



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

ENSAYOS DE RESISTENCIA AL FUEGO PARA ANTEPROYECTO DE NORMA DE
CALCULO DE RESISTENCIA AL FUEGO PARA LA CONSTRUCCION EN MADERA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

SANTIAGO JOAQUIN CERFOGLI ROMERO

PROFESOR GUÍA:
MARIO WAGNER MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
DAVID CAMPUSANO BROWN
ÁNDRES SANTIS ÁLVAREZ

SANTIAGO DE CHILE

2018

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL
POR: SANTIAGO CERFOGLI ROMERO
FECHA: OCTUBRE DE 2018
PROF. GUÍA: SR. MARIO WAGNER MUÑOZ**

ENSAYOS DE RESISTENCIA AL FUEGO PARA ANTEPROYECTO DE NORMA DE CALCULO DE RESISTENCIA AL FUEGO PARA LA CONSTRUCCION EN MADERA

El presente estudio tiene como objetivo principal la determinación de la velocidad de carbonización unidireccional de madera aserrada de Pino Radiata, Pino Oregón, Roble y Madera Lamina Encolada de Pino Radiata, mediante un programa experimental con probetas ensayadas de acuerdo a protocolos reconocidos internacionalmente en el horno de escala reducida incorporado recientemente al laboratorio de incendios del IDIEM.

Esta propiedad constituye un parámetro relevante en el desarrollo de métodos analíticos para la estimación de la resistencia al fuego de elementos y componentes en construcciones de madera.

La velocidad de carbonización de las distintas especies madereras se determina por medio de dos métodos. El primero considera la instalación de sensores dispuestos a profundidades conocidas con respecto a la superficie de la probeta que se expone al fuego, que permiten medir el avance del frente carbonizado a través de la intensidad de las temperaturas registradas y la posterior aplicación de regresiones lineales. El segundo, denominado método del ancho residual, consiste en remover la capa de carbón, posterior al apagado de la probeta y medir el ancho no carbonizado comparándolo con la dimensión original.

Para la medición de la velocidad de carbonización unidireccional el efecto de la exposición al fuego se aplica solo sobre una cara de la probeta, a diferencia de los estudios realizados anteriormente en Chile que consideraron exposiciones al fuego en la totalidad de las superficies de las probetas.

Como actividades complementarias cabe consignar la realización de ensayos preliminares de calibración de la cámara de combustión, su instrumentalización y la medición de la densidad y el contenido de humedad de la totalidad de las muestras ensayadas para analizar el efecto que estas propiedades pudieran ejercer sobre la velocidad de carbonización.

Los resultados obtenidos permiten validar, con excepción de la madera laminada encolada de Pino Radiata, la aplicación de las velocidades de carbonización especificadas en la norma europea para el diseño de construcciones de madera, EN 1995-1-2, que constituye el principal documento referencial para la redacción de la correspondiente norma en el ámbito nacional, labor que en la actualidad se desarrolla por parte del IDIEM.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mi familia, en especial a mis padres, que sin su apoyo y ayuda nada de esto podría haber sido posible.

Al profesor Mario Wagner, que siempre estuvo pendiente de mis dudas y dispuesto a ayudar en cualquier momento. A Andrés Santis, que, gracias a su guía, hizo posible la realización de los ensayos y al profesor David Campusano que gracias a su consejo pude completar este trabajo.

A mis amigos que siempre estuvieron conmigo durante este proceso y a lo largo de todos mis estudios.

Agradecer a Bárbara no solo por su paciencia y apoyo, sino que, por su ayuda y enseñanzas en el ámbito de los análisis estadísticos, siendo esto fundamental en el entendimiento y realización de este trabajo.

A Mauricio Rey quien me permitió acceder sin problemas al laboratorio y entrego todo lo necesario para realizar los ensayos, estando dispuesto a resolver mis problemas en cualquier momento. También a todos los funcionarios del laboratorio de incendios de IDIEM que con su profesionalismo y actitud hicieron agradable y llevadero el proceso de ensayos, demostrando que la experiencia ganada en el trabajo es muy importante.

