una forma gráfica de determinar la densidad básica en función del contenido de humedad (eje y) y la densidad nominal (eje x).

---

<sup>12</sup> FOREST Products Laboratory. Wood Handbook- Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Centennial ed. Madison, WI, USA, Department of Agriculture. 2010, 508p.

**Figura 2.4** “Relación entre Densidad nominal, básica y contenido de humedad en la madera”

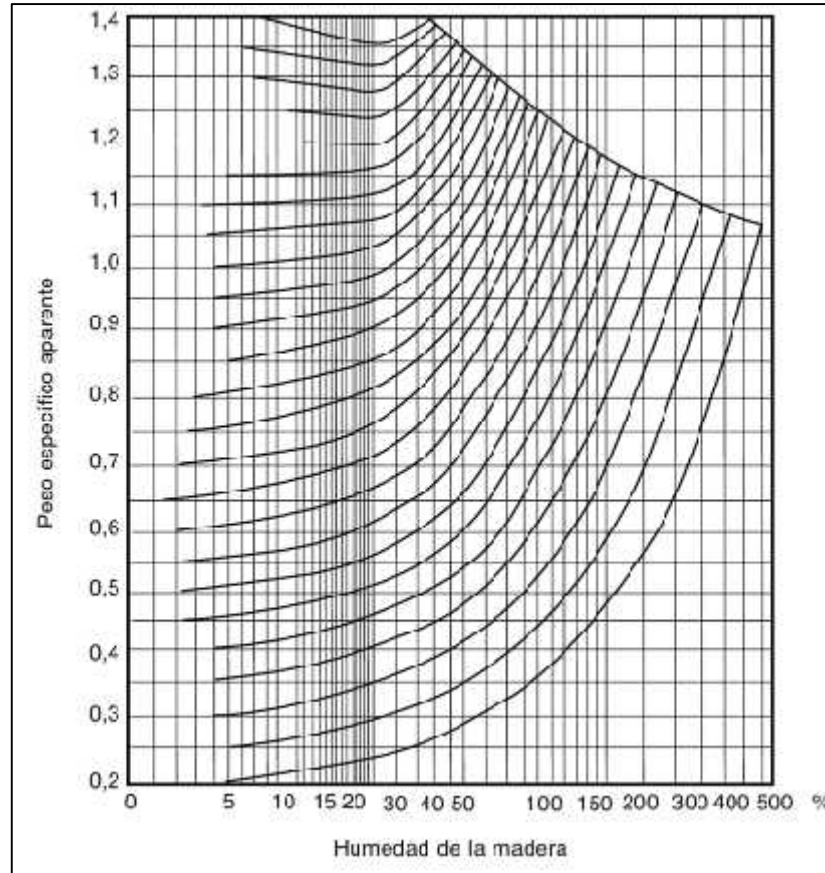


Fuente: Wood Handbook-Wood as an ingeneering material 2010.

Kollman (1959) confeccionó un ábaco (mostrado en la Figura 2.5<sup>13</sup>) que determina la densidad anhidra ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) a partir del peso específico referencial o aparente (eje x, en  $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) y del contenido de humedad (eje y, en %).

<sup>13</sup> VIGNOTE P., Santiago y Martínez R., Isaac. Tecnología de la madera. 3ª ed., Madrid, Ediciones Mundi-Prensa, 2006. 678p.

**Figura 2.5** “Relación densidad anhídra, referencial y contenido de humedad, Kollman (1959)”.



Fuente: Vignote y Martínez 2006.

Para efectos prácticos, las densidades mayormente utilizadas son la anhidra y normal, ya que se obtienen a partir de humedades fijas como son 0 y 12% respectivamente. En la norma chilena NCh 1198 Of-2006 “Madera- Construcciones en madera- Cálculo” – Anexo E, se detallan valores de estas densidades para las distintas especies forestales comerciales del país.

Específicamente para el caso del fenómeno de carbonización, se tienen variados estudios experimentales en los que se asocia la densidad con la tasa a la cual esta avanza. Uno de los más significativos, Collier (1992)<sup>14</sup>, expresó esta velocidad en función sólo en la densidad, considerando que el contenido de humedad de las maderas en general siempre está cercano al 12%. Con esto presentó los rangos que se muestran en la Tabla 2.6.

<sup>14</sup> COLLIER, P.C.R. Charring Rates of Timber. Study Report No.42. Nueva Zelanda, 1992.

**Tabla 2.6** “Razón de carbonización con respecto a la densidad nominal, Collier (1992)”

Densidad [kg/m <sup>3</sup> ] (contenido de humedad del 12%)	Tasa de Carbonización [mm/min]
400	0.75
500	0.70
600	0.65

Fuente: Collier 1992.

## 2.5. Ensayos.

Es difícil encontrar un marco teórico para la realización de ensayos en este tema ya que los procedimientos son muy variados y responden a las características del material e instalaciones en cada zona.

La norma internacional ISO 834 propone una curva de incendio estándar con el fin de unificar los criterios de exposición al fuego en ensayos de materiales. Esta gráfica pretende describir el incremento de la temperatura a lo largo del tiempo en un incendio típico. La mayoría de los países ha adoptado esta curva en las normas referentes a resistencia de materiales al fuego, y Chile no es la excepción con la NCh 935/1 Of 1997<sup>1</sup>. Ensayo de resistencia al fuego<sup>1</sup>.

La curva en cuestión responde a la fórmula:

$$T - T_0 = 345 \cdot \log(8 \cdot t_f + 1) \quad (2.11)$$

Dónde:

- $t_f$ : Tiempo desde el inicio del ensayo, en min.
- $T$ : Temperatura del horno en el instante  $t_f$ , en °C.
- $T_0$ : Temperatura inicial del horno, comprendida entre 0 y 40 °C.

La tolerancia de la desviación media de temperatura en el horno varía según intervalos de tiempo como se muestra en la tabla siguiente.

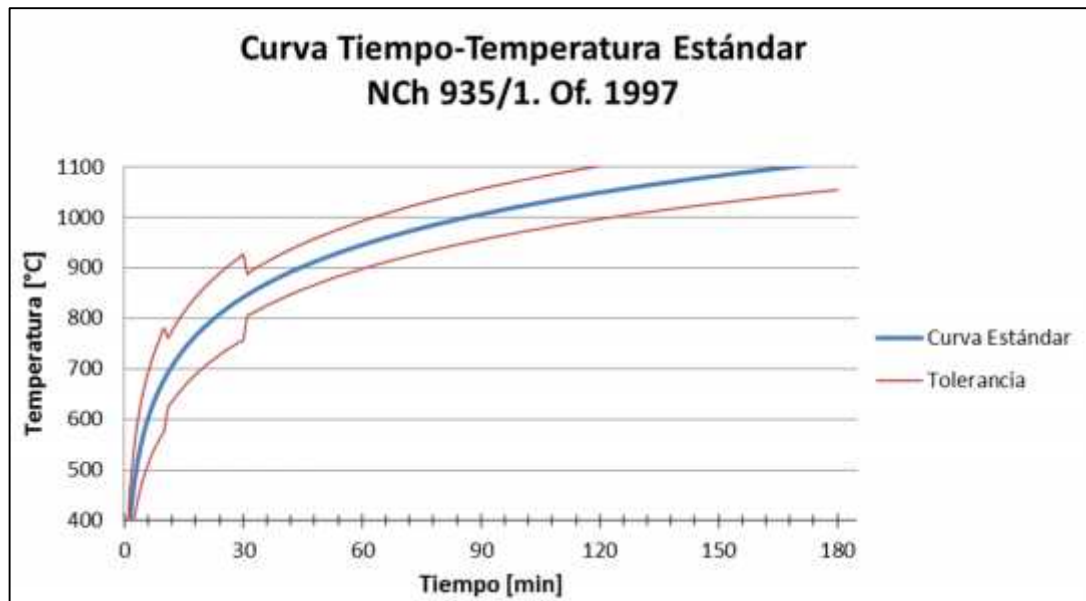


**Tabla 2.7** “Tolerancias de desviación media de temperatura de incendio estándar”

Intervalo [min]	Tolerancia
0 - 10	$\pm 15\%$
11 - 30	$\pm 10\%$
31 - ---	$\pm 5\%$

La materialización de la ecuación (2.11) y las tolerancias de desviación media se muestra en la Figura 2.6. Se considera una temperatura inicial igual a 20°C.

**Figura 2.6** “Curva Tiempo-Temperatura de incendio estándar y tolerancias según NCh 935/1-ISO 834”



## **CAPITULO III**

### **ANTECEDENTES.**

Dentro del amplio universo de antecedentes referentes a estudios y ensayos de elementos de madera y su comportamiento al fuego existentes, se mencionan a continuación los más representativos para este trabajo, en cuyos casos se emplean metodologías interesantes y/o probetas de especies muy similares al Pino Radiata Chileno.

No se consideran investigaciones que contemplen acción de cargas ya que se busca un procedimiento para determinar un valor nominal de la tasa de carbonización en condiciones normales.

#### **3.1. Antecedentes Internacionales.**

##### **3.1.1. Gardner y Syme (1991), Australia<sup>15</sup>.**

El trabajo titulado realizado por W.D. Gardner y D.R. Syme, (1991); es de gran interés en este estudio dado que una de las especies ensayadas es Pino Radiata y por la metodología empleada.

El objetivo principal de este estudio, como su nombre lo dice, es determinar la tasa de carbonización de las distintas especies y ver el efecto de la protección mediante yeso-cartón.

##### **3.1.1.1. Probetas.**

Se utilizan 3 muestras de madera laminada por cada especie de 150, 270 y 1400 mm de ancho, alto y largo respectivamente; con un espesor de lámina de 30mm.

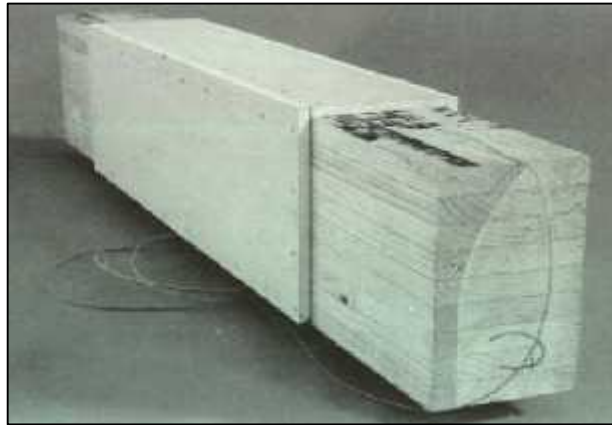
---

<sup>15</sup> GARDNER, W.D. y Syme, D.R. Charring of Glued-Laminated beams of eight Australian-grown timber species and the effect of 13mm gypsum plasterboard protection on their charring. Sydney, 1991.

La densidad de las láminas para las probetas de pino radiata están en el rango de 443-565 [kg/m<sup>3</sup>], con un promedio de 526 [kg/m<sup>3</sup>] y una desviación estándar de 37 [kg/m<sup>3</sup>]. En cuanto al contenido de Humedad el rango es de 8.3 - 9.9 [%], promedio 9.2 [%] y la desviación estándar 0.6 [%]. Ver propiedades de las otras especies madereras en la sección Anexos.

Placas de yeso-cartón de espesor 13mm, se disponen con el fin de cubrir las caras superior y laterales en un tramo central de 900mm como lo muestra la Figura 3.1.

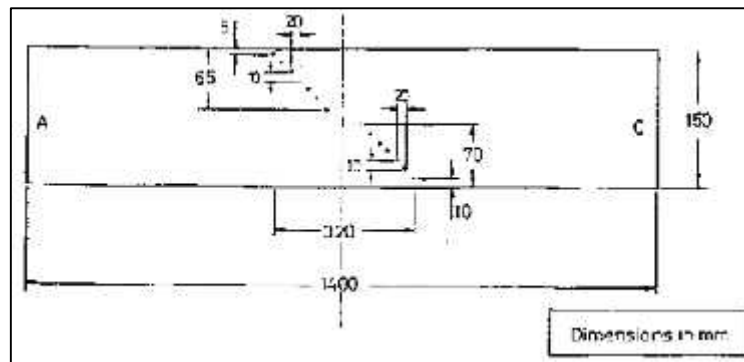
**Figura 3.1** “Probeta con protección Y-C, Gardner y Syme, (1991)”



Fuente: Gardner y Syme 1991

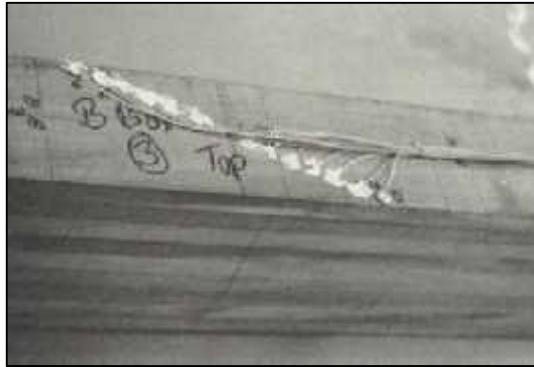
El ensayo contempla la utilización de termocuplas tipo K (Cromel-Alumel) situadas todas a una profundidad de 105mm desde la cara superior y a 10 mm sucesivamente de las caras laterales, ver esquema de la Figura 3.2. y Figura 3.3.

**Figura 3.2** “Esquema localización termocuplas, Gardner y Syme (1991)”



Fuente: Gardner y Syme 1991

**Figura 3.3** “Muestra con termocuplas insertas, Gardner y Syme (1991)”



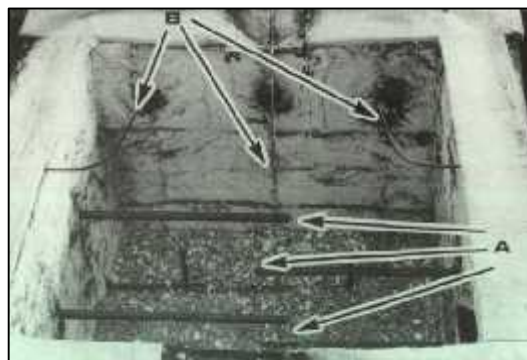
Fuente: Gardner y Syme 1991

### 3.1.1.2. *Equipo.*

Los ensayos se realizaron en un horno horizontal a gas que tiene una abertura de 900x900mm aproximadamente. Este se cubre con módulos de fibra cerámica que cumplen con las especificaciones de materiales de revestimiento en la cláusula 2.1 de la norma australiana AS 1530.4-1985. El equipo en cuestión estaba localizado en el *Fire Technology Laboratory, Weyerhaeuser Company, Lonview, Washington, E.E.U.U.*

En el horno hay dos juegos de termocuplas que entregan el valor de la temperatura promedio en la cámara de combustión. El primer juego “A” está situado en un plano horizontal a 300mm de la parte superior (abertura donde se colocará la tapa junto con la probeta) y el segundo “B” en otro plano a 150 mm de las misma zona (ver Figura 3.4).

**Figura 3.4** “Localización de termocuplas dentro del horno, Garder y Syme (1991)”



Fuente: Gardner y Syme 1991

### 3.1.1.3. Metodología.

Las muestras fueron puestas en la tapa del horno -mencionado anteriormente- con cubierta aislante, sobresaliendo cada extremo 150mm aproximadamente. La superficie superior estaba en estrecho contacto con el material aislante con lo que se aseguró que las dos caras laterales y la cara inferior quedaran expuestas al fuego y no así la superior, ver Figura 3.5.

Las termocuplas son conectadas al equipo de recopilación de datos y se posiciona la tapa del horno sobre este último, como se aprecia en la Figura 3.5 (Derecha).

Las probetas son expuestas a una curva de temperatura de incendio estándar según AS 1530.4 (ISO 834).

**Figura 3.5** “Probeta situada en la tapa del horno (Izquierda), Tapa con probeta y horno ensamblados (Derecha), Gardner y Syme (1991)”



Fuente: Gardner y Syme 1991

El procedimiento consta de 4 tipos de exposición al fuego, se detallan a continuación:

- **Exposición 1A:** Probetas expuestas a condiciones de calor estándar durante 1 hora, con las termocuplas dispuestas en el plano a 300mm bajo la base de la muestra (A).
- **Exposición 1B:** Probetas expuestas a condiciones de calor estándar durante 1 hora, con las termocuplas dispuestas en el plano a 150mm bajo la base de la muestra (B)
- **Exposición 2B:** Probetas expuestas a condiciones de calor estándar durante 2 hora, con las termocuplas dispuestas en el plano a 150mm bajo la base de la muestra (B)
- **Exposición 2BP:** Probetas protegidas con placa de Yeso-Cartón expuesta a las mismas condiciones que 2B.

Una vez terminado el ensayo las probetas son rápidamente sacadas del horno y de su tapa, para posteriormente ser enfriadas con vapor de agua.

#### 3.1.1.4. Resultados.

La velocidad de carbonización se obtuvo de dos formas distintas:

##### a) Sección residual.

Una vez finalizado el ensayo, se mide la sección residual de la probeta y al compararla con las iniciales se obtiene la profundidad de carbonización en las caras expuestas al fuego, en la Tabla 3.1 se muestran los resultados obtenidos para las muestras de pino radiata.

**Tabla 3.1** “Profundidad y tasa de carbonización de Pino Radiata, Gardner y Syme (1991)”.

Especie / Exposición	Profundidad carbonización [mm]		Tasa Carbonización [mm/min]	
	Lateral	Base	Lateral	Base
<b>Pino Radiata</b>				
1A	55.5	47	0.9	0.8
1B	47.5	35	0.8	0.6
2BP	52.8	48	0.4	0.4

Fuente: Gardner y Syme 1991.

Los resultados de las otras especies madereras ensayadas se encuentran en la sección Anexos.

##### b) Regresión Lineal.

Se realiza utilizando los datos obtenidos con las termocuplas dispuestas en la pieza. Para ello se considera que la temperatura en la frontera de carbonización es de 288 °C, valor asignado por Schaffer (1984)<sup>6</sup>; con esto, se tienen los pares ordenados distancia (posición de termocupla) y tiempo transcurrido hasta que se registra la temperatura de carbonización.

Con el gráfico desplegado para cada especie y en sus distintos tipos de exposición, se genera una regresión lineal del tipo:

$$c = a \cdot t + b \quad (3.1)$$

Dónde:

- c: Distancia desde la cara expuesta al fuego hasta la isoterma 288°C, en mm.
- t: Tiempo en que la muestra ha estado expuesta a las condiciones de calor estandarizado.

En la Tabla 3.2 se muestran los valores correspondientes a las probetas de Pino Radiata.

**Tabla 3.2** “Valores de Regresión Lineal para ensayos de probetas de Pino Radiata, Gardner y Syme (1991)”

Especie	Exposición	a	b	R <sup>2</sup>
Pino Radiata	1A	0.92	2.3	0.99
Pino Radiata	1B	0.83	0.8	0.98
Pino Radiata	2BP	0.48	-9.1	0.97

Fuente: Gardner y Syme 1991

Los resultados de las otras especies madereras ensayadas se encuentran en la sección Anexos.

### **3.1.2. Collier, P.C.R. (1992), Nueva Zelanda<sup>14</sup>.**

Esta investigación consiste en analizar parámetros que influyen en la tasa de carbonización de los elementos de madera. Para ello se realizan dos tipos de test en donde se ensayan probetas de dos especies neozelandesa, Pino Radiata y Pino Oregón.

#### **3.1.2.1. *Probetas.***

Para el test 1, se utilizan 28 probetas de dimensiones 200 x 100 x 90 mm, de alto, ancho y espesor respectivamente. Estas son de Pino Radiata (aserrada y laminada); y de pino Oregón (sólo aserrada). Para el ensayo 2 se emplean probetas de madera laminada de pino radiata de secciones 545mm x 135mm x 1985mm.

#### **3.1.2.2. *Equipo.***

Las probetas se ensayan en el horno piloto BRANZ, el cual tiene por dimensiones 1 metro de ancho, 2.2 de alto y 0.5 de profundidad; posee 8 quemadores a diésel y 4 termocuplas que monitorean la temperatura dentro de él.

#### **3.1.2.3.- *Metodología.***

Como se menciona anteriormente, este trabajo consta de dos test, el primero para determinar la relación entre la tasa de carbonización y los parámetros físicos de la madera; y el segundo principalmente para comparar los resultados del ensayo anterior con el de una probeta de grandes dimensiones como una viga o columna. Para ello se utiliza en ambos procedimientos la curva tiempo -temperatura acorde a la norma AS 1530.4 (ISO 834) durante un periodo de tiempo igual a 1 hora.

En el ensayo número 1 se tiene una tapa-muro con 28 agujeros en los cuales se insertan las probetas pequeñas con el fin de que queden expuestas al fuego sólo por una cara, ver Figura 3.6 Sólo 7 muestras son instrumentadas con termocuplas a 18 y 36 mm de la superficie expuesta; 2 de estas probetas son de MLE de pino radiata, 4 de pino radiata aserradas y una de pino Oregón aserrada. Para las demás muestras la obtención del dato buscado, velocidad de carbonización, se hace mediante la razón entre profundidad de carbonización y el tiempo transcurrido, en donde ciertas probetas se exponen el tiempo completo (1 hora), los primeros 29 minutos, y otras el tiempo restante (31 minutos). Estas

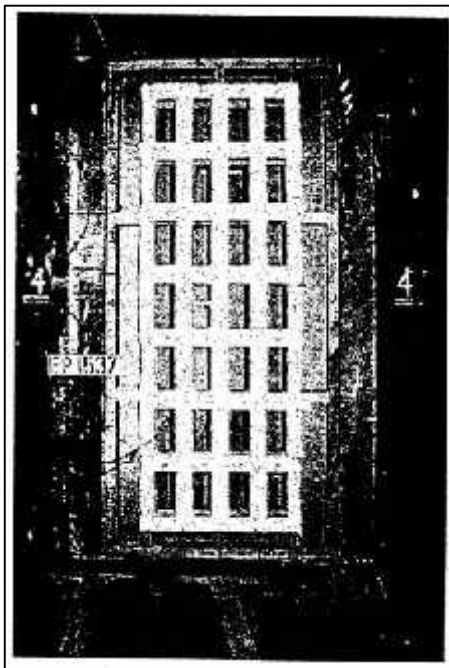


últimas siguiendo una curva de incendio estándar (AS 1530.4-ISO834) sujeta a una temperatura inicial igual a 817°C.

El ensayo número 2 consiste en que la probeta de madera laminada se sitúa de manera vertical en el horno de tal forma que tres caras quedan expuestas al fuego. Se implementa con 26 termocuplas: 4 de ellas a una profundidad de 18mm de la cara sobresaliente, y otras 22 a 36mm de la misma. Ver esquema de la Figura 3.7 en donde se muestran los puntos donde se hacen las perforaciones.

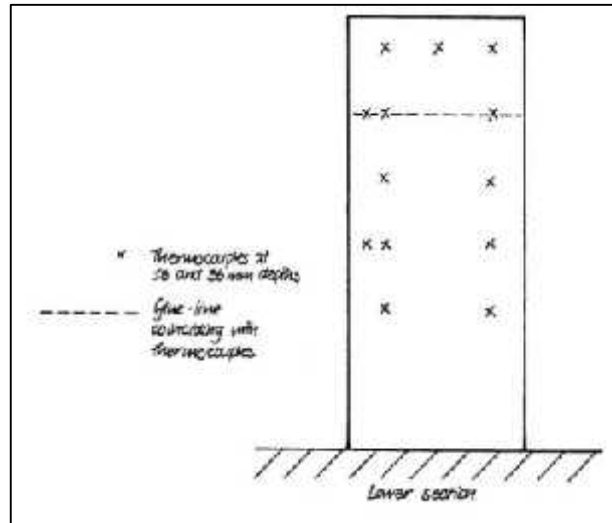
Cabe mencionar que la temperatura en la interfaz carbón/madera considerada es la impuesta por Hadvig (1981)<sup>7</sup> de 300°C.

**Figura 3.6** “Horno Piloto BRANZ con probetas para ensayo N°1, Collier (1992)”



Fuente: Collier 1992.

**Figura 3.7** “Esquema de localización de termocuplas ensayo N°2, Collier (1992)”



Fuente: Collier 1992.

Se utilizaron probetas del mismo tipo para determinar las propiedades físicas mencionadas con anterioridad.

### 3.1.2.3. Resultados.

En primer lugar se aprecia que los factores más influyentes en la tasa de carbonización son el contenido de humedad y densidad de la madera.

En cuanto a las tasas de carbonización obtenidas de los ensayos, se tienen valores cercanos a los predichos por White (1988). Los resultados se muestran en el punto A.2.2 de Anexos por medio de imágenes de tablas del documento en cuestión.

Para la madera laminada de pino radiata se tienen valores que van desde 0.52 hasta 0.97 [mm/min] para el ensayo 1, y entre 0.55 y 1.04 [mm/min] para en ensayo 2, considerando que en las líneas de encolado la carbonización se producía más rápidamente.

### **3.1.3. White y Nordheim (1992), Estados Unidos<sup>16</sup>.**

El trabajo busca principalmente determinar una ecuación predictiva para la tasa de carbonización en la madera en función de parámetros físicos como son el contenido de humedad, densidad, propiedades químicas, permeabilidad y otras. Si bien ninguna de las especies ensayadas y analizadas corresponde a pino radiata, entra en el análisis la característica de maderas latifoliadas o coníferas, siendo el segundo grupo al cual pertenece la especie en estudio de esta tesis.

Otro aspecto interesante es la implementación de termocuplas para determinar el avance de la carbonización, junto con el análisis de datos empleado.

#### **3.1.3.1. Probetas.**

Las especies madereras a ensayar corresponden a *Picea engelmannii*, *Thuja plicata*, *Pinus sp.*, *Sequoia sempervirens*, *Hacer sp.*, *Liriodendron tulipifera*, *Quercus sp.* y *Tilia sp.*

Se fabrica una viga para cada especie de dimensiones 510mm, 230mm y 3m de ancho alto y largo respectivamente, para posterior seccionamiento cada 63mm, con lo cual se obtienen probetas de 63x230x510mm por cada tipo de madera, para los distintos tipos de ensayos.

Las muestras están confeccionadas con 5 láminas de 46mm de espesor, excepto las de la especie Pino, que consta de 7 láminas de 38mm.

#### **3.1.3.2. Equipo.**

El equipo utilizado es un horno de hormigón refractario vertical a gas, de tamaño pequeño del cual no se da mayor especificación.

---

<sup>16</sup> WHITE, R y Norheim, E. Charring Rate of Wood for ASTM E 119 Exposure. Madison, 1992.

### 3.1.3.3. Metodología.

Se hacen dos grupos de ensayos, el primero con tres probetas de cada especie con contenidos de humedad de 6.9 y 11%, y el segundo con 2 muestras por tipo de madera con contenidos de humedad 9 y 16%.

En tres láminas de cada probeta se insertan 4 pares de termocuplas a una distancia de 13, 25, 38 y 51mm de la cara expuesta al fuego, con esto se tienen dos lecturas por posición en cada una de las láminas.

La inyección de gas al horno fue regulado siguiendo las indicaciones de la ASTM E119 para la curva tiempo-temperatura estándar. La prueba finaliza cuando la tercera termocupla (a 38mm de a cara expuesta) registra una temperatura de 288°C (Schaffer, 1984). No se considera la cuarta termocupla ya que la idea es registrar datos que sean consistentes con un cuerpo semi-infinito.

Los ensayos complementarios para determinar las propiedades de densidad, contenido de humedad, permeabilidad, y composición química se realizan con las probetas de igual sección obtenidas como se menciona en el punto 2.1.2.1. Estos tests y sus resultados se describen en “*Charring Rates of Different Wood Species*”, White, Robert Hawthorne (1988).

### 3.1.3.4. Resultados.

Como se menciona en el punto 2.3 del presente documento, se consideran cuatro modelos que pueden relacionar de buena manera el tiempo y el avance de la carbonización, los cuales son:

$$- t = m \cdot x_c \quad (3.2)$$

$$- t = m \cdot x_c - b \quad (3.3)$$

$$- t = m \cdot x_c^a \quad (3.4)$$

$$- t = d \cdot x_c + g \cdot x_c^2 \quad (3.5)$$

Por los datos obtenidos de los ensayos, se tiene que la curva que mejor representan estos es la (3.4), con el valor de la constante “a” igual a 1.23. Por lo tanto:

$$t = m \cdot x_c^{1.2} \quad (3.6)$$

El valor de “m” queda en función de las propiedades determinadas por los ensayos complementarios, de la forma:

$$m = -0.147 + 0.564 \cdot p + 0.0121 \cdot u + 0.532 \cdot f_c \quad (3.7)$$

Dónde:

- p: Densidad seca.
- u: Contenido de humedad.
- f<sub>c</sub>: Factor de contracción por carbonización (En función de la densidad, clasificación: madera conífera c=1; madera latifoliada c=-1, profundidad de penetración de CCA y otros).

En la sección de Anexos se tienen los valores de todas las especies ensayadas. Específicamente para la madera Pino, se tienen los siguientes valores de m con las ecuaciones (3.2) y (3.4):

Para ecuación (3.2)  $t = m \cdot x_c$   $m = 1.62 \left[ \frac{m}{m} \right]$

Para ecuación (3.4)  $t = m \cdot x_c^{1.2}$   $m = 0.7338 \left[ \frac{m}{mm^{1.2}} \right]$

Del resultado de ecuación (3.2) se tiene que la velocidad de carbonización es  $c = 0.62 \left[ \frac{m}{m} \right]$ .

### 3.1.4. Ligens, Albert (2003), Alemania<sup>17</sup>.

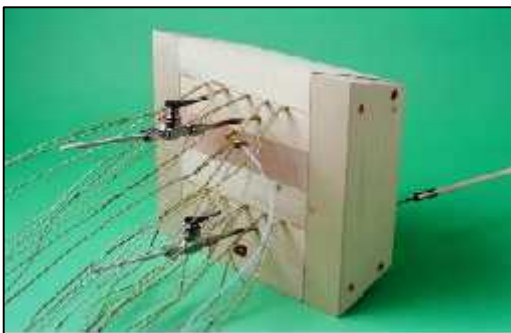
El trabajo titulado en español “Investigación sobre la carbonización y gases de combustión en especies madereras en relación a composición química en la madera estructural de construcción” tiene una sección en la cual se emplea un método para determinar la velocidad de carbonización interesante para el tema tratado en esta investigación.

#### 3.1.4.1. *Probetas.*

Los elementos a ensayar en este procedimiento corresponden a probetas de las cinco especies comerciales principales en Alemania, como son el Abeto, Pino, Alerce, Haya y Roble. Las muestras, libres de defecto, se climatizaron en un ambiente tierno calefaccionado, logrando que alcanzaran una humedad de equilibrio higroscópico igual a 9.2%.

Las probetas por cada ensayo consisten en bloques de 4 mini-probetas de dimensiones 50 x 200 x 100 mm de alto, ancho y largo respectivamente, éstas son fijadas en un marco de prueba por medio de ranuras y lengüetas; los elementos de dicho marco son de altura linealmente decreciente con la finalidad de que el bloque sea una especie de tapón en la abertura de la cámara de combustión, ver Figura 3.8.

**Figura 3.8** “Bloque de probetas, Ligens (2003)”



Fuente: Ligens 2003.

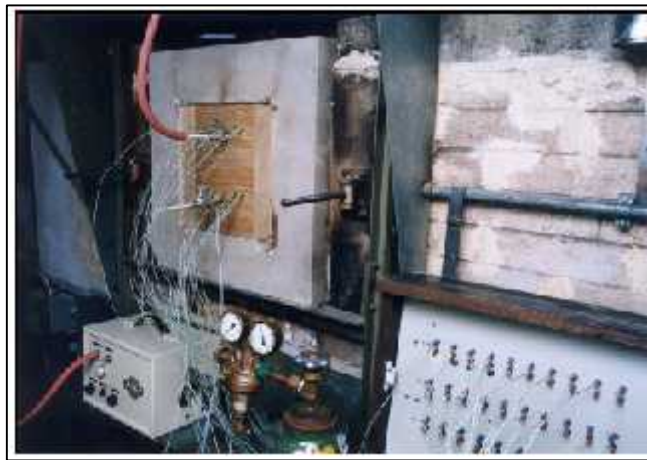
---

<sup>17</sup> LIGENS, Albert. Untersuchung des Abbrandes und der Brandgase ausgewählter Holzarten in Abhängigkeit vom chemischen und strukturellen Holzaufbau. Tesis (Doctorado). Munich, Alemania. Universidad de Munich, 2003.

### 3.1.4.2. *Equipo.*

Para los procedimientos se utiliza una cámara de combustión a escala reducida cuyas especificaciones se encuentran en la norma DIN 4102, Parte 8<sup>18</sup> (Ver punto 6.6). El bloque de prueba se expone unilateralmente al fuego por medio de un quemador Özer. En la siguiente figura se ve el horno con la muestra ya instalada y lista para ensayar.

**Figura 3.9** “Cámara de combustión a escala reducida con bloque de probetas montado, Ligens (2003)”.



Fuente: Ligens 2003.

### 3.1.4.3. *Metodología.*

La curva de temperaturas utilizada es la definida para un incendio estándar en las norma DIN 4102 parte 2 (ISO 834).

Una vez instalado el bloque de prueba, se extraen de forma continua los gases dentro del recinto ya que se busca determinar la composición de los gases de combustión que influyen en la muestra testeada.

Para determinar la tasa de carbonización se recurre a tres métodos, el primero consiste en medirla de forma continua durante el ensayo. Para ello se emplea el procedimiento

---

<sup>18</sup> DIN (Deutsches Institut für Normung) (GERMANY). Fire behaviour of building materials and elements. Part 8: Small-scale test furnace. DIN 1402-8: 2003. 4p.

desarrollado por Lache (1992), el cual consiste en hacer uso de la diferencia de densidades entre la madera y el carbón ( $\rho_{\text{car}} = 0.4\rho_{\text{mad}}$ ) de tal forma que una sonda de barra cerámica con una aguja Wolfram de 60mm de longitud y 1.5mm de espesor atraviese sólo la capa de carbón y no la madera sin carbonizar, al aplicarle una fuerza dada, para esto ver Figura 3.10.

**Figura 3.10** “Principio de la medición continua de la carbonización, Ligens (2003)”



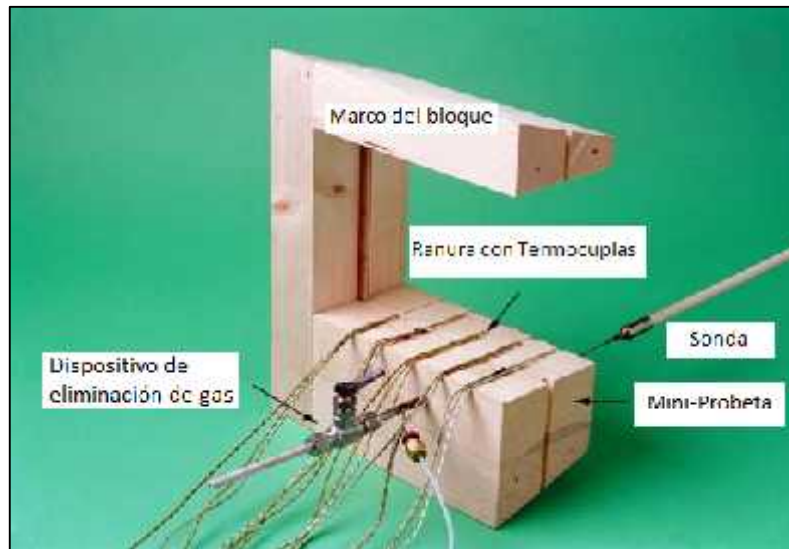
Fuente: Ligens 2003.

El segundo método se realiza con posterioridad al ensayo, y corresponde a la medición de la capa de carbón en distintos puntos de la probeta, y así dividiendo por el tiempo de exposición se obtiene la razón de carbonización promedio en cada pieza.

El tercero y último consiste en medir las temperaturas en el interior de las probetas, para ello se disponen 15 termocuplas tipo K repartidas sobre 5 ranuras en las mini-probetas superior e inferior. Éstas van cada 5mm desde los 5 hasta los 75 mm con respecto a la cara expuesta al fuego (ver Figura 3.11).



**Figura 3.11** “Bloque de probetas con implementos, Ligenis (2003)”.



Fuente: Ligenis 2003.

#### **3.1.4.4. Resultados.**

Para el caso de pino, se tienen velocidades de carbonización para el método continuo y para el posterior al ensayo, si bien se tienen mayores valores para el segundo, esta diferencia es muy pequeña. Se hace la distinción entre los valores obtenidos en las zonas de duramen y albura de las probetas.

Para el caso del duramen, la medición continua arroja datos entre 0.6 y 0.63 [mm/min] y el método posterior a ensayo (área residual) entre 0.68 y 0.73 [mm/min].

La velocidad de carbonización de las otras especies se muestra en las tablas correspondientes de la sección Anexos.

### 3.1.5. Fonseca y Barreira (2009), Portugal<sup>5</sup>.

Esta investigación tiene como finalidad principal el ensayo de elementos de madera conífera, específicamente Pino, y comparar los resultados con el modelamiento mediante el programa de elementos finitos *Ansys*.

#### 3.1.5.1. *Probetas.*

Los elementos corresponden a una especie maderera de pino representativo de Portugal. Las dimensiones son 80mm de ancho, 180mm de alto y 500mm de largo. El número total de muestras asciende a nueve, realizando tres ensayos con tres probetas cada uno.

#### 3.1.5.2. *Equipo.*

Se utiliza un sistema de calentamiento electro-cerámico (Ver Figura 3.12 *Izquierda*) con una unidad de potencia térmica de 70kVA (Figura 3.12 *Derecha*).

**Figura 3.12** “Sistema electro-cerámico de calentamiento (*Izquierda*); Unidad Térmica (*Derecha*), Fonseca y Barreira (2009)”



Fuente: Fonseca y Barreira 2009.

### 3.1.5.3. Metodología.

En el primer, segundo y tercer ensayo se utilizan las probetas T1, T2, T3; T4, T5, T6 y T7, T8, T9 respectivamente. Con el fin de medir la temperatura en función del tiempo dentro de los elementos, se sitúan 5 termocuplas a distancias de 1, 2, 3, 5 y 25 cm de la superficie expuesta al calor (cara superior). Esto ayuda también a determinar el avance de la interfaz carbón/madera, la cual según este trabajo se caracteriza por presentar una temperatura igual a 300°C, como lo indica la norma EN 1995-1-2.

Una vez instalado el sistema electro-cerámico sobre las probetas, estas se aíslan (ver Figura 3.13) y se comienza con la aplicación de calor. En los tres ensayos la curva tiempo-temperatura es la misma respondiendo a un incremento lineal y constante hasta los 800°C en un tiempo cercano a los 60 minutos, como se puede ver en las Figuras 3.16, 3.17 y 3.18.

**Figura 3.13** “Aislamiento de probeta, Fonseca y Barreira (2009)”.



Fuente: Fonseca y Barreira 2009.

En la Figura 3.14 se puede observar cómo es aplicado el calor por medio de las resistencias de cerámica.

**Figura 3.14** “Aplicación de calor a probeta, Fonseca y Barreira (2009)”.

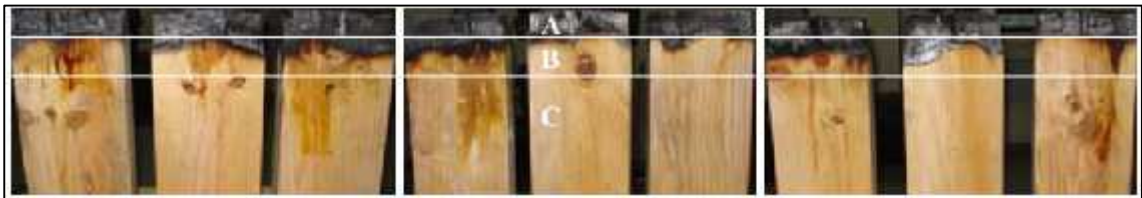


Fuente: Fonseca y Barreira 2009.

#### **3.1.5.4. Resultados.**

En la Figura 3.15 se aprecian los resultados físicos de los tres grupos de probetas, demarcando las zonas A, B y C correspondientes a zona carbonizada, de pirolisis e intacta respectivamente.

**Figura 3.15** “Probetas ensayadas con capas de carbonización, Fonseca y Barreira (2009)”.



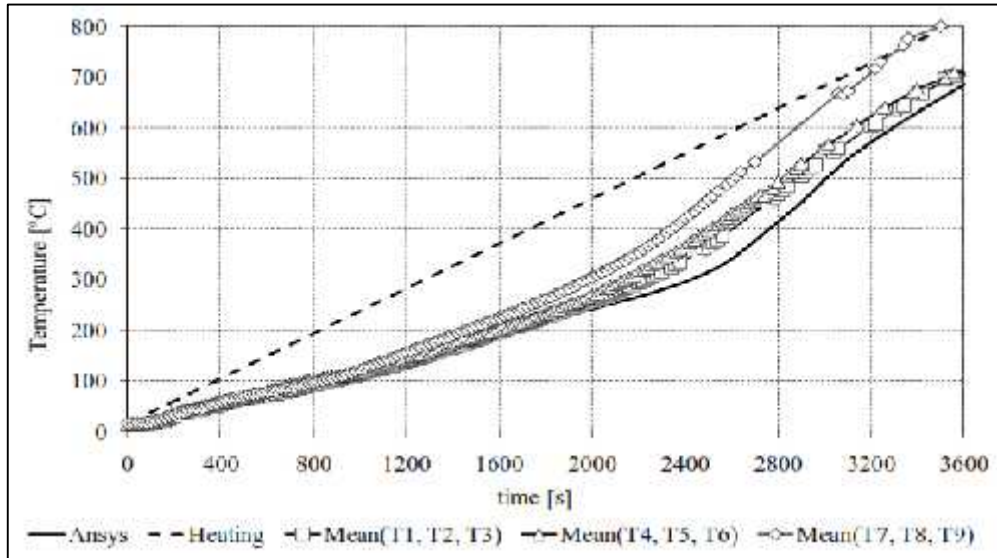
Fuente: Fonseca y Barreira 2009.

Los resultados de este trabajo se presentan en forma de gráficos mostrando las curva tiempo-temperatura que registran las termocuplas en las distintas distancias de la cara expuesta, el análisis con el *software Ansys* y la curva de temperatura aplicada con la unidad de potencia térmica.

En las Figuras siguientes se muestran los gráficos de las temperaturas registradas a 1, 2 y 3 cm de la cara superior (expuesta al calor) respectivamente. Para las termocuplas restantes (a 5 y 25 cm de superficie expuesta) no se generan las curvas ya que en la primera

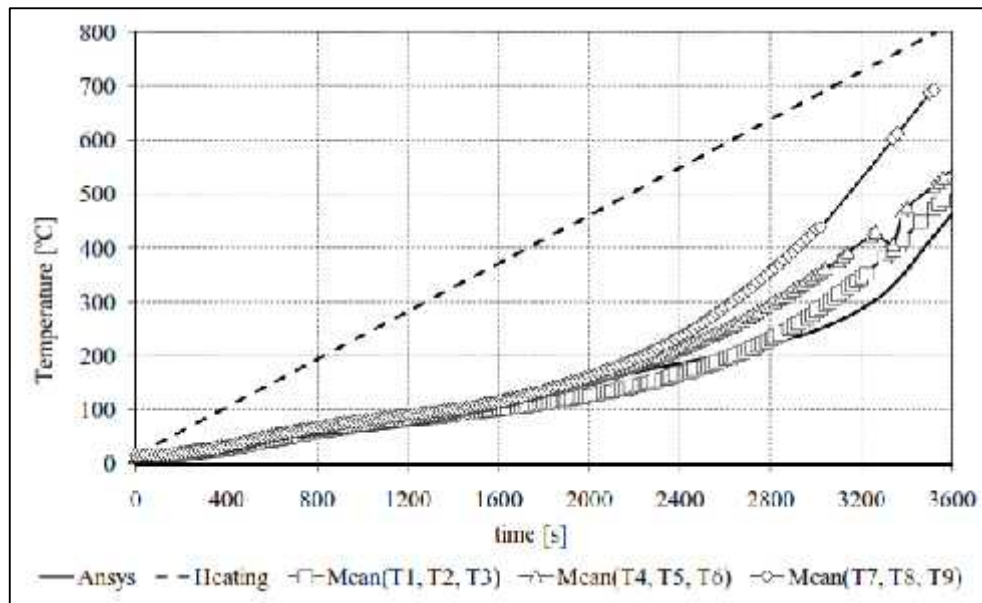
nunca se registran temperaturas sobre los 300°C y en la segunda se mantiene constante en 16°C.

**Figura 3.16** “Temperatura a 1cm de la cara superior, Fonseca y Barreira (2009)”.



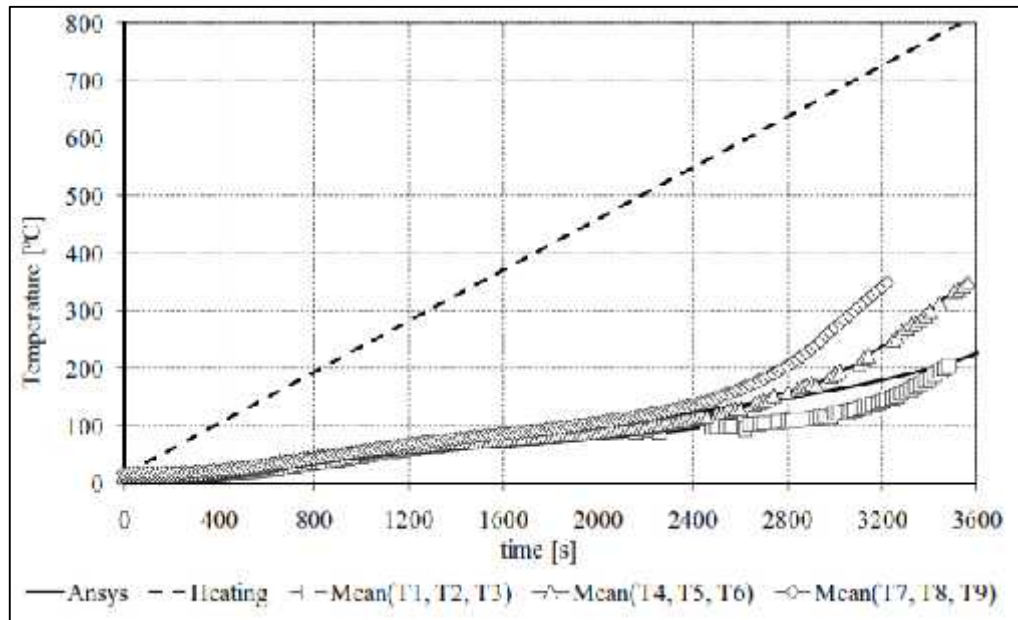
Fuente: Fonseca y Barreira 2009.

**Figura 3.17** “Temperatura a 2cm de la cara superior, Fonseca y Barreira (2009)”.



Fuente: Fonseca y Barreira 2009.

**Figura 3.18** “Temperatura a 3cm de la cara superior, Fonseca y Barreira (2009)”.



Fuente: Fonseca y Barreira 2009.

Considerando, una temperatura de carbonización igual a 300°C como lo hacen los autores, y la información entregada por los gráficos, la velocidad de carbonización está dentro de un rango igual a 0.27-0.6 [mm/min].

Se debe tener en cuenta que la curva de temperatura aplicada no responde a la estándar establecida por la norma internacional ISO 834<sup>19</sup>.

<sup>19</sup> ISO. Fire resistance test- Elements of building construction. ISO 834: 2012.

## 3.2. Antecedentes Nacionales.

### 3.2.1. Ramírez, Alejandro (2001), Chile<sup>6</sup>.

En nuestro país, la resistencia al fuego en el campo de la madera estructural es un punto muy poco investigado. Ramírez (2001) en su trabajo de título estudió el comportamiento de la madera frente al fuego y su protección mediante recubrimientos, ignifugantes y retardadores de inflamación.

#### 3.2.1.1. Probetas.

Las probetas utilizadas en los ensayos, de 50 cm de largo, son de cuatro especies madereras aserradas: Álamo, Pino Radiata, Roble y Coigüe. Las escuadrías son variadas no superando el máximo de 6''x6'' por condición del horno, y se pueden ver en la Tabla 3.3 junto con la densidad aparente y el contenido de humedad.

**Tabla 3.3** “Características de las probetas aserradas ensayadas, Ramírez (2001)”.

Especie Forestal	Sección transversal (mm/mm)	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de humedad (%)
Alamo	97/97 *	403	23
Coigüe	144/144*	850	20
Pino insigne	97/97*	486	20
	89/89*	535	18
	91/91**	565	16
Roble	154/154*	818	24

(\*): Piezas cepilladas; (\*\*) Piezas en bruto

Fuente: Ramírez 2001.

También se ensayaron probetas de madera laminada encolada de pino radiata, con láminas de espesores entre 15 y 30 mm y secciones transversales de 126x126mm; en unas se utilizó como adhesivo Resorcinol y en otras Urea formaldehído. Los datos se pueden ver en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4** “Características probetas de MLE ensayadas, Ramírez (2001)”.

Adhesivo	Sección transversal (mm/mm)	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Contenido de humedad (%)
Resorcinol	126/126	650	17
Urea formaldehído	126/126	650	17

Fuente: Ramírez 2001.

Para el caso de ensayos con protección, a 72 probetas se le aplican productos ignifugantes, a 48 retardantes, 24 se recubren con yeso-cartón y otras 12 con fibrocemento.

### 3.2.1.2. *Equipo.*

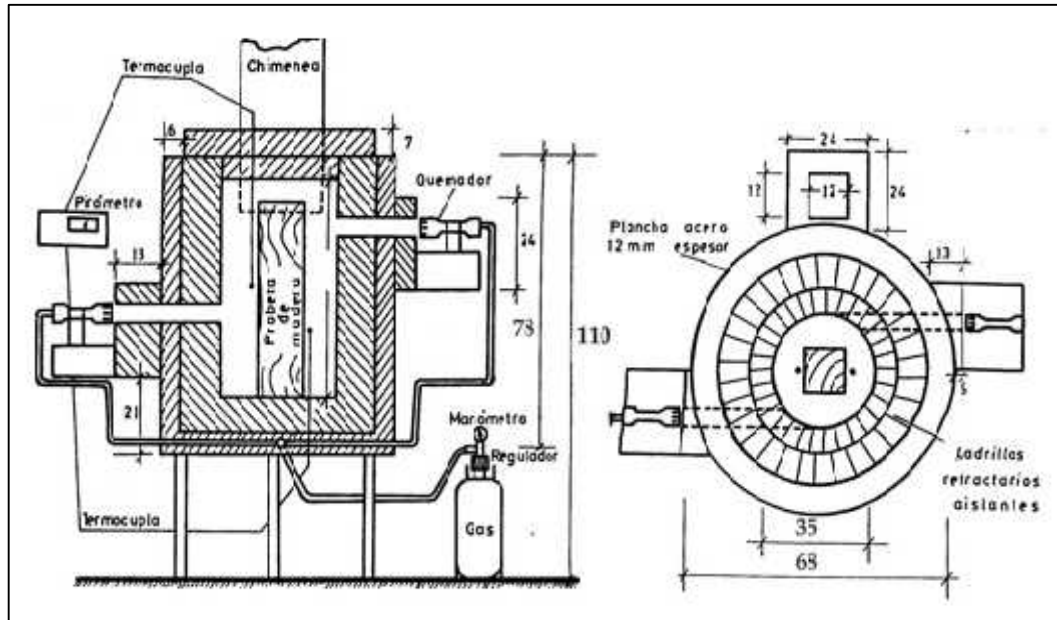
El horno utilizado por Ramírez (2001) es cilíndrico y de tamaño reducido (Figura 3.19), capaz de ensayar probetas de una escuadría máxima de 170x170 mm<sup>2</sup>. Dada su configuración de quemadores, los elementos son expuestos a 4 caras. En la Figura 3.20 se muestra un esquema de dicho equipo.

**Figura 3.19** “Horno cilíndrico IDIEM”





**Figura 3.20** “Esquema horno cilíndrico”



Fuente: Ramírez (2001).

### 3.2.1.3. Metodología.

Los ensayos fueron del tipo interrumpido, en los que a un tiempo “t” se apagan los quemadores, se enfría la probeta, y se mide el área residual. Con la profundidad de carbonización (inicial menos residual) y el tiempo de ensayo se tiene el valor de .

La curva de temperatura utilizada en el procedimiento responde a la de incendio estándar presente en NCh 935/1<sup>1</sup>, equivalente a la definida en la norma internacional ISO 834<sup>19</sup>.

### 3.2.1.4. Resultados.

Las tasas de carbonización promedio, junto con otros datos de interés se muestran en la Tabla 3.5, rescatando la de MLE Pino Radiata que corresponde a 0.83 [mm/min].

**Tabla 3.5** “Cuadro Resumen tasas de carbonización probetas de madera, Ramírez (2001)”

Especie Forestal	Condiciones de ensayo		Coeficiente de contracción volumétrica k	Densidad de referencia dr12 (kg/m3)	Velocidad de carbonización $\beta$ (mm/min)
	Contenido de humedad (%)	Densidad (kg/m3)			
Alamo	23	403	0.40	342	1.08
Pino Insigne	20	486	0.49	420	0.9
Pino insigne	18	535	0.49	466	0.85
Pino insigne	16	565	0.49	496	0.87
MLE (Resorcinol)	17	650	0.49	569	0.89
MLE (Urea)	17	650	0.49	569	0.77
Roble	24	818	0.47	695	0.69
Coigue	20	850	0.45	732	0.71

Fuente: Ramírez (2001).

## CAPÍTULO IV

### PROCEDIMIENTO PLANTEADO.

En los ensayos mostrados en el Capítulo III se ve que en su mayoría se privilegia una lectura de la velocidad de carbonización de forma unidireccional por medio de termocuplas que obtengan el avance en tiempo real de este frente. Se decide por lo tanto plantear un procedimiento que obedezca a esta modalidad adaptándolo a las condiciones que presenta el laboratorio de incendios de IDIEM.

Dado que se resuelve exponer las probetas de madera a altas temperaturas por sólo una cara, se tiene que estas no necesariamente deben ser de grandes dimensiones, lo importante es que puedan alojar de forma consecuente y secuencial el número de termopares necesarios para una medición confiable.

#### 4.1. Equipos e Implementos.

A continuación se mencionan y detallan los implementos necesarios para llevar a cabo de la mejor manera el ensayo propuesto.

##### 4.1.1. Termocuplas.

Una termocupla o termopar es un sensor cuya finalidad es medir temperatura y que consta básicamente de dos hilos metálicos de diferente material. Estos se unen en uno de sus extremos, formando el punto de medición denominado “Junta caliente” y se dejan separados en el otro dando lugar a la “Junta fría”, ver Figura 4.1.

**Figura 4.1** “Esquema Termocupla”



Los cables deben estar unidos sólo en el punto de interés y no en otro sector, sino las lecturas serán erróneas. La medición de temperatura se basa en tres efectos físicos explicados a continuación<sup>20</sup>: Al haber una diferencia de temperatura entre la junta fría y la caliente, se genera una corriente eléctrica producto de que el circuito está conformado por dos elementos distintos (efecto Seebeck), esta corriente al fluir por la unión caliente, hace que en esta se absorba calor y se libere en la junta fría (efecto Pelteir). El gradiente de temperaturas en el conductor metálico genera un gradiente de voltaje (efecto Thomson) que es leído por la tarjeta de adquisición de datos, con magnitudes que dependen de los metales utilizados.

La unión en la junta caliente puede ser soldada o enroscada; en la primera, la lectura se efectúa en el extremo mismo (punto de soldadura), mientras que en la segunda se considera que el dato detectado corresponde al que se lee en el punto medio de la longitud de roscado.

Existen varios tipos de termocuplas denominados por letras, en donde la mayor diferencia entre ellas son los rangos de temperaturas que detectan y soportan. La norma internacional IEC 584-1982 muestra características de estos que se ven en la Tabla 4.1.

Para el caso de ensayos en nuestro país, y acorde a las temperaturas alcanzadas con la curva estandarizada se utilizan las termocuplas tipo K, las que, como se especifica en la Tabla 4.1, están compuestas por un par de alambres Cromel-Alumel, Níquel-cromo (+) el primero y Níquel-Aluminio (-) el segundo. El rango de temperaturas que miden va desde los -200°C hasta los 1200°C. Recomendables para atmósferas oxidantes o inertes, y no lo son para ambientes reductores y sulfurosos.

Dado que la extensión de los cables debe ser de gran longitud para poder conectarse a las tarjetas de adquisición de datos, se emplean cables de extensión compensados que se deben conectar a los extremos libres de la termocupla haciendo coincidir los signos, de lo contrario se tendrán lecturas erróneas de las temperaturas.

---

<sup>20</sup> BORGER, Alexander. Termopares. [en línea].

<<http://www.industriaynegocios.cl/Academicos/AlexanderBorger/Docts%20Docencia/Seminario%20de%20Aut/trabajos/2001/Automatizaci%C3%B3n/termopar.htm>>. [consulta: 19 mayo 2015].

**Tabla 4.1** “Características termopares, norma IEC 584-1982”.

TIPO	TERMOPAR	INTERVALO DE MEDIDA	ERROR MAX. (clase 1)	ERROR MAX. (clase 2)	ERROR MAX. (clase 3)	RANGO DE USO
B	Platino 30% Rodio (+)	600 ... 1700 °C	-----	+ 1,5°C	+ 4 °C	1 370 °C
	Platino 6% Rodio (-)			+ 0,25%	+ 0,5%	
E	Cromel (NiCr) (+)	-40 ... 800 °C	+ 1,5 °C	+ 2,5°C	+ 2,5°C	95 °C
	Constantan (-)		± 0,4 %	± 0,75%	± 0,75%	900 °C
J	Hierro (+)	-40 ... 750 °C	+ 1,5 °C	+ 2,5°C	-----	95 °C
	Constantan (-)		± 0,4 %	± 0,75 %	-----	760 °C
K	Cromel (NiCr) (+)	-40 ... 1.200 °C	+ 1,5 °C	+ 2,5°C	+ 2,5°C	95 °C
	Alumel (Ni) (-)		± 0,4 %	± 0,75 %	± 1,5 %	1.260 °C
R	Platino 13% Rodio (+)	0 ... 1.600 °C	+ 1°C	+ 1,5 °C	-----	870 °C
	Platino (-)			± 0,25 %	-----	1.450 °C
S	Platino 10% Rodio (+)	0 ... 1.600 °C	± 1°C	± 1,5 °C	-----	980 °C
	Platino (-)			± 0,25 %	-----	1.450 °C
T	Cobre (+)	-200 ... 350 °C	± 0,5 °C	± 1 °C	± 1 °C	-200 °C
	Constantan (-)		± 0,4 %	± 0,75 %	± 1,5 %	350 °C

Fuente: GEMISA<sup>21</sup>.

#### 4.1.2. Tarjeta de Adquisición de Datos.

La tarjeta de adquisición de datos es la encargada de traducir la información, en forma de voltaje que entrega la termocupla, a temperaturas en grados Celsius o Fahrenheit. Estas cuentan con canales en los cuales se conectan los cables de extensión compensados provenientes de los termopares para posterior conversión de datos. El Laboratorio de Incendios de IDIEM cuenta con dos tipos de sistemas; uno análogo, en el cual el operario debe ajustar la manilla para ver la temperatura registrada en cada canal y otro automático, el que por medio de un Software computacional se guardan las lecturas de los distintos canales a lo largo del tiempo.

#### 4.1.3. Horno.

El horno debe estar diseñado de acuerdo a la norma NCh 935-1: Of 1997<sup>1</sup> y ser capaz de propiciar las temperaturas y presiones indicadas en el capítulo 6 de la misma, las cuales corresponden a la curva de incendio estándar y  $10 \pm 2$  [Pa] de presión dentro del horno después de los primeros 5 minutos del ensayo.

<sup>21</sup> GEMISA. Sondas de temperatura. [en línea]. <<http://www.guemisa.com/hrtemp/docus/sondas>>. [consulta: 23 abril 2015].

Las dimensiones del equipo deben permitir el alojamiento de las probetas en su totalidad con su adecuada preparación a fin de exponer sólo una de sus caras a las llamas, así como también garantizar que los elementos de medición en las probetas (termocuplas) tengan una salida libre y segura, sin fuga de calor ni gases.

#### **4.1.4. Material aislante.**

Se debe contar con materiales capaces de aislar térmicamente la probeta en distintas zonas. Es de mucho interés que este pueda ser de fácil moldeo dado que el material a ensayar (madera) es por naturaleza irregular y susceptible a cambios físicos como contracción y dilatación, por lo que las juntas siempre tenderán a tener una separación, lo cual dificulta que esta se carbonice unidireccionalmente como se desea en el procedimiento

En el siguiente punto se desglosa el procedimiento propuesto, considerando como ya se ha mencionado, las limitaciones y/o condiciones que presenta el laboratorio de incendios de IDIEM. Posteriormente, con carácter representativo, se efectúa un ensayo siguiendo los pasos sugeridos para obtener una primera impresión de este y analizar si es que los resultados generados justifican el nuevo método planteado.

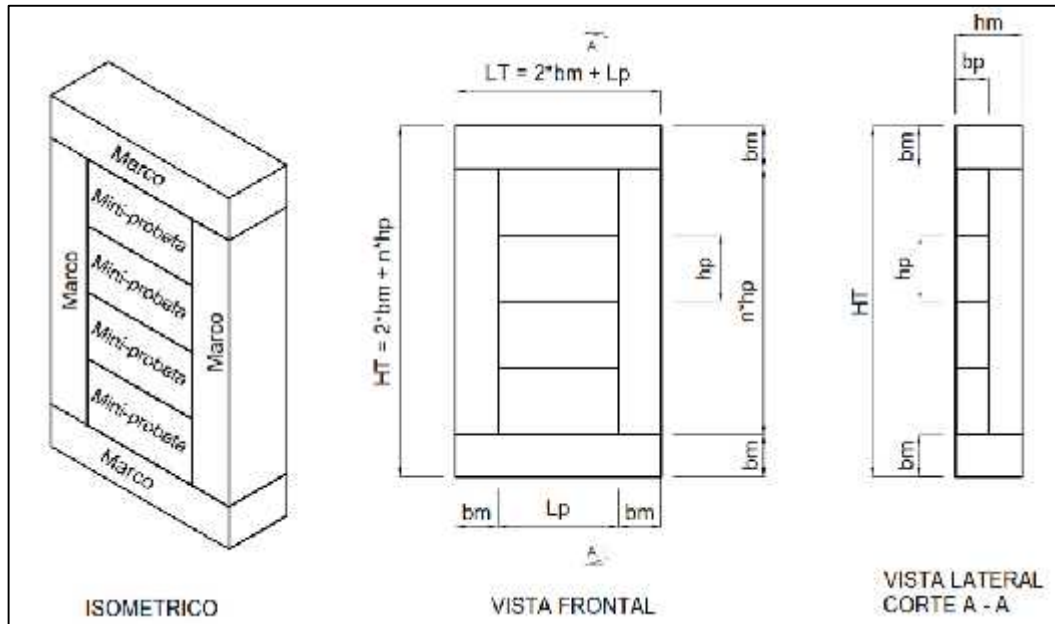
## 4.2. Procedimiento propuesto.

Esta metodología tiene como base el trabajo realizado por Ligens (2003). Se considera que es susceptible a modificaciones siempre y cuando estas no atenten contra el principio fundamental de ensayo, correspondiente a la carbonización unilateral de la madera.

### 4.2.1. Probetas de procedimiento propuesto.

Las probetas de ensayo se conforman por tres o más mini-probetas insertas dentro de un marco de sacrificio del mismo material, el que debe cumplir la finalidad de impedir la exposición al calor en los cantos de estas. Se debe garantizar también que las probetas individuales queden aisladas en su cara trasera, para ello se debe emplear el método más conveniente según las condiciones de la prueba. En la siguiente figura se muestra un esquema de probeta tipo junto con la nomenclatura de dimensiones de la misma.

Figura 4.2 “Esquema Probeta compuestas”

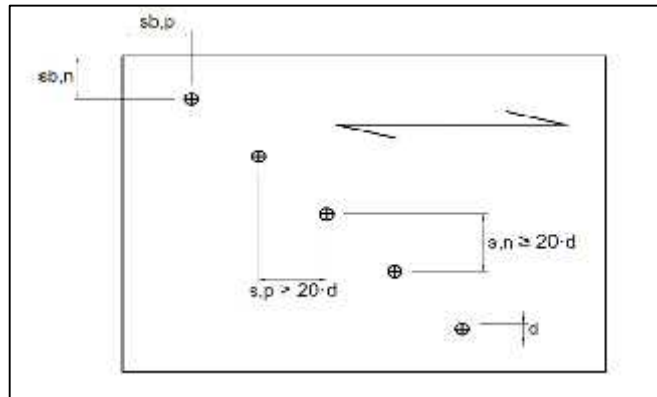


#### 4.2.1.1. Dimensiones.

Las dimensiones de la probeta y de sus elementos en particular dependen de dos factores: el número de termocupas por unidad o mini-probeta y la duración del ensayo. La cantidad de termopares impone el alto ( $h_p$ ) y largo ( $L_p$ ) mínimo de las unidades, mientras que el tiempo de ensayo restringe los anchos de los marcos ( $b_m$ ) y mini-probetas ( $b_p$ ).

En el plano de la cara expuesta, la distancia entre termocupas debe ser al menos veinte veces su diámetro ( $20d$ ), tanto en el sentido paralelo a la fibra  $s_p$  como en el perpendicular  $s_n$ . Esto garantiza que ante una exposición de calor no deseada, la conductividad térmica de los metales que las componen no influya en la carbonización y lecturas de las adyacentes. Ver Figura 4.3.

**Figura 4.3** “Separaciones entre termocupas y bordes”.



Considerando que se puede producir redondeo de arista producto de un aislamiento deficiente de los cantos de las probetas unitarias, se impone que la distancia entre un termopar y cualquier borde ( $s_{b,n}$  o  $s_{b,p}$ ), no debe ser menor al radio de redondeo por carbonización con el cual se modela dicho evento según la norma EN 1995-1-2, 2004<sup>9</sup>. El valor de  $r$  se define como:

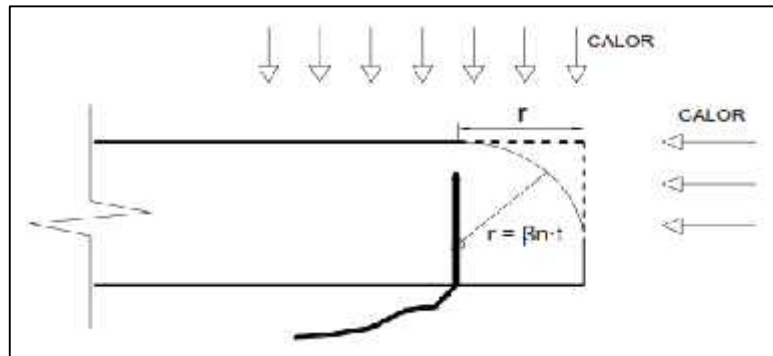
$$r = \beta_n \cdot t \quad (4.1)$$

Se debe recalcar que en la ecuación (4.1) se utiliza  $\beta_n$  y no  $\beta_0$  como lo estipula el eurocódigo anterior, para adoptar un valor más conservador de la velocidad de carbonización



Aquí “t” corresponde al tiempo de duración del ensayo y “n” la velocidad de carbonización nominal, cuyos valores se muestran en la Tabla 2.1 del presente documento y que tiene como fuente el eurocódigo mencionado anteriormente. La Figura 4.4 muestra lo ya señalado.

**Figura 4.4** “Distancia mínima entre termocupla y borde”.



El ancho mínimo de los elementos se calcula de acuerdo al tiempo durante el cual se expondrá la probeta a las altas temperaturas. De forma análoga a la ecuación (4.1), se tiene que el ancho mínimo de procedimiento se obtiene de la siguiente fórmula:

$$b_m = \alpha \cdot \beta_n \cdot t \quad (4.2)$$

Dónde:

- $b_{min}$  : Ancho mínimo del elemento para procedimiento, en mm.
- $\alpha$  : Factor de ajuste.
- $\beta_n$  : Tasa de carbonización nominal según Tabla 2.1 (EN 1995-1-2<sup>9</sup>), en mm/seg.
- $t$  : Tiempo de duración del ensayo.

El factor de ajuste “ $\alpha$ ” es una constante que se inventa para que de cierta manera se asegure la existencia de un ancho o espesor residual después del ensayo y poder medir su dimensión, su valor es igual a 2 en marcos y 1.5 en el caso de mini-probetas.

Utilizando la ecuación (4.2) y considerando que el material corresponde a Madera Laminada Encolada de Pino Radiata con densidad característica superior a 290 [kg/m<sup>3</sup>], se tiene que los anchos mínimos para las probetas unitarias y marcos, en función del tiempo de exposición, son los que se presentan en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2** “Anchos mínimos de acuerdo a tiempo de exposición”.

Elemento	Unidad	Marco
$\alpha =$	1.5	2
<b>t</b> [min]	<b>bp min</b> [mm]	<b>bm min</b> [mm]
15	16	21
30	32	42
45	47	63
60	63	84
120	126	168
180	189	252

Finalmente, la altura de marco ( $h_m$ ) o espesor de probeta compuesta, depende de la aislación trasera que se le aplique a esta. Las condiciones que se deben respetar son:

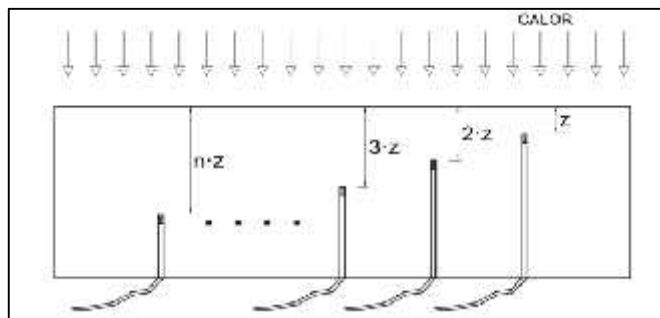
- $h_m \geq h_p$
- Garantizar que las termocupas no queden expuestas al calor de manera perjudicial para su funcionamiento.

#### **4.2.1.2. Implementación.**

Como ya se indicó, las probetas se implementan con termocupas que tienen la función de entregar el desarrollo de temperaturas dentro de estas. La cantidad mínima de termopares asciende a 4 por cada unidad, con el fin de disponer de una cantidad de datos suficientes para obtener valores representativos de la razón de carbonización.

Los pares de alambres se insertan por la cara trasera (contraria a la que recibe calor) separados según lo indicado en el punto 4.2.1.1. Las juntas calientes, o puntas de medición se sitúan a cierta distancia de la superficie afecta a carbonización, las que deben ser contantemente crecientes por cada termocupla y estar representadas por múltiplos de una distancia  $z$ , como muestra la Figura 4.5.

**Figura 4.5** “Profundidades de puntos de medición”.



El valor de  $z$  no debe ser inferior a 5 [mm], a menos que se asegure una perforación de profundidad con precisión de 1 [mm]. Los agujeros deben ser de diámetro lo más ajustado posible al espesor de la termocupla y se debe asegurar que la junta caliente esté en contacto con el fondo del orificio.

Para el caso de probetas de MLE, si una termocupla coincide o está cercano a un plano de encolado, se debe tomar en cuenta este hecho, dado que la velocidad de carbonización en estas singularidades es mayor.

#### **4.2.1.3. Ensamblaje.**

Los elementos constituyentes de las probetas se deben ensamblar de tal forma que se cumplan las siguientes condiciones:

1. Mantener la configuración de la probeta durante todo el ensayo.
2. Anular o minimizar lo más posible el flujo de calor en los planos de unión entre elementos.
3. La utilización de elementos de unión no debe afectar en las lecturas de los termopares, ya sea por obstáculo o carbonización en otra dirección no deseada.

Para el punto 3, si el ensamblaje contempla medios de unión de acero u otro metal, como clavos, pernos o tornillos, se debe garantizar que la carbonización producto de su conductividad térmica no se sobreponga a la de la dirección principal de avance. Para ello, al igual que en los puntos anteriores, se toma en consideración lo estipulado por el Eurocódigo EN 1995-1-2, Capítulo 6, referente a resistencia al fuego de conexiones en madera. Según la ecuación (6.2) de dicho documento, se determina que la profundidad de carbonización producto del flujo en un elemento de acero equivale a lo estipulado en la fórmula (4.3).

$$d_{c,M} = \beta_n \cdot k_f \cdot t \quad (4.3)$$

En dónde:

- $d_{c,MU}$  : Profundidad de carbonización producto del flujo en un medio de unión.
- $\beta_n$  : Velocidad de carbonización nominal según Tabla 2.1 (EN 1995-1-2<sup>9</sup>).
- $k_{flujo}$  : Coeficiente de aumento de flujo de calor a través del elemento de fijación.
- $t$  : Tiempo de exposición.

La distancia entre el eje de una termocupla y cualquier punto del medio de unión debe ser mayor al valor determinado por la ecuación (4.3). El coeficiente  $k_{flujo}$  tiene un valor igual a 1.5.

#### **4.2.1.4. Medición de propiedades significativas.**

Para el presente procedimiento, se medirán dos propiedades del material, el contenido de humedad y la densidad. Para ello se debe contar con muestras idénticas a las utilizadas en las probetas y que hayan sido expuestas a las mismas condiciones.

Se recomienda que las probetas unitarias se fabriquen con un ancho igual al doble del que se señala en el punto 4.2.1.1. De esta forma, cortándolas por la mitad se tienen dos muestras con propiedades idénticas, siendo utilizadas en la probeta de ensayo y para mediciones respectivamente.

En este punto, cuando se hable de probetas o muestras será referenciado a las utilizadas para mediciones de humedad y densidad.

Las propiedades mencionadas se deben determinar mediante las normas NCh 176/1 Of. 2009<sup>22</sup> y NCh 176/2 Of 1986<sup>23</sup>.

#### **I. Medición del contenido de humedad.**

Para la determinación de la humedad existen tres métodos, los cuales se explican brevemente a continuación:

<sup>22</sup> INN (CHILE). Madera. Determinación de la humedad. NCh 176-1. Of.2009. 12p.

<sup>23</sup> INN (CHILE). Madera. Determinación de la densidad. NCh 176-2. Of.1986. Mod. 1988. 12p.

- a) **Método de secado en Estufa:** Aplicable a maderas con cualquier contenido de humedad, se basa en la cuantificación de pérdida de masa de agua a medida que la probeta se somete a temperaturas controladas de secado igual a  $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  y hasta llegar a un valor constante (masa anhidra). La precisión de la masa debe ser del orden de 0.1 [g]. El contenido de humedad se calcula por medio de la ecuación (2.6) del capítulo II, se promedian los valores de las distintas probetas y se obtiene un contenido de humedad medio.
  
- b) **Método de destilación:** También aplicable a maderas con cualquier contenido de humedad y también cualquier contenido de sustancias volátiles. Se basa en la remoción del agua contenida en la probeta por medio de un solvente, la cal, por medio de la condensación se acumula en una trampa de agua y permite la medición de su volumen.
  
- c) **Método del Xilohigrómetro:** Se puede utilizar en madera con contenido de humedad en el rango 7-28%, se basa en la relación que existe entre las propiedades eléctricas del material y el contenido de agua. Apto para determinaciones de humedad en terreno.

## II. Medición de la Densidad.

Para determinar esta propiedad se necesita básicamente el volumen de la muestra y la masa de la misma, ambos con el contenido de humedad respectivo al tipo de densidad buscado.

Brevemente, se debe determinar el peso de la probeta con una precisión de 0.01 [g], al contenido de humedad H determinado según el punto anterior. Secar la muestra hasta una masa constante con la misma precisión de 0.01 [g], correspondiente al estado anhidro, y obtener su masa y volumen. Con estos valores obtener mediante las ecuaciones (2.7), (2.8) y (2.9) la densidad buscada.

## **4.2.2. Metodología de procedimiento propuesto.**

### **4.2.2.1. Ubicación y Colocación de la Probeta.**

La probeta compuesta, debe ubicarse en una zona donde exista la mayor uniformidad de temperatura en cada instante.

La colocación de la probeta dentro del horno se debe hacer de tal forma que sólo la cara delantera de las mini-probetas quede expuesta al fuego. Se debe garantizar que la cara trasera, que es por donde se insertan las termocuplas, quede completamente aislada de las altas temperaturas. Se recomiendan dos maneras de hacer lo anteriormente descrito.

1. Posicionar la probeta con su cara trasera contra el muro-tapa del horno o contra el suelo y sellar las aberturas con algún material aislante. Las termocuplas deben quedar expuestas lo menos posible a las altas temperaturas, aun cuando estas estén recubiertos de fábrica con materiales propicios para la resistencia al fuego; deben salir hacia el exterior del equipo de forma segura, impidiendo fuga considerable de calor y gases.
2. Realizar un orificio rectangular en el muro-tapa, de tamaño ligeramente mayor a la probeta compuesta para situarla en él y exponer la cara deseada a las altas temperaturas. Se deben sellar los espacios alrededor de la probeta para fijarla y evitar el flujo de calor y gas desde el interior del horno hacia el exterior.

### **4.2.2.2. Exposición de temperaturas.**

La probeta debe ser expuesta a una curva tiempo-temperatura estándar según el punto 6.1 de la norma NCh 935-1 Of. 1997<sup>1</sup>, que se explica en el Capítulo II, punto 2.4 del presente trabajo.