Especiales agradecimientos a las empresas, que gracias a sus donaciones hicieron posible la confección de las probetas. Oxiquim quien proveyó el adhesivo e Ingelam que fabrico las probetas de MLE.

Tabla de Contenido

AGRADECIMIENTOS.....	II
ÍNDICE DE TABLAS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE GRAFICOS	X
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. OBJETIVOS.....	4
1.1.1. Objetivos Generales	4
1.1.2. Objetivos Específicos	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. FACTORES QUE AFECTAN LA CARBONIZACIÓN	5
2.2. FRENTE DE CARBONIZACIÓN	10
2.3. CURVA TIEMPO TEMPERATURA	11
2.3.1. Chile.....	11
2.3.2. Estados Unidos	12
2.3.3. Unión Europea.....	13
2.4. VELOCIDAD DE CARBONIZACIÓN	15
2.4.1. Valores Internacionales	15
2.4.2. Valores Nacionales	20
2.5. DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CARBONIZACIÓN	22
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	25
3.1. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS E IMPLEMENTOS	25
3.1.1. Horno.....	25
3.1.1.1. Dimensiones.....	26
3.1.1.2. Cámara de Combustión.....	28
3.1.1.3. Quemador	28
3.1.1.4. Computador Horno	29
3.1.2. Termocuplas	29
3.1.3. Cable Compensado	30
3.1.4. Adquisición de Datos	30
3.1.5. Horno de secado.....	31
3.1.6. Balanza.....	31
3.1.7. Cámara Termográfica	31
3.2. PROBETA	32
3.2.1. Probetas para Madera Aserrada	33
3.2.1.1. Dimensiones.....	33
3.2.1.3. Muestras	35
3.2.2. Probeta para MLE	35
3.3. MEDICIÓN DE HUMEDAD Y DENSIDAD.....	37
3.3.1. Humedad	37
3.3.2. Densidad	38
3.3.2.1. Densidad Anhidra.....	38
3.3.2.2. Densidad de referencia	38
3.4. NUMERO DE TERMOCUPLAS	39
3.5. POSICIÓN DE TERMOCUPLAS.....	42

3.5.1.	Probeta de Madera Aserrada	42
3.5.2.	Probeta de MLE	43
3.6.	CONDICIONES DE ENSAYO	44
3.6.1.	Método de Ensayos	45
4.	ITEMIZADO DE ENSAYOS.....	48
5.	ESTUDIO DE DATOS.....	49
5.1.	MÉTODOS PARA PARA OBTENER LA VELOCIDAD DE CARBONIZACIÓN.....	49
5.1.1.	Método ancho residual.....	49
5.1.2.	Método mediante regresión lineal	52
5.1.3.	Método rectángulo equivalente.....	54
5.2.	MÉTODO DE ANÁLISIS DE DATOS.....	56
5.2.1.	Estudio de Normalidad	56
5.2.2.	Estudio de Cuartiles	58
5.2.3.	Estudio de Correlación.....	59
5.2.4.	Estudio de Concordancia	61
6.	RESULTADOS	62
6.1.	MADERA ASERRADA	62
6.1.1.	Pino Radiata.....	62
6.1.1.1.	Velocidad de Carbonización	62
6.1.1.1.	Humedad.....	64
6.1.1.2.	Densidad	64
6.1.2.	Pino Oregón	65
6.1.2.1.	Velocidad de Carbonización	65
6.1.2.2.	Humedad.....	67
6.1.2.3.	Densidad	67
6.1.3.	Roble.....	68
6.1.3.1.	Velocidad de Carbonización	68
6.1.3.2.	Humedad.....	69
6.1.3.3.	Densidad	70
6.2.	MADERA LAMINADA ENCOLADA	71
6.2.1.	Velocidad de Carbonización	71
6.2.2.	Humedad	72
6.2.3.	Densidad.....	73
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	74
7.1.	VELOCIDAD DE CARBONIZACIÓN	74
7.2.	CORRELACIÓN ENTRE DENSIDAD Y VELOCIDAD DE CARBONIZACIÓN	83
7.3.	CORRELACIÓN ENTRE HUMEDAD Y VELOCIDAD DE CARBONIZACIÓN.....	88
7.4.	CONCORDANCIA.....	92
7.5.	DIFERENCIAS EN LOS PATRONES DE QUEMADO.....	94
7.6.	EVAPORACIÓN DEL AGUA.....	95
8.	CONCLUSIONES.....	96
8.1.	VELOCIDAD DE CARBONIZACIÓN	96
8.1.1.	Conclusión Principal.....	96
8.1.2.	Interpretación de Diferencias.....	97
8.1.4.	Efecto del tipo de Exposición al Fuego	98
8.2.	RELACIÓN ENTRE DENSIDAD Y HUMEDAD CON LA VELOCIDAD DE CARBONIZACIÓN.....	98
8.3.	DENSIDADES DE LA MADERA UTILIZADA EN LA FABRICACIÓN DE MUESTRAS.	98

8.4.	CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MADERA UTILIZADA EN LA FABRICACIÓN DE MUESTRAS.....	99
8.5.	ESTUDIOS DE CONCORDANCIA ENTRE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE CARBONIZACIÓN.	100
8.5.1.	Método de Regresión Lineal y Ancho Residual	100
8.5.2.	Método del Ancho Residual y Rectángulo Equivalente	100
8.6.	RECOMENDACIONES PARA LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS	100
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	102
	ANEXO A	105
	ANEXO B	112
	ANEXO C	120
	ANEXO D	121
	ANEXO E	135
	ANEXO F.....	137
	ANEXO G	139
	ANEXO H.....	148
	ANEXO I	152

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de velocidad de carbonización propuestos, Collier (1992) [14].....	5
Tabla 2. Velocidad de carbonización ordenada según densidad, Njankouo et al. (2004) [21]	7
Tabla 3. Curva-tiempo temperatura ASTM E119-16 ^a	12
Tabla 4. Velocidad de Carbonización, EN 1995-1-2:2004	16
Tabla 5. Velocidad de Carbonización, CSA-O86.....	16
Tabla 6. Velocidades de Carbonización, latifoliadas tropicales. Njankouo et al. (2004) [21].....	17
Tabla 7. Velocidades de Carbonización, Yang et al.	18
Tabla 8. Velocidades de Carbonización Pino Radiata, Collier.....	19
Tabla 9. Velocidades de Carbonización, trabajo Alejandro Ramírez	20
Tabla 10. Velocidad de Carbonización, Esteban Reyes	21
Tabla 11. Velocidad de Carbonización distintos medios de análisis, Esteban Reyes (2015)....	22
Tabla 12. Especificaciones Adhesivo	34
Tabla 13. Coeficiente de contracción, Especies Madereras.....	39
Tabla 14. Ejemplo Alturas mini-muestras, muestra 7	51
Tabla 15. Resultados test Shapiro Wilk.....	57
Tabla 16. Resumen valores cuartiles	58
Tabla 17. Interpretación de valores coeficiente.....	59
Tabla 18. P-value y coeficiente de correlación, Densidad -Velocidad de Carbonización	60
Tabla 19. Velocidades de carbonización para muestras de Pino Radiata	62
Tabla 20. Densidad normal y característica, Pino Radiata	65
Tabla 21. Velocidades de carbonización para muestras de Pino Radiata	65
Tabla 22. Densidad normal y característica, Pino Oregón	68
Tabla 23. Velocidades de carbonización para muestras de Roble	68
Tabla 24. Densidad normal y característica, Roble	70
Tabla 25. Velocidades de carbonización para muestras de MLE	71
Tabla 26. Densidad normal y característica, MLE	73
Tabla 27. Diferencias velocidades de carbonización muestras	74
Tabla 28. Resumen valores muestras de Pino Radiata.....	75
Tabla 29. Diferencias velocidades de carbonización muestras de Pino Radiata	80
Tabla 30. Resumen valores muestras de Pino Radiata.....	82
Tabla 31. Correlación Densidad Pino Radiata, Ancho Residual.....	83
Tabla 32. Correlación Densidad Pino Radiata, Ancho Residual.....	84
Tabla 33. Correlación Densidad Pino Oregón	85
Tabla 34. Correlación Densidad Roble	86
Tabla 35. Correlación Densidad, MLE método Ancho Residual	86
Tabla 36. Correlación Densidad, MLE método Ancho Residual	87
Tabla 37. Comparación velocidad de carbonización con normativa internacional	96
Tabla 38. Resumen resultados de correlación Densidad -Velocidad de Carbonización	99
Tabla 39. Resumen probetas madera aserrada	149
Tabla 40. Contenido de humedad muestras Pino Radiata	152
Tabla 41. Densidad muestra de Pino Radiata	153
Tabla 42. Contenido de humedad muestras Pino Oregón.....	154