El tiempo de exposición depende del mandante y de la clasificación que se estima o busca de la estructura constituida por la madera ensayada. Ver punto 2.1 del Capítulo II.

#### **4.2.2.3. *Lectura de datos.***

La lectura de datos se hace a través de la medición de temperatura que hacen las termocuplas en tiempo real. Si la máquina de adquisición de datos es análoga como la que se muestra en la Figura 5.2 (Izquierda), se deben registrar los tiempos en el momento justo en que estás marquen temperaturas igual a 300°C y 288°C según Hadvig (1981)<sup>8</sup> y Schaffer (1984)<sup>7</sup> respectivamente, las que se consideran asociadas al frente de carbonización.

Para el caso de tarjetas de adquisición digitales se deben guardar los registros de cada termopar con el software correspondiente. La discretización del tiempo en los registros debe ser de un segundo o un minuto como máximo.

#### **4.2.2.4. *Finalización del ensayo.***

Una vez transcurrido el tiempo determinado para el ensayo, se debe apagar el horno y sacar de forma expedita y segura el muro de cierre. Esto ya que probablemente la probeta seguirá quemándose producto de las aún altas temperaturas y la ignición producida en la misma; por lo que se debe enfriar de la forma más rápida posible para no tener grandes diferencias en los resultados de los distintos métodos de medición.

La(s) probeta o probetas unitaria(s) residual (es) (sin raspar la capa de carbón aún adherida) deben ser almacenadas en un ambiente seco y en el que no se vea expuesta a altas temperaturas, con el fin de realizar las mediciones posteriores sin mayores cambios en las propiedades al final del ensayo.

### **4.2.3. Obtención de resultados aplicando el procedimiento propuesto.**

Los resultados se obtendrán a partir de dos métodos distintos. A continuación se detallan las dos modalidades.

#### ***4.2.3.1. Método de regresión lineal.***

Se utilizan las lecturas de temperatura y tiempo obtenidas por medio de los termopares insertos en las probetas.

Se obtienen los tiempos en que cada termocupla alcanza lecturas de temperatura igual a 288°C y 300°C, previa identificación de la probeta al que pertenecía y la profundidad con respecto a la superficie expuesta.

Para cada mini-probeta, y de forma separada para las dos temperaturas de carbonización, se grafican los pares ordenados (tiempo, profundidad) y se aplica un modelo de regresión lineal en ellos. La pendiente de la recta generada corresponde a la tasa de carbonización de la muestra asociada a una de las temperaturas. Se deben descartar los puntos que se encuentren lejanos a la curva de tendencia, a menos que se tenga certeza total de que el dato en cuestión no haya tenido problemas de implementación o que provenga de una termocupla situada en un plano de encolado.

La velocidad de carbonización de cada probeta unitaria se calcula como el promedio de las pendientes entre ambas curvas (288 y 300°C).

Finalmente, la velocidad de carbonización de la probeta general corresponde al promedio entre las de cada probeta unitaria.

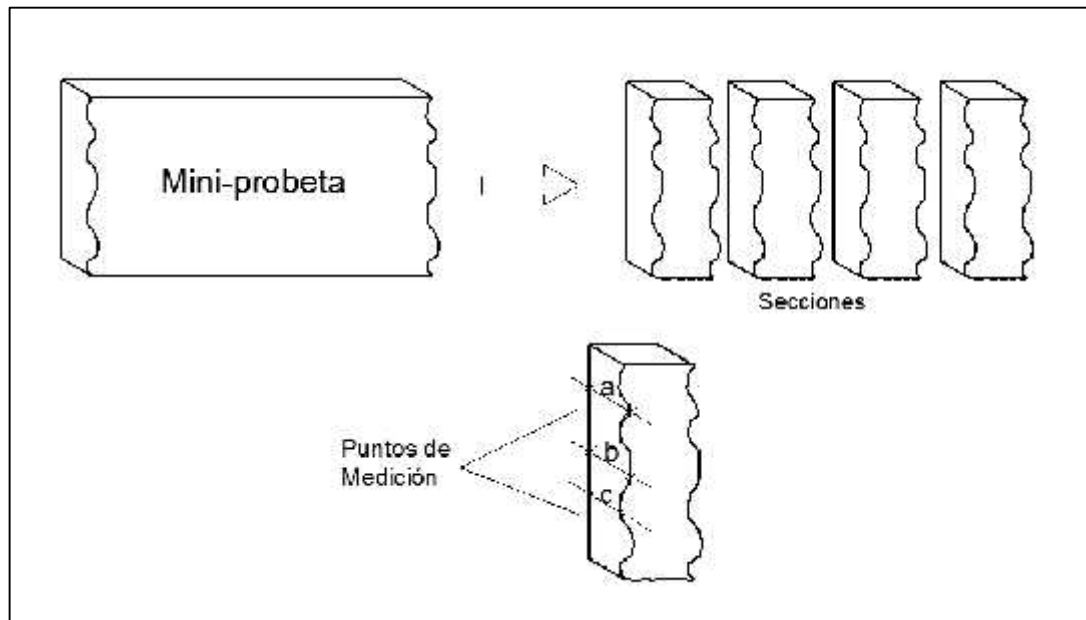


#### 4.2.3.2. Método de medición de ancho residual.

Luego de finalizado el ensayo y después de un tiempo razonable para que las probetas post-ensayo se encuentren secas, se comienza con el retiro de la capa de carbón raspándola con alguna herramienta de acero hasta que se evidencie el inicio de la madera normal o no quemada obteniendo así las muestras residuales.

Se cortan las probetas residuales en franjas de 3 a 4 centímetros de ancho y se prosigue con la medición del espesor de cada uno. Esta acción se debe hacer en al menos 3 puntos de cada franja para luego obtener un promedio del espesor residual de cada mini-probeta. Ver Figura 4.6.

**Figura 4.6** “Método ancho residual”



La velocidad de carbonización de cada elemento se calcula por medio de la razón entre el espesor carbonizado (inicial menos residual) y el tiempo de ensayo. Si es posible de determinar o estimar, al tiempo de ensayo agregar lo que demora en apagarse completamente la muestra desde que finaliza la prueba.

Al igual que en el método anterior, la tasa de carbonización total de la probeta compuesta se determina mediante el promedio entre los valores individuales de las muestras que la conforman.

Cabe mencionar que este segundo método es sólo de referencia, pero cuyo resultado no debiese estar muy lejano al determinado con el punto anterior.

#### **4.2.4. Aclaraciones.**

A continuación se enumeran aclaraciones referentes al procedimiento redactado con anterioridad.

1. Se escoge un procedimiento similar al ejecutado por Lagens (2003) ya que se busca que el avance del frente de carbonización sea una medición en tiempo real del proceso y porque dicho trabajo es el que maneja y controla de mejor manera las variables influyentes.
2. Las probetas compuestas deben estar constituidas por al menos 3 unidades de ensayo, ya que se considera una cantidad aceptable para garantizar que al menos una de ellas no presente algún error significativo. Punto aparte es que una mayor cantidad de probetas unitarias implica una menor dispersión en los datos finales.
3. En la ecuación (4.2) el factor de ajuste  $\alpha$  toma los valores 2.0 y 1.5 para que abarque velocidades de carbonización mayores a las entregadas en la Tabla 2.4. Según antecedentes vistos, la tasa de carbonización de este tipo de material toma valores desde los 0.5 hasta los 1.1 [mm/min], y es por ello que el factor  $\alpha$  es agregado a la ecuación. El valor asignado a elementos de marco es mayor para garantizar que el flujo de calor no exponga de forma libre el canto de las probetas unitarias.
4. El número mínimo de termocuplas asciende a 4 con el propósito de disponer de datos suficientes como para generar una regresión lineal lo más representativa posible. Si bien esta se puede realizar con tres datos, el cuarto es el salvaguarda por si alguno falla o se presentan lecturas erróneas.
5. La lectura de datos por medio de las termocuplas se hace considerando los tiempos en detectar temperaturas de 288°C y 300°C. Se establece que se registren los tiempos para ambas, con el fin de tener una muestra más grande de datos (pendientes). El otro motivo es el de compararlas dado que no debiesen diferir en gran proporción.

6. En probetas de MLE, si una termocupla coincide o está situada cerca de un plano de encolado, no se deben prescindir de los datos entregados por ella, por muy distantes que se muestren de la curva de tendencia, ya que es esperable que presente una velocidad de carbonización mayor en comparación al resto de la muestra y se debe considerar producto de que es una condición propia de este tipo de material.

## CAPÍTULO V

### REALIZACIÓN DE ENSAYOS

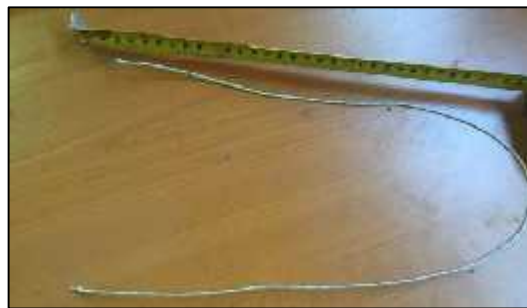
Sobre la base del procedimiento descrito en el capítulo anterior se realiza una prueba de carácter demostrativo que consiste en efectuar un ensayo con dos probetas compuestas posicionadas en localidades distintas dentro del horno. Siguiendo el formato del procedimiento propuesto se detalla lo efectuado en cada punto de este.

#### 5.1. Equipos e implementos utilizados.

##### 5.1.1. Termopares utilizados en ensayo.

Las termocuplas empleadas para la medición de las temperaturas dentro de las piezas de madera son del tipo K (cromel-alumen), de diámetro 0.5 [mm] y longitud 70 [cm], suficiente para que puedan salir por debajo de la puerta de horno y conectarse a los cables de extensión compensados. Cabe mencionar que se utilizan termopares soldados y roscados en la junta caliente o punto de medición. En la Figura 5.1 se observa uno de los termopares usados. Estos implementos son adquiridos a la empresa Senyter.

**Figura 5.1.** “Termocupla utilizada en ensayo”.



##### 5.1.2. Tarjetas de adquisición utilizadas en ensayo.

Producto de la cantidad de termocuplas utilizadas en el ensayo, y por ende, de canales necesarios para la conversión de datos, es que se obtienen las lecturas a través de los dos sistemas de adquisición con que cuenta el laboratorio: el análogo y el computacional. Cada uno encargado de leer el desarrollo de temperaturas en una de las probetas (compuestas).

La Figura 5.2 muestra ambas tarjetas de adquisición, a la izquierda la análoga y a la derecha la automática.

**Figura 5.2** “Sistemas de adquisición de datos”.



### 5.1.3. Horno utilizado en ensayo.

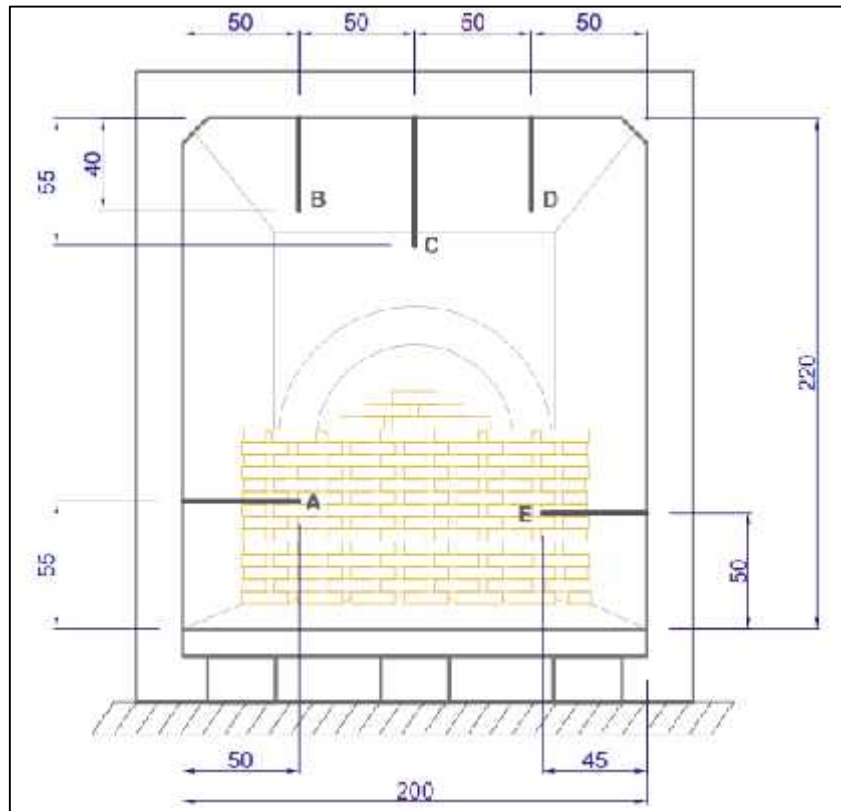
El equipo en el que se ensayan las probetas corresponde al horno vertical del laboratorio de IDIEM mostrado en la Figura 5.3, cuyas dimensiones corresponden a 2.00m x 2.20m x 0.80m de ancho, alto y profundidad respectivamente. Está confeccionado con elementos de hormigón armado y recubierto por fuera con planchas de acero. Posee un revestimiento de manta cerámica de espesor 15 [cm] en sus 5 caras internas. La zona de ensayo está separada del único quemador a gas por medio de un malla de ladrillos refractarios, cuya finalidad es que los elementos ensayados no reciban la llama directa de la fuente de calor.

**Figura 5.3** “Horno vertical laboratorio de incendios IDIEM”.



La temperatura inducida en el horno se mide a través de 5 termocuplas tipo k dispuestas dentro de él; una en cada costado y tres en la parte superior. La verificación de que el desarrollo de temperaturas sigue la curva de incendio estándar se hace con el promedio de las lecturas entregadas por estas. En la figura siguiente se identifican los termopares del horno y se detallan las cotas de los puntos en los cuales miden, distancias en milímetros.

**Figura 5.4** “Sistema de medición de temperaturas dentro del horno y medidas”



Se cuenta con un muro de hormigón armado de espesor igual a 15 [cm] que cumple la función de tapan la cara libre del horno y sellarlo durante el procedimiento.

#### **5.1.4. Materiales aislantes utilizados.**

En el ensayo se utilizan dos materiales aislantes.

Para cubrir los espacios entre los elementos de la probeta se utiliza Masilla Refractaria 1500°C ceys® que soporta temperaturas de hasta 1100°C en sellados de juntas o fisuras y 1500°C en puntas y fuego directo. Este producto se utiliza también para la fijación de las termocuplas dentro de los orificios en la madera y sellarlos, valiéndose de su alta adherencia en este material.

Con la finalidad de aislar térmicamente la cara trasera de la probeta, se utiliza manta de fibra cerámica, cerciorándose de que quede bien posicionada en las zonas donde se requiere.

#### **5.2. Procedimiento realizado.**

##### **5.2.1. Probetas de ensayo realizado.**

Los elementos a ensayar (PC1, PC2, PC3 y PC4) están constituidos por cuatro probetas unitarias de madera lamina enmarcadas en elementos del mismo material. Las láminas, de pino radiata y espesor de 40[mm] están unidas o encoladas con adhesivo urea-formaldehído. En la siguiente figura se muestra una imagen de las cuatro probetas utilizadas.

**Figura 5.5** “Probetas compuestas utilizadas en ensayo”



En cada ensayo, se introducen dos probetas compuestas y dos probetas macizas de madera laminada de la misma procedencia (PM1, PM2, PM3 y PM4) las que quedarán expuestas al fuego por sus cuatro caras. Sus dimensiones son de 135 x 200 x 400 mm de ancho, alto y largo respectivamente.

### 5.2.1.1. Dimensiones e implementación de probetas ensayadas.

En los procedimientos llevados a cabo, se utilizan cinco termocuplas por muestra unitaria a profundidades de 7 [mm] entre cada una desde la superficie expuesta. Para las probetas compuestas PC2 y PC3 se emplean termopares enroscados en la punta de medición, y soldados para PC1 y PC4.

Como se ve en el capítulo IV, algunas dimensiones dependen fuertemente del tiempo de duración del ensayo que en este caso es de 50 minutos. Otro valor importante corresponde a la velocidad de carbonización nominal según el Eurocódigo EN 1995-1-2<sup>9</sup> ( $\beta_n$ ), que para el caso de la madera constituyente de las probetas, MLE pino radiata, corresponde a 0.7 [mm/min] (ver Tabla 2.4).

A continuación, y en referencia a la nomenclatura mostrada en las Figuras 4.2 y 4.3, se enumeran las dimensiones significativas de las probetas compuestas (PC), unitarias (PU) y marcos (MA).

Distancias de termocuplas:

- $s_p = 20 [m] > 20 \cdot d = 10 [m] \quad \text{OK}$
- $s_n = 10 [m] = 20 \cdot d = 10 [m] \quad \text{OK}$
- $s_{d,p} = 60 [m] > r = \beta_n \cdot t = 35 [m] \quad \text{OK}$
- $s_{d,n} = 35 [m] = r = \beta_n \cdot t = 35 [m] \quad \text{OK}$

Dimensiones de probetas:

- Altura PU:  $h_p = 2 \cdot s_{d,n} + 4 \cdot s_n = 110 [m]$
- Largo PU:  $L_p = 2 \cdot s_{d,p} + 4 \cdot s_p = 200 [m]$
- Espesor PU:  $b_p = 55 [m] > b_{m,p} = \alpha_p \cdot \beta_n \cdot t = 53 [m] \quad \text{OK}$
- Altura MA:  $h_m = 110 [m] > b_p = 55 [m] \quad \text{OK}$
- Espesor MA:  $b_m = 70 [m] = b_{m,m} = \alpha_m \cdot \beta_n \cdot t = 70 [m] \quad \text{OK}$
- Altura PC:  $H_T = 2 \cdot b_m + 4 \cdot h_p = 580 [m]$
- Largo PC:  $L_T = 2 \cdot b_m + L_p = 340 [m]$
- Espesor PC:  $B_T = h_m = 110 [m]$

Como se ve en la lista anterior, se satisface la totalidad de las condiciones impuestas en el capítulo IV.



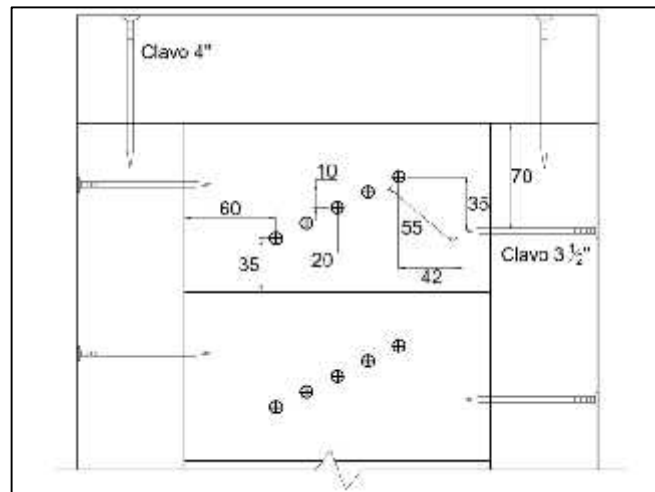
### 5.2.1.2. Ensamblaje de probetas en ensayo realizado.

Los elementos de las probetas compuestas se unen mediante clavos como lo muestra la Figura 5.6. El marco de sacrificio se ensambla con clavos de 4'' de forma que quede lo más rígido posible. Las probetas unitarias se afirman al marco sólo con dos clavos de 3 1/2'', uno en cada costado. Esto sólo con el fin de sostenerlas ya que se debe tener cuidado con la distancia al punto de medición de la termocupla más cercana.

La distancia mínima (D) entre el medio de unión y el eje del termopar más próximo es de 55 [mm], mayor a la crítica según la fórmula (4.3). Ver Figura 5.6.

$$D = 55 [m] > d_{c,M} = \beta_n \cdot k_f \cdot t = 0.7 \cdot 1.5 \cdot 50 = 53 [m] \quad \text{OK}$$

**Figura 5.6** “Esquema Ensamblaje de probetas compuestas”.



### 5.2.1.3. Densidad y humedad de probetas en ensayo realizado.

Las probetas son almacenadas en las dependencias del laboratorio de incendio de IDIEM, bajo techo, durante 3 semanas antes de realizar los ensayos. Con las mitades restantes de cada mini-probeta se efectúan las mediciones de humedad y densidad, siguiendo los principios de los procedimientos normativos de NCh 176 parte 1 y 2 respectivamente. Cabe destacar que las mediciones se realizan antes de ensamblar sus pares correspondientes en las probetas compuestas.

### a) Contenido de Humedad

Se utiliza el principio de secado en estufa para determinar las masas  $m_H$  y  $m_0$  (a humedad H y anhidra) junto con la fórmula (2.6) mostrada en el capítulo II. Las mediciones se realizan en 4 sectores distintos de cada muestra empleando un pie de metro. En las tablas a continuación se muestran los valores promedio de masas y contenidos de humedad calculados para las probetas compuestas y macizas.

**Tabla 5.1** “Masa y contenido de humedad de probetas compuestas”

Probeta Compuesta	Probeta Unitaria	Masa [gr]		Contenido de Humedad
		Húmeda	Anhidra	
PC1	P11	551.22	497.73	9.7%
	P12	503.84	464.76	7.8%
	P13	471.49	415.68	11.8%
	P14	532.09	453.75	14.7%
PC2	P21	518.51	448.48	13.5%
	P22	479.00	424.05	11.5%
	P23	498.94	432.64	13.3%
	P24	533.79	459.54	13.9%
PC3	P31	527.94	475.70	9.9%
	P32	469.92	419.50	10.7%
	P33	464.05	413.30	10.9%
	P34	519.28	463.74	10.7%
PC4	P41	534.92	472.02	11.8%
	P42	526.08	472.06	10.3%
	P43	530.09	476.12	10.2%
	P44	547.93	488.35	10.9%

**Tabla 5.2** “Masa y contenido de humedad de probetas macizas”

Probeta Maciza	Masa [gr]		Contenido de Humedad
	Húmeda	Anhidra	
PM1	4250.55	3710.73	12.7%
PM2	4623.47	4013.17	13.2%
PM3	4807.23	4182.36	13.0%
PM4	4768.79	4134.67	13.3%

Las mediciones específicas se muestran en tablas en la sección anexos A.3.1.

**b) Densidad.**

En Anexos A.3.2 se presentan las tablas de mediciones para determinar las dimensiones de las probetas en estado de equilibrio higroscópico y anhidrido para las distintas muestras compuestas y macizas ensayadas. En las Tablas 5.3 y 5.4 mostradas a continuación se presentan la densidad referencial, nominal y anhidra, junto con masa y volumen, para las maderas de las probetas utilizadas.

**Tabla 5.3 “Densidades de probetas compuestas”**

Probeta Compuesta	Probeta Unitaria	Masa [gr]		Volumen [cm3]		Densidad [gr/cm3]		
		Húmeda	Anhidra	Húmedo	Anhidro	Refer.	Nominal	Anhidra
PC1	P11	551.22	497.73	1229.06	1206.52	0.448	0.405	0.413
	P12	503.84	464.76	1220.32	1196.49	0.413	0.381	0.388
	P13	471.49	415.68	1228.99	1212.62	0.384	0.338	0.343
	P14	532.09	453.75	1229.01	1213.28	0.433	0.369	0.374
PC2	P21	518.51	448.48	1264.77	1243.96	0.410	0.355	0.361
	P22	479.00	424.05	1253.45	1237.61	0.382	0.338	0.343
	P23	498.94	432.64	1244.33	1216.40	0.401	0.348	0.356
	P24	533.79	459.54	1233.76	1215.29	0.433	0.372	0.378
PC3	P31	527.94	475.70	1225.16	1202.63	0.431	0.388	0.396
	P32	469.92	419.50	1254.90	1230.63	0.374	0.334	0.341
	P33	464.05	413.30	1237.44	1220.93	0.375	0.334	0.339
	P34	519.28	463.74	1262.71	1246.80	0.411	0.367	0.372
PC4	P41	534.92	472.02	1225.08	1204.63	0.437	0.385	0.392
	P42	526.08	472.06	1231.87	1216.15	0.427	0.383	0.388
	P43	530.09	476.12	1233.20	1205.53	0.430	0.386	0.395
	P44	547.93	488.35	1246.82	1228.06	0.439	0.392	0.398

**Tabla 5.4 “Densidades de probetas macizas”**

Probeta Maciza	Masa [gr]		Volumen [cm3]		Densidad [gr/cm3]		
	Húmeda	Anhidra	Húmedo	Anhidro	Refer.	Nominal	Anhidra
PM1	4250.55	3710.73	10875.40	10768.07	0.391	0.341	0.345
PM2	4623.47	4013.17	10974.42	10849.43	0.421	0.366	0.370
PM3	4807.23	4182.36	10925.73	10817.83	0.440	0.383	0.387
PM4	4768.79	4134.67	10894.66	10770.21	0.438	0.380	0.384

A modo de resumir los valores mostrados en las tablas anteriores se presentan las siguientes con los valores de densidad y contenido de humedad por muestra analizada.

**Tabla 5.5** “Cuadro resumen densidad y humedad probetas compuestas”

Probeta Compuesta	Probeta Unitaria	Densidad [gr/cm <sup>3</sup> ]			Contenido de Humedad
		Refer.	Nominal	Anhidra	
PC1	P11	0.448	0.405	0.413	9.7%
	P12	0.413	0.381	0.388	7.8%
	P13	0.384	0.338	0.343	11.8%
	P14	0.433	0.369	0.374	14.7%
PC2	P21	0.410	0.355	0.361	13.5%
	P22	0.382	0.338	0.343	11.5%
	P23	0.401	0.348	0.356	13.3%
	P24	0.433	0.372	0.378	13.9%
PC3	P31	0.431	0.388	0.396	9.9%
	P32	0.374	0.334	0.341	10.7%
	P33	0.375	0.334	0.339	10.9%
	P34	0.411	0.367	0.372	10.7%
PC4	P41	0.437	0.385	0.392	11.8%
	P42	0.427	0.383	0.388	10.3%
	P43	0.430	0.386	0.395	10.2%
	P44	0.439	0.392	0.398	10.9%

**Tabla 5.6** “Cuadro resumen densidad y humedad probetas macizas”

Probeta Maciza	Densidad [gr/cm <sup>3</sup> ]			Contenido de Humedad
	Refer.	Nominal	Anhidra	
PM1	0.391	0.341	0.345	12.7%
PM2	0.421	0.366	0.370	13.2%
PM3	0.440	0.383	0.387	13.0%
PM4	0.438	0.380	0.384	13.3%

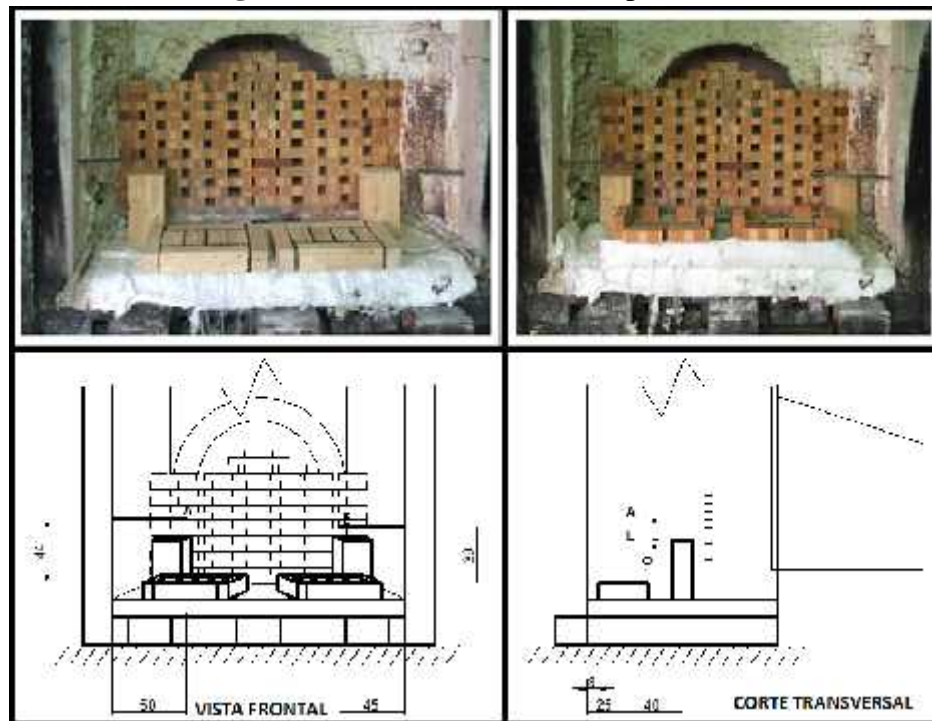
## 5.2.2. Metodología utilizada en ensayo.

### 5.2.2.1. Ubicación de las probetas en el ensayo.

En cada ensayo, se posicionan dentro el horno dos juegos de probetas, formado cada uno de una compuesta y otra maciza. Un juego (PM y PC) se ubica bajo la termocupla A y el otro bajo la termocupla E, según la identificación de termopares como se muestra en la Figura 5.4. Específicamente, en el ensayo N°1, las probetas PC3 y PM3 se ubican bajo el punto A y PC4 con PM4 bajo el punto E. Para el segundo procedimiento, se ubican PC2 y PM2 bajo la termocupla denominada A, y PC1 con PM1 bajo E.

Las probetas compuestas se disponen con su cara trasera contra la superficie inferior del horno, sobre una manta de fibra cerámica (Figura 5.7 – superior izquierda). Para garantizar que las caras posteriores de las probetas no se expongan a las altas temperaturas, se ponen ladrillos refractarios sobre los marcos de las probetas, para así hacer presión sobre la manta. La cual también se emplea para proteger los cables de las termocuplas (Figura 5.7 – superior derecha). Las posiciones finales de las probetas en el horno se esquematizan en la Figura 5.7 – Parte Inferior.

**Figura 5.7** “Posicionamiento de probetas”

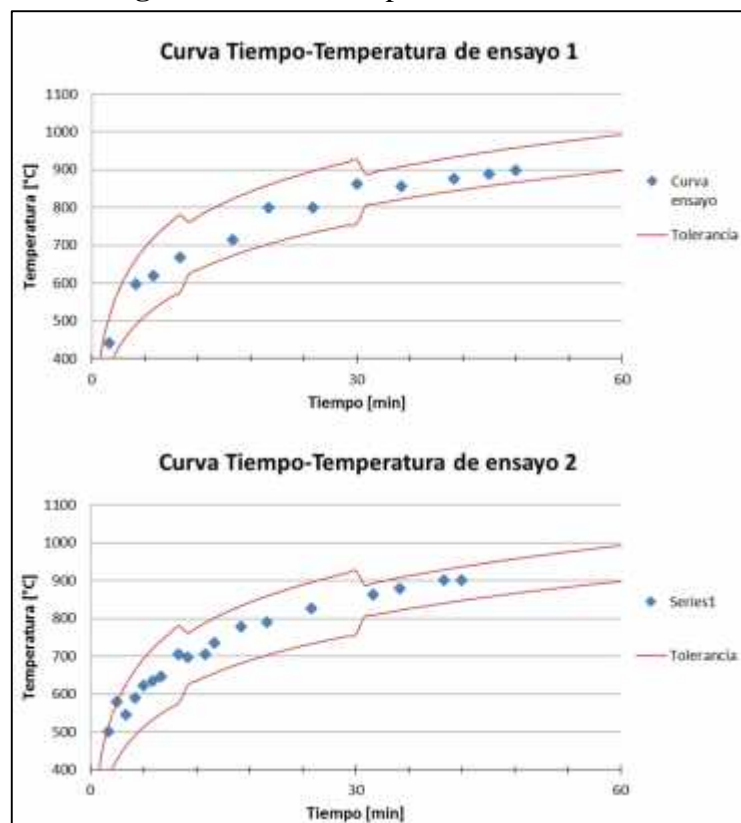


Las probetas macizas se posicionan libres, para que queden expuestas al calor por sus cuatro caras, al estilo de una columna.

#### 5.2.2.2. *Exposición de temperaturas en ensayo.*

Las probetas se exponen a una curva tiempo-temperatura de incendio estándar durante un período de 50 y 42 minutos respectivamente. El desarrollo de las curvas reales se encuentra dentro de la zona de tolerancia aceptada por la norma chilena NCh 935/1. Ver la Figura 5.8 donde se muestra la gráfica de lo ensayado en ambas ocasiones.

**Figura 5.8** “Curva experimental de horno”



### 5.2.2.3. *Lectura de datos de ensayo.*

En el primer ensayo, las termocuplas de la probeta PC3 están conectadas a la tarjeta de adquisición de datos digital, mientras que PC4 está vinculada al sistema de medición análogo. Para el caso del ensayo número 2, PC1 se lee con la tarjeta digital y PC2 con el sistema análogo.

Las termocuplas empleadas con cada sistema de medición se alternan como se explica en la tabla siguiente. La finalidad de esto último es para verificar si existe una variación entre ambas modalidades.

**Tabla 5.7** “Sistemas de medición en probetas compuestas”

Ensayo	Probeta	Adquisición	Termocupla
1	PC3	Digital	Enroscadas
	PC4	Análoga	Soldadas
2	PC1	Digital	Soldadas
	PC2	Análoga	Enroscadas

### 5.2.2.4. *Finalización del ensayo realizado.*

Tras terminar de inyectar gas al horno y finalizar la combustión de él, se retira el muro de hormigón. Se evidencia la presencia de llama en las probetas que se extinguen con agua durante un periodo de tiempo prolongado para enfriarlas. Con el fin de garantizar la correcta utilización de los datos obtenidos, se verifica que la fijación de las termocuplas en las probetas unitarias esté en buen estado y sellada como en un inicio. Las mediciones de profundidades de carbonización previo raspado de capa quemada se efectúa después de 3 días de realizado el ensayo.

### **5.2.3. Resultados de ensayo realizado.**

En primera instancia se muestran los resultados del ensayo 1, las probetas compuestas PC3 y PC4 para los métodos descritos en el punto 4.2.3, el de regresión lineal y ancho residual; para posteriormente exponer las dimensiones post carbonización de las muestras macizas. Se realiza lo mismo para el caso del segundo ensayo.

#### **5.2.3.1. Resultados de Probetas Compuestas.**

##### **a) Método de Regresión Lineal.**

Para el caso de la probeta PC3, en la que las temperaturas se registran computacionalmente en intervalos de un segundo, por medio de termocuplas enroscadas en la punta de medición, se tienen lecturas no siempre continuamente crecientes. Se discreta el registro a intervalos de 6 segundos (0.1 minuto) calculando los promedios de las temperaturas de cada uno de ellos y obteniendo mediante interpolación el tiempo en detectar una temperatura de 300°C, correspondiente al frente de carbonización. Los valores en tiempos re-discretizados se encuentran en la Tabla A.3.10 en la sección Anexos A.3. En el mismo capítulo se pueden encontrar los gráficos de las curvas de temperaturas registradas en los distintos canales – termocuplas. De forma gráfica y con la tabla recientemente mencionada, se estima el tiempo correspondiente a la intersección entre la curva de tendencia de temperaturas captadas por cada termocupla y la ordenada de los 300°C.

En la probeta PC1, cuya tarjeta de adquisición de datos es también la digital se tienen las mismas oscilaciones que en PC3, aun cuando el sistema de termocupla es distinto (soldadas).

Para la medición de las probetas PC4 y PC2, con el sistema análogo, se registraron durante el ensayo los tiempos en que cada termocupla alcanzaba temperaturas de 288°C y 300°C.

En las Tablas 5.8 y 5.9 se identifican los tiempos que los termopares registran las temperaturas descritas con anterioridad, con la respectiva distancia a la superficie expuesta y el canal correspondiente.



**Tabla 5.8** “Registro de tiempos de carbonización en probeta PC3”

Probeta	Probeta Unitaria	Canal	Profundidad [mm]	Tiempo en alcanzar 300 [°C]	
				[min]	
PC3	P31	1	7	15.2	
		5	14	20.1	
		9	21	23.4	
		13	28	25.9	
		17	35	30.9	
	P32	2	7	14.4	
		6	14	20.9	
		10	21	22.9	
		14	28	24.0	
		18	35	24.8	
	P33	3	7	-	
		7	14	20.8	
		11	21	24.8	
		15	28	27.3	
		19	35	29.9	
	P34	4	7	11.5	
		8	14	18.9	
		12	21	22.5	
		16	28	23.7	
		20	35	24.6	

El símbolo ‘-’ representa una lectura fallida del termopar.

No se realiza un análisis para PC1 dado que se observa que la tarjeta de adquisición de datos presenta fallas.

**Tabla 5.9** “Registro de tiempos de carbonización en probeta PC4”

Probeta	Probeta Unitaria	Canal	Profundidad [mm]	Tiempo en alcanzar [min]	
				288 [°C]	300 [°C]
PC4	P41	1	7	14.9	15.3
		5	14	21.3	21.7
		9	21	32.0	32.4
		13	28	41.2	41.7
		17	35	46.0	46.5
	P42	2	7	10.8	11.7
		6	14	19.0	19.3
		14	21	28.3	28.9
		10	28	32.1	32.5
		18	35	34.5	34.9
	P43	3	7	10.8	11.2
		7	14	16.7	17.0
		12	21	26.1	27.0
		15	28	-	-
		19	35	38.5	39.7
	P44	4	7	11.6	12.1
		8	14	21.1	21.6
		11	21	30.2	30.7
		16	28	36.9	37.4
		20	35	39.6	40.1

El símbolo ‘-’ representa una lectura fallida del termopar.