Tabla 43. Densidad muestra de Pino Oregón	155
Tabla 44. Contenido de humedad muestras Pino Radiata	156
Tabla 45. Densidad muestra de Roble.....	157
Tabla 46. Contenido de humedad muestras de MLE	158
Tabla 47. Densidad muestra de MLE.....	158

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de materiales en la construcción en Chile	1
Figura 2. Madera cosechada vs consumo per cápita, Ministerio de Vivienda y Urbanismo	2
Figura 3. Producción de madera aserrada en Chile, 2015	3
Figura 4. Relación densidad-velocidad de carbonización, Cachim (2010).....	6
Figura 5. Relación Densidad- Velocidad de carbonización de Roble Blanco.....	9
Figura 6. Relación Densidad- Velocidad de carbonización de Southern Pines	9
Figura 7. Temperatura en termocuplas donde no se evidencia un cambio al alcanzar los 300°C	11
Figura 8. Efecto del redondeo de aristas.....	15
Figura 9. Probetas compuestas, consistentes de micro probetas y marco de sacrificio	21
Figura 10. Muestras utilizadas para la medición del ancho residual, Ramírez (2001)	22
Figura 11. Frente carbonizado en termocuplas, Daud et al. (2015).....	23
Figura 12. Horno de dimensiones reducidas, de izquierda a derecha, ventana 2 y ventana 1 respectivamente	25
Figura 13. Vistas laterales del horno de dimensiones reducidas.....	26
Figura 14. Vista superior, corte A-A	26
Figura 15. Vista superior, corte B-B	27
Figura 16. Vista interna, Corte C-C.....	27
Figura 17. Cámara de combustión con llama.....	28
Figura 18. Quemador de horno, sobre ventana poniente, vista frontal	28
Figura 19. Quemador de horno, sobre ventana poniente, vista lateral	29
Figura 20. Controlador N1200.....	29
Figura 21. Termocupla tipo K, a la izquierda se muestra la junta fría.	30
Figura 22. Cable Compensado	30
Figura 23. Tarjeta de adquisición de datos TC-32.....	30
Figura 24. Horno de secado.....	31
Figura 25. Balanza.....	31
Figura 26. Cámara termográfica	31
Figura 27. Prototipo de Probeta de Pino Oregón.	32
Figura 28. Probeta para madera aserrada	32
Figura 29. Vista frontal de probeta de madera aserrada	33
Figura 30. Dimensiones probeta de madera aserrada	34
Figura 31. Muestras de madera aserrada	35
Figura 32. Esquema probeta MLE vista Frontal	36
Figura 33. Probetas de MLE, con sus divisiones predeterminadas para el estudio previo	36
Figura 34. mini-muestras de MLE antes de ingresar al horno de secado.	37
Figura 35. Probeta trabajo de Njankouo et al. (2003) [21].....	40
Figura 36. König et al. 1999 [17]	40
Figura 37. Posicionamiento trabajo Esteban Reyes (2015) [7].....	40
Figura 38. Termocuplas en probeta de madera aserrada	42
Figura 39. Termocuplas probetas de MLE	43
Figura 40. Detalle posicionamiento termocuplas.....	43
Figura 41. Ventana 3, arriba en rojo, el Quemador	44
Figura 42. Probeta con protección de manta en los espacios entre horno y probeta.	45
Figura 43. Controlador N1200 en automático y manual	45
Figura 44. Seguimiento de Controlador N1200 de la curva tiempo-temperatura, Arriba T° deseada, Abajo T° real.....	46
Figura 45. Probetas recién sacadas del horno con llamas presentes.....	46

Figura 46. Termografía aun con llama visible.....	47
Figura 47. Termografía probeta 1 minutos después de apagada con agua.....	47
Figura 48. Termografía probeta 1,5 minutos después de apagada con agua.....	47
Figura 49. Probeta carbonizada posterior a su apagado.....	49
Figura 50. Muestras y soportes separadas de probeta.....	49
Figura 51. Muestras a estudiar, sin los soportes.....	50
Figura 52. Muestras raspadas.....	50
Figura 53. Muestras sin bordes.....	50
Figura 54. Mini-muestras para el cálculo del ancho residual.....	51
Figura 55. Disposición de termocuplas madera aserrada.....	52
Figura 56. Tarjeta de adquisición.....	52
Figura 57. Irregularidades en la carbonización de probetas de MLE.....	54
Figura 58. comparación mini-muestras MLE. arriba, imagen tomada de la mini-muestra. abajo, modelación de la sección en AutoCAD.....	55
Figura 59. rectángulo equivalente que resulta de la modelación de AutoCAD.....	55
Figura 60. Ejemplo de uso para grafico Bland-Altman.....	61
Figura 61. De izquierda a derecha, arriba. Pino Radiata y Pino Oregón. Abajo Roble y MLE de Pino Radiata.....	94
Figura 62. Mini-muestras de MLE con planos encolados carbonizados.....	97

ÍNDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1. Curva Tiempo-Temperatura, norma chilena	12
Gráfico 2. Curva Tiempo-Temperatura, normativa estadounidense	13
Gráfico 3. Curva Tiempo-Temperatura Eurocódigo.....	13
Gráfico 4. Comparación Curvas Tiempo-temperatura.....	14
Gráfico 5. Ejemplo de método por regresión lineal Ejemplo de método por regresión lineal	53
Gráfico 6. Velocidad de carbonizacion mediante Regresion lineal	54
Gráfico 7. Gráfico Q-Q para demostrar normalidad de la distribución de la velocidad de carbonización	57
Gráfico 8. Gráfico Q-Q para demostrar normalidad de la distribución de la densidad	57
Gráfico 9. Gráfico de Caja	58
Gráfico 10. Relación linear Densidad-Velocidad de Carbonización.....	60
Gráfico 11. Comparación velocidades de carbonización.....	63
Gráfico 12. Gráfico de caja humedades Pino Radiata.....	64
Gráfico 13. Densidades Pino Radiata	64
Gráfico 14. Gráfico de Caja velocidad de carbonización Pino Oregón	66
Gráfico 15. Distribución humedad Pino Oregón	67
Gráfico 16. Densidades Pino Oregón.....	67
Gráfico 17. Gráfico de Caja velocidad de Carbonización muestras de Roble.....	69
Gráfico 18. Distribución humedad roble	69
Gráfico 19. Densidades Pino Radiata	70
Gráfico 20. Gráfico de caja comparación velocidad de carbonización ancho residual y rectángulo equivalente	72
Gráfico 21. Humedad Muestras de MLE	72
Gráfico 22. Densidades Muestras de MLE	73
Gráfico 23. Gráfico Q-Q Pino Radiata- Método del Ancho Residual.....	76
Gráfico 24. Gráfico Q-Q Pino Radiata- Método de Regresión Lineal.....	76
Gráfico 25. Gráfico Q-Q Pino Oregón- Método del Ancho Residual	78
Gráfico 26. Gráfico Q-Q Roble - Método del Ancho Residual.....	79
Gráfico 27. Gráfico Q-Q MLE - Método del Ancho Residual.....	81
Gráfico 28. Gráfico Q-Q MLE - Método del Rectángulo Equivalente	82
Gráfico 29. Velocidad de carbonización vs Densidad Anhidra Pino Radiata para el Método de regresión Lineal	83
Gráfico 30. Velocidad de carbonización vs Densidad Anhidra Pino Radiata para el Método de Ancho Residual.....	84
Gráfico 31. Velocidad de carbonización vs Densidad Anhidra Pino Oregón.....	85
Gráfico 32. Velocidad de carbonización vs Densidad anhidra Roble.....	85
Gráfico 33. Velocidad de carbonización vs Densidad anhidra, Ancho Residual para MLE	86
Gráfico 34. Velocidad de carbonización vs Densidad anhidra, Regresión Lineal para MLE	87
Gráfico 35. Velocidad de carbonización y Humedad, Pino Radiata método de regresión lineal	88
Gráfico 36. Velocidad de carbonización y Humedad, Pino Radiata método de regresión lineal	89
Gráfico 37. Velocidad de carbonización y Humedad, Pino Oregón	89
Gráfico 38. Velocidad de carbonización y Humedad, Roble.....	90