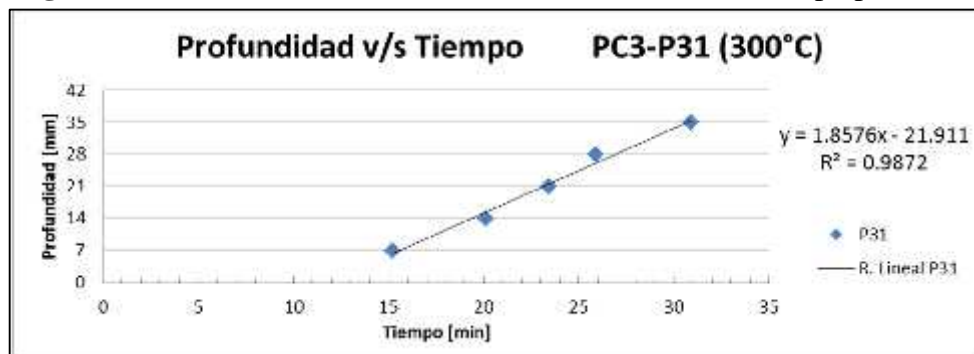
**Tabla 5.10** “Registro de tiempos de carbonización en probeta PC2”

Probeta	Probeta Unitaria	Canal	Profundidad [mm]	Tiempo en alcanzar [min]	
				288 [°C]	300 [°C]
PC2	P21	21	7	14.4	15.1
		25	14	22.8	23.1
		29	21	29.7	30.0
		33	28	35.3	35.6
		37	35	37.0	37.2
	P22	22	7	15.1	15.5
		26	14	20.4	20.9
		30	21	26.8	27.2
		34	28	30.3	30.7
		38	35	31.0	32.0
	P23	23	7	14.8	15.4
		27	14	20.4	20.7
		31	21	-	-
		35	28	34.5	35.0
		39	35	38.1	38.3
	P24	24	7	16.4	16.8
		28	14	21.7	22.0
		32	21	32.3	32.6
		36	28	36.8	37.2
		40	35	-	38.7

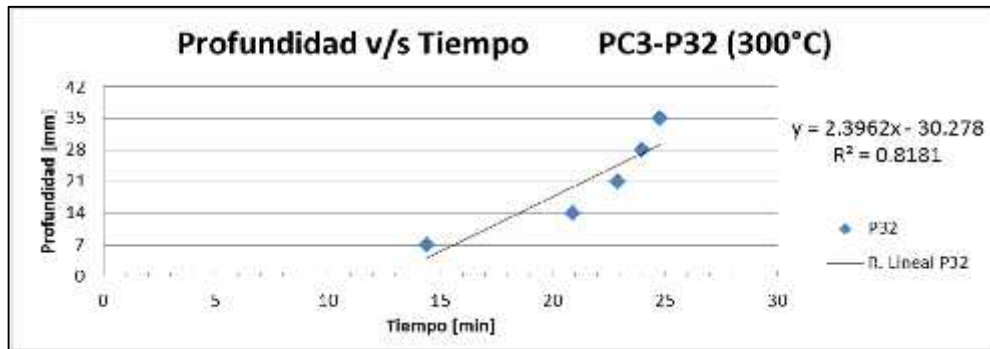
El símbolo ‘-’ representa una lectura fallida del termopar.

Se realiza una regresión lineal con las lecturas de los termopares por cada probeta unitaria. Se muestran a continuación los gráficos y líneas de tendencia para las muestras unitarias de la probeta compuesta PC3.

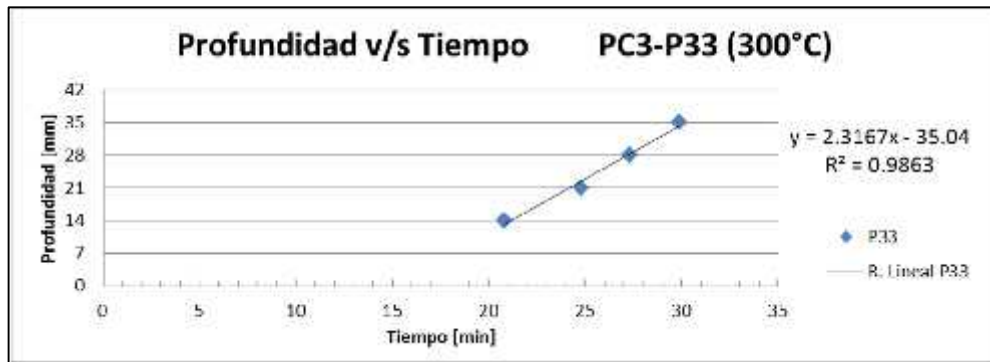
**Figura 5.9** “Profundidad de carbonización en función del tiempo para P31”



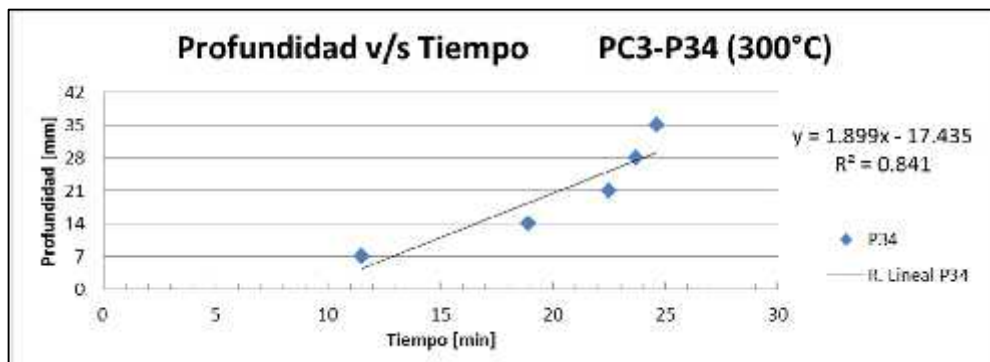
**Figura 5.10** “Profundidad de carbonización en función del tiempo para P32”



**Figura 5.11** “Profundidad de carbonización en función del tiempo para P33”

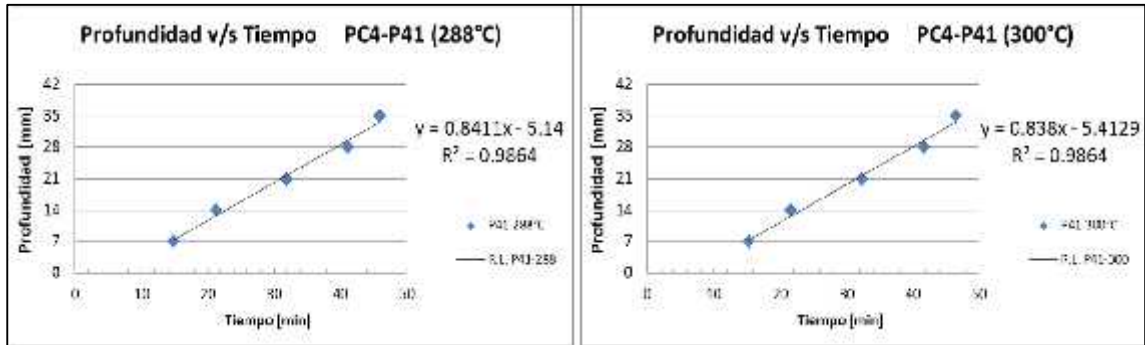


**Figura 5.12** “Profundidad de carbonización en función del tiempo para P34”

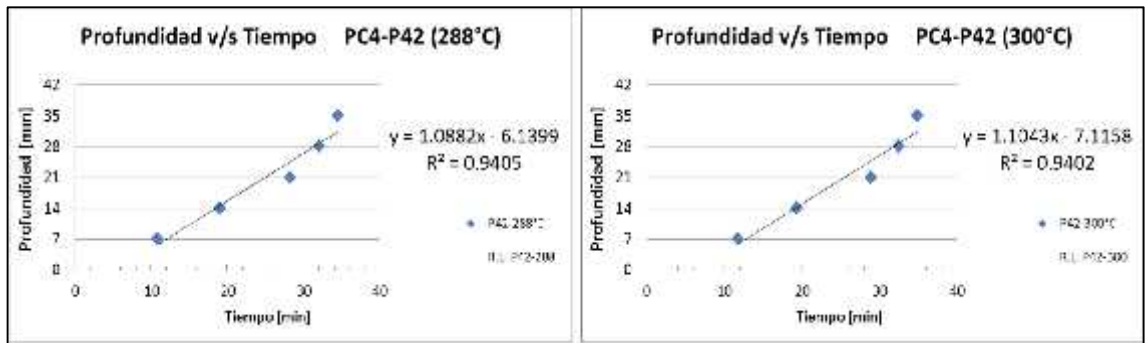


Las figuras 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16 muestran las gráficas y líneas de tendencia para las muestras unitarias de la probeta compuesta PC4, considerando temperaturas en la interfaz madera/carbón de 288°C y 300°C.

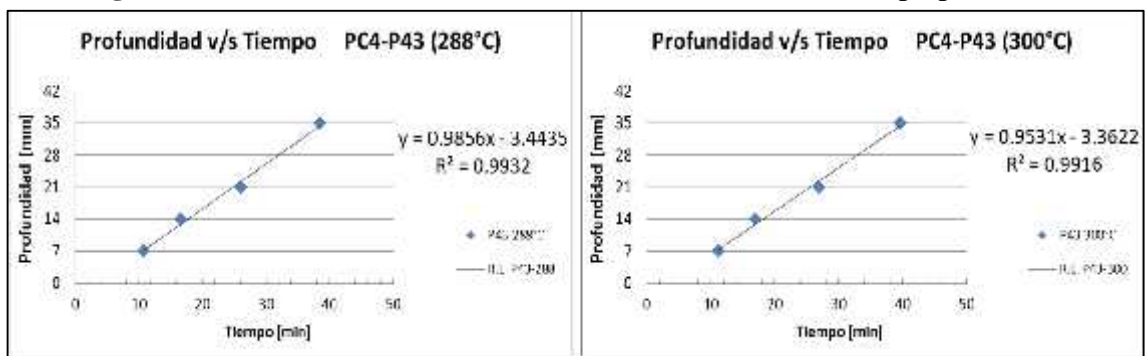
**Figura 5.13** “Profundidad de carbonización en función del tiempo para P41”



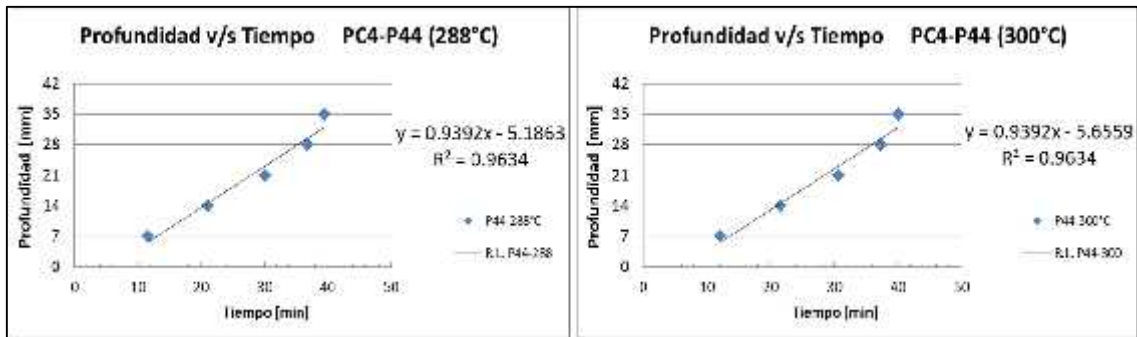
**Figura 5.14** “Profundidad de carbonización en función del tiempo para P42”



**Figura 5.15** “Profundidad de carbonización en función del tiempo para P43”

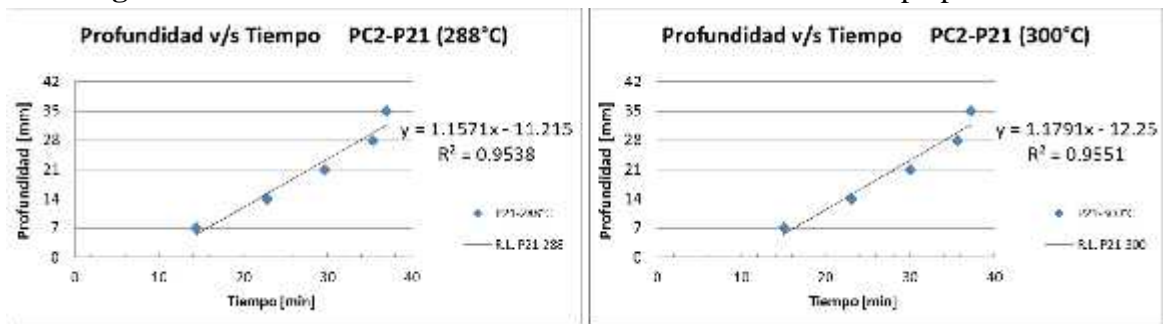


**Figura 5.16** “Profundidad de carbonización en función del tiempo para P44”

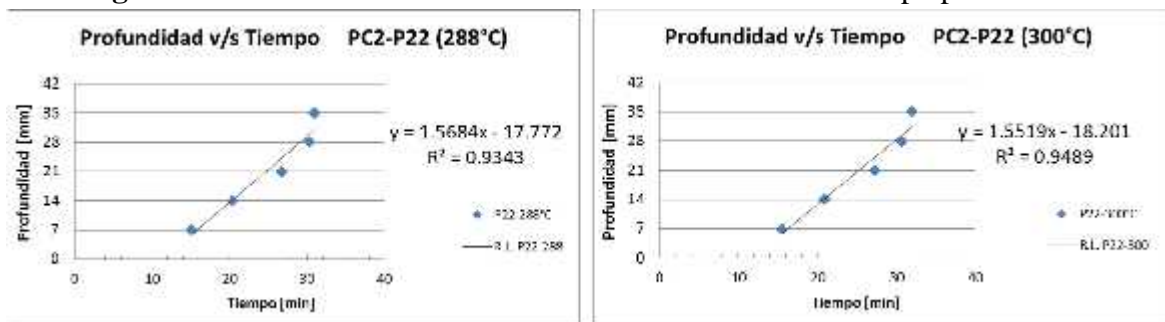


Las figuras siguientes muestran las gráficas y líneas de tendencia para las muestras unitarias de la probeta compuesta PC2 del ensayo número 2, considerando temperaturas en la interfaz madera/carbón de 288°C y 300°C al igual que en el caso anterior.

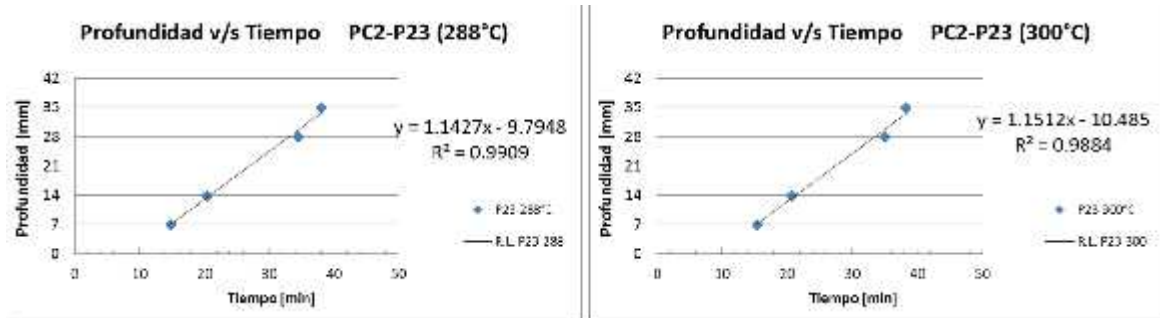
**Figura 5.17** “Profundidad de carbonización en función del tiempo para P21”



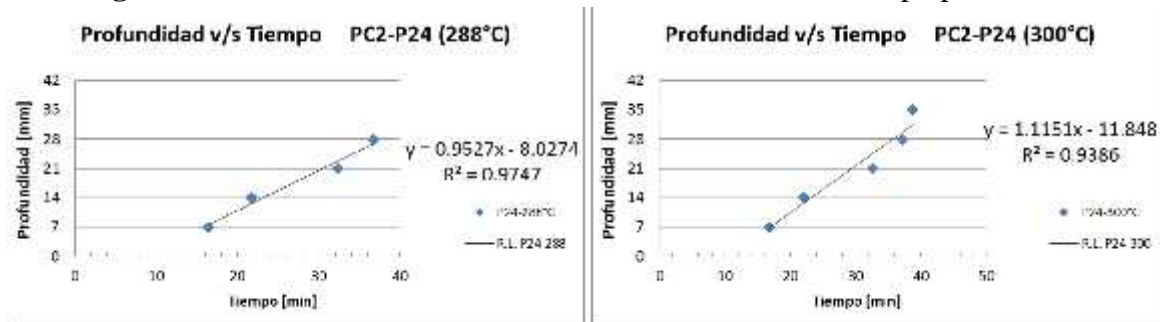
**Figura 5.18** “Profundidad de carbonización en función del tiempo para P22”



**Figura 5.19** “Profundidad de carbonización en función del tiempo para P23”



**Figura 5.20** “Profundidad de carbonización en función del tiempo para P24”



Dado que la pendiente de la recta del modelamiento lineal corresponde a la velocidad de carbonización ( $\beta_i$ ), es que se tienen las tasas para cada probeta en la Tabla 5.11.

**Tabla 5.11** “Velocidad de carbonización ( $\beta_i$ ) de cada probeta unitaria M.R. Lineal”

Probeta	Probeta Unitaria	$\beta_i$ [mm/min]
PC1	P11	-
	P12	-
	P13	-
	P14	-
PC2	P21	1.17
	P22	1.56
	P23	1.15
	P24	1.04
PC3	P31	1.86
	P32	2.40
	P33	2.32
	P34	1.90
PC4	P41	0.84
	P42	1.10
	P43	0.95
	P44	0.94

En el caso de la probeta PC4 y PC2, el valor de  $c$  asignado a cada unidad corresponde al promedio entre las pendientes de las rectas de 288°C y 300°C modeladas.

En la Tabla 5.12 se observa la velocidad de carbonización promedio ( ) y la desviación estándar ( ) de cada probeta compuesta.

**Tabla 5.12** “Tasa de carbonización promedio de probetas compuestas M.R. Lineal”

<b>Probeta</b>	<b><math>\beta</math> [mm/min]</b>	<b><math>\sigma</math> [mm/min]</b>
PC2	1.230	0.197
PC3	2.118	0.241
PC4	0.959	0.095

#### **b) Método de Ancho Residual.**

Posterior al secado de las probetas apagadas con agua y el raspado de la capa de carbón adherida, se tienen las secciones residuales de las mini-probetas de PC3 y PC4 del primer ensayo como se ve en las Figuras 5.21 y 5.22 (Vista frontal).

**Figura 5.21** “Secciones residuales de probeta PC3”



**Figura 5.22** “Secciones residuales de probeta PC4”



En las Figuras 5.23 y 5.24 se muestran las secciones residuales, aún con la capa de carbón de las probetas PC1 y PC2 del ensayo 2.

**Figura 5.23** “Secciones residuales de probeta PC1”





**Figura 5.24** “Secciones residuales de probeta PC2”



Las muestras se seccionan en franjas de 3-4 [cm] de ancho y se mide el espesor de cada una en tres puntos distintos, se debe evitar medir cerca de los bordes por el efecto redondeo de aristas. Los valores de las medidas tomadas se encuentran en las tablas A.3.21 a la A.3.24 para las probetas compuestas.

En la tabla que se muestra a continuación se presenta los espesores residuales promedios por probeta unitaria y por probeta compuesta total.

**Tabla 5.13** “Profundidades residuales promedio de probetas compuestas”

Probeta	Probeta Unitaria	er PU [mm]	er PC [mm]	$\sigma$ [mm]
PC1	P31	14.2	13.3	3.2
	P32	13.4		
	P33	11.4		
	P34	14.3		
PC2	P41	16.1	16.7	4.7
	P42	14.4		
	P43	16.1		
	P44	20.0		
PC3	P31	13.1	12.7	2.4
	P32	13.2		
	P33	12.9		
	P34	11.7		
PC4	P41	15.1	13.0	3.0
	P42	14.0		
	P43	11.3		
	P44	11.6		

El primer ensayo realizado tiene una duración de 50 [min], estimando que el tiempo que demora en apagar la probeta y enfriarla es de 10 [min], por lo que obtenemos un período total de ensayo igual a 60 [min]. El segundo ensayo dura 43 [min] y estimando el mismo tiempo de demora en enfriar completamente las muestras tenemos un tiempo total de 53 [min] La tasa de carbonización se calcula con la razón entre la profundidad de carbonización ( $d_c$ ) y el tiempo de ensayo total. El valor de  $d_c$  corresponde a la diferencia entre el espesor inicial de la probeta y el residual luego de ser expuesta a las altas temperaturas. Con esto se obtienen las velocidades de carbonización mostradas en la Tabla 5.14 para cada una de las muestras.

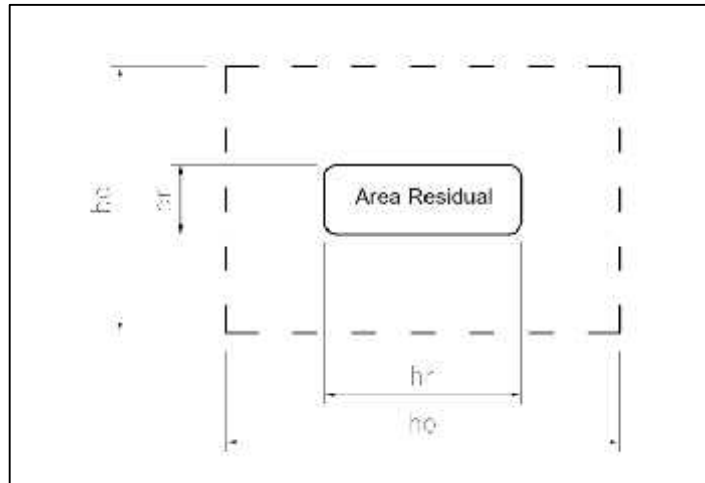
**Tabla 5.14** “Velocidad de carbonización probetas, M. Ancho Residual”

Probeta	Probeta Unitaria	$d_c$ PU [mm]	$\beta_i$ [mm/min]	$\beta$ [mm/min]
<b>PC1</b>	P11	40.8	0.769	<b>0.79</b>
	P12	41.6	0.785	
	P13	43.6	0.823	
	P14	40.7	0.769	
<b>PC2</b>	P21	38.9	0.734	<b>0.72</b>
	P22	40.6	0.766	
	P23	38.9	0.734	
	P24	35.0	0.659	
<b>PC3</b>	P31	41.900	0.698	<b>0.70</b>
	P32	41.767	0.696	
	P33	42.078	0.701	
	P34	43.328	0.722	
<b>PC4</b>	P41	39.944	0.666	<b>0.70</b>
	P42	40.956	0.683	
	P43	43.722	0.729	
	P44	43.417	0.724	

### 5.2.3.2. Resultados de Probetas Macizas.

Al igual que en el método de ancho residual para probetas compuestas, en este, las probetas macizas se raspan para sacar la capa de carbón adherida y se mide las distancias residuales (ver Figura 5.25). Para ello se cortan franjas de espesor 5-6 [mm] y se miden el ancho ( $b_r$ ) y alto ( $h_r$ ) transversales residuales en varias zonas de cada trozo. Las Tablas A.3.25 y A.3.26, de Anexos, muestran el detalle de las dimensiones obtenidas de los fragmentos residuales y su homónima 5.15 los promedios de dichos valores. A modo de observación, no se consideran trozos próximos a la zona superior de la probeta.

**Figura 5.25** “Esquema de área residual de pieza con 4 caras expuestas”



**Tabla 5.15** “Altura y ancho residual promedio por probetas macizas”

Probeta	Iniciales		Residuales	
	$h_0$ [mm]	$b_0$ [mm]	$h_r$ [mm]	$b_r$ [mm]
PM1	200	135	130.3	49.9
PM2	200	135	120.4	43.9
PM3	200	135	100.3	35.6
PM4	200	135	126.2	49.4

Utilizando la nomenclatura de la Figura 5.19, el cálculo de la profundidad de carbonización promedio ( $d_{c,prom}$ ) para este tipo de exposición se realiza como lo indica la ecuación (5.1). La cual no es más que el promedio de la profundidad de carbonización en el ancho y en el alto de la probeta.

$$d_{c,p} = \frac{n_U + b_U}{4} - \frac{n_R + b_R}{4} \quad (5.1)$$

En la Tabla 5.16 se identifican las profundidades y tasas de carbonización para las probetas macizas, considerando el tiempo de exposición igual a 60 y 53 minutos para los ensayos 1 y 2 respectivamente.

**Tabla 5.16** “Velocidad y profundidad de carbonización para probetas macizas”

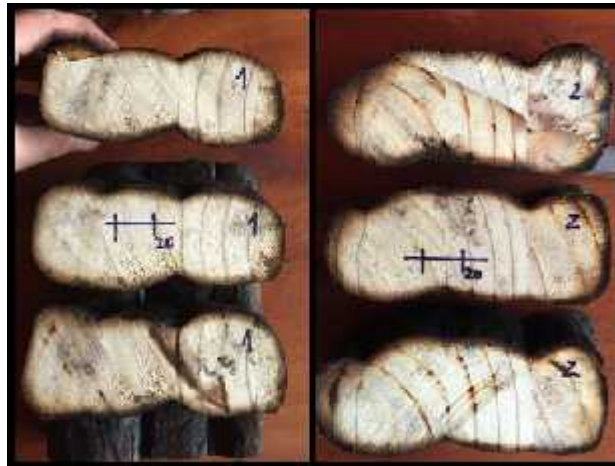
Probeta	Iniciales		Residuales		dc,prom [mm]	β [mm/min]
	h0 [mm]	b0 [mm]	hr [mm]	br [mm]		
PM1	200	135	130.3	49.9	38.7	0.730
PM2	200	135	120.4	43.9	42.7	0.805
PM3	200	135	100.3	35.6	49.8	0.830
PM4	200	135	126.2	49.4	39.9	0.664

En la Figura 5.26 se muestran las secciones residuales reales de ambas probetas macizas, PM3 a la izquierda y PM4 a la derecha. De igual manera se muestra para las probetas PM1 y PM2 en la Figura 5.27.

**Figura 5.26** “Probetas residuales PM3 (izquierda) y PM4 (derecha) seccionadas”

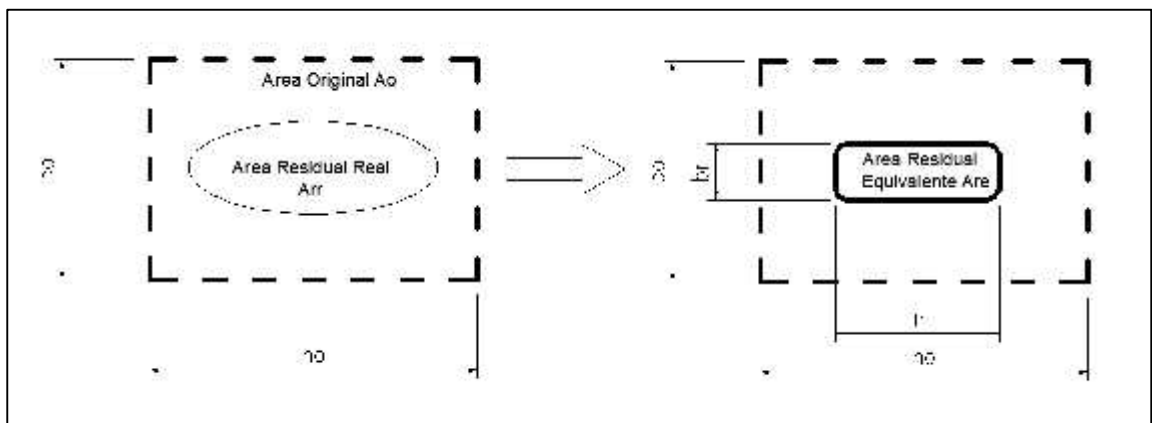


**Figura 5.27** “Probetas residuales PM1 (izquierda) y PM2 (derecha) seccionadas”



Una manera de representar de forma más unificada la sección residual de la probeta ensayada, es empleando el método del rectángulo equivalente, el cual consiste en representar el área residual de la probeta en una sección equivalente a la original, respetando la proporción que existe entre el alto y ancho de la muestra. Ver Figuras 5.28 y 5.29 para mayor claridad.

**Figura 5.28** “Método del rectángulo equivalente probetas macizas”

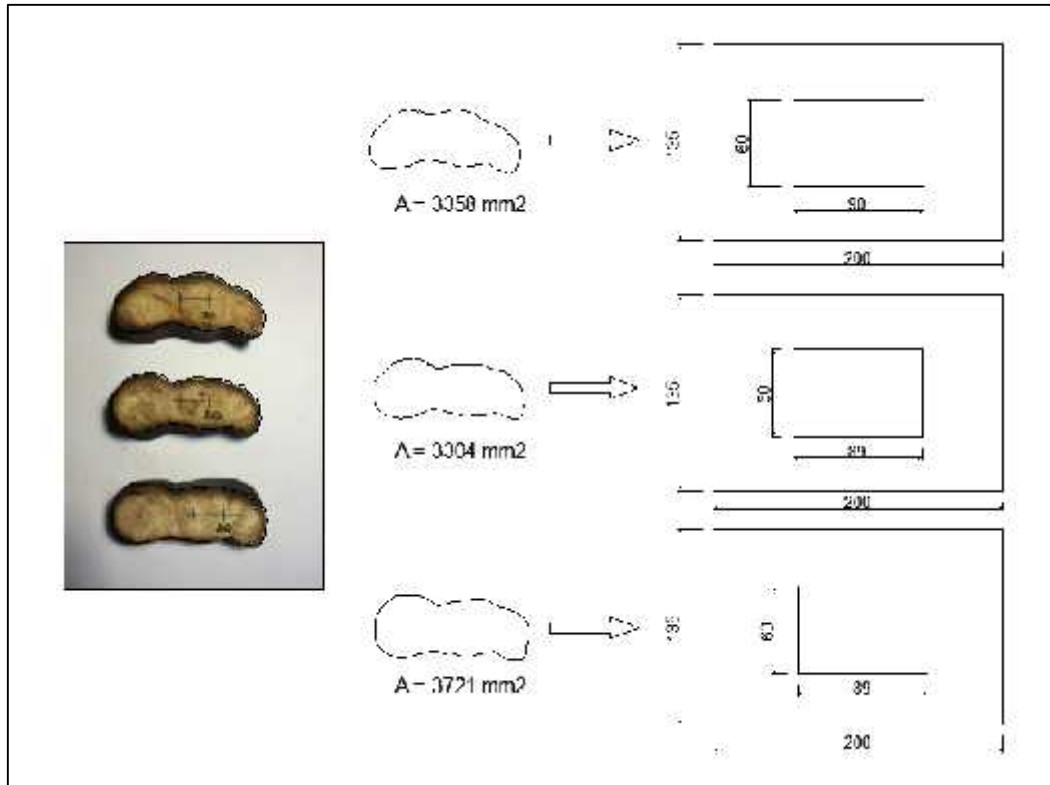


En referencia a la imagen anterior, se debe cumplir lo siguiente:

- $A_{rr} = A_{re}$
- $b_o/h_o = b_r/h_r$ .

A continuación se muestra la imagen de una sección residual de la probeta PM3 y se aplica el método en cuestión.

**Figura 5.29** “Esquema Método del rectángulo equivalente para PM3”



En la siguiente Tabla se muestran las dimensiones residuales equivalentes de cada probeta maciza. En la misma, y utilizando la ecuación 5.1, se muestran las profundidades de carbonización en cada una de las secciones.

**Tabla 5.17** “Dimensiones de probetas macizas para método de rectángulo equivalente”

Probeta	Sección	Dimensiones Originales			Área residual [mm <sup>2</sup> ]	Dimensiones Equivalentes		dc. Prom [mm]
		B0 [mm]	h0 [mm]	Area Inicial [mm <sup>2</sup> ]		B equiv. [mm]	h equiv [mm]	
PM1	1	135	200	27000	5553	61	91	45.8
	2	135	200	27000	5952	63	94	44.4
	3	135	200	27000	6542	66	98	42.5
PM2	1	135	200	27000	6926	68	101	41.3
	2	135	200	27000	6541	66	98	42.5
	3	135	200	27000	6920	68	101	41.4
PM3	1	135	200	27000	3358	48	71	54.2
	2	135	200	27000	3304	47	70	54.5
	3	135	200	27000	3721	50	74	52.7
PM4	1	135	200	27000	5420	60	90	46.2
	2	135	200	27000	5326	60	89	46.6
	3	135	200	27000	5289	60	89	46.7

Con los datos de la última columna de la tabla 5.17, y sabiendo que los tiempos de los ensayos 1 y 2 son 60 y 53 minutos respectivamente se tienen las tasas de carbonización que se muestran en la Tabla 5.18.

**Tabla 5.18** “Velocidad de Carbonización de probetas macizas con el método del rectángulo equivalente”

<b>Probeta</b>	<b>Sección</b>	<b>dc. i [mm]</b>	<b>dc. Prom [mm]</b>	<b>Tiempo [min]</b>	<b><math>\beta</math> [mm/min]</b>
<b>PM1</b>	1	45.8	44.2	53.0	<b>0.835</b>
	2	44.4			
	3	42.5			
<b>PM2</b>	1	41.3	41.7	53.0	<b>0.787</b>
	2	42.5			
	3	41.4			
<b>PM3</b>	1	54.2	53.8	60.0	<b>0.896</b>
	2	54.5			
	3	52.7			
<b>PM4</b>	1	46.2	46.5	60.0	<b>0.775</b>
	2	46.6			
	3	46.7			

## CAPÍTULO VI

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 6.1. Densidad y contenido de humedad.

Los resultados de esta categoría se encuentran en las Tablas 5.5 y 5.6 para probetas compuestas - unitarias, y macizas respectivamente.

Para las probetas macizas, PM3 y PM4, los valores tanto de densidad como contenido de humedad son muy similares, el último próximo del 13%, cercano al 12% que es con el cual se considera estado seco.

En cuanto a la densidad de estas probetas se puede decir que la anhidra, 386 [kg/m<sup>3</sup>], bordea el valor característico para la madera de pino radiata adoptado en la norma NCh 1198 Of. 2006-Anexo E-Tabla E.1, equivalente a 370 [kg/m<sup>3</sup>]. Si se compara el valor de la densidad referencial o normal de las muestras, 439 [kg/m<sup>3</sup>], dado que el contenido de humedad es del 13% (cercano al 12), se tiene que este difiere del estipulado en la Tabla E.2 de la norma ya mencionada igual a 476 [kg/m<sup>3</sup>], en un 8% con respecto al valor medio correspondiente.

Para las probetas unitarias constituyentes de PC3 y PC4 se tienen contenidos de humedad bajo el 12% por lo que están en condición seca. En el caso de las densidades normales obtenidas, entre 374 y 439 [kg/m<sup>3</sup>], se ven diferencias significativas. Esto puede deberse a la presencia de singularidades en alguna de ellas, como nudos que pueden verse a simple vista.

Las probetas compuestas y macizas fueron expuestas al mismo ambiente y durante la misma cantidad de tiempo antes de realizar el ensayo, por lo que la diferencia en el contenido de humedad posiblemente se debe a que las segundas poseen mayor masa y volumen, lo que hace que sea menos permisible al intercambio de masa de agua con el ambiente.



## 6.2. Captación de datos.

En este trabajo, la captación de datos (temperaturas) por parte de los termopares evidencia que la junta de medición puede ser soldada o enroscada, ya que en ambos casos se registran temperaturas constantemente crecientes lo cual es lo esperado. Como se muestra en la Tabla 5.7, en el primer ensayo se utilizan los sistemas termocupla-tarjeta de adquisición de la forma: enroscado-digital para PC3 y soldado-análogo para PC4. Dado que con la primera configuración se obtienen datos defectuosos, en el segundo procedimiento estas se alternan (enroscado-análogo para PC2 y soldado-digital para PC1) para así verificar si el problema proviene del tipo de junta de medición en las termocuplas, de la tarjeta de adquisición de datos, o de una aislación deficiente en el armado de la probeta compuesta.

Con los resultados del ensayo N°2, se comprueba que el error en la medición proviene de la tarjeta de adquisición de datos digital, aun cuando previamente, para evitar una posible oscilación de lecturas, se configuró por parte del personal del laboratorio. La probeta compuesta PC1 presenta la misma incongruencia en las temperaturas detectadas que su par PC3 en el ensayo anterior. Con esto se descarta la utilización de esta tarjeta con termocuplas tipo K de diámetro 0.5 [mm].

En la sección de anexos A.3, se encuentra la Tabla A.3.19 y las Figuras A.3.1, A.3.2, A.3.3 y A.3.4 en donde se pueden observar los valores variables de las temperaturas detectadas en la probeta PC3 del ensayo 1. Como una forma de obtener un tiempo de carbonización para cada punto de las probetas que componen PC4, se estimó gráficamente y con la Tabla A.3.19 la intersección entre una curva de tendencia y una recta horizontal:  $y = 300^{\circ}\text{C}$ .

Con la intención de descartar flujo de calor a través del orificio de inserción de las termocuplas en las probetas unitarias, al momento de finalizar el ensayo se verificó que la fijación de estas estuviera en buen estado y selladas, lo cual resultó afirmativo; por lo que se elimina cualquier suposición de falla por este sector. En la siguiente imagen se presenta una muestra de esto.

**Figura 6.1** “Sello y fijación de termocuplas post-ensayo”



### **6.3. Temperatura dentro del horno.**

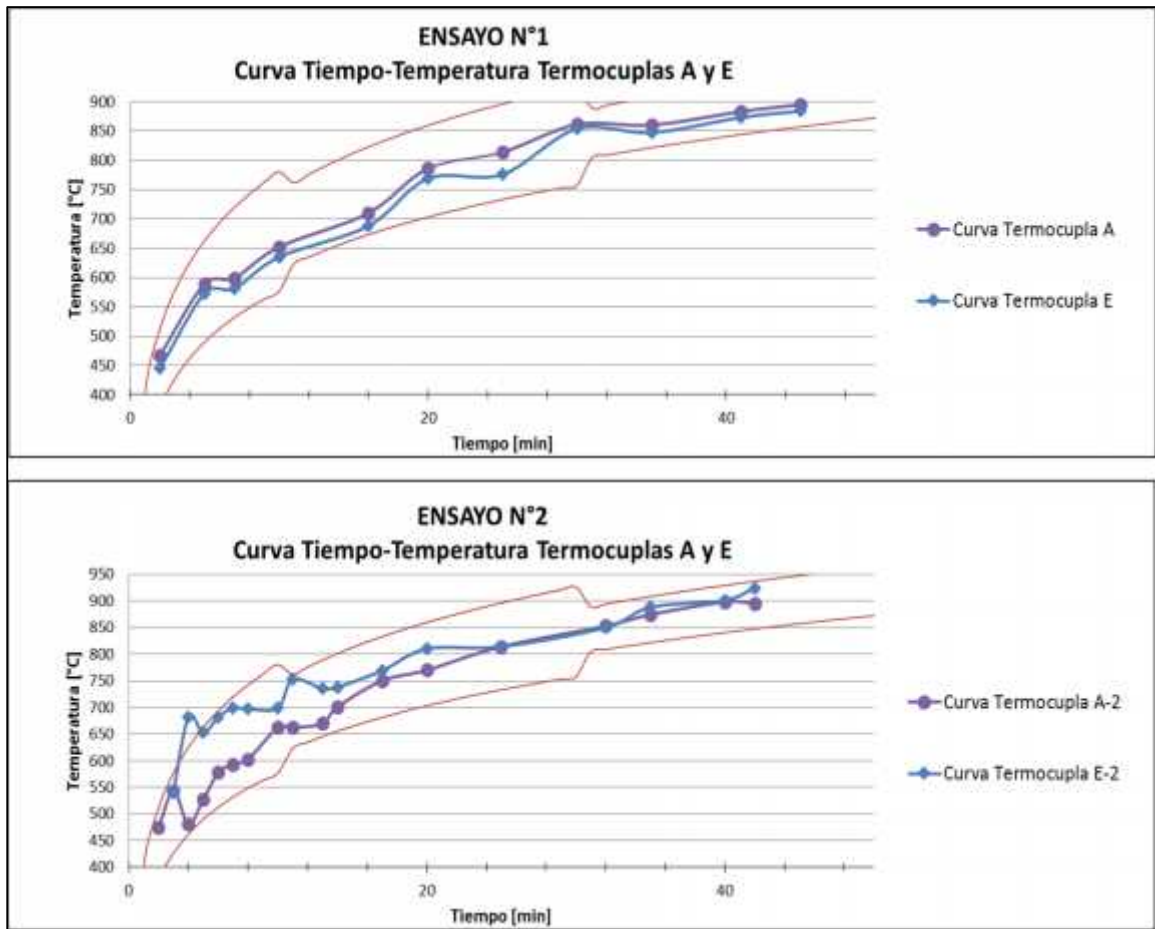
La velocidad de carbonización de cada probeta ensayada en esta investigación difiere según tipo de análisis y muestra utilizada. Los resultados obtenidos con los distintos métodos de obtención de la tasa de carbonización muestran que en el primer ensayo, PC3 y PM3 presentan una velocidad de carbonización un tanto mayor a su par homólogo PC4 y PM4. Lo mismo ocurre en el ensayo N°2 en donde el par PC1, PM1 se carboniza más rápido que las respectivas PC2 y PM2.