Gráfico 39. Velocidad de carbonización y Humedad relación logarítmica, Pino Radiata método de regresión lineal	90
Gráfico 40. Velocidad de carbonización y Humedad, MLE de Pino Radiata método de Ancho Residual.....	91
Gráfico 41. Velocidad de carbonización y Humedad, MLE de Pino Radiata método de Rectángulo Equivalente.....	91
Gráfico 42. Gráfico Bland-Altman para relación Método de Regresión Lineal y Ancho residual en Pino Radiata	92
Gráfico 43. Gráfico Bland-Altman para relación Método de Ancho Residual y Rectángulo Equivalente en MLE de Pino Radiata.....	93
Gráfico 45. Registro de termocuplas con meseta a los 100°C	95

1. INTRODUCCIÓN

El uso de elementos estructurales de madera, tanto a nivel global como nacional, se ha incrementado en los últimos años. Las diversas bondades de estos elementos los hacen un material ventajoso en la construcción residencial. En nuestro país, sin embargo, su uso no se encuentra masificado desde el punto de vista de lo permitido por su potencial.

Según datos del Instituto Nacional de estadísticas, INE, reflejados en el gráfico de Figura 1, hasta el año 2016 solo el 13% de las viviendas construidas eran de madera, mientras que el material predominante, el hormigón, concentraba el 53%. Esta información difiere con lo que se puede apreciar en otras regiones del mundo. En Canadá, por ejemplo, el 85% de las construcciones residenciales se materializan en madera, porcentaje que alcanza el 90% en EEUU, mientras que en Australia y Nueva Zelandia se registra un 70%.¹

Como resultado de una acertada política de incentivos a las plantaciones de Pino Radiata implementada durante la segunda mitad del siglo pasado, Chile se ha transformado en uno de los mayores productores mundiales de madera aserrada de esta especie. El aprovechamiento interno de este recurso, sin embargo, queda muy por debajo de lo que se aprecia en otros países, situación que se visualiza en el gráfico de la Figura 2².

La explicación de esta paradoja no es sencilla y reside principalmente en los prejuicios sociales que existen en relación a las construcciones de madera y al material mismo. El fuego surge como uno de los principales factores de riesgo, que atemoriza y condiciona un rechazo hacia las soluciones constructivas de madera, material que, por ser efectivamente combustible, queda relegado frente al empleo de materiales tradicionalmente asociados a la incombustibilidad, como son el hormigón, las albañilerías y el acero.

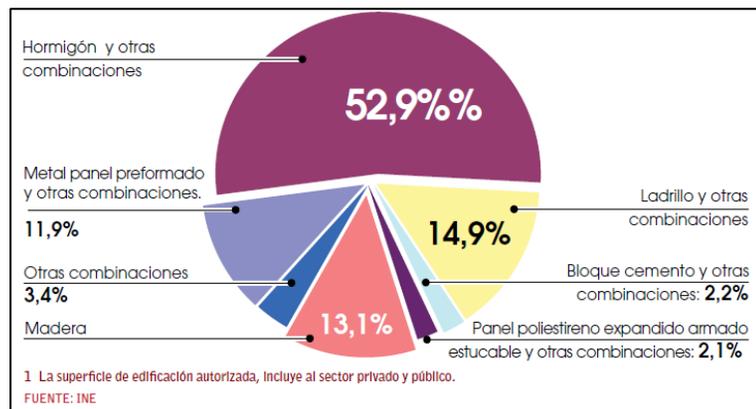


Figura 1. Distribución de materiales en la construcción en Chile

¹ Construcción con madera en altura, la nueva tendencia llega a Chile, CHAMCAL cámara chileno-alemana.