La explicación de lo descrito anteriormente se encuentra en el desarrollo de temperaturas dentro del horno durante el ensayo. Se debe hacer notar y recordar que las curvas impuestas en cada procedimiento, mostradas en los gráficos de la Figura 5.8, corresponden al promedio de las lecturas de las termocuplas A, B, C, D y E en cada caso. Es cerca de la primera y la última donde se ubican los pares de probetas.

Las curvas registradas por las termocuplas mencionadas se muestran en los gráficos de la Figura 6.2. Si bien en ambas gráficas las curvas se encuentran dentro del rango aceptado por la normativa chilena para temperaturas de un incendio estándar (exceptuando al inicio del ensayo 2 con la termocupla E), se aprecia que las temperaturas entre estas dos zonas no son idénticas, y en algunos momentos la diferencia entre ellas es considerable. Coincidentemente, las probetas que presentan una carbonización más rápida en cada procedimiento son las que se sitúan en la zona donde se presentan temperaturas mayores respecto a la otra.

Se debe tener en claro que la diferencia de temperaturas puede ser aún mayor dado que las caras expuestas de las probetas compuestas se sitúan a las distancias no despreciables de 44 y 40 [cm] por debajo de la termocupla A y E respectivamente.

**Figura 6.2** “Curvas de termopares del horno A y E”



Lo descrito con anterioridad no es de mucha influencia en ensayos de elementos grandes como columnas, vigas, tabique, u otros, ya que el volumen de estos acapara gran porcentaje del espacio del horno y las temperaturas dentro de él actúan de forma más uniforme. No es el caso del ensayo propuesto en este trabajo en donde se espera la mayor invariabilidad posible en las temperaturas que afectan las probetas, producto del aprovechamiento del reducido tamaño que se desea de estas.

En el punto 6.6 se plantea la construcción de un horno de escala reducida en el que su funcionalidad va más allá que determinar la tasa de carbonización en elemento de madera con el procedimiento planteado, sino que estudiar cualquier comportamiento frente al

fuego de algún material en que sus propiedades en tamaño real se puedan representar a escala reducida, simplificando muchas veces el procedimiento y reduciendo costos de ensayo.

#### **6.4. Velocidades de Carbonización obtenidas.**

En primera instancia se puede observar que la relación densidad-carbonización sigue el patrón esperado, el cual consiste en que a mayor densidad de la madera se evidencia una menor tasa de carbonización, es decir, más lenta. A continuación se analizan por separado los resultados obtenidos con cada método de utilizado con la correspondiente comparación entre ellos.

##### **6.4.1. Análisis Método de Regresión Lineal.**

El modelamiento de regresión lineal arroja velocidades de carbonización muy diferentes para las dos probetas ensayadas en cada ocasión. Como se detalló anteriormente, las probetas PC3 y PC1 de los ensayos 1 y 2 respectivamente quedan fuera de este análisis debido al error presentado en la tarjeta de adquisición.

Para la probeta PC4 se tiene una velocidad de carbonización promedio es igual a 0.96 [mm/min] en donde los coeficientes de determinación de las rectas de regresión para cada mini-probeta no bajan del valor 0.94.

Para la modelación se considera una regresión lineal de la forma:

$$d_{cha} = \beta \cdot t - b \quad (6.1)$$

En donde  $b$  y el signo negativo representan el período inicial de ensayo durante el que no existe una carbonización suficiente aún, corresponde a la tasa de carbonización nominal y  $t$  al tiempo de duración del ensayo.

Considerando el retardo de la carbonización que se produce al inicio del ensayo, y la de gran intensidad que se produce inmediatamente después de ocurrida la combustión, es que se propone una línea de tendencia que pasa por el origen del gráfico Profundidad de carbonización vs. Tiempo. Con esto se promedian las brechas en los valores que se originan al inicio del ensayo y el modelo se asocia a la expresión (2.5) de la forma:

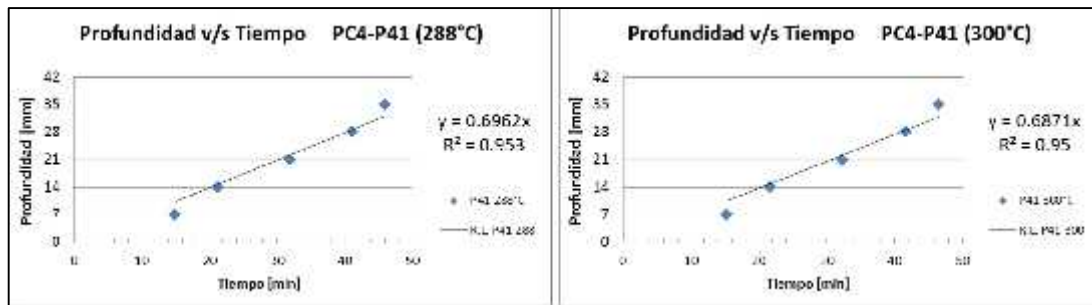
$$d_{cha} = \beta \cdot t$$

Las consideraciones anteriores explican los valores para la velocidad de carbonización mostrados en la Tabla 6.1.

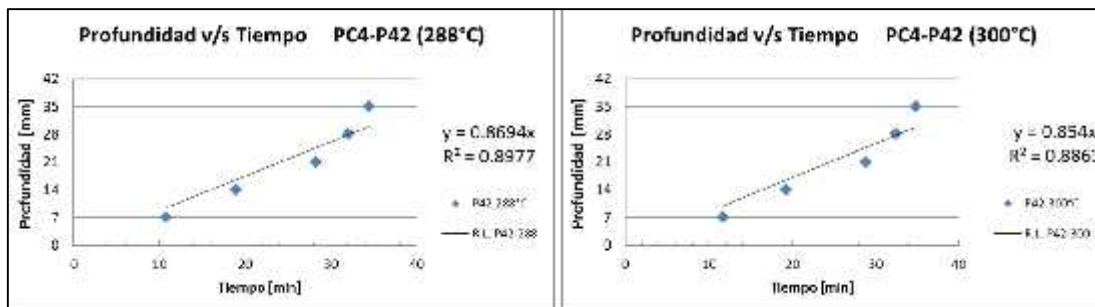
En las siguientes Figuras se muestra la regresión lineal de cada mini-probeta pero de la forma como lo muestra la ecuación (2.5), es decir, con intersección en el punto (0,0).

Para el ensayo N°1 se tienen las siguientes imágenes referidas a la probeta compuesta PC4.

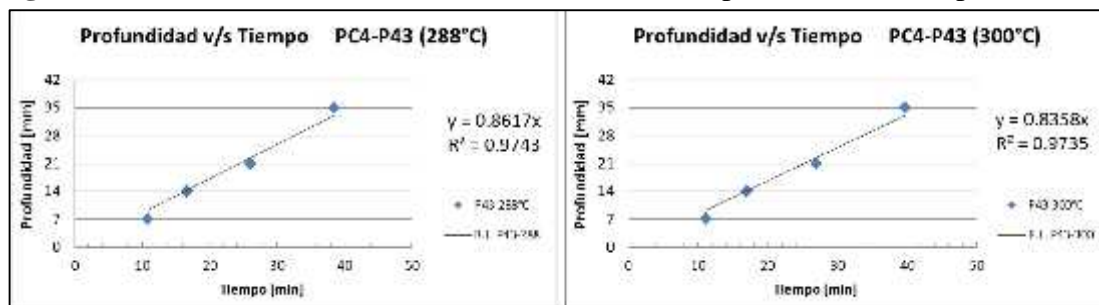
**Figura 6.3** “Determinación de tasa de carbonización sin parámetro b. Para probeta P41”



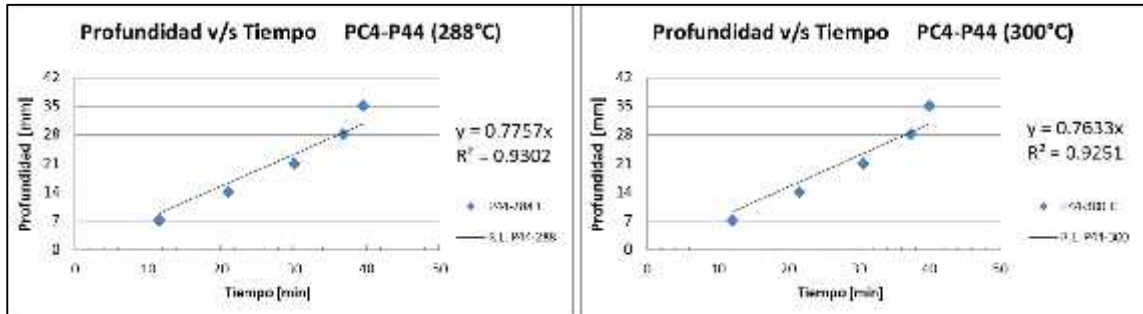
**Figura 6.4** “Determinación de tasa de carbonización sin parámetro b. Para probeta P42”



**Figura 6.5** “Determinación de tasa de carbonización sin parámetro b. Para probeta P43”

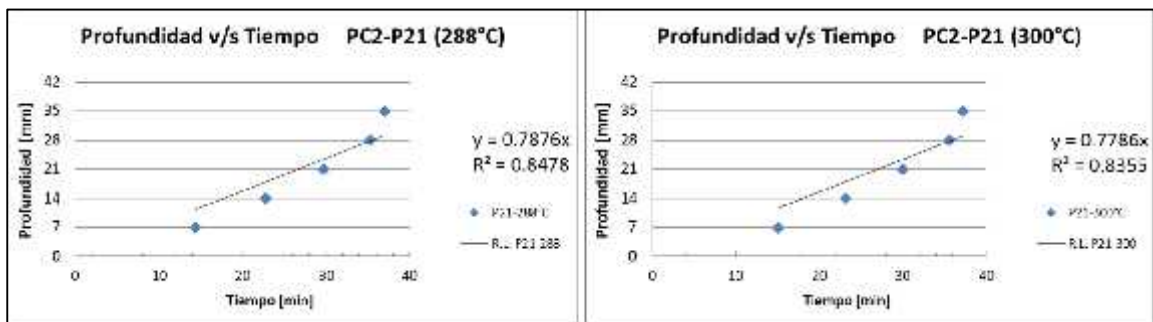


**Figura 6.6** “Determinación de tasa de carbonización sin parámetro b. Para probeta P44”

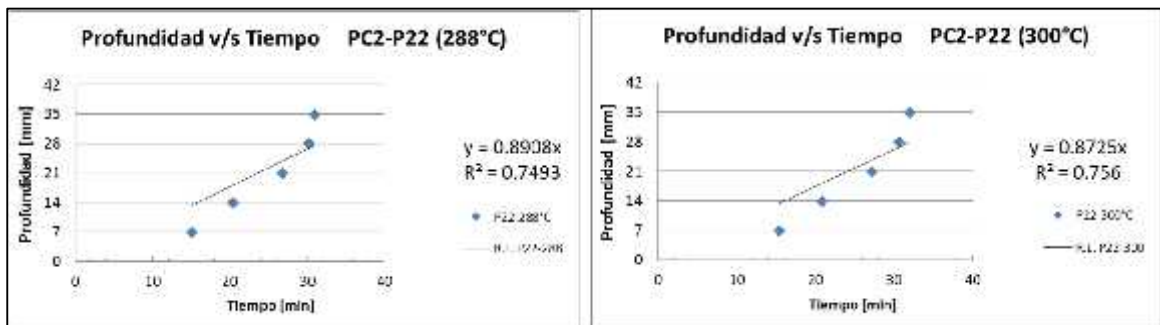


Para el ensayo N°2 se tienen las imágenes referidas a la probeta compuesta P24.

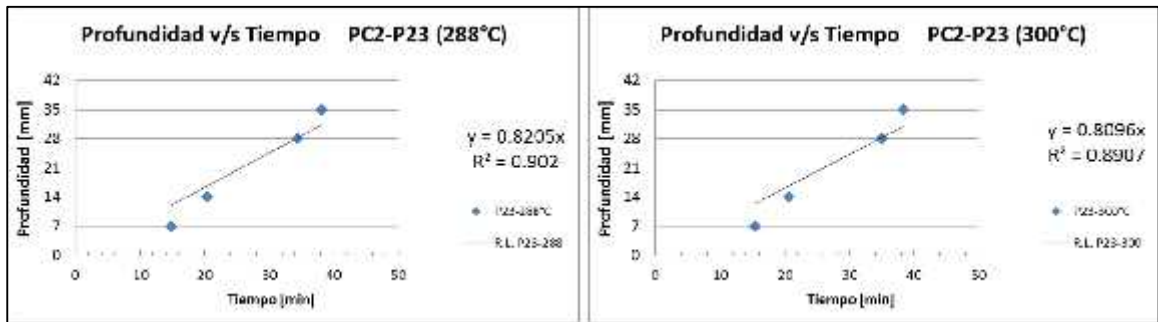
**Figura 6.7** “Determinación de tasa de carbonización sin parámetro b. Para probeta P21”



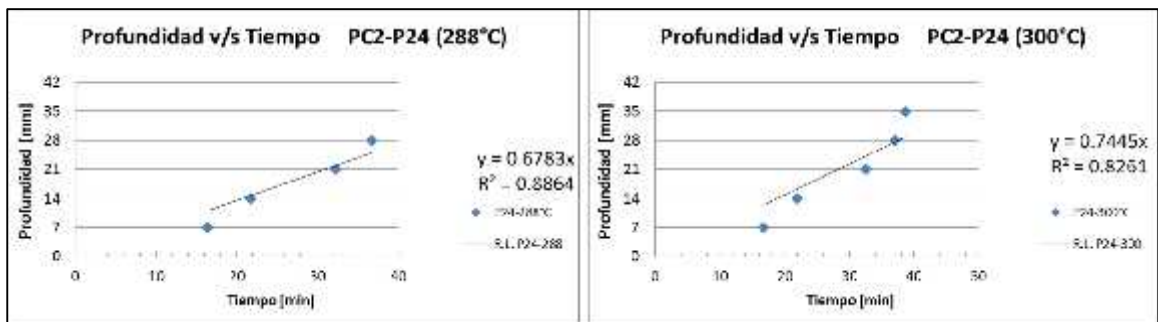
**Figura 6.8** “Determinación de tasa de carbonización sin parámetro b. Para probeta P22”



**Figura 6.9** “Determinación de tasa de carbonización sin parámetro b. Para probeta P23”



**Figura 6.10** “Determinación de tasa de carbonización sin parámetro b. Para probeta P24”



**Tabla 6.1** “Velocidades de carbonización de M.R. Lineal sin parámetro b, para PC2 y PC4”

Probeta	Probeta Unitaria	$\beta_i$ [mm/min]	$\beta$ [mm/min]
PC2	P21	0.783	<b>0.798</b>
	P22	0.882	
	P23	0.815	
	P24	0.711	
PC4	P41	0.692	0.801
	P42	0.892	
	P43	0.849	
	P44	0.770	

Este análisis no se realiza para PC3 ni PC1 ya que se considera que las mediciones en estas probetas fueron defectuosas.

Como bien se evidencia, el valor de  $R^2$  deja de ser tan representativo como antes dado que se pierda un poco de representatividad real con la regresión.

Cabe destacar que para la probeta PC3, con la prescindencia de la constante “b”, se obtiene una velocidad de carbonización promedio igual a 1.01 [mm/min].

El considerar el parámetro b en la ecuación de carbonización, da resultados por sobre el 20% en relación a prescindir de dicho valor.

Pensando en el cálculo de estructuras de madera resistentes al fuego la clasificación FXX se hace en base al periodo total de duración del evento de incendio, por lo tanto no entra en juego el valor de la constante “b”. Dicho esto, la regresión lineal para determinar la tasa de carbonización se debe hacer como se muestra en la ecuación (2.5) y en este último punto.

#### **6.4.2. Análisis Método de Ancho Residual.**

El método de ancho residual entrega valores de velocidades no muy similares a las del método anteriormente analizado, siendo estas alrededor de un 11% más bajas en relación a la obtenida con la regresión lineal. El problema de esta metodología reside en la arbitrariedad con que se pueden escoger los puntos de medición.

Producto de que la madera laminada encolada quemada presenta variados espesores residuales no tan solo por su condición de material combustible sino que también debido a la velocidad mayor que presenta en sus planos de encolado, es difícil obtener una medida objetivamente representativa.

Como se ve en la Tabla 5.13 los espesores residuales de las probetas compuestas poseen variaciones estándar del orden del 9% y 23% respectivamente, lo que indica una dispersión muy alta con respecto al valor promedio.

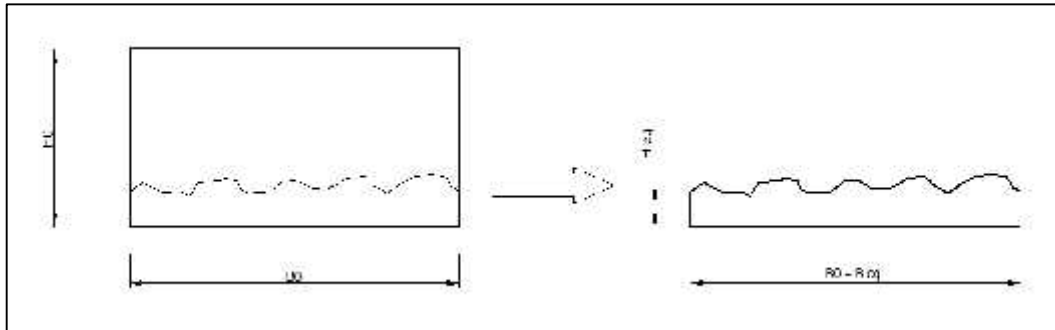
La idea de realizar esta parte del procedimiento es corroborar que los valores entregados con la implementación de termocupas no se alejen de forma significativa de los obtenidos mediante la metodología tradicional de probetas residuales. Es más, se puede observar que la tasa de carbonización obtenida para la probeta compuesta PC3 difiere significativamente de la obtenida con este método, lo que cuestiona la validez de las mediciones con termocupas en esta muestra.

De forma similar a lo estipulado en el punto 5.2.3.2 del capítulo anterior, se emplea el método del rectángulo equivalente para tener un resultado más objetivo con este tipo de



procedimiento. La diferencia con la metodología descrita para las probetas macizas, es que en este caso, al ser una carbonización unidireccional, se tiene que el ancho residual de las franjas de cada mini-probeta es igual al inicial, por lo que sólo se debe obtener un espesor equivalente, como se muestra en la Figura 6.11.

**Figura 6.11** “Método del rectángulo equivalente probetas compuestas”



En las tablas A.4.1 y A.4.2 de la sección anexos se presentan las medidas para obtener las áreas equivalentes residuales y la altura del método descrito.

En la Tabla 6.2 se presentan las tasas de carbonización obtenidas con este método para cada probeta compuesta.

**Tabla 6.2** “Velocidad de carbonización de probetas compuestas con método del rectángulo equivalente”

Probeta	Mini-probeta	dc.prom [mm]	Tiempo [min]	$\beta.i$ [mm/min]	$\beta.prom$ [mm/min]
PC1	P11	46.8	53	0.883	0.909
	P12	47.5	53	0.897	
	P13	49.5	53	0.934	
	P14	48.8	53	0.921	
PC2	P21	46.4	53	0.875	0.883
	P22	48.3	53	0.911	
	P23	45.5	53	0.859	
	P24	47.0	53	0.887	
PC3	P31	44.0	53	0.830	0.810
	P32	42.2	53	0.796	
	P33	43.2	53	0.816	
	P34	42.3	53	0.798	
PC4	P41	42.7	53	0.806	0.788
	P42	42.0	53	0.793	
	P43	40.0	53	0.754	
	P44	42.3	53	0.799	

Como se puede apreciar en la tabla anterior, mayoritariamente las velocidades de carbonización resultantes con este método son mayores en un 15% aproximadamente con respecto a las calculadas con el procedimiento del ancho residual descrito con anterioridad. Con esto se tiene que en este último método, probablemente los puntos de medición escogidos no eran lo más representativos.

### **6.4.3. Análisis de resultados de probetas macizas.**

El ensayo de este tipo de probetas tiene como finalidad el determinar una correlación entre los datos obtenidos con un ensayo de probetas expuestas al calor unidireccionalmente y otro en sus 4 caras. Para ello es necesario tener una lista de resultados mucho más extensa. De igual manera, se puede rescatar que gracias a que estas muestras se expusieron al fuego bajo las mismas circunstancias que sus pares, hay algunos datos interesantes de analizar.

Es en las probetas macizas en las que se ve de forma más clara la mayor tasa de carbonización en los planos de encolado, reduciendo claramente el ancho residual en ese punto, ver Figuras 5.26 y 5.27. Estas diferencias de espesores residuales de forma no uniforme complican al igual que en el método descrito en el punto anterior, la medición del área residual de forma objetiva, ya que el resultado obtenido dependerá de la elección de puntos dónde realizarla. La utilización del método del rectángulo equivalente da una respuesta más subjetiva del suceso, pero no necesariamente muy representativa de la realidad.

En primer lugar, las probetas PM1 y PM2 presentan carbonizaciones diferentes dependiendo del método con que se analiza. Con el método del área residual, se observa que PM1 tiene una tasa de carbonización menor que PM2, mientras que con el modelo de rectángulo equivalente la relación se invierte. Esto da razón de la necesidad de utilizar este último método y no el primero producto de la subjetividad implicada. De ahora en adelante los resultados para estas probetas se analizan con este método más óptimo.

Las probetas PM3 y PM1 presentan una carbonización más rápida que sus homólogas PM4 y PM2 producto de las mayores temperaturas que se experimentaron en aquel sector del horno. La Tabla 5.18 entrega tasas de carbonización promedio con valores de 0.896 y 0.775 [mm/min] para las probetas PM3 y PM4, y de 0.385 y 0.787 [mm/min] para PM1 y PM2 respectivamente.

Se motiva a quien le resulte pertinente, el seguir con esta investigación y obtener una cantidad de resultados empíricos aceptable con los cuales poder relacionar la tasa de carbonización obtenida mediante el procedimiento descrito en esta tesis y el comportamiento real de elementos de madera expuestos en dos, tres o cuatro caras a temperaturas de incendio estándar.

#### 6.4.4. Comparación de resultados.

En la Tabla 6.3 se muestran las tasas de carbonización obtenidas para cada probeta con los métodos respectivos.

**Tabla 6.3** “Velocidades de carbonización con cada método empleado”

		Método			
		Regresión Lineal		Ancho Residual	Rectángulo Equivalente
Probeta	Mini-Probeta	ax+b	ax		
PC1	P11	-	-	0.769	0.883
	P12	-	-	0.785	0.897
	P13	-	-	0.823	0.934
	P14	-	-	0.769	0.921
PC2	P21	1.170	0.783	0.734	0.875
	P22	1.560	0.882	0.766	0.911
	P23	1.150	0.815	0.734	0.859
	P24	1.040	0.711	0.659	0.887
PC3	P31	-	-	0.698	0.830
	P32	-	-	0.696	0.796
	P33	-	-	0.701	0.816
	P34	-	-	0.722	0.798
PC4	P41	0.838	0.692	0.666	0.806
	P42	1.104	0.892	0.683	0.793
	P43	0.953	0.849	0.729	0.754
	P44	0.939	0.770	0.724	0.799
PM1	-	-	-	0.730	0.835
PM2	-	-	-	0.805	0.787
PM3	-	-	-	0.830	0.896
PM4	-	-	-	0.664	0.775

Lamentablemente, dado el problema que se tiene con la tarjeta de adquisición de datos digital, se rescatan sólo ocho resultados provenientes de dos probetas compuestas por lo que los distintos análisis respecto a este tipo de probeta se compararán sólo con dichos resultados.

En primer lugar, por lo expuesto en el punto 6.4.1, para el método de la regresión lineal se considerará solo los resultados obtenidos sin considerar el parámetro “b” de la recta de tendencia (ax).

Dicho lo anterior, se tiene que las tasas obtenidas por medio de las termocuplas difieren de distinta manera con respecto a las calculadas con el método del rectángulo equivalente, la diferencia va desde un 3% hasta un 25%, lo cual muestra que no hay una relación clara entre los dos procedimientos. Sin embargo, se puede ver que en 6 muestras de 8, el valor obtenido con el modelo residual es mayor que el del lineal. Dicho resultado puede deberse principalmente a que la medición del avance del frente de carbonización con las termocuplas no siempre coincide con un plano de encolado, mientras que con la forma del rectángulo equivalente dichas zonas si son tomadas en cuenta a cabalidad y por ende muestran un mayor volumen quemado, que responde a un avance más rápido que el del global de la interfaz de carbonización.

Se puede apreciar que el método propuesto tiene un punto de arbitrariedad muy alto, el cual es la posición de las termocuplas en el plano expuesto al fuego. Este inconveniente se puede obviar incorporando un mayor número de termopares que realicen las medidas, lo cual por motivos económicos y de implementación en el laboratorio no se pudo llevar a cabo.

Como ya se mencionó anteriormente, la diferencia entre el método tradicional de ancho o espesor residual y el del rectángulo equivalente viene de la subjetividad en la medición que presenta el primero y es por ello que la comparación con los resultados del método lineal se realiza con este último.

Para lograr comparar las probetas compuestas con las macizas, y por ende, una carbonización en una cara versus una actuando en las cuatro superficies, se rescata una tasa promedio por cada probeta compuesta. Asumiendo que dada la posición cercana dentro del horno de cada par (PM y PC) es que se analiza cada muestra maciza con su homóloga compuesta.

En la siguiente tabla se muestran las velocidades de carbonización por probetas compuesta total y macizas.

**Tabla 6.4** “Velocidades de carbonización de probeta compuestas totales y macizas”

Probeta	Método		
	R. Lineal	Ancho Res.	Rect. Equiv.
PC1	-	0.786	0.909
PC2	0.798	0.723	0.883
PC3	-	0.704	0.810
PC4	0.801	0.697	0.788
PM1	-	0.730	0.835
PM2	-	0.805	0.787
PM3	-	0.830	0.896
PM4	-	0.664	0.775

Comparando con el método de regresión lineal, se tiene que las probetas macizas PM2 y PM4 se carbonizan un 1 y un 3% más rápido que PC2 y PC4 respectivamente. Con el caso del mismo método de rectángulo equivalente en las probetas compuestas, se tiene en general que también la velocidad de carbonización en las probetas PC es mayor que en las PM, específicamente PC1, PC2 y PC4 tienen una tasa superior en un 9, 12 y 2% en comparación con PM1, PM2 y PM4 respectivamente, mientras que PC3 es menor que PM3 en un 10%. Por el escaso número de ensayos, no se puede determinar de manera eficiente una relación clara entre estos dos tipos de exposición.

Al comparar los resultados de este trabajo con el de Ramírez 2001, se tiene que según la tabla 3.5 del capítulo 3, la velocidad de carbonización para probetas de madera laminada de pino radiata con Urea formaldehído como adhesivo es de 0.77 [mm/min], valor en general inferior a los obtenidos en los ensayos de esta memoria. La diferencia en este dato proviene principalmente de las condiciones iniciales de las probetas, ya que según la tabla 3.5, el contenido de humedad y la densidad de referencia de las probetas utilizadas por Ramírez 2001 son 17% y 569 [kg/m<sup>3</sup>] respectivamente, valores muy superiores a las de las probetas empleadas en este trabajo las cuales bordean un 13% de contenido de humedad y una densidad de referencia no superior a los 448 [kg/m<sup>3</sup>].

Los valores rescatados en los ensayos mencionados en el capítulo 3: Antecedentes; muestran que las tasas de carbonización determinadas en los ensayos de esta memoria se encuentran dentro del rango esperado. Si bien este último es muy amplio, se debe tener en consideración que las muestras ensayadas en los distintos trabajos mencionados poseen diferencias significativas a las de este informe, siendo la más clara e importante el que no todas emplean probetas de madera laminada de pino radiata, y aún más, en los casos en que sí lo son, las propiedades mecánicas y químicas no necesariamente coinciden debido a las diferencias que se presentan en las distintas regiones de crecimiento de los árboles respectivos. En la Tabla 6.5 se muestra el resumen de dichos valores.

**Tabla 6.5** “Resumen de valores en procedimientos nacionales e internacionales”

<b>Autor (es)</b>	<b>País</b>	<b>Año</b>	<b>Probeta</b>	<b><math>\beta</math> [mm/min]</b>
Gardner y Syme	Australia	1991	MLE Pino Radiata	0.82 - 0.92
Collier	Nueva Zelanda	1992	MLE Pino Radiata	0.52 - 1.04
White y Nodheim	Estados Unidos	1992	MLE Pino	0.62
Ligens	Alemania	2003	Pino	0.6 - 0.63
Fonseca y Barreira	Portugal	2009	Pino	0.27 - 0.6 *
Ramírez	Chile	2001	MLE Pino Radiata	0.77
			Pino Radiata	0.87

(\*) Valore sobtenidos con curva de temperatura distinta a la de incendio estándar

Las tasas de carbonización obtenidas en esta investigación, para cada tipo de metodología son las que se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 6.6** “Velocidad de carbonización promedio de probetas ensayadas según exposición”

<b>Exposición</b>	<b>Método</b>	
	<b>Lineal</b>	<b>A. Residual (Rect. Equiv)</b>
<b>1 cara</b>	0.80	0.85
<b>4 caras</b>	-	0.82

Como se observa, en cuanto a prometas de MLE de pino radiata, los valores mostrados en la Tabla 6.5 son muy similares a los expuestos por este trabajo, específicamente el método propuesto, razón por la cual se entiende que el método tiene consistencia a la hora de determinar la propiedad en cuestión.

## **6.5. Comentarios sobre método experimental propuesto.**

Con el ensayo realizado, se evidencia de forma notoria que el procedimiento planteado tiene problemas en cuanto a que el equipo donde se efectúa posee ciertas desventajas para llevarlo a cabo de forma deseada.

En primer lugar, la temperatura en un instante dado debiese ser lo más uniformemente posible dentro de todo el recinto, para que la posición de la probeta no influya en los resultados y así, eliminar una variable más dentro de las tantas que existen.

Sacando del escenario las probetas con lecturas difusas, se tiene que con PC4 y PC2 se cumplieron las expectativas que se tenían en un principio: presenciar y obtener datos de forma continua acerca de la carbonización y su avance en el tiempo.

Durante el registro de las termocuplas con el sistema análogo, se observa que a partir de aproximadamente los 270°C, las temperaturas comienzan a aumentar de forma cada vez más rápida hasta pasados los 310°C, de ahí en adelante lo hacen de forma aún más acelerada. Esto da a entender que los valores de temperatura en la interfaz madera/carbón considerados de 288°C y 300°C según Schaffer y Hadvig respectivamente están dentro del rango esperable. Lamentablemente los registros no se tienen de manera digital para poder hacer un análisis más acucioso de ellos, pero se deja propuesto este aspecto para efectos de una eventual investigación del tema.

Los elementos de aislación térmica utilizados cumplieron su cometido en las probetas compuestas. El producto con mayores probabilidades de falla corresponde a la masilla refractaria, pero según información del fabricante, soporta sin problemas temperaturas hasta los 1100 °C, valor que se alcanza recién al final del ensayo. Se debe considerar en todo caso que en ensayos de mayor duración se deben tomar las precauciones necesarias en cuanto a los materiales empleados.

En cuanto a las cotas para la ubicación de termocuplas y medios de unión parecería que las referencias aplicadas del eurocódigo EN 1995-1-2 se pueden considerar para un procedimiento estándar y de tiempos similares o menores a los realizados en esta investigación, teniendo en cuenta siempre que son los valores empíricos de maderas nacionales los que deben ser considerados si es que existe la certeza de su veracidad.

Contando con una tarjeta de adquisición de datos digital en buen estado y que permita obtener los registros de varias termocuplas a la vez, se sugiere que las profundidades de

carbonización se midan con dos o más termopares cada una, ya que de esta manera se obtiene un promedio de dichos tiempos y se cuenta con un tiempo de carbonización más objetivo.

Sería interesante, con el fin de ratificar lo expresado en párrafos anteriores, que los bordes y cercanías de medios de unión se implementaran con termopares para obtener mediciones del efecto real de estos en las probetas ensayadas.

En el punto siguiente se hace referencia al horno propuesto para llevar a cabo de mejor manera el ensayo planteado.

## **6.6. Horno Propuesto para ensayos.**

Como ya se ha mencionado, producto de que el horno vertical de IDIEM es de grandes dimensiones y existen variaciones de temperatura dentro de él durante un procedimiento es que el ensayo de probetas pequeñas se hace muy dependiente de la posición en que se sitúan éstas, y aun así no se garantiza una exposición al desarrollo homogéneo de temperaturas requerido.

Dado que el procedimiento planteado responde en gran medida al trabajo realizado por Ligens (2003) se sugiere la implementación del horno especial a pequeña escala que él utiliza y que responde a la norma DIN 4102-8: 2003<sup>18</sup>.

El equipo consiste en una cámara de combustión con sólo un quemador e implementos de medición, A continuación se detallan las indicaciones de la norma alemana mencionada anteriormente.

### **6.6.1. Cámara de Combustión.**

La cámara debe estar constituida por muros de ladrillo refractario con densidades entre 1900 y 2100 [kg/m<sup>3</sup>] enmarcados en acero. La superficie superior e inferior deberán ser de hormigón refractario con densidad entre 200 y 2200 [kg/m<sup>3</sup>].

El horno puede estar cubierto por fuera con planchas de acero de espesor 2 mm opcionalmente aislada de los muros y losas con materiales propicios.

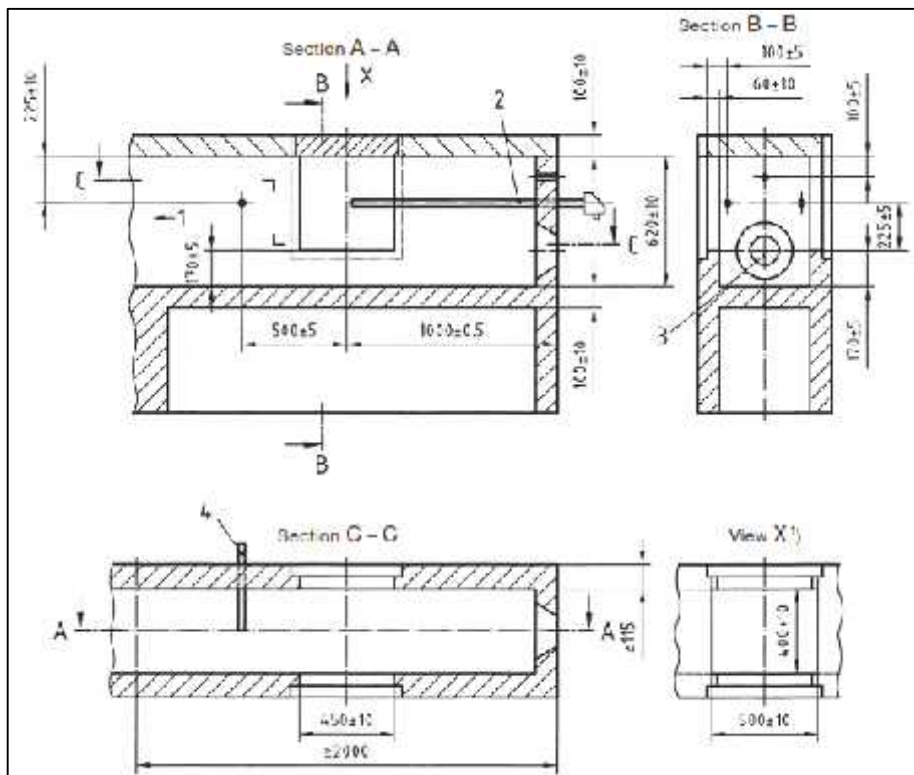


Se cuenta con tres aberturas de 450 x 450 [mm] cada una, para insertar la probeta a ensayar, una en cada muro longitudinal y una tercera en la parte superior, como se muestra en la Figura 6.12. Se pueden tener como máximo dos aberturas de inspección capaces de cerrarse, estas no pueden tener un área superior a 100 [cm<sup>2</sup>] cada una.

La salida de humos debe estar diseñada para generar una presión de hasta 12 [Pa] después de los primeros cinco minutos del ensayo en la cámara de combustión.

En la Figura 6.12 se muestran esquemas del horno tipo y sus dimensiones en [mm].

**Figura 6.12** “Esquema de Horno a pequeña escala según norma DIN 4102-8: 2003”.



Fuente: DIN 4102-8: 2003.

En la Figura anterior se detallan las siguientes referencias:

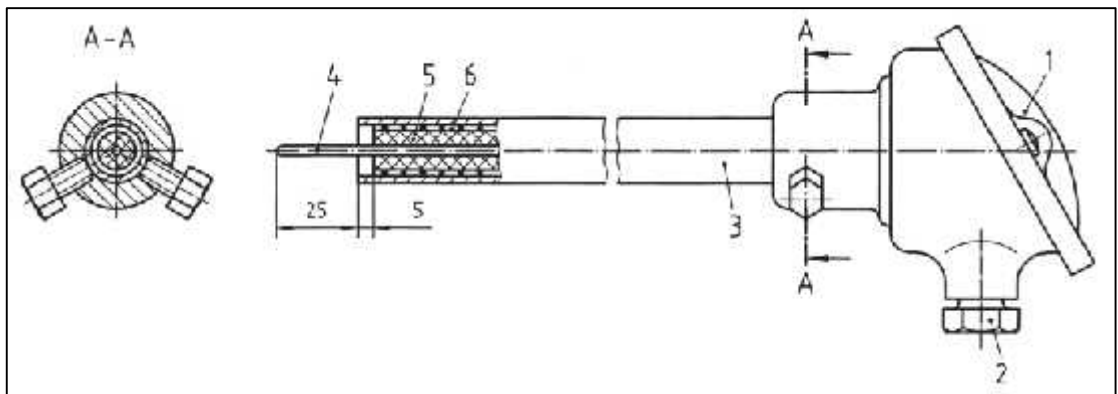
- 1- Extractor de humo con válvula de mariposa.
- 2- Termocupla envainada.
- 3- Apertura del quemador.
- 4- Tomador de presión, 15 ± 5 [mm] de diámetro interior.

### 6.6.2. Equipo de medición.

La medición de la temperatura dentro del horno se hace a través de una termocupla envainada, de diámetro exterior igual a 3mm y protegida por un tubo de acero como se muestra en la Figura 6.13. La vaina y el tubo de acero deben no ser susceptibles a la formación de cal. La termocupla se debe posicionar de tal manera que la junta caliente quede a una distancia de  $10 \pm 0.5$  [cm] del centro de la superficie de la probeta, ver sección A-A de la Figura 4.2.

Para medir la presión dentro del horno, se dispone de un tubo de acero de diámetro interior  $15 \pm 5$  [mm] como se especifica en las secciones A-A y C-C de la figura anterior.

**Figura 6.13** “Termocupla para medición de temperaturas dentro del horno”.



Fuente: DIN 4102-8: 2003.

Para la Figura 4.3 se detallan las siguientes referencias:

- 1- Cabeza de conexión Tipo A, definida en norma DIN 43729.
- 2- Casquillo roscado.
- 3- Tubo protector de acero.
- 4- Termocupla enfundada.
- 5- Chaqueta aislante de diámetros exterior e interior de 16 y 5mm respectivamente y 100mm de largo, fabricada con material aislante de cerámica.
- 6- Cordón de fibra mineral.

## **CAPÍTULO VII**

### **CONCLUSIONES**

El objetivo principal de esta investigación fue la estimación exploratoria de la velocidad de carbonización de madera laminada encolada de Pino radiata aplicando el concepto de carbonización unidimensional, con el propósito de comparar los resultados con los obtenidos aplicando el concepto de carbonización nominal.

No existiendo hasta la fecha un procedimiento normalizado aceptado regionalmente para la determinación de estas propiedades se optó por aplicar las prácticas descritas en informes de estudios recientes de investigaciones relacionadas con el tema, desarrollados en Australia, Nueva Zelanda, Estados Unidos, Alemania y Portugal. A diferencia de la práctica tradicional de incorporar las probetas en el interior de cámaras de combustión de grandes dimensiones adecuadas para analizar el comportamiento al fuego a escala real de componentes constructivas tales como paredes, pisos, puertas, etc., se recurre a la estimación de la velocidad de carbonización unidimensional por medio una cámara de combustión a pequeña escala en la que resulta más sencillo controlar y uniformar el desarrollo de temperaturas en el tiempo, localizar la acción del fuego sobre una única superficie expuesta del material investigado y reducir considerablemente el consumo de combustible. En la norma DIN 4102-8: 2003 se describe la implementación de un horno de esta naturaleza, el que se detalla en el punto 6.6 del presente documento, antecedente que podría servir de información referencial para la construcción de una unidad de ensayo en el Laboratorio de Fuego del IDIEM. Por restricciones de tiempo y presupuesto no fue posible implementar esta infraestructura en el contexto del desarrollo de la memoria, por lo que se optó por adaptar el procedimiento a la cámara ya existente.

En los ensayos se determinó la carbonización de tres formas distintas:

1.- Para las probetas que se ensayaron según un ataque de fuego unidimensional y asociando, de acuerdo con el criterio de la norma EN 1995-1-2, el frente de carbonización al sector que alcanza una temperatura de 288 y 300°C es posible, mediante una disposición secuencial en profundidad de termocuplas en las probetas, hacia el interior de la superficie expuesta al fuego, estimar el tiempo que requiere alcanzar esta temperatura para cada termocupla y de esta forma estimar la velocidad de carbonización.

2.- Al finalizar el ensayo y después de raspar y eliminar el carbón hasta alcanzar la base de madera no carbonizada se puede medir también la profundidad efectiva de

carbonización media desarrollada en las probetas, valor que combinado con la duración del ensayo permite calcular la velocidad de carbonización promedio del ensayo.

3.- Finalmente con las probetas dispuestas en el centro de la cámara (probetas macizas) expuestas a un ataque del fuego por las 4 caras y el extremo superior, es posible cuantificar al finalizar el ensayo la profundidad efectiva de carbonización, la sección transversal residual y con esto, un valor de la velocidad de carbonización nominal promedio del ensayo.

Del análisis de los resultados experimentales y después de descartar valores incoherentes se puede concluir que los valores promedio de la velocidad de carbonización controlada experimentalmente difieren entre sí de acuerdo con el criterio considerado para su procesamiento, según se resume en el siguiente cuadro:

**Tabla 7.1** “Valores promedio de la velocidad de carbonización”

<b>Velocidad de Carbonización</b>	<b>Medido con</b>	<b>Valor</b>	
Unidimensional	Termocupla	0.80	[mm/min]
Unidimensional	Altura residual	0.85	[mm/min]
Nominal	Sección residual	0.82	[mm/min]

Estos valores exceden en prácticamente un 22 % a los especificados en la Tabla de la norma EN 1995-1-2 para madera laminada encolada de especies coníferas con densidad normal característica no inferior a 270 kg/m<sup>3</sup>, que asciende a 0,65 m/min y 0,70 mm/min para los valores unidimensional y nominal, respectivamente y resultan similares a los medidos por Alejandro Ramírez en su tesis de titulación hace más de dos décadas. Podría ser necesario, en consecuencia, considerar estos incrementos de velocidad en las verificaciones al fuego de elementos estructurales de madera laminada encolada de Pino radiada, mientras no se cuente con elementos de análisis sustentados por un proyecto de mayor amplitud y realizados en un horno del tipo propuesto y que permita materializar efectivamente un ataque de fuego unidimensional sobre un bloque de madera laminada encolada.

Si bien el procedimiento experimental utilizado resulta más complejo de implementar que tradicionalmente utilizado, ya que cada probeta consiste en realidad de un conjunto de miniprobetas, todas enmarcadas por elementos de protección pasiva, y provistas de un manto lateral de aislación térmica que permite propiciar el ataque al fuego unidimensional.

Adicionalmente la instalación de la red de termocuplas y el correspondiente sistema de registro de temperaturas condiciona costos adicionales. Sin embargo, los beneficios superan con creces los aspectos consignados. En un mismo ensayo es posible incorporar cuatro o más probetas individuales, y los registros de carbonización basados en el avance del frente de temperaturas de 300°C permiten estimar en forma continua la velocidad de carbonización. La carbonización física, sin embargo, solo será posible cuantificarla una sola vez al final del ensayo y reflejará la tasa de avance promedio de la carbonización en dicho período. Cabe comentar que esta propiedad se puede cuantificar en forma continua durante el ensayo utilizando un dispositivo de presión operado desde el exterior que actuando sobre el carbón por medio de una presión superior a la resistencia del carbón lo horada hasta alcanzar el frente de madera no carbonizada, cuya resistencia al aplastamiento resulta muy superior a la del carbón.

Si bien el número de ensayos realizados en el estudio resultó menor que el planificado inicialmente, impidiendo esta situación una calibración más exacta del procedimiento aplicado, este estudio confirma en cierta forma las mediciones de A. Ramírez y entrega antecedentes suficientes para el diseño y construcción de una infraestructura adecuada para la implementación del método de ensayo adecuado a la medición de la carbonización unidimensional.

Resulta importante reiterar que en la recopilación de antecedentes internacionales, referentes a países que presentan un desarrollo importante en temas de construcción en madera y su respuesta frente al fuego, no se encontró referencias a un procedimiento normativo relacionado con criterios unificados o de consenso para medir la tasa de carbonización. A lo más se exige que las muestras a ensayar queden expuestas a una curva de incendio estándar. Es por ello que el objetivo impuesto en el punto 1.1.2 se satisface sólo en cuanto a métodos experimentales empleados en distintas investigaciones según sus autores, y no siguiendo una estructura definida por una norma oficial.

## GLOSARIO

- **Albura:** Capa blanda de la madera, de color más claro y que corresponde a los últimos anillos de crecimiento del árbol, se encuentra alrededor del duramen.
- **Aislante térmico:** Material o elemento resistente a las altas temperaturas que dificulta o impide el flujo de calor a través de él<sup>24</sup>.
- **Carbonización:** Proceso de descomposición químico y físico de la madera producto de su exposición a altas temperaturas.
- **Comburente:** Sustancia que proporciona el elemento químico necesario para que se produzca la combustión de un combustible<sup>23</sup>.
- **Combustible:** Elemento capaz de entrar en combustión en presencia de un comburente<sup>23</sup>.
- **Conductividad térmica:** Capacidad de un elemento de conducir o permitir el flujo de calor a través de él<sup>23</sup>.
- **Duramen:** Zona central del tronco de un árbol que se encuentra rodeada por la albura. Es más densa y dura que esta última y posee un color más oscuro.
- **Ensayo:** Procedimiento de laboratorio para determinar ciertas propiedades de algún material por medio de una probeta representativa de él.
- **Horno:** Equipo capaz de producir y almacenar calor en él.
- **Ignición:** Proceso en el cual un combustible no necesita de una fuente externa para mantener la reacción química de combustión.
- **Incendio:** Combustión producida por un fuego que se descontrola<sup>23</sup>.

---

<sup>24</sup> INN (CHILE). Prevención de incendio en Edificios – Terminología. NCh 933. Of97. Santiago, Chile. 1999, 17 p.

- **Pirólisis:** Descomposición físico-química de la madera debido al calor.
- **Probeta:** Pieza representativa de un material, destinada a ser sometida a pruebas mecánicas o de otro tipo para estudiar alguna propiedad.
- **Punto de saturación de la fibra:** Estado de humedad de la madera en el cual las paredes celulares se encuentran saturadas de agua.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1].- INN (CHILE). Prevención de incendio en edificios – Ensayo de resistencia al fuego – Parte 1: Elementos de construcción en general. NCh 935-1. Of 1997. Santiago, Chile, 1997, 29p.
- [2].- MINISTERIO de Vivienda y Urbanismo (Chile). Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. Actualizada a Abril de 2011.
- [3].-DIN (Deutsches Institut für Normung) (GERMANY). Fire behaviour of building materials and elements. Part 1: Classification of building materials – Requirements and testing. DIN 1402-1: 1998.
- [4].- EUROPEAN STANDARD. Fire classification of construction products and building elements. Part 1: Classification using data from reaction to fire tests.. EN 13501-1: 2002. 53p.
- [5].- FONSECA, E. M .M. y Barreira, L. M. S. Charring rate determination of Wood pine profiles submitted to high temperatures. Polytechnic Institute of Brangña. Portugal, 2009.
- [6].-RAMÍREZ C., Alejandro. Comportamiento de la madera frente al fuego y su protección. Tesis (Ingeniero Civil). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2001.
- [7].-SCHAFFER, E.L. Structural fire design: Wood Research Note. FPL 450. Forest Products Laboratory. U.S. Department of Agriculture, 1984.
- [8].-HADVIG, S. Charring of Wood in building fires. Technical report. Technical University of Denmark. Lynby 1981.
- [9].- EUROPEAN STANDARD. Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural Fire design. EN 1995-1-2: 2004. 69p.
- [10].- WAGNER M., Mario. CI-5224-1. Diseño y Construcción en Madera. El agua en la madera. [Diapositiva]. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 2013.



- [11].-INN (CHILE). Madera – Construcción en madera – Cálculo. NCh 1198 Of2006. Santiago, Chile, 2006, 213p.
- [12].-FOREST Products Laboratory. Wood Handbook- Wood as an engineering material. General Technical Report FPL-GTR-190. Centennial ed. Madison, WI, USA, Department of Agriculture. 2010, 508p.
- [13].- VIGNOTE P., Santiago y Martínez R., Isaac. Tecnología de la madera. 3ª ed., Madrid, Ediciones Mundi-Prensa, 2006. 678p.
- [14].-COLLIER, P.C.R. Charring Rates of Timber.Study Report No.42. Nueva Zelanda, 1992.
- [15].- GARDNER, W.D. y Syme, D.R. Charring of Glued-Laminated beams of eight Australian-grown timber species and the effect of 13mm gypsum plasterboard protection on their charring. Sydney, 1991.
- [16].- WHITE, R y Norheim, E. Charring Rate of Wood for ASTM E 119 Exposure. Madison, 1992.
- [17].- LIGENS, Albert. Untersuchung des Abbrandes und der Brandgase ausgewählter Holzarten in Abhängigkeit vom chemischen und strukturellen Holzaufbau. Tesis (Doctorado). Munich, Alemania. Universidad de Munich, 2003.
- [18].- DIN (Deutsches Institut für Normung) (GERMANY). Fire behaviour of building materials and elements. Part 8: Small-scale test furnace. DIN 1402-8: 2003. 4p.
- [19].-ISO. Fire resistance test- Elements of building construction. ISO 834: 2012.
- [20].- BORGER, Alexander. Termopares. [en línea].  
<<http://www.industriaynegocios.cl/Academicos/AlexanderBorger/Docts%20Docencia/Seminario%20de%20Aut/trabajos/2001/Automatizaci%C3%B3n/termopar.htm>>.  
[consulta: 19 mayo 2015].
- [21].- GEMISA. Sondas de temperatura. [en línea].  
<<http://www.gemisa.com/hrtemp/docus/sondas>>. [consulta: 23 abril 2015].
- [22].- INN (CHILE). Madera. Determinación de la humedad. NCh 176-1. Of.2009. 12p.

[23].- INN (CHILE). Madera. Determinación de la densidad. NCh 176-2. Of.1986. Mod. 1988. 12p.

[24].- INN (CHILE). Prevención de incendio en Edificios – Terminología. NCh 933. Of97. Santiago, Chile. 1999, 17 p.

## ANEXOS

### A. Anexos Marco Teórico.

**Tabla A.1.1** “Tipo de Edificio según superficie edificada”

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

Fuente: TABLA 1, OGUC 2011.

**Tabla A.1.2 “Tipo de Edificio según máximo de ocupantes”**

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

Fuente: TABLA 2, OGUC 2011.

**Tabla A.1.3 “Tipo de Edificio según densidad de carga combustible”**

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

1MJ/m<sup>2</sup> = 238.85 kcal/m<sup>2</sup>

1 MJ = 0.053 kg madera equivalente de 4.000 kcal/kg

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

Fuente: TABLA 2, OGUC 2011.

## B. Anexos Antecedentes.

### B.1.1.- Anexos Gardner y Syme (1991).

**Tabla A.2.1** “Rango, promedio y desviación estándar de la densidad de las especies ensayadas, Gardner y Syme (1991)”

	Density, kg/m <sup>3</sup>		
	Range	Mean	S.D.
Blackbutt	827 - 986	939	48
Blue gum	780 - 1049	968	96
Brush box	787 - 843	819	23
Cypress pine	630 - 720	666	37
Jarraah	706 - 961	846	83
Radiata pine	443 - 565	526	37
Spotted gum	823 - 958	901	65
Victorian ash	568 - 739	659	58

Fuente: Gardner y Syme 1991.

**Tabla A.2.2** “Rango, promedio y desviación estándar del contenido de humedad de las muestras de las especies ensayadas, Gardner y Syme (1991)”

	Moisture content, %		
	Range	Mean	S.D.
Blackbutt	10.9 - 12.7	12.2	0.6
Blue gum	12.8 - 15.0	14.1	0.8
Brush box	10.7 - 11.8	11.4	0.3
Cypress pine	10.2 - 11.4	10.9	0.5
Jarraah	11.2 - 12.9	12.0	0.5
Radiata pine	8.3 - 9.9	9.2	0.6
Spotted gum	11.5 - 12.4	12.0	0.2
Victorian ash	10.3 - 10.7	10.5	0.2

Fuente: Gardner y Syme 1991.

**Tabla A.2.3** “Profundidad de carbonización y tasa de carbonización de probetas de especies ensayadas .Método Sección Residual, Gardner y Syme (1991)”

Species/ Furnace exposure	Char depth, mm		Char rate, mm/min.	
	Side	Base	Side	Base
<b>Blackbutt</b>				
1A	32.0	35.0	0.5	0.6
2BP	28.6	45.0	0.2	0.4
<b>Blue gum</b>				
1A	29.4	29.0	0.5	0.5
2BP	26.1	41.0	0.2	0.3
<b>Brush box</b>				
1A	32.7	32.0	0.6	0.5
2BP	27.9	31.0	0.2	0.3
<b>Cypress pine</b>				
1A	37.3	35.0	0.6	0.6
2BP	37.2	48.0	0.3	0.4
<b>Jarrah</b>				
1A	32.0	39.0	0.5	0.7
2BP	32.0	39.0	0.3	0.3
<b>Radiata pine</b>				
1A	55.5	47.0	0.9	0.8
1B	47.6	35.0	0.8	0.6
2BP	52.8	48.0	0.4	0.4
<b>Spotted gum</b>				
1A	31.6	29.0	0.5	0.5
2BP	29.6	32.0	0.3	0.3
<b>Victorian ash</b>				
1A	37.2	25.0	0.6	0.4
2BP	38.5	39.0	0.3	0.3

Fuente: Gardner y Syme 1991.

**Tabla A.2.4** “Valores de Regresión Lineal para ensayos de probetas de las especies ensayadas, Gardner y Syme (1991)”

Species	Furnace exposure	a	b	R <sup>2</sup>	n	p
Blackbutt	1A	0.44	3.8	0.97	5	<0.0003
Blue gum	1A	0.52	2.2	0.99	5	<0.0001
Brush box	1A	0.53	3.6	0.98	5	<0.0001
Cypress pine	1A	0.61	3.2	0.98	9	<0.0001
Jarraah	1A	0.54	2.9	0.97	5	<0.0003
Radiata pine	1A	0.92	2.3	0.99	9	<0.0001
Spotted gum	1A	0.68	2.0	0.99	7	<0.0001
Victorian ash	1A	0.55	3.1	0.97	6	<0.0001
Blackbutt	2B	0.39	2.8	0.99	8	<0.0001
Blue gum	2B	0.44	0.4	0.98	7	<0.0001
Brush box	2B	0.44	3.0	0.99	9	<0.0001
Cypress pine	2B	0.49	3.6	0.99	11	<0.0001
Jarraah	2B	0.45	2.1	0.99	9	<0.0001
Radiata pine	1B	0.83	0.8	0.98	9	<0.0001
Spotted gum	2B	0.62	0.1	0.99	13	<0.0001
Victorian ash	2B	0.55	0.5	0.96	11	<0.0001
Blackbutt	2BP	0.24	-5.2	0.99	3	<0.004
Blue gum	2BP	0.25	-5.4	0.99	3	<0.0004
Brush box	2BP	0.28	-5.6	0.97	4	<0.002
Cypress pine	2BP	0.32	-5.6	0.98	4	<0.002
Jarraah	2BP	0.25	-3.5	0.99	4	<0.0007
Radiata pine	2BP	0.48	-9.1	0.97	8	<0.0001
Spotted gum	2BP	0.29	-7.2	0.98	4	<0.001
Victorian ash	2BP	0.38	-10.0	0.98	6	<0.0001

Fuente: Gardner y Syme 1991.

**B.1.2.- Anexos Collier, P.C.R. (1992).**

**Tabla A.2.5** “Resultados ensayo 1, probetas expuestas durante los primeros 29 minutos, Collier (1992)”.

Species	Density oven-dry (kg/m <sup>3</sup> )	Moisture Content (%)	Predicted Charring Rate (mm/min)	Actual Charring Rate (mm/min)	Exposure Period (minutes)
Radiata pine	455	0	0.94	0.76	0-29
Radiata pine	621	0	0.80	0.52	0-29
Radiata pine	424	21	0.72	0.67	0-29
Radiata pine	522	14	0.72	0.52	0-29
Radiata pine	565	17	0.67	0.63	0-29
Douglas fir	534	23	0.56	0.55	0-29
<b>Glulam</b>					
Radiata pine (b)	500	12	0.66	0.52	0-29
Radiata pine (a)	500	12	0.66	0.59	0-29
Radiata pine (c)	500	12	0.66	0.59	0-29

(a) exposure parallel to laminates  
 (b) exposure perpendicular to laminates (200 mm in length)  
 (c) exposure perpendicular to laminates (100 mm in length)

Fuente: Collier 1992.

**Tabla A.2.6** “Resultados ensayo 1, probetas expuestas durante los 31 minutos restantes, Collier (1992)”

Species	Density oven-dry kg/m <sup>3</sup>	Moisture Content %	Predicted Charring Rate mm/min	Actual Charring Rate mm/min	Exposure Period minutes
Radiata pine	504	0	0.88	1.23	31-60
Radiata pine	559	0	0.84	0.84	31-60
Radiata pine	513	21	0.65	0.57	31-60
Douglas fir	523	24	0.53	0.55	31-60
Radiata pine	528	15	0.70	0.74	31-60
Radiata pine	625	19	0.80	0.57	31-60
<b>Glulam</b>					
Radiata pine (a)	500	12	0.65	0.97	31-60
Radiata pine (c)	500	12	0.65	0.87	31-60
Radiata pine (b)	500	12	0.65	0.97	31-60

(a) exposure parallel to laminates  
 (b) exposure perpendicular to laminates (200 mm in length)  
 (c) exposure perpendicular to laminates (100 mm in length)

Fuente: Collier 1992.



**Tabla A.2.7** “Resultados ensayo 1, probetas expuestas durante los 60 minutos, Collier (1992)”.

Species	Density oven-dry (kg/m <sup>3</sup> )	Moisture Content (%)	Predicted Charring Rate (mm/min)	Actual Charring Rate (mm/min)	Exposure Period (minutes)
Radiata pine	409	0	0.77	0.80	0-60
Radiata pine	483	0	0.71	0.72	0-60
Radiata pine *1	544	0	0.75	0.93	0-60
Douglas fir	372	15	0.65	0.68	0-60
Radiata pine *4	407	21	0.54	0.60	0-60
Radiata pine	516	16	0.52	0.58	0-60
Radiata pine	522	16	0.62	0.60	0-60
Douglas fir	536	24	0.48	0.48	0-60
Douglas fir *3	550	16	0.53	0.57	0-60
Radiata pine *2	620	20	0.53	0.53	0-60
End grain (d)					
Radiata pine	550	12	0.63	0.60	0-60
Radiata pine	550	12	0.63	0.59	0-60
Radiata pine	550	21	0.56	0.56	0-60
Radiata pine	550	21	0.56	0.56	0-60
CCA treated timber					
Radiata pine H3	550	15	0.61	0.60	0-60
Radiata pine H5 *5	550	13	0.62	0.53	0-60
Glulam					
Radiata pine *6(c)	500	12	0.57	0.63	0-60
Radiata pine *7(b)	500	12	0.57	0.57	0-60
Radiata pine (a)	500	12	0.57	0.62	0-60

(a) exposure parallel to laminates  
 (b) exposure perpendicular to laminates (200 mm in length)  
 (c) exposure perpendicular to laminates (100 mm in length)  
 (d) exposure on end grain  
 \* samples instrumented with two thermocouples at 18 mm and 36 mm depth

Fuente: Collier 1992.

**Tabla A.2.8** “Resultados ensayo 1, probetas equipadas con termocuplas, Collier (1992)”.

Sample No	density kg/m <sup>3</sup>	moisture content %	mean charring rate mm/min thermocouple at depths of		charring rate at 1 hour
			18 mm	36 mm	
*1	544	0	0.90	0.92	0.93
*2	620	20	0.45	-	0.51
*3	550	16	0.58	0.61	0.57
*4	407	21	0.49	-	0.60
*5	550	13	0.67	0.61	0.53
*6	500	12	0.73	0.73	0.63
*7	500	12	0.67	0.60	0.57

\* samples instrumented with two thermocouples at 18 mm and 36 mm depth  
 Note - where a charring rate is not shown for the thermocouples at 36 mm, the temperature at that depth had not exceeded 300°C.

Fuente: Collier 1992.

**Tabla A.2.9** “Resultados ensayo 2, probetas de MLE de Pino Radiata, Collier (1992)”.

Glulam Charring Measurements			
Location	Depth of thermocouples (mm)	Charring Rates (mm/min)	
		Mean	Range
Left side	18	0.75	(0.69-0.82)
Right side	18	0.75	(0.73-0.77)
Left side	36	0.68	(0.55-0.80)*
Right side	36	0.87	(0.63-1.04)*
Narrow edge	36	0.75	(0.61-0.86)
Weighted mean for whole of specimen		0.77	(0.55-1.04)

\* glue lines represented by upper end of range.

Fuente: Collier 1992.

**B.1.3.- Anexos White & Nordheim (1992).**

**Tabla A.2.10** “Tasas de carbonización y propiedades de especies utilizadas en ensayos”

*Table 2: Average char rates and properties of species used in the factorial experimental design.\**

Species	Reciprocal of char rate m <sup>b</sup>		Char contraction factor	Klason lignin (%)	Density <sup>c</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	Depth of penetration (mm)
	Equation (8) (min/mm <sup>1.25</sup> )	Equation (1) (min/mm)				
<b>Softwoods</b>						
Engelmann spruce	0.7338 (A)	1.32 (A)	0.895 (A)	27.3	0.425 (C)	3 (C)
Western red cedar	0.5541 (C,D)	1.22 (C,D)	0.784 (B)	33.2	0.310 (E)	3 (C)
Southern pine	0.5547 (C,D)	1.23 (C,D)	0.589 (D)	27.9	0.509 (B)	31 (B)
Redwood	0.6976 (B,C)	1.32 (B,C)	0.862 (A)	37.1	0.343 (D,E)	4 (C)
<b>Hardwoods</b>						
Hard maple	0.6550 (B)	1.44 (B)	0.594 (D)	22.4	0.691 (A)	47 (A)
Yellow poplar	0.6068 (B,C)	1.34 (B,C)	0.672 (C)	21.3	0.504 (B)	5 (C)
Red oak	0.7470 (A)	1.35 (A)	0.703 (C)	24.5	0.654 (A)	3 (C)
Basswood	0.4050 (D)	1.10 (D)	0.542 (D)	19.8	0.398 (C,D)	30 (B)

\*Means with the same letter are not significantly different based on Duncan's multiple range test.  
<sup>b</sup>Mean of results with different moisture contents.  
<sup>c</sup>Based on weight and volume oven-dried.

Fuente : White y Nordheim 1992.

**B.1.4.- Anexos Ligens, Albert (2003).**

**Tabla A.2.11** “Resultados velocidad de carbonización dos métodos, Ligens (2003)”

Especie	Densidad		Velocidad de carbonización			
	Literatura	Valor determinado	Medición Continua	N°	Medición	N°
				muestras pequeñas	después de ensayo	muestras pequeñas
[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[mm/min]		[mm/min]		
Picea	0.43	0.40 - 0.51	0.72 - 0.79	3	0.67 - 0.80	6
Pino (núcleo)	0.49	0.39 - 0.54	0.60 - 0.63	2	0.68 - 0.73	3
Pino (Albura)	0.49	0.46	0.89	1	0.80 - 0.92	2
Alerce	0.55	0.59	0.74	1	0.70 - 0.76	3
Haya	0.68	0.65 - 0.76	0.78 - 0.89	4	0.76 - 0.91	5
Arce	0.59 / 0.62	0.57 - 0.63	0.90 - 1.00	3	0.89 - 1.00	5
Roble	0.65	0.65 - 0.72	0.66 - 0.77	3	0.68 - 0.73	5

Fuente: Ligens 2003.

## C. Anexos Procedimiento.

### C.1.1. Contenido de Humedad ensayo realizado.

**Tabla A.3.1** “Mediciones de masa para determinar Contenido de humedad Probeta PC3”

P31				P32			
$\Delta t$ [min]	Tiempo [min]	Peso [gr]	$\Delta$ Peso [%]	$\Delta t$ [min]	Tiempo [min]	Peso [gr]	$\Delta$ Peso [%]
0	0	527.94		0	0	469.92	
30	30	512.61	2.9	30	30	454.38	3.3
50	80	496.73	3.1	50	80	442.84	2.5
60	140	486.40	2.1	60	140	432.19	2.4
60	200	482.18	0.9	60	200	428.64	0.8
60	260	476.79	1.1	60	260	420.35	1.9
60	320	476.20	0.1	60	320	420.06	0.1
60	380	475.70	0.1	60	380	419.50	0.1
$\Delta H =$			9.90%	$\Delta H =$			10.73%
P33				P34			
$\Delta t$ [min]	Tiempo [min]	Peso [gr]	$\Delta$ Peso [%]	$\Delta t$ [min]	Tiempo [min]	Peso [gr]	$\Delta$ Peso [%]
0	0	464.05		0	0	519.28	
30	30	448.56	3.3	30	30	510.56	1.7
50	80	434.84	3.1	50	80	488.13	4.4
60	140	424.43	2.4	60	140	478.17	2.0
60	200	420.16	1.0	60	200	472.58	1.2
60	260	414.59	1.3	60	260	464.79	1.6
60	320	413.85	0.2	60	320	464.05	0.2
60	380	413.30	0.1	60	380	463.74	0.1
$\Delta H =$			10.94%	$\Delta H =$			10.70%

**Tabla A.3.2** “Mediciones de masa para determinar Contenido de humedad Probeta PC4”

P41				P42			
$\Delta t$ [min]	Tiempo [min]	Peso [gr]	$\Delta$ Peso [%]	$\Delta t$ [min]	Tiempo [min]	Peso [gr]	$\Delta$ Peso [%]
0	0	534.92		0	0	526.08	
30	30	515.73	3.6	30	30	510.82	2.9
50	80	503.46	2.4	50	80	496.73	2.8
60	140	490.72	2.5	60	140	484.95	2.4
60	200	480.29	2.1	60	200	480.43	0.9
60	260	474.34	1.2	60	260	474.21	1.3
60	320	472.84	0.3	60	320	472.24	0.4
60	380	472.02	0.2	60	380	472.06	0.0
			$\Delta H = 11.76\%$				$\Delta H = 10.27\%$
P43				P44			
$\Delta t$ [min]	Tiempo [min]	Peso [gr]	$\Delta$ Peso [%]	$\Delta t$ [min]	Tiempo [min]	Peso [gr]	$\Delta$ Peso [%]
0	0	530.09		0	0	547.93	
30	30	510.46	3.7	30	30	530.27	3.2
50	80	498.94	2.3	50	80	514.93	2.9
60	140	484.51	2.9	60	140	502.72	2.4
60	200	480.73	0.8	60	200	498.72	0.8
60	260	478.34	0.5	60	260	490.65	1.6
60	320	477.68	0.1	60	320	489.64	0.2
60	380	476.12	0.3	60	380	488.35	0.3
			$\Delta H = 10.18\%$				$\Delta H = 10.87\%$

**Tabla A.3.3** “Mediciones de masa para determinar Contenido de humedad Probeta PC1”

P11				P12			
$\Delta t$ [min]	Tiempo [min]	Peso [gr]	$\Delta$ Peso [%]	$\Delta t$ [min]	Tiempo [min]	Peso [gr]	$\Delta$ Peso [%]
0	0	551.22		0	0	503.84	
30	30	535.25	2.9	30	30	486.71	3.4
50	80	525.59	1.8	50	80	477.89	1.8
60	140	505.17	3.9	60	140	469.63	1.7
60	200	499.57	1.1	60	200	466.98	0.6
60	260	498.83	0.1	60	260	465.78	0.3
60	320	498.09	0.1	60	320	465.05	0.2
60	380	497.73	0.1	60	380	464.76	0.1
			$\Delta H = 9.70\%$				$\Delta H = 7.76\%$
P13				P14			
$\Delta t$ [min]	Tiempo [min]	Peso [gr]	$\Delta$ Peso [%]	$\Delta t$ [min]	Tiempo [min]	Peso [gr]	$\Delta$ Peso [%]
0	0	471.49		0	0	532.09	
30	30	456.92	3.1	30	30	511.87	3.8
50	80	444.57	2.7	50	80	493.83	3.5
60	140	437.65	1.6	60	140	476.98	3.4
60	200	427.89	2.2	60	200	464.59	2.6
60	260	419.11	2.1	60	260	456.58	1.7
60	320	416.21	0.7	60	320	454.14	0.5
60	380	415.68	0.1	60	380	453.75	0.1
			$\Delta H = 11.84\%$				$\Delta H = 14.72\%$

**Tabla A.3.4** “Mediciones de masa para determinar Contenido de humedad Probeta PC2”

P21				P22			
$\Delta t$ [min]	Tiempo [min]	Peso [gr]	$\Delta$ Peso [%]	$\Delta t$ [min]	Tiempo [min]	Peso [gr]	$\Delta$ Peso [%]
0	0	518.51		0	0	479	
30	30	498.73	3.8	30	30	463.82	3.2
50	80	484.46	2.9	50	80	451.73	2.6
60	140	471.72	2.6	60	140	439.95	2.6
60	200	458.29	2.8	60	200	432.43	1.7
60	260	449.94	1.8	60	260	425.21	1.7
60	320	449.03	0.2	60	320	424.59	0.1
60	380	448.48	0.1	60	380	424.05	0.1
$\Delta H = 13.51\%$				$\Delta H = 11.47\%$			
P23				P24			
$\Delta t$ [min]	Tiempo [min]	Peso [gr]	$\Delta$ Peso [%]	$\Delta t$ [min]	Tiempo [min]	Peso [gr]	$\Delta$ Peso [%]
0	0	498.94		0	0	533.79	
30	30	481.44	3.5	30	30	509.19	4.6
50	80	464.94	3.4	50	80	491.50	3.5
60	140	449.51	3.3	60	140	477.65	2.8
60	200	439.73	2.2	60	200	466.45	2.3
60	260	434.34	1.2	60	260	460.92	1.2
60	320	433.23	0.3	60	320	460.00	0.2
60	380	432.64	0.1	60	380	459.54	0.1
$\Delta H = 13.29\%$				$\Delta H = 13.91\%$			

**Tabla A.3.5** “Mediciones de masa para determinar Contenido de humedad Probetas macizas PM3 y PM4”

PM3				PM4			
$\Delta t$ [min]	Tiempo [min]	Peso [gr]	$\Delta$ Peso [%]	$\Delta t$ [min]	Tiempo [min]	Peso [gr]	$\Delta$ Peso [%]
0	0	4807.23		0	0	4768.79	
30	30	4735.68	1.5	30	30	4657.28	2.3
50	80	4679.35	1.2	50	80	4497.65	3.4
60	140	4549.72	2.8	60	140	4237.72	5.8
60	200	4356.97	4.2	60	200	4191.28	1.1
60	260	4187.25	3.9	60	260	4165.52	0.6
60	320	4184.46	0.1	60	320	4144.53	0.5
60	380	4182.36	0.1	60	380	4134.67	0.2
$\Delta H = 13.00\%$				$\Delta H = 13.30\%$			

**Tabla A.3.6** “Mediciones de masa para determinar Contenido de humedad Probetas macizas PM1 y PM2”

PM1				PM2			
$\Delta t$ [min]	Tiempo [min]	Peso [gr]	$\Delta$ Peso [%]	$\Delta t$ [min]	Tiempo [min]	Peso [gr]	$\Delta$ Peso [%]
0	0	4250.55		0	0	4623.47	
30	30	4156.45	2.2	30	30	4550.97	1.6
50	80	4023.87	3.2	50	80	4428.04	2.7
60	140	3906.67	2.9	60	140	4261.83	3.8
60	200	3807.67	2.5	60	200	4117.71	3.4
60	260	3733.01	2.0	60	260	4021.20	2.3
60	320	3714.44	0.5	60	320	4017.19	0.1
60	380	3710.73	0.1	60	380	4013.17	0.1
$\Delta H = 12.70\%$				$\Delta H = 13.20\%$			

**C.1.2. Densidad en ensayo realizado.**

**Tabla A.3.7 “Dimensiones Probeta PC3 estado húmedo”**

Mini Probeta	Altura [mm]	Largo [mm]	Espesor [mm]	Peso [gr]	
P 31	h1 = 111.35	L1 = 201.00	e1 = 55.40	P1 = 527.88	Vol = 1225.16 [cm3]
	h2 = 111.35	L2 = 200.90	e2 = 55.00	P2 = 527.93	Peso = 527.94 [gr]
	h3 = 111.20	L3 = 201.00	e3 = 54.40	P3 = 528.01	Dens. = 0.431 [gr/cm3]
	h4 = 110.70	L4 = 200.20	e4 = 54.80		
	111.15	200.78	54.90	527.94	
P 32	h1 = 110.00	L1 = 203.00	e1 = 56.00	P1 = 469.86	Vol = 1254.90 [cm3]
	h2 = 111.30	L2 = 203.00	e2 = 55.60	P2 = 470.01	Peso = 469.92 [gr]
	h3 = 111.40	L3 = 202.80	e3 = 55.90	P3 = 469.90	Dens. = 0.374 [gr/cm3]
	h4 = 111.20	L4 = 202.90	e4 = 55.40		
	110.98	202.93	55.73	469.92	
P 33	h1 = 110.50	L1 = 202.00	e1 = 54.80	P1 = 464.12	Vol = 1237.44 [cm3]
	h2 = 110.75	L2 = 202.10	e2 = 55.30	P2 = 464.09	Peso = 464.05 [gr]
	h3 = 110.90	L3 = 202.00	e3 = 55.50	P3 = 463.95	Dens. = 0.375 [gr/cm3]
	h4 = 111.10	L4 = 202.00	e4 = 55.50		
	110.81	202.03	55.28	464.05	
P 34	h1 = 111.50	L1 = 201.80	e1 = 55.30	P1 = 518.89	Vol = 1262.71 [cm3]
	h2 = 111.40	L2 = 202.20	e2 = 56.00	P2 = 518.85	Peso = 519.28 [gr]
	h3 = 111.50	L3 = 202.10	e3 = 56.40	P3 = 520.10	Dens. = 0.411 [gr/cm3]
	h4 = 111.45	L4 = 202.00	e4 = 56.60		
	111.46	202.03	56.08	519.28	

**Tabla A.3.8 “Dimensiones Probeta PC3 estado seco”**

Mini Probeta	Altura [mm]	Largo [mm]	Espesor [mm]	Peso [gr]	
P 31	h1 = 110.35	L1 = 200.50	e1 = 54.40	P1 = 475.7	Vol = 1202.63 [cm3]
	h2 = 110.85	L2 = 199.90	e2 = 54.50		Peso = 475.70 [gr]
	h3 = 110.20	L3 = 200.50	e3 = 53.40		Dens. = 0.396 [gr/cm3]
	h4 = 109.70	L4 = 200.20	e4 = 53.80		
	111.15	200.28	54.03	475.70	
P 32	h1 = 109.50	L1 = 202.50	e1 = 55.00	P1 = 419.5	Vol = 1230.63 [cm3]
	h2 = 110.30	L2 = 202.50	e2 = 55.10		Peso = 419.50 [gr]
	h3 = 110.90	L3 = 201.80	e3 = 54.90		Dens. = 0.341 [gr/cm3]
	h4 = 111.20	L4 = 201.90	e4 = 54.40		
	110.98	202.18	54.85	419.50	
P 33	h1 = 110.00	L1 = 201.00	e1 = 54.30	P1 = 413.3	Vol = 1220.93 [cm3]
	h2 = 109.75	L2 = 201.60	e2 = 54.30		Peso = 413.30 [gr]
	h3 = 110.40	L3 = 201.00	e3 = 55.00		Dens. = 0.339 [gr/cm3]
	h4 = 111.10	L4 = 201.00	e4 = 55.50		
	110.81	201.15	54.78	413.3	
P 34	h1 = 110.50	L1 = 200.80	e1 = 54.80	P1 = 463.74	Vol = 1246.80 [cm3]
	h2 = 110.90	L2 = 201.20	e2 = 55.00		Peso = 463.74 [gr]
	h3 = 110.50	L3 = 201.60	e3 = 55.90		Dens. = 0.372 [gr/cm3]
	h4 = 110.45	L4 = 201.50	e4 = 56.60		
	111.46	201.28	55.58	463.74	



**Tabla A.3.9 “Dimensiones Probeta PC4 estado húmedo”**

Mini Probeta	Altura [mm]	Largo [mm]	Espesor [mm]	Peso [gr]	
P 41	h1 = 110.75	L1 = 200.1	e1 = 55.4	P1 = 534.95	Vol = 1225.08 [cm3]
	h2 = 111.35	L2 = 200.5	e2 = 54.9	P2 = 535.00	Peso = 534.92 [gr]
	h3 = 110.9	L3 = 200.3	e3 = 55.2	P3 = 534.82	Dens. = 0.437 [gr/cm3]
	h4 = 111.1	L4 = 200.5	e4 = 54.8		
	111.03	200.35	55.075	534.92	
P 42	h1 = 111.9	L1 = 200.3	e1 = 56	P1 = 526.08	Vol = 1231.87 [cm3]
	h2 = 111.3	L2 = 200.5	e2 = 54.9	P2 = 526.10	Peso = 526.08 [gr]
	h3 = 111.2	L3 = 200.5	e3 = 55.4	P3 = 526.05	Dens. = 0.427 [gr/cm3]
	h4 = 110.6	L4 = 200	e4 = 54.8		
	111.25	200.33	55.275	526.08	
P 43	h1 = 111	L1 = 202.1	e1 = 55.2	P1 = 530.15	Vol = 1233.20 [cm3]
	h2 = 110.95	L2 = 201.8	e2 = 54.7	P2 = 529.90	Peso = 530.09 [gr]
	h3 = 111.2	L3 = 201.9	e3 = 55	P3 = 530.21	Dens. = 0.430 [gr/cm3]
	h4 = 110.9	L4 = 202.1	e4 = 55.1		
	111.01	201.98	55	530.09	
P 44	h1 = 112.4	L1 = 202.7	e1 = 55.1	P1 = 548.03	Vol = 1246.82 [cm3]
	h2 = 112.2	L2 = 203	e2 = 54.85	P2 = 547.85	Peso = 547.93 [gr]
	h3 = 112.2	L3 = 203	e3 = 54.2	P3 = 547.92	Dens. = 0.439 [gr/cm3]
	h4 = 111.8	L4 = 201.5	e4 = 55.4		
	112.15	202.55	54.888	547.93	

**Tabla A.3.10 “Dimensiones Probeta PC4 estado seco”**

Mini Probeta	Altura [mm]	Largo [mm]	Espesor [mm]	Peso [gr]	
P 41	h1 = 109.75	L1 = 199.60	e1 = 54.40	P1 = 472.02	Vol = 1204.63 [cm3]
	h2 = 110.85	L2 = 199.50	e2 = 54.40		Peso = 472.02 [gr]
	h3 = 109.90	L3 = 199.30	e3 = 54.70		Dens. = 0.392 [gr/cm3]
	h4 = 110.10	L4 = 200.50	e4 = 53.80		
	111.03	199.73	54.33	472.02	
P 42	h1 = 111.40	L1 = 199.80	e1 = 55.50	P1 = 472.06	Vol = 1216.15 [cm3]
	h2 = 110.30	L2 = 200.00	e2 = 53.90		Peso = 472.06 [gr]
	h3 = 110.70	L3 = 199.50	e3 = 54.90		Dens. = 0.388 [gr/cm3]
	h4 = 110.60	L4 = 199.00	e4 = 54.80		
	111.25	199.58	54.78	472.06	
P 43	h1 = 110.50	L1 = 201.60	e1 = 54.20	P1 = 476.12	Vol = 1205.53 [cm3]
	h2 = 109.95	L2 = 200.80	e2 = 53.70		Peso = 476.12 [gr]
	h3 = 110.70	L3 = 200.90	e3 = 54.00		Dens. = 0.395 [gr/cm3]
	h4 = 110.90	L4 = 201.10	e4 = 54.10		
	111.01	201.10	54.00	476.12	
P 44	h1 = 111.40	L1 = 201.70	e1 = 54.60	P1 = 488.35	Vol = 1228.06 [cm3]
	h2 = 111.70	L2 = 202.00	e2 = 53.85		Peso = 488.35 [gr]
	h3 = 111.20	L3 = 202.50	e3 = 53.20		Dens. = 0.398 [gr/cm3]
	h4 = 110.80	L4 = 201.00	e4 = 55.40		
	112.15	201.80	54.26	488.35	

**Tabla A.3.11 “Dimensiones Probeta PC1 estado húmedo”**

Mini Probeta	Altura [mm]	Largo [mm]	Espesor [mm]	Peso [gr]	
P 11	h1 = 111.20	L1 = 200.20	e1 = 55.30	P1 = 551.43	Vol = 1229.06 [cm3]
	h2 = 110.90	L2 = 201.00	e2 = 54.90	P2 = 550.90	Peso = 551.22 [gr]
	h3 = 111.10	L3 = 200.80	e3 = 55.10	P3 = 551.34	Dens. = 0.448 [gr/cm3]
	h4 = 111.40	L4 = 201.10	e4 = 55.00		
	111.15	200.78	55.08	551.22	
P 12	h1 = 109.90	L1 = 200.30	e1 = 55.90	P1 = 503.43	Vol = 1220.32 [cm3]
	h2 = 109.80	L2 = 201.40	e2 = 55.30	P2 = 504.12	Peso = 503.84 [gr]
	h3 = 110.10	L3 = 201.70	e3 = 54.80	P3 = 503.98	Dens. = 0.413 [gr/cm3]
	h4 = 110.40	L4 = 200.50	e4 = 54.70		
	110.05	200.98	55.18	503.84	
P 13	h1 = 109.70	L1 = 201.40	e1 = 55.00	P1 = 471.37	Vol = 1228.99 [cm3]
	h2 = 110.00	L2 = 201.40	e2 = 55.20	P2 = 470.97	Peso = 471.49 [gr]
	h3 = 110.20	L3 = 201.30	e3 = 55.80	P3 = 472.12	Dens. = 0.384 [gr/cm3]
	h4 = 109.90	L4 = 201.50	e4 = 56.00		
	109.95	201.40	55.50	471.49	
P 14	h1 = 111.10	L1 = 201.70	e1 = 54.60	P1 = 531.93	Vol = 1229.01 [cm3]
	h2 = 111.20	L2 = 201.90	e2 = 54.90	P2 = 532.11	Peso = 532.09 [gr]
	h3 = 110.90	L3 = 202.10	e3 = 55.30	P3 = 532.23	Dens. = 0.433 [gr/cm3]
	h4 = 110.90	L4 = 201.20	e4 = 54.70		
	111.03	201.73	54.88	532.09	

**Tabla A.3.12 “Dimensiones Probeta PC1 estado seco”**

Mini Probeta	Altura [mm]	Largo [mm]	Espesor [mm]	Peso [gr]	
P 11	h1 = 110.20	L1 = 199.70	e1 = 54.30	P1 = 497.73	Vol = 1206.52 [cm3]
	h2 = 110.40	L2 = 200.00	e2 = 54.40		Peso = 497.73 [gr]
	h3 = 110.10	L3 = 200.30	e3 = 54.10		Dens. = 0.413 [gr/cm3]
	h4 = 110.40	L4 = 201.10	e4 = 54.00		
	111.15	200.28	54.20	497.73	
P 12	h1 = 109.40	L1 = 199.80	e1 = 54.90	P1 = 464.73	Vol = 1196.49 [cm3]
	h2 = 108.80	L2 = 200.90	e2 = 54.80		Peso = 464.73 [gr]
	h3 = 109.60	L3 = 200.70	e3 = 53.80		Dens. = 0.388 [gr/cm3]
	h4 = 110.40	L4 = 199.50	e4 = 53.70		
	110.05	200.23	54.30	464.73	
P 13	h1 = 109.20	L1 = 200.40	e1 = 54.50	P1 = 415.68	Vol = 1212.62 [cm3]
	h2 = 109.00	L2 = 200.90	e2 = 54.20		Peso = 415.68 [gr]
	h3 = 109.70	L3 = 200.30	e3 = 55.30		Dens. = 0.343 [gr/cm3]
	h4 = 109.90	L4 = 200.50	e4 = 56.00		
	109.95	200.53	55.00	415.68	
P 14	h1 = 110.10	L1 = 200.70	e1 = 54.10	P1 = 453.75	Vol = 1213.28 [cm3]
	h2 = 110.70	L2 = 200.90	e2 = 53.90		Peso = 453.75 [gr]
	h3 = 109.90	L3 = 201.60	e3 = 54.80		Dens. = 0.374 [gr/cm3]
	h4 = 109.90	L4 = 200.70	e4 = 54.70		
	111.03	200.98	54.38	453.75	

**Tabla A.3.13 “Dimensiones Probeta PC2 estado húmedo”**

Mini Probeta	Altura [mm]	Largo [mm]	Espesor [mm]	Peso [gr]	
P 21	h1 = 111.8	L1 = 202.1	e1 = 55.8	P1 = 518.54	Vol = 1264.77 [cm3]
	h2 = 112.1	L2 = 202	e2 = 56.1	P2 = 518.05	Peso = 518.51 [gr]
	h3 = 111.6	L3 = 202.3	e3 = 55.9	P3 = 518.95	Dens. = 0.410 [gr/cm3]
	h4 = 111.8	L4 = 202.2	e4 = 56		
	111.825	202.15	55.95	518.51	
P 22	h1 = 111.7	L1 = 201.3	e1 = 56.2	P1 = 478.92	Vol = 1253.45 [cm3]
	h2 = 111	L2 = 201.7	e2 = 56	P2 = 479.23	Peso = 479.00 [gr]
	h3 = 111.3	L3 = 201.5	e3 = 55.8	P3 = 478.84	Dens. = 0.382 [gr/cm3]
	h4 = 111.6	L4 = 201	e4 = 55.5		
	111.4	201.375	55.875	479.00	
P 23	h1 = 111.9	L1 = 202.4	e1 = 55.3	P1 = 498.87	Vol = 1244.33 [cm3]
	h2 = 111.8	L2 = 202.3	e2 = 55	P2 = 499.05	Peso = 498.94 [gr]
	h3 = 111.9	L3 = 202.4	e3 = 54.9	P3 = 498.9	Dens. = 0.401 [gr/cm3]
	h4 = 112.2	L4 = 202	e4 = 54.6		
	111.95	202.275	54.95	498.94	
P 24	h1 = 111.6	L1 = 200.1	e1 = 54.9	P1 = 533.89	Vol = 1233.76 [cm3]
	h2 = 110.8	L2 = 200.3	e2 = 55.4	P2 = 533.45	Peso = 533.79 [gr]
	h3 = 110.9	L3 = 199.9	e3 = 56	P3 = 534.02	Dens. = 0.433 [gr/cm3]
	h4 = 111	L4 = 200.6	e4 = 55.6		
	111.075	200.225	55.475	533.79	

**Tabla A.3.14 “Dimensiones Probeta PC2 estado seco”**

Mini Probeta	Altura [mm]	Largo [mm]	Espesor [mm]	Peso [gr]	
P 21	h1 = 110.80	L1 = 201.60	e1 = 54.80	P1 = 448.48	Vol = 1243.96 [cm3]
	h2 = 111.60	L2 = 201.00	e2 = 55.60		Peso = 448.48 [gr]
	h3 = 110.60	L3 = 201.30	e3 = 55.40		Dens. = 0.361 [gr/cm3]
	h4 = 110.80	L4 = 202.20	e4 = 55.00		
	111.83	201.53	55.20	448.48	
P 22	h1 = 111.20	L1 = 200.80	e1 = 55.70	P1 = 424.05	Vol = 1237.61 [cm3]
	h2 = 110.00	L2 = 201.20	e2 = 55.00		Peso = 424.05 [gr]
	h3 = 110.80	L3 = 200.50	e3 = 55.30		Dens. = 0.343 [gr/cm3]
	h4 = 111.60	L4 = 200.00	e4 = 55.50		
	111.40	200.63	55.38	424.05	
P 23	h1 = 111.40	L1 = 201.90	e1 = 54.30	P1 = 432.64	Vol = 1216.40 [cm3]
	h2 = 110.80	L2 = 201.30	e2 = 54.00		Peso = 432.64 [gr]
	h3 = 111.40	L3 = 201.40	e3 = 53.90		Dens. = 0.356 [gr/cm3]
	h4 = 112.20	L4 = 201.00	e4 = 53.60		
	111.95	201.40	53.95	432.64	
P 24	h1 = 110.60	L1 = 199.10	e1 = 54.40	P1 = 459.54	Vol = 1215.29 [cm3]
	h2 = 110.30	L2 = 199.30	e2 = 54.40		Peso = 459.54 [gr]
	h3 = 109.90	L3 = 199.40	e3 = 55.00		Dens. = 0.378 [gr/cm3]
	h4 = 110.00	L4 = 200.10	e4 = 55.60		
	111.08	199.48	54.85	459.54	

**Tabla A.3.15** “Dimensiones Probetas macizas PM3y PM4 estado húmedo”

Mini Probeta	Altura [mm]	Largo [mm]	Espesor [mm]	Peso [gr]	
PM3	h1 = 201.50	b1 = 135.20	L1 = 402.40	P1 = 4807.31	Vol = 10925.7 [cm3]
	h2 = 201.00	b2 = 135.20	L2 = 401.90	P2 = 4807.10	Peso = 4807.23 [gr]
	h3 = 200.95	b3 = 135.50	L3 = 401.90	P3 = 4807.28	
	h4 = 200.10	b4 = 135.20	L4 = 402.00		Dens. = 0.440 [gr/cm3]
	200.89	135.28	402.05	4807.23	
PM4	h1 = 201.10	b1 = 134.95	L1 = 401.20	P1 = 4768.94	Vol = 10894.7 [cm3]
	h2 = 201.30	b2 = 135.05	L2 = 400.80	P2 = 4768.80	Peso = 4768.79 [gr]
	h3 = 201.40	b3 = 135.10	L3 = 401.10	P3 = 4768.64	
	h4 = 200.95	b4 = 135.00	L4 = 401.10		Dens. = 0.438 [gr/cm3]
	201.19	135.03	401.05	4768.79	

**Tabla A.3.16** “Dimensiones Probetas macizas PM3y PM4 estado seco”

Mini Probeta	Altura [mm]	Largo [mm]	Espesor [mm]	Peso [gr]	
PM3	h1 = 200.50	b1 = 134.70	L1 = 402.40	P1 = 4182.360	Vol = 10817.8 [cm3]
	h2 = 200.50	b2 = 135.20	L2 = 401.90		Peso = 4182.36 [gr]
	h3 = 199.45	b3 = 134.50	L3 = 401.90		
	h4 = 199.60	b4 = 133.70	L4 = 402.00		Dens. = 0.387 [gr/cm3]
	200.01	134.53	402.05	4182.36	
PM4	h1 = 200.60	b1 = 133.45	L1 = 400.20	P1 = 4134.67	Vol = 10770.2 [cm3]
	h2 = 201.30	b2 = 135.05	L2 = 400.30		Peso = 4134.67 [gr]
	h3 = 200.40	b3 = 134.60	L3 = 399.60		
	h4 = 199.45	134.00	400.60		Dens. = 0.384 [gr/cm3]
	200.44	134.28	400.18	4134.67	

**Tabla A.3.17** “Dimensiones Probetas macizas PM1y PM2 estado húmedo”

Mini Probeta	Altura [mm]	Largo [mm]	Espesor [mm]	Peso [gr]	
PM1	h1 = 199.80	b1 = 136.10	L1 = 400.10	P1 = 4250.34	Vol = 10875.4 [cm3]
	h2 = 200.10	b2 = 135.90	L2 = 400.00	P2 = 4250.56	Peso = 4250.55 [gr]
	h3 = 200.20	b3 = 135.70	L3 = 400.00	P3 = 4250.75	
	h4 = 200.00	b4 = 135.90	L4 = 400.20		Dens. = 0.391 [gr/cm3]
	200.03	135.90	400.08	4250.55	
PM2	h1 = 201.20	b1 = 135.60	L1 = 401.30	P1 = 4623.38	Vol = 10974.4 [cm3]
	h2 = 202.10	b2 = 135.40	L2 = 401.10	P2 = 4623.63	Peso = 4623.47 [gr]
	h3 = 202.10	b3 = 135.40	L3 = 400.90	P3 = 4623.41	
	h4 = 202.10	b4 = 135.70	L4 = 401.20		Dens. = 0.421 [gr/cm3]
	201.88	135.53	401.13	4623.47	

**Tabla A.3.18** “Dimensiones Probetas macizas PM1 y PM2 estado seco”

Mini Probeta	Altura [mm]	Largo [mm]	Espesor [mm]	Peso [gr]	
PM1	h1 = 198.80	b1 = 135.60	L1 = 400.10	P1 = 3710.73	Vol = 10768.1 [cm3]
	h2 = 199.60	b2 = 135.90	L2 = 400.00		Peso = 3710.73 [gr]
	h3 = 198.70	b3 = 134.70	L3 = 400.00		Dens. = 0.345 [gr/cm3]
	h4 = 199.50	b4 = 134.40	L4 = 400.20		
	199.15	135.15	400.08	3710.73	
PM2	h1 = 200.70	b1 = 134.10	L1 = 400.30	P1 = 4013.17	Vol = 10849.4 [cm3]
	h2 = 202.10	b2 = 135.40	L2 = 400.60		Peso = 4013.17 [gr]
	h3 = 201.10	b3 = 134.90	L3 = 399.40		Dens. = 0.370 [gr/cm3]
	h4 = 200.60	134.70	400.70		
	201.13	134.78	400.25	4013.17	

### C.1.3. Resultados de ensayo con método de Regresión Lineal.

#### C.1.3.1. Resultados de ensayo con Tarjeta de Adquisición de Datos (TAD) digital.

**Tabla A.3.19-A** “Temperaturas registradas por termocuplas de PC3 en TAD digital – Parte 1”

Tiempo [min]	Temperatura en el Canal [°C]																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
10.0	155	204	18	251	102	102	108	104	63	97	74	89	32	53	39	42	28	32	29	31
10.1	157	207	18	255	102	102	109	104	65	98	75	90	32	54	39	43	28	33	30	31
10.2	159	209	18	258	102	102	109	104	66	98	76	91	33	55	39	43	28	33	30	31
10.3	162	212	18	261	103	102	110	105	67	98	76	92	33	57	40	44	28	33	30	32
10.4	164	214	18	265	103	102	111	105	69	98	77	93	33	58	40	45	28	34	30	32
10.5	166	217	18	268	103	103	111	106	70	98	78	94	33	59	40	45	28	34	30	32
10.6	169	220	18	271	103	103	112	106	72	98	79	94	34	61	41	46	28	35	30	32
10.7	171	222	18	275	103	103	113	107	73	98	81	95	34	62	41	47	28	35	30	33
10.8	173	225	18	279	103	103	113	108	74	98	82	96	34	63	42	48	28	35	30	33
10.9	176	227	18	283	103	103	114	108	76	98	82	96	34	65	42	49	28	36	31	33
11.0	179	230	18	287	104	103	115	109	77	98	83	96	35	66	42	50	29	36	31	33
11.1	182	234	18	291	104	103	116	110	79	98	84	97	35	68	43	51	29	37	31	34
11.2	184	236	18	293	104	103	117	111	80	98	85	97	35	69	43	52	29	37	31	34
11.3	187	239	18	296	105	103	117	112	81	98	86	97	36	71	43	53	29	37	31	34
11.4	189	242	18	298	105	103	118	112	83	98	86	97	36	72	44	55	29	38	31	34
11.5	192	244	18	301	106	104	119	113	84	98	87	97	36	74	44	56	29	38	31	35
11.6	195	247	18	304	106	104	120	114	85	98	88	97	36	75	45	58	29	39	31	35
11.7	197	250	18	306	107	104	121	115	87	98	89	97	37	77	45	59	29	39	32	35
11.8	200	252	18	309	107	105	122	116	88	98	89	97	37	78	46	61	29	39	32	36
11.9	203	255	18	312	108	105	123	117	89	98	90	97	37	80	46	62	30	40	32	36
12.0	205	257	18	315	109	106	124	119	91	98	91	97	38	81	46	64	30	40	32	36
12.1	209	259	18	318	110	107	126	120	93	98	91	97	38	82	47	65	30	41	32	37
12.2	211	260	18	320	111	107	127	121	94	98	92	97	38	84	47	67	30	41	32	37
12.3	214	261	18	323	112	108	128	122	95	98	92	97	39	85	48	69	30	42	33	37
12.4	216	263	18	326	113	108	129	124	96	98	93	97	39	86	48	70	30	42	33	38
12.5	219	264	18	329	114	109	131	125	97	98	93	97	39	87	49	72	30	43	33	38
12.6	222	266	18	333	115	110	132	126	98	98	94	97	40	88	49	73	30	43	33	39
12.7	225	268	18	337	116	110	134	128	99	98	94	97	40	89	50	75	31	44	33	39
12.8	228	269	18	340	117	111	135	129	100	98	95	97	40	90	50	76	31	44	33	39
12.9	231	271	18	344	118	112	137	130	100	98	95	97	40	91	50	78	31	44	34	40
13.0	234	273	18	347	119	113	138	132	101	98	96	97	41	92	51	79	31	45	34	40
13.1	238	275	18	351	121	113	140	134	101	98	96	97	41	92	51	81	31	45	34	41
13.2	240	276	18	354	121	114	141	135	101	98	96	97	41	93	52	82	31	46	34	41
13.3	243	278	18	358	123	115	142	136	101	98	97	97	42	94	52	84	31	46	34	41
13.4	247	281	18	361	124	116	144	138	101	98	97	97	42	94	53	85	32	47	34	42
13.5	250	283	18	364	125	117	146	139	101	98	97	97	42	94	53	86	32	47	35	42
13.6	254	285	18	367	127	118	147	141	102	98	97	97	43	95	54	87	32	48	35	43
13.7	257	287	19	370	128	119	149	143	102	98	97	97	43	95	54	88	32	48	35	43
13.8	260	289	19	373	129	120	150	144	102	98	97	97	43	96	55	89	32	49	35	44
13.9	263	292	18	376	131	121	152	146	102	98	97	97	44	96	55	90	32	49	35	44

**Tabla A.3.19-B** “Temperaturas registradas por termocuplas de PC3 en TAD digital –  
Parte 2”

Tiempo [min]	Temperatura en el Canal [°C]																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
14.0	266	294	18	378	132	122	154	148	102	98	98	97	44	96	56	90	32	50	36	44
14.1	269	296	18	381	134	123	155	150	102	98	98	97	44	96	56	91	33	50	36	45
14.2	272	298	18	384	135	124	157	152	102	98	98	97	45	96	57	92	33	51	36	45
14.3	274	301	19	386	137	125	159	154	102	98	98	98	45	97	57	92	33	51	36	46
14.4	277	303	18	389	139	126	160	156	102	98	98	98	46	97	58	93	33	51	36	46
14.5	279	306	18	391	140	127	162	158	103	98	98	98	46	97	58	94	33	52	37	47
14.6	281	308	18	393	142	128	164	160	103	98	98	98	46	97	59	94	33	52	37	47
14.7	283	310	18	395	144	129	165	162	103	98	98	98	47	97	59	95	34	53	37	48
14.8	285	313	19	398	145	130	167	164	103	98	98	98	47	97	60	95	34	53	37	49
14.9	287	315	19	401	147	131	169	166	103	98	98	98	47	97	60	95	34	54	37	49
15.0	289	317	19	403	149	132	170	168	103	98	98	98	48	97	61	96	34	54	38	50
15.1	291	319	18	405	150	134	172	170	103	98	98	98	48	97	61	96	34	55	38	50
15.2	300	321	18	407	152	135	173	173	103	98	99	98	48	97	62	96	34	55	38	51
15.3	303	324	19	410	154	136	175	175	103	98	99	98	49	97	62	96	35	56	38	51
15.4	303	326	19	411	156	137	177	177	103	98	99	98	49	97	63	96	35	56	38	52
15.5	304	328	18	413	157	138	178	180	103	98	99	99	50	97	63	97	35	57	39	53
15.6	306	330	19	414	159	139	180	182	103	98	100	99	50	97	63	97	35	57	39	53
15.7	309	332	19	417	161	141	182	185	103	98	100	99	50	97	64	97	35	58	39	54
15.8	312	334	19	419	163	142	184	188	103	98	100	99	51	97	65	97	36	58	40	55
15.9	315	336	19	420	165	143	185	191	103	98	101	99	51	97	65	97	36	59	40	55
16.0	317	338	19	423	167	145	187	194	103	98	101	99	52	97	66	97	36	59	40	56
16.1	320	341	19	424	169	146	189	197	103	98	101	100	52	97	66	97	36	60	40	56
16.2	322	343	19	425	171	147	191	200	103	98	102	100	52	97	67	97	36	60	41	57
16.3	323	345	19	426	174	148	192	203	104	98	102	100	53	97	67	97	37	61	41	58
16.4	325	348	19	428	176	150	194	206	104	98	102	100	53	97	68	97	37	62	41	59
16.5	326	352	19	430	178	151	196	209	104	98	103	101	54	97	68	98	37	62	41	59
16.6	328	356	19	431	180	152	198	212	104	98	103	101	54	97	69	97	37	63	42	60
16.7	330	358	19	432	182	154	199	215	104	98	104	101	54	97	69	98	37	63	42	61
16.8	333	361	19	434	184	155	201	219	104	99	104	101	55	97	70	98	38	64	42	61
16.9	335	364	19	436	187	156	203	222	104	99	105	102	55	97	70	98	38	64	43	62
17.0	339	367	19	439	189	158	205	226	104	99	105	102	56	97	71	98	38	65	43	63
17.1	342	371	19	443	191	159	207	230	105	99	106	102	56	97	71	98	38	65	43	63
17.2	344	374	19	446	194	161	209	234	105	99	106	103	57	97	72	98	38	66	43	64
17.3	345	378	19	450	197	162	211	238	105	99	107	103	57	97	72	98	39	66	44	65
17.4	347	381	19	453	200	164	213	242	105	99	107	104	57	97	73	98	39	67	44	66
17.5	349	384	19	457	202	165	215	247	105	99	108	104	58	97	73	98	39	67	44	66
17.6	350	388	19	461	205	167	217	252	105	99	108	105	58	97	74	98	39	68	45	67
17.7	353	393	19	465	208	169	219	257	106	100	109	105	59	97	74	98	40	68	45	68
17.8	356	397	19	469	211	171	221	262	106	100	110	106	59	97	75	98	40	69	45	68
17.9	358	400	19	473	214	173	223	267	106	100	110	106	60	97	76	98	40	69	46	69
18.0	361	403	19	477	218	175	226	272	106	100	111	107	60	97	76	98	40	70	46	70
18.1	364	407	19	481	221	177	228	276	106	100	112	107	61	97	77	98	40	71	46	71
18.2	367	411	19	485	225	179	230	277	106	101	112	108	61	97	77	98	41	71	47	71
18.3	370	415	19	490	228	181	232	276	106	101	113	108	62	97	78	98	41	72	47	72
18.4	373	418	19	493	232	183	235	279	107	101	114	109	62	97	79	98	41	72	47	73
18.5	375	421	20	497	236	186	237	282	107	101	115	110	63	97	80	98	41	73	48	74
18.6	378	424	19	502	239	188	240	286	107	102	116	111	63	97	81	98	42	73	48	74
18.7	382	427	20	506	243	190	242	291	107	102	116	111	63	98	81	98	42	74	48	75
18.8	385	431	20	509	246	193	244	296	107	102	117	112	64	98	82	98	42	74	49	76
18.9	387	435	20	513	250	195	247	303	107	103	118	113	64	98	83	98	42	75	49	76

**Tabla A.3.19-C “Temperaturas registradas por termocuplas de PC3 en TAD digital – Parte 3”**

Tiempo [min]	Temperatura en el Canal [°C]																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
19.0	390	439	20	517	254	198	249	314	107	103	119	114	65	97	84	98	43	75	49	77
19.1	390	443	20	523	256	200	252	319	106	103	120	114	65	97	85	98	43	76	50	78
19.2	396	447	20	526	262	203	254	321	107	104	121	115	66	98	86	98	43	76	50	78
19.3	399	451	20	531	266	206	257	325	107	104	122	116	66	97	87	98	43	77	51	79
19.4	399	454	20	561	268	208	259	328	106	104	123	117	67	97	88	98	43	77	51	80
19.5	402	458	20	591	271	211	262	333	104	104	124	117	67	96	88	97	44	77	51	80
19.6	406	462	20	626	275	214	265	337	105	104	125	118	68	96	89	97	44	77	52	81
19.7	409	464	20	639	278	217	267	345	104	104	126	119	68	96	90	97	44	77	52	82
19.8	415	467	20	738	282	219	270	361	104	104	127	119	69	95	90	96	45	77	52	82
19.9	426	471	20	767	286	222	272	390	105	104	128	127	69	95	91	100	45	77	53	83
20.0	438	477	20	766	298	225	275	406	112	105	129	154	70	101	91	113	45	79	53	83
20.1	435	486	20	707	310	236	278	411	119	107	130	147	71	100	92	109	45	79	54	84
20.2	450	492	20	785	313	236	282	429	116	108	132	159	71	96	93	110	46	78	54	84
20.3	472	511	20	790	313	240	284	434	116	108	133	148	72	99	93	110	46	79	54	85
20.4	461	510	20	817	322	251	287	468	118	108	134	166	72	102	93	119	46	80	55	85
20.5	479	530	20	825	321	254	290	480	119	110	135	169	73	100	94	113	46	80	55	86
20.6	466	527	20	810	322	257	293	455	116	113	137	155	74	102	94	117	47	83	56	86
20.7	513	596	20	846	346	292	298	535	139	128	138	222	74	124	94	150	47	94	56	86
20.8	458	524	20	777	327	259	300	418	116	114	140	142	75	97	96	98	47	83	57	87
20.9	559	670	21	862	382	351	308	582	159	161	141	271	76	153	93	174	47	116	57	86
21.0	577	700	21	874	407	382	325	605	180	182	143	291	77	169	95	202	48	135	57	86
21.1	530	663	20	857	368	350	312	559	150	158	144	242	77	143	94	164	48	115	58	87
21.2	446	525	20	801	335	264	310	418	114	115	146	138	78	97	96	98	48	85	58	89
21.3	467	558	20	814	345	287	313	446	119	123	147	156	79	106	96	110	48	92	59	89
21.4	572	735	20	880	409	436	334	620	178	190	149	292	79	191	94	195	49	149	59	88
21.5	599	752	21	889	428	451	346	629	189	229	151	319	83	204	98	226	49	163	60	95
21.6	467	588	21	842	357	307	323	474	120	121	152	174	81	118	96	121	49	102	60	91
21.7	453	602	21	840	350	280	324	445	117	119	154	144	82	96	97	97	50	87	61	90
21.8	460	651	21	855	353	318	326	482	119	126	155	184	83	118	96	119	50	104	61	91
21.9	462	638	21	842	356	301	330	466	135	145	157	181	88	116	99	105	50	89	62	91
22.0	516	712	21	882	401	397	345	552	151	180	159	219	92	134	98	125	51	108	62	91
22.1	614	785	21	905	451	505	374	652	210	284	160	360	84	266	98	246	51	223	63	121
22.2	647	797	21	914	493	531	422	676	247	330	163	379	90	295	99	274	51	261	63	144
22.3	659	803	21	914	510	541	414	681	264	344	163	388	87	308	97	293	52	282	64	158
22.4	664	810	21	921	529	548	438	691	275	359	165	396	107	318	104	304	52	293	64	166
22.5	680	813	21	925	540	557	484	698	291	369	165	408	108	337	103	315	52	317	65	200
22.6	683	820	21	929	554	564	470	707	312	380	170	412	124	345	112	326	53	318	65	196
22.7	684	820	21	929	559	567	490	706	297	380	169	415	119	348	109	336	53	331	66	202
22.8	691	825	21	936	569	574	501	718	329	393	174	427	148	357	115	348	53	334	66	225
22.9	570	795	21	914	435	456	362	602	139	191	174	234	91	145	97	131	54	121	67	94
23.0	562	805	21	921	419	474	377	621	148	203	176	253	91	161	97	153	54	146	67	98
23.1	588	806	21	927	434	500	394	650	158	229	178	280	91	186	97	172	54	165	68	108
23.2	606	811	21	930	446	509	392	672	167	248	179	299	91	199	97	172	55	175	68	114
23.3	619	823	22	942	467	529	413	688	182	267	182	325	96	220	97	190	55	183	69	120
23.4	576	806	21	930	440	471	399	644	166	220	183	265	99	169	97	121	55	116	69	94
23.5	670	804	21	951	580	582	538	746	313	393	181	432	145	349	107	339	56	331	70	247
23.6	732	862	22	965	625	603	586	768	377	427	200	465	252	392	173	385	56	378	70	338
23.7	691	855	22	966	561	580	521	751	280	364	212	409	157	313	133	305	57	298	71	218
23.8	598	794	21	917	491	456	459	609	190	204	196	247	135	164	123	162	57	156	71	146
23.9	611	828	22	947	450	493	413	697	159	218	192	283	94	166	98	156	57	151	72	111



**Tabla A.3.19-D “Temperaturas registradas por termocuplas de PC3 en TAD digital – Parte 4”**

Tiempo [min]	Temperatura en el Canal [°C]																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
24.0	619	837	22	953	466	499	426	711	168	229	195	305	98	171	99	172	58	154	72	113
24.1	638	842	21	957	472	508	439	730	173	231	196	326	94	179	98	189	58	170	73	120
24.2	649	842	21	959	479	515	451	738	180	248	197	335	92	185	97	198	59	173	73	131
24.3	663	850	22	961	492	522	473	752	189	263	199	357	94	211	98	219	59	193	74	141
24.4	673	860	22	973	523	540	500	769	205	284	203	369	104	224	102	236	59	181	75	148
24.5	676	857	22	964	514	535	509	774	210	291	203	380	95	233	98	243	60	213	75	157
24.6	685	858	22	966	521	540	510	777	214	294	205	387	96	230	98	257	60	218	76	162
24.7	733	879	22	989	611	583	586	807	324	374	228	444	187	319	132	325	61	292	76	263
24.8	780	888	22	986	686	629	668	835	425	453	298	506	293	413	225	421	61	401	77	390
24.9	774	888	22	993	665	619	647	835	382	426	269	506	246	391	195	402	61	379	78	354
25.0	785	896	22	998	691	625	671	833	419	447	269	505	271	403	169	414	62	398	77	386
25.1	787	896	22	997	691	625	671	844	428	457	279	507	271	404	168	415	62	400	78	387
25.2	787	898	22	1000	699	627	668	849	432	460	282	511	293	407	167	418	63	399	79	390
25.3	799	910	22	1011	715	635	679	859	442	469	310	517	304	416	189	423	63	403	81	392
25.4	798	902	22	1001	715	634	689	869	460	473	350	528	356	426	237	438	64	416	83	412
25.5	811	909	22	1008	725	641	695	874	460	476	356	526	325	421	200	429	64	406	81	398
25.6	809	905	22	1001	720	633	692	865	451	468	351	522	313	413	187	426	64	404	81	401
25.7	806	901	22	994	721	628	670	869	453	464	315	522	324	413	168	428	65	405	82	399
25.8	817	909	23	1000	721	632	650	876	418	438	296	512	268	371	151	395	65	353	84	341
25.9	827	903	22	990	737	640	687	876	465	475	359	535	345	425	191	435	66	410	83	409
26.0	841	917	23	1000	754	654	707	886	482	487	401	545	360	431	218	438	66	416	85	414
26.1	840	908	22	993	749	648	707	880	475	485	419	545	353	428	242	438	66	414	82	415
26.2	812	920	23	1001	724	624	669	881	424	438	315	516	230	368	155	397	67	339	85	343
26.3	838	906	23	986	761	657	720	875	470	482	423	540	320	419	228	437	67	407	84	410
26.4	828	917	22	1004	744	639	719	890	449	462	398	529	285	403	187	420	68	385	85	389
26.5	837	913	23	1002	766	658	743	890	495	497	487	559	369	441	305	444	68	418	123	424
26.6	833	906	23	994	740	628	714	883	439	445	390	527	272	378	202	401	69	354	97	365
26.7	838	904	23	987	761	646	715	882	467	458	406	535	307	395	219	411	69	396	85	403
26.8	852	910	23	987	787	669	734	888	507	502	492	569	397	441	311	450	70	416	99	424
26.9	848	906	23	983	785	659	733	885	503	498	484	567	387	436	290	445	70	413	86	420
27.0	856	908	23	987	774	643	711	893	478	464	444	551	351	407	266	428	71	368	100	405
27.1	868	940	23	1019	781	649	724	917	481	468	381	536	324	404	166	419	71	373	88	385
27.2	876	942	23	1022	794	654	733	924	493	474	430	548	340	409	184	426	72	380	88	395
27.3	862	914	23	988	809	677	768	894	523	516	513	562	398	451	329	458	72	423	106	429
27.4	886	939	23	1018	813	666	765	919	508	464	450	539	338	389	243	407	73	355	89	365
27.5	894	946	23	1019	812	661	756	917	508	499	506	560	385	436	288	443	73	400	88	397
27.6	893	945	23	1020	833	673	771	927	521	504	519	568	392	440	317	450	74	408	118	420
27.7	909	956	23	1031	842	682	780	934	529	514	527	572	398	438	311	443	74	398	90	403
27.8	894	945	23	1023	836	672	774	931	522	505	519	566	385	430	306	439	75	393	89	408
27.9	899	947	23	1022	845	673	776	929	523	504	520	564	389	433	310	439	75	397	90	407
28.0	901	950	23	1024	854	680	781	933	531	512	533	572	392	434	325	445	76	398	114	404
28.1	900	951	23	1021	849	671	786	932	528	506	531	568	386	433	318	440	76	398	95	408
28.2	900	938	23	1018	856	677	785	931	521	505	531	567	385	432	318	439	77	396	97	403
28.3	902	952	23	1020	863	685	801	936	530	512	543	575	396	440	329	445	78	396	121	416
28.4	874	920	23	980	845	710	818	903	569	550	575	585	428	475	405	473	78	425	215	445
28.5	898	945	23	1018	860	676	837	935	526	501	524	571	368	421	323	427	79	366	140	391
28.6	910	956	23	1019	869	698	852	938	547	526	563	590	403	445	340	445	80	401	135	415
28.7	909	957	23	1020	873	701	859	944	550	524	561	586	407	451	368	452	81	400	178	422
28.8	914	959	24	1024	879	699	858	950	547	529	573	596	417	452	367	452	82	394	189	420
28.9	913	956	23	1024	878	705	867	944	548	526	562	586	405	449	370	450	82	397	155	413

**Tabla A.3.19-E “Temperaturas registradas por termocuplas de PC3 en TAD digital – Parte 5”**

Tiempo [min]	Temperatura en el Canal [°C]																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
29.0	667	721	23	793	625	467	627	703	282	233	309	269	108	144	124	125	83	103	96	98
29.1	846	951	24	998	861	722	869	919	569	543	578	585	417	468	403	472	84	414	253	411
29.2	917	961	24	1022	879	722	914	942	561	540	589	600	413	448	367	448	84	395	228	429
29.3	888	936	24	986	861	731	912	914	576	566	608	593	433	484	417	477	86	414	296	439
29.4	893	938	24	994	865	742	914	915	594	574	614	605	443	498	430	478	115	425	332	452
29.5	903	945	24	996	869	747	911	921	590	578	625	604	442	493	432	487	91	420	337	448
29.6	889	934	24	981	860	740	895	915	588	573	620	600	439	497	432	487	97	423	343	452
29.7	908	952	24	1004	878	760	903	925	591	570	621	604	433	490	434	483	105	421	345	443
29.8	915	958	24	1009	883	747	901	941	579	565	622	602	426	479	415	473	88	401	279	427
29.9	935	977	24	1027	899	757	911	955	578	562	622	603	424	476	413	470	117	404	281	427
30.0	920	962	24	1003	882	769	886	931	596	579	625	604	435	487	427	480	169	420	335	448
30.1	904	947	24	999	874	763	874	924	594	581	638	605	437	496	430	479	221	420	351	445
30.2	915	958	24	1002	883	772	876	931	598	582	637	609	436	494	432	482	271	423	354	441
30.3	916	959	24	1004	885	780	872	934	609	597	664	624	468	521	464	495	319	428	355	443
30.4	925	970	24	1018	894	773	880	957	584	578	638	606	422	478	419	471	264	402	308	426
30.5	906	952	24	999	877	773	860	936	600	588	652	610	439	499	429	484	320	419	349	438
30.6	908	949	24	1001	880	781	860	938	611	602	667	620	450	513	451	496	351	429	366	444
30.7	914	957	24	1003	884	782	853	933	608	596	663	615	448	510	446	489	354	429	342	446
30.8	934	983	24	1034	904	780	885	965	598	584	659	610	436	496	430	480	314	417	315	432
30.9	946	986	24	1036	910	797	876	968	592	581	647	618	426	484	407	466	275	409	309	416
31.0	940	978	24	1023	902	798	868	971	600	598	660	627	435	501	438	482	332	417	336	424
31.1	941	982	25	1026	907	802	873	980	600	592	658	621	430	493	430	466	311	410	316	419
31.2	949	985	25	1028	908	808	877	978	609	607	668	633	441	507	444	485	350	428	348	427
31.3	957	995	25	1037	924	825	888	989	633	625	693	647	471	539	470	508	379	445	364	432
31.4	951	983	25	1027	913	813	872	973	620	615	678	634	448	521	452	495	363	437	361	433
31.5	942	977	25	1018	905	815	870	971	630	621	688	637	448	523	454	487	355	434	359	433
31.6	946	982	25	1020	912	817	874	974	630	623	690	641	453	532	461	498	371	443	367	440
31.7	942	977	25	1013	909	817	875	969	636	624	696	641	457	537	463	501	375	436	366	441
31.8	951	979	25	1022	914	822	879	968	635	629	700	644	461	539	465	503	373	447	362	439
31.9	940	975	25	1013	912	822	876	967	640	628	703	640	456	537	461	500	375	450	370	441
32.0	942	977	25	1013	910	824	881	971	642	631	706	645	460	543	466	503	380	456	375	443
32.1	953	986	25	1013	912	825	875	967	645	634	712	644	465	544	467	503	376	454	374	446
32.2	950	983	25	1010	910	823	875	961	645	633	714	645	464	544	467	503	382	459	374	443
32.3	945	981	25	1014	916	830	882	970	643	633	711	650	460	546	467	502	378	456	369	438
32.4	940	981	25	1011	913	826	882	971	647	638	720	649	462	547	467	504	375	459	369	441
32.5	961	1001	25	1045	940	853	909	1000	643	639	725	660	470	549	477	506	384	469	369	441
32.6	977	1012	25	1051	947	862	920	1010	649	650	718	663	464	545	468	500	370	463	356	435
32.7	972	1015	25	1048	945	862	922	1008	654	656	725	669	473	559	477	511	380	468	370	435
32.8	962	1002	25	1039	938	858	912	999	655	653	724	667	470	558	473	512	377	470	358	434
32.9	940	996	25	1026	927	850	907	984	666	656	734	663	486	565	488	516	395	488	383	399
33.0	961	1003	25	1041	938	856	917	998	654	652	723	667	467	557	471	505	365	466	349	426
33.1	956	992	25	1033	935	853	908	979	656	652	727	663	470	558	477	508	376	481	366	436
33.2	951	992	25	1028	930	848	913	989	649	652	723	665	465	561	477	508	374	479	362	433
33.3	958	995	25	1029	932	856	912	986	677	671	746	673	488	573	496	523	401	500	385	449
33.4	937	975	25	1009	911	840	890	959	676	658	743	665	492	564	493	517	392	505	383	456
33.5	935	971	25	1004	916	841	887	962	678	661	745	669	498	570	498	518	393	510	386	459
33.6	914	950	25	992	892	815	874	951	624	607	693	616	435	513	441	461	339	459	337	351
33.7	900	937	25	983	874	792	863	937	581	569	658	626	437	522	446	466	341	457	332	398
33.8	900	938	25	995	876	791	866	944	453	474	535	465	227	333	248	259	150	258	148	180
33.9	958	991	25	1022	932	859	914	983	686	678	755	682	494	578	501	528	390	516	381	458

**Tabla A.3.19-F** “Temperaturas registradas por termocuplas de PC3 en TAD digital – Parte 6”

Tiempo [min]	Temperatura en el Canal [°C]																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
34.0	945	978	26	1031	920	838	914	990	517	557	609	527	270	391	270	310	158	290	154	208
34.1	947	982	26	1030	919	841	915	987	492	540	591	512	228	375	228	281	102	252	102	162
34.2	946	983	25	1038	931	848	920	992	513	554	616	538	247	389	243	311	103	273	101	176
34.3	967	997	25	1043	938	861	929	1005	543	579	636	554	270	431	262	341	109	291	102	181
34.4	974	1008	25	1047	948	873	936	1008	566	602	657	578	304	452	280	362	118	300	102	198
34.5	977	1009	26	1053	954	879	942	1013	580	612	665	583	306	456	288	373	125	333	104	225
34.6	977	1009	26	1049	958	880	945	1014	591	622	680	595	329	474	311	388	133	353	108	243
34.7	984	1014	26	1052	965	887	950	1020	609	634	696	610	361	494	343	402	155	383	129	268
34.8	988	1016	26	1053	970	901	952	1022	683	689	753	678	467	567	466	496	319	499	287	383
34.9	938	960	26	960	875	799	849	932	602	600	669	603	392	481	426	433	307	454	304	355
35.0	927	955	26	988	908	834	888	960	665	657	728	661	518	598	523	539	401	554	394	458
35.1	964	989	26	1020	944	873	924	991	723	709	776	708	524	601	532	544	415	565	411	466
35.2	965	993	26	1027	954	884	932	997	737	722	790	724	544	615	549	558	433	587	427	487
35.3	976	1002	26	1029	953	888	936	996	735	721	786	718	537	609	541	546	417	575	405	468
35.4	964	994	26	1027	949	880	930	990	727	717	780	714	532	603	537	544	409	574	399	470
35.5	965	995	26	1030	951	890	936	997	736	727	790	724	544	612	550	553	424	591	412	480
35.6	973	995	27	1032	953	885	934	994	684	675	739	675	485	555	492	492	371	597	403	476
35.7	993	1020	26	1056	978	908	961	1027	731	738	800	733	528	611	536	548	404	575	394	460
35.8	938	965	27	1004	923	853	907	968	695	689	783	739	544	620	553	562	424	595	412	476
35.9	976	998	26	999	920	846	896	959	690	681	741	684	546	611	549	553	415	587	401	474

Se muestran los valores de temperaturas entre los 14 y 36 minutos, ya que es en este rango en donde se encuentran los puntos de interés para el estudio del frente de carbonización.

En la siguiente tabla se muestra la correspondencia entre canales y posición de termocuplas en cada probeta.

**Tabla A.3.20** “Relación profundidad de medición con canal, probeta PC3”

Probeta unitaria	Profundidad medición [mm]	Canal
P31	7	1
	14	5
	21	9
	28	13
	35	17
P32	7	2
	14	6
	21	10
	28	14
	35	18
P33	7	3
	14	7
	21	11
	28	15
	35	19
P34	7	4
	14	8
	21	12
	28	16
	35	20

En las siguientes figuras se grafica el desarrollo de temperaturas obtenido por cada termocupla inserta en la probeta PC3.

Figura A.3.1 “Desarrollo de temperaturas en termopares de probeta unitaria P31”

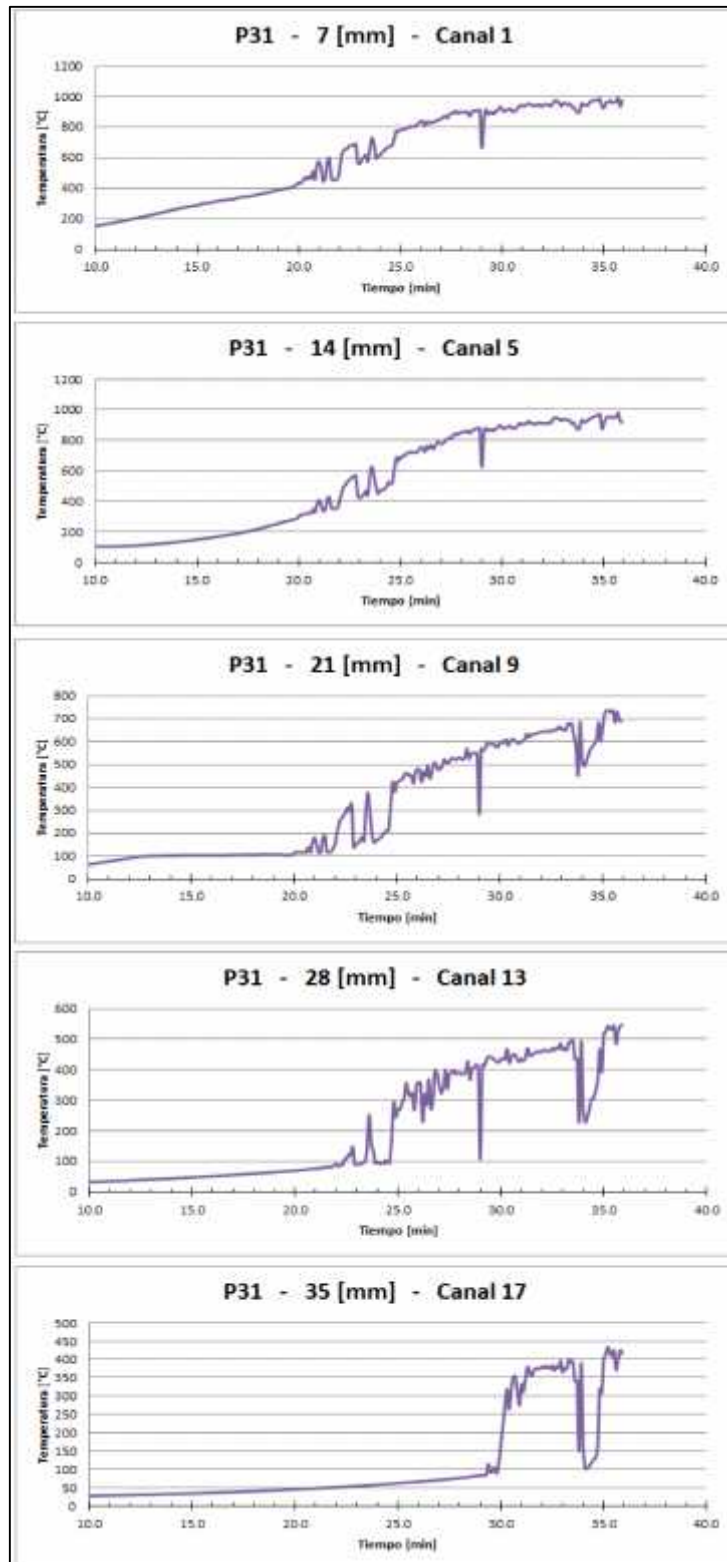


Figura A.3.2 “Desarrollo de temperaturas en termopares de probeta unitaria P32”

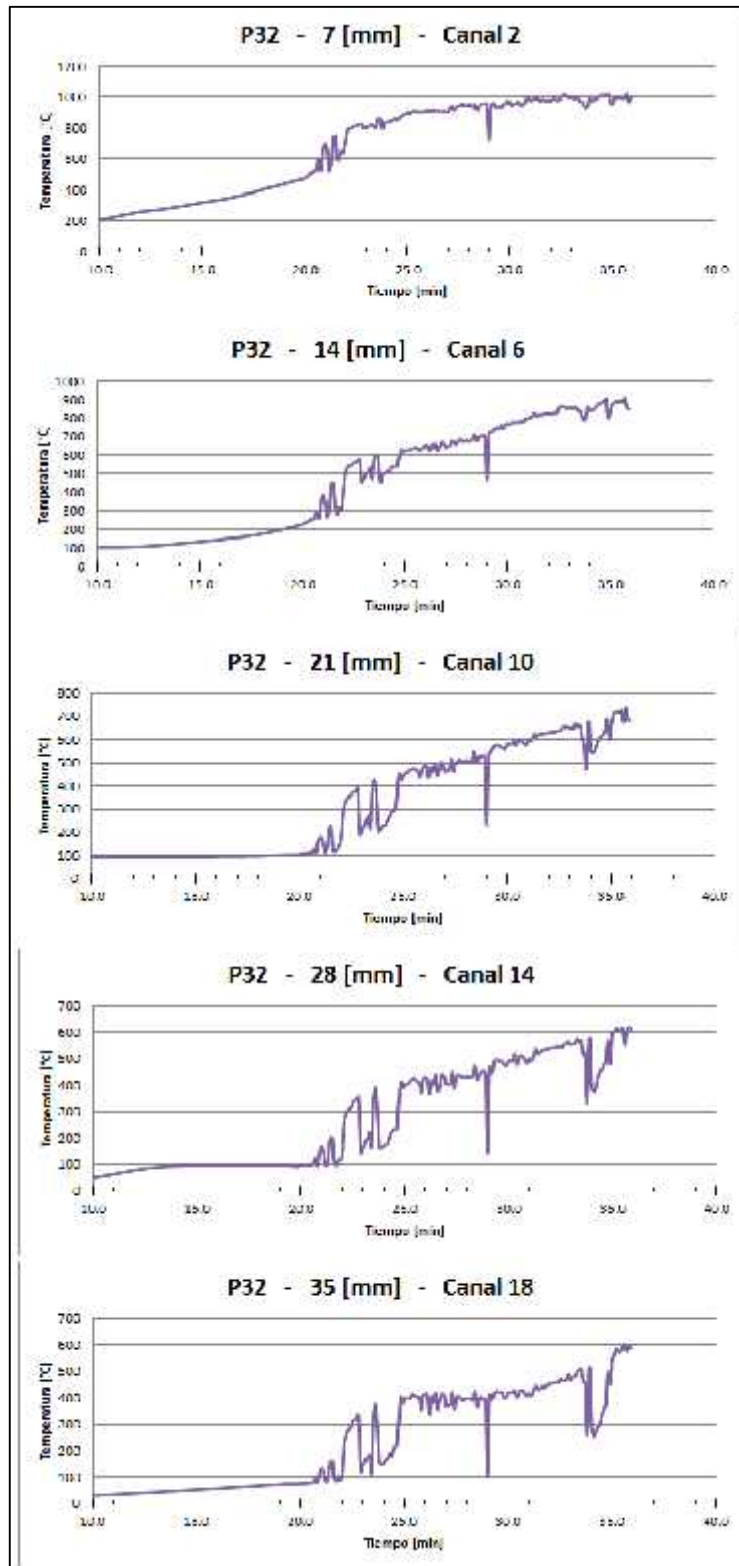


Figura A.3.3 “Desarrollo de temperaturas en termopares de probeta unitaria P33”

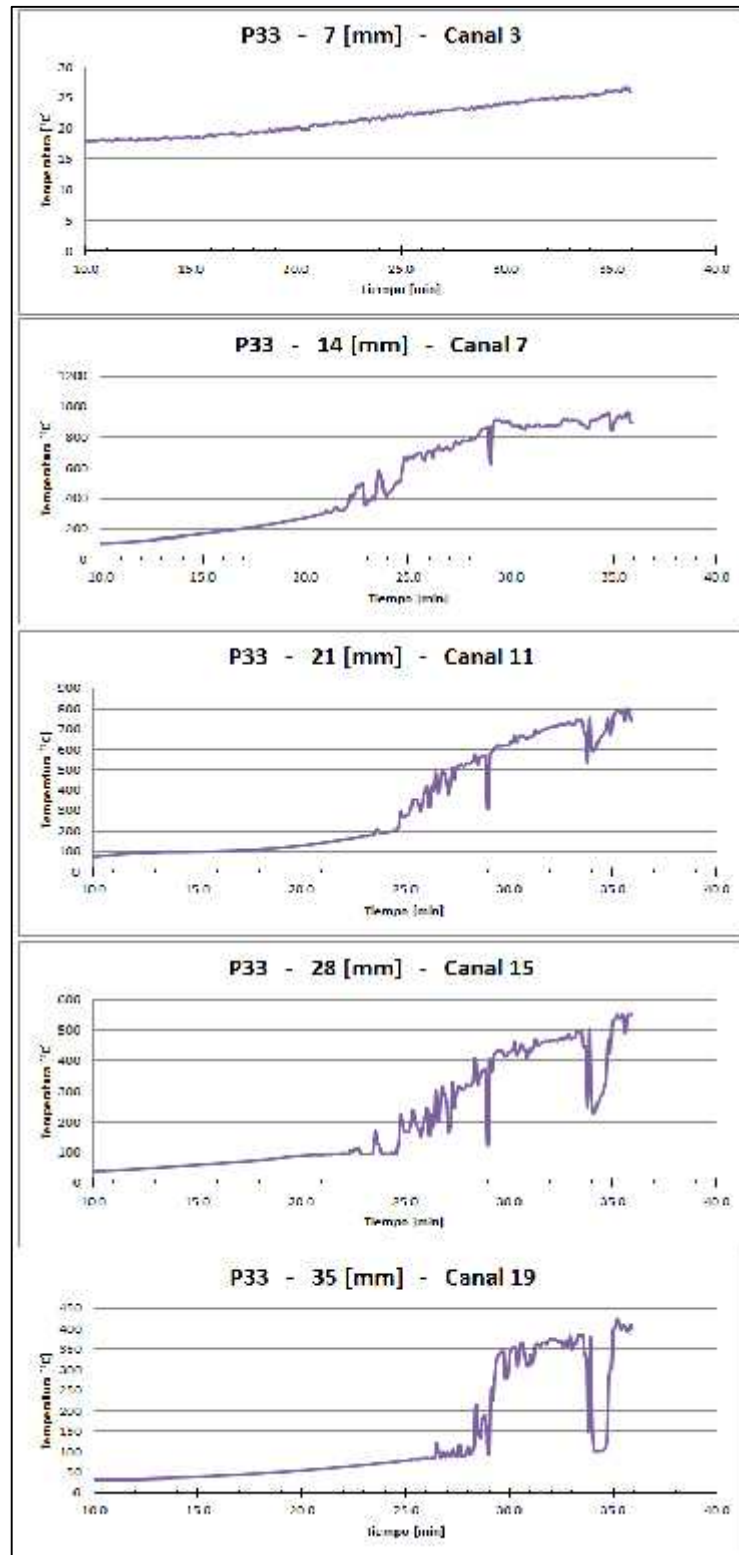
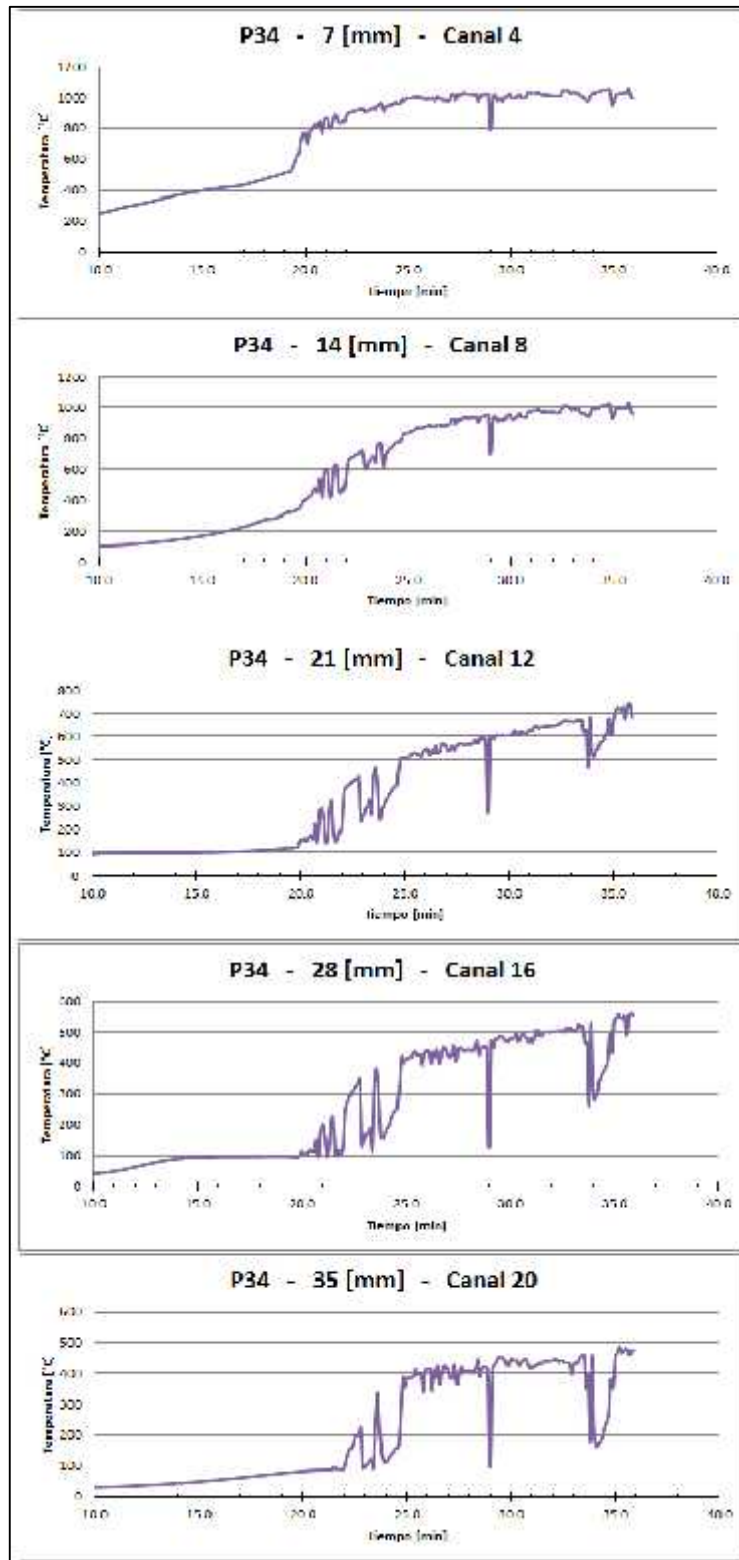


Figura A.3.4 “Desarrollo de temperaturas en termopares de probeta unitaria P34”



**C.1.3.2. Resultados de ensayo con método de Ancho Residual.**

**Tabla A.3.21 “Mediciones de ancho o espesor residual Probeta PC3”**

Probeta Unitaria	Franja	e1 [mm]	e2 [mm]	e3 [mm]	Probeta Unitaria	Franja	e1 [mm]	e2 [mm]	e3 [mm]
<b>P31</b>	P31-1	14.5	14.0	11.7	<b>P33</b>	P33-1	16.0	16.5	8.6
	P31-2	11.9	14.2	16.2		P33-2	11.3	13.5	14.2
	P31-3	11.2	12.4	12.4		P33-3	10.8	13.5	12.0
	P31-4	11.2	10.5	11.6		P33-4	14.9	11.1	13.2
	P31-5	18.2	14.8	9.4		P33-5	15.9	16.5	8.4
	P31-6	12.3	15.5	13.8		P33-6	7.8	12.2	16.2
<b>P32</b>	P32-1	10.8	12.6	16.8	<b>P34</b>	P34-1	11.8	12.2	13.7
	P32-2	13.7	14.3	12.4		P34-2	11.3	11.8	10.3
	P32-3	11.7	15.1	14.6		P34-3	8.8	9.1	9.8
	P32-4	12.2	17.0	16.9		P34-4	14.4	14.9	9.4
	P32-5	12.9	11.2	14.4		P34-5	12.0	12.3	11.9
	P32-6	12.8	8.6	10.2		P34-6	9.6	12.3	14.5

**Tabla A.3.22 “Mediciones de ancho o espesor residual Probeta PC4”**

Probeta Unitaria	Franja	e1 [mm]	e2 [mm]	e3 [mm]	Probeta Unitaria	Franja	e1 [mm]	e2 [mm]	e3 [mm]
<b>P41</b>	P41-1	15.2	25.1	21.2	<b>P43</b>	P43-1	9.7	12.0	11.1
	P41-2	14.1	17.7	16.7		P43-2	9.1	10.1	13.3
	P41-3	13.8	11.4	15.7		P43-3	13.2	11.8	12.6
	P41-4	15.8	13.9	10.5		P43-4	10.4	9.2	10.2
	P41-5	11.7	14.6	12.4		P43-5	10.6	8.9	9.7
	P41-6	12.8	15.4	13.0		P43-6	12.2	13.4	15.5
<b>P42</b>	P42-1	10.7	13.2	9.5	<b>P44</b>	P44-1	9.7	11.4	12.6
	P42-2	13.1	17.2	12.7		P44-2	11.5	11.9	12.5
	P42-3	15.3	11.6	14.9		P44-3	12.6	12.4	11.6
	P42-4	20.0	18.4	13.3		P44-4	12.1	12.2	12.0
	P42-5	12.0	12.2	11.9		P44-5	10.1	11.9	12.5
	P42-6	13.8	12.2	20.8		P44-6	11.1	10.0	10.4

**Tabla A.3.23 “Mediciones de ancho o espesor residual Probeta PC1”**

Probeta Unitaria	Franja	e1 [mm]	e2 [mm]	e3 [mm]	Probeta Unitaria	Franja	e1 [mm]	e2 [mm]	e3 [mm]
<b>P11</b>	P11-1	14.6	16.9	12.2	<b>P13</b>	P13-1	13.0	8.6	13.3
	P11-2	14.9	15.2	12.9		P13-2	12.0	9.6	12.0
	P11-3	15.6	14.6	11.7		P13-3	11.1	9.5	11.9
	P11-4	14.8	14.3	11.2		P13-4	11.5	8.5	13.4
	P11-5	16.3	16.1	12.4		P13-5	11.6	9.8	15.0
<b>P12</b>	P12-1	13.8	14.8	11.4	<b>P14</b>	P14-1	7.0	15.5	20.1
	P12-2	13.8	15.0	10.9		P14-2	8.5	16.6	21.9
	P12-3	15.3	13.2	12.3		P14-3	8.4	14.4	20.9
	P12-4	15.5	12.2	12.4		P14-4	8.0	13.9	20.0
	P12-5	15.2	12.8	12.4		P14-5	7.5	11.5	19.8



**Tabla A.3.24 “Mediciones de ancho o espesor residual Probeta PC2”**

Probeta Unitaria	Franja	e1 [mm]	e2 [mm]	e3 [mm]	Probeta Unitaria	Franja	e1 [mm]	e2 [mm]	e3 [mm]
P21	P21-1	11.1	18.0	19.9	P23	P23-1	17.0	17.2	15.9
	P21-2	11.3	16.3	20.0		P23-2	15.5	16.0	15.5
	P21-3	10.9	15.9	19.7		P23-3	15.3	16.8	14.7
	P21-4	10.5	16.6	21.8		P23-4	16.4	17.6	14.6
	P21-5	11.1	16.1	22.5		P23-5	15.5	17.6	15.8
P22	P22-1	8.5	15.7	21.7	P24	P24-1	13.9	17.8	24.7
	P22-2	8.6	15.0	19.1		P24-2	14.9	18.9	25.3
	P22-3	7.2	15.9	18.7		P24-3	13.7	20.9	26.9
	P22-4	6.7	17.3	19.1		P24-4	13.3	22.2	26.7
	P22-5	5.9	17.9	19.1		P24-5	13.5	21.0	27.0

**C.1.4. Resultados de ensayos de probetas macizas.**

**Tabla A.3.25 “Mediciones de ancho y alto transversal residual de probetas macizas PM3 y PM4”**

		Altura Residual			Ancho Residual				
Probeta	Franja	h1 [mm]	h2 [mm]	h3 [mm]	b1 [mm]	b2 [mm]	b3 [mm]	b4 [mm]	b5 [mm]
PM3	P3-1	100.7	101.9	100.7	41.7	33.4	34.2	31.3	35.4
	P3-2	99.2	98.8	97.5	36.4	32.9	37.9	35.8	29.4
	P3-3	95.0	104.0	104.6	29.1	33.9	30.7	38.0	35.1
	P3-4	101.4	100.4	99.4	38.6	38.0	37.8	43.9	38.4
PM4	P4-1	118.6	127.0	129.5	45.6	53.0	50.3	51.2	48.5
	P4-2	122.9	126.9	125.5	49.7	37.4	49.2	54.7	67.9
	P4-3	132.2	129.2	127.5	54.3	60.4	52.1	50.2	34.6
	P4-4	124.2	124.8	125.6	56.3	50.9	46.6	33.0	41.5

**Tabla A.3.26 “Mediciones de ancho y alto transversal residual de probetas macizas PM1 y PM2”**

		Altura Residual			Ancho Residual				
Probeta	Franja	h1 [mm]	h2 [mm]	h3 [mm]	b1 [mm]	b2 [mm]	b3 [mm]	b4 [mm]	b5 [mm]
PM1	P1-1	124.3	131.0	131.2	61.2	50.0	51.1	52.0	46.8
	P1-2	131.0	133.8	133.9	51.5	43.0	43.6	51.6	44.1
	P1-3	128.5	130.1	129.3	51.7	51.1	51.4	48.9	49.7
	P1-4	127.5	132.5	130.8	48.0	47.1	52.0	50.4	52.9
PM2	P2-1	115.6	118.5	119.0	43.6	40.7	43.6	43.7	42.7
	P2-2	118.9	123.0	123.6	47.1	46.0	47.7	49.9	47.9
	P2-3	119.3	123.6	124.0	35.3	38.9	36.3	48.9	39.4
	P2-4	117.5	120.5	120.8	44.9	48.0	44.1	44.2	45.2

## D. Anexos Análisis.

**Tabla A.4.1 “Medidas Método Rectángulo equivalente para probetas compuestas PC1 y PC2”**

Probeta	Mini-Probeta	Sección	Dimensiones Originales			Área residual [mm <sup>2</sup> ]	Dimensiones Equivalentes		dc [mm]
			B0 [mm]	h0 [mm]	Area Inicial [mm <sup>2</sup> ]		B equiv. [mm]	h equiv [mm]	
PC1	P11	P11-1	110	55	6050	992	110	9.0	46.0
		P11-2	110	55	6050	835	110	7.6	47.4
		P11-3	110	55	6050	910	110	8.3	46.7
		P11-4	110	55	6050	916	110	8.3	46.7
		P11-5	110	55	6050	901	110	8.2	46.8
		P11-6	110	55	6050	864	110	7.9	47.1
	P12	P12-1	110	55	6050	740	110	6.7	48.3
		P12-2	110	55	6050	944	110	8.6	46.4
		P12-3	110	55	6050	759	110	6.9	48.1
		P12-4	110	55	6050	852	110	7.7	47.3
		P12-5	110	55	6050	791	110	7.2	47.8
		P12-6	110	55	6050	836	110	7.6	47.4
	P13	P13-1	110	55	6050	660	110	6.0	49.0
		P13-2	110	55	6050	560	110	5.1	49.9
		P13-3	110	55	6050	601	110	5.5	49.5
		P13-4	110	55	6050	587	110	5.3	49.7
		P13-5	110	55	6050	618	110	5.6	49.4
		P13-6	110	55	6050	605	110	5.5	49.5
	P14	P14-1	110	55	6050	525	110	4.8	50.2
		P14-2	110	55	6050	883	110	8.0	47.0
		P14-3	110	55	6050	597	110	5.4	49.6
		P14-4	110	55	6050	709	110	6.4	48.6
		P14-5	110	55	6050	716	110	6.5	48.5
		P14-6	110	55	6050	649	110	5.9	49.1
PC2	P21	P21-1	110	55	6050	1071	110	9.7	45.3
		P21-2	110	55	6050	812	110	7.4	47.6
		P21-3	110	55	6050	945	110	8.6	46.4
		P21-4	110	55	6050	867	110	7.9	47.1
		P21-5	110	55	6050	1057	110	9.6	45.4
		P21-6	110	55	6050	951	110	8.6	46.4
	P22	P22-1	110	55	6050	633	110	5.8	49.2
		P22-2	110	55	6050	834	110	7.6	47.4
		P22-3	110	55	6050	736	110	6.7	48.3
		P22-4	110	55	6050	682	110	6.2	48.8
		P22-5	110	55	6050	728	110	6.6	48.4
		P22-6	110	55	6050	803	110	7.3	47.7
	P23	P23-1	110	55	6050	838	110	7.6	47.4
		P23-2	110	55	6050	1225	110	11.1	43.9
		P23-3	110	55	6050	1006	110	9.1	45.9
		P23-4	110	55	6050	1049	110	9.5	45.5
		P23-5	110	55	6050	935	110	8.5	46.5
		P23-6	110	55	6050	1215	110	11.0	44.0
	P24	P24-1	110	55	6050	880	110	8.0	47.0
		P24-2	110	55	6050	873	110	7.9	47.1
		P24-3	110	55	6050	899	110	8.2	46.8
		P24-4	110	55	6050	862	110	7.8	47.2
		P24-5	110	55	6050	870	110	7.9	47.1
		P24-6	110	55	6050	902	110	8.2	46.8

**Tabla A.4.2 “Medidas Método Rectángulo equivalente para probetas compuestas PC3 y PC4”**

Probeta	Mini- Probeta	Sección	Dimensiones Originales			Área residual [mm <sup>2</sup> ]	Dimensiones Equivalentes		dc [mm]
			B0 [mm]	h0 [mm]	Area Inicial [mm <sup>2</sup> ]		B equiv. [mm]	h equiv [mm]	
PC3	P31	P31-1	110	55	6050	1210	110	11.0	44.0
		P31-2	110	55	6050	1089	110	9.9	45.1
		P31-3	110	55	6050	1188	110	10.8	44.2
		P31-4	110	55	6050	1518	110	13.8	41.2
		P31-5	110	55	6050	1078	110	9.8	45.2
		P31-6	110	55	6050	1177	110	10.7	44.3
	P32	P32-1	110	55	6050	1331	110	12.1	42.9
		P32-2	110	55	6050	1265	110	11.5	43.5
		P32-3	110	55	6050	1067	110	9.7	45.3
		P32-4	110	55	6050	1155	110	10.5	44.5
		P32-5	110	55	6050	1122	110	10.2	44.8
		P32-6	110	55	6050	1188	110	10.8	44.2
	P33	P33-1	110	55	6050	1375	110	12.5	42.5
		P33-2	110	55	6050	1309	110	11.9	43.1
		P33-3	110	55	6050	1287	110	11.7	43.3
		P33-4	110	55	6050	1188	110	10.8	44.2
		P33-5	110	55	6050	1210	110	11.0	44.0
		P33-6	110	55	6050	1419	110	12.9	42.1
	P34	P34-1	110	55	6050	1551	110	14.1	40.9
		P34-2	110	55	6050	1419	110	12.9	42.1
		P34-3	110	55	6050	1595	110	14.5	40.5
		P34-4	110	55	6050	1298	110	11.8	43.2
		P34-5	110	55	6050	1309	110	11.9	43.1
		P34-6	110	55	6050	1210	110	11.0	44.0
PC4	P41	P41-1	110	55	6050	1353	110	12.3	42.7
		P41-2	110	55	6050	1331	110	12.1	42.9
		P41-3	110	55	6050	1419	110	12.9	42.1
		P41-4	110	55	6050	1298	110	11.8	43.2
		P41-5	110	55	6050	1408	110	12.8	42.2
		P41-6	110	55	6050	1309	110	11.9	43.1
	P42	P42-1	110	55	6050	1507	110	13.7	41.3
		P42-2	110	55	6050	1485	110	13.5	41.5
		P42-3	110	55	6050	1419	110	12.9	42.1
		P42-4	110	55	6050	1375	110	12.5	42.5
		P42-5	110	55	6050	1441	110	13.1	41.9
		P42-6	110	55	6050	1353	110	12.3	42.7
	P43	P43-1	110	55	6050	1859	110	16.9	38.1
		P43-2	110	55	6050	1485	110	13.5	41.5
		P43-3	110	55	6050	1639	110	14.9	40.1
		P43-4	110	55	6050	1683	110	15.3	39.7
		P43-5	110	55	6050	1628	110	14.8	40.2
		P43-6	110	55	6050	1606	110	14.6	40.4
	P44	P44-1	110	55	6050	1386	110	12.6	42.4
		P44-2	110	55	6050	1419	110	12.9	42.1
		P44-3	110	55	6050	1364	110	12.4	42.6
		P44-4	110	55	6050	1375	110	12.5	42.5
		P44-5	110	55	6050	1320	110	12.0	43.0
		P44-6	110	55	6050	1518	110	13.8	41.2