² Uso de la madera en la construcción, Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

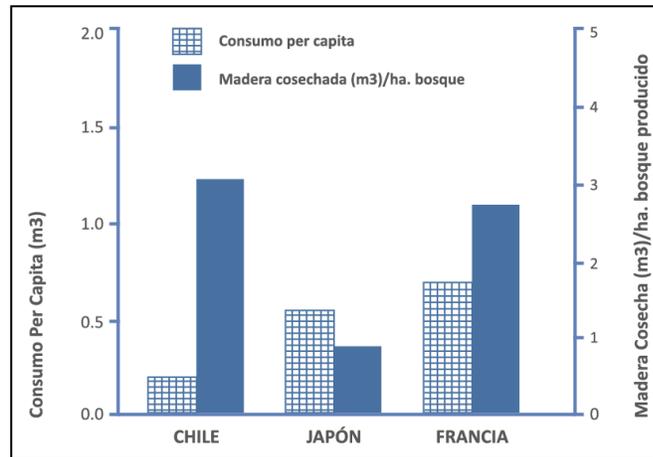


Figura 2. Madera cosechada vs consumo per cápita, Ministerio de Vivienda y Urbanismo

Pese a que efectivamente la madera es un material combustible, al quedar expuesta al fuego su comportamiento puede resultar más que aceptable, y si se respeta un conjunto de consideraciones, tanto de diseño como constructivas, las edificaciones de madera pueden alcanzar niveles de seguridad similares a las que ofrecen las construcciones de hormigón o de acero.

Se hace necesario, en consecuencia, llevar a cabo una amplia divulgación de las condiciones que permitan posicionar al material en el nivel que ha alcanzado en el hemisferio norte y en Oceanía. La capacitación profesional y la investigación aplicada coordinada juegan aquí un rol decisivo. Desde el punto de vista de la ingeniería, la disponibilidad de criterios de diseño y verificación al fuego resultan una necesidad imprescindible.

La información requerida de mayor relevancia para la estimación de la capacidad resistente de elementos y componentes constructivos de madera en condiciones de humedad consiste de la velocidad de avance del proceso de carbonización desde la superficie hacia el interior de las piezas de madera y de la reducción de las capacidades mecánicas del material como consecuencia del incremento de temperatura que se produce en los sectores próximos al frente de carbonización.

En el medio nacional, la investigación sistemática del comportamiento al fuego de componentes constructivos de madera o que incorporan madera, se ha limitado a certificación del desempeño de segmentos de tabiques y pisos por medio de ensayos normalizados en cámaras de combustión.

Existen sin embargo dos investigaciones realizadas en esta facultad relacionadas con la velocidad de carbonización, correspondiendo ambas a trabajos de titulación de la Escuela de Ingeniería. Fueron desarrolladas por Alejandro Ramírez (1990-1991) y Esteban Reyes (2015) y permitieron estimar velocidades de carbonización de distintas especies madereras nacionales y los efectos de la incorporación de recubrimientos de protecciones sobre el desarrollo de la carbonización en el caso de la primera y ratificar y precisar los valores correspondientes a la especie Pino Radiata, en la segunda.

Para este trabajo se utilizan 3 especies madereras distintas, dos coníferas; Pino Radiata y Pino Oregón y una latifoliada; Roble. Las muestras de madera laminada encolada (MLE) son de Pino Radiata ya que representan la mayor parte del mercado.

En Chile el Pino Radiata representa el 96% de toda la producción de madera aserrada, mientras que el pino Oregón el 2% aproximadamente, por lo que solo con estas dos especies madereras ya se abarca el 98% del mercado nacional (figura 3).

El objetivo de esta memoria de título se centra en la determinación de la velocidad de carbonización de las 3 especies madereras mencionadas utilizando un horno diseñado específicamente para este tipo de estudios y recientemente incorporado a la infraestructura del laboratorio de incendios del IDIEM en Cerrillos. Se realizó para estos efectos un conjunto de ensayos respetando protocolos reconocidos internacionalmente, lo que permite incorporar sus resultados en la norma de diseño al fuego de construcciones de madera cuya redacción, bajo forma de anteproyecto, ha sido encargada al IDIEM.

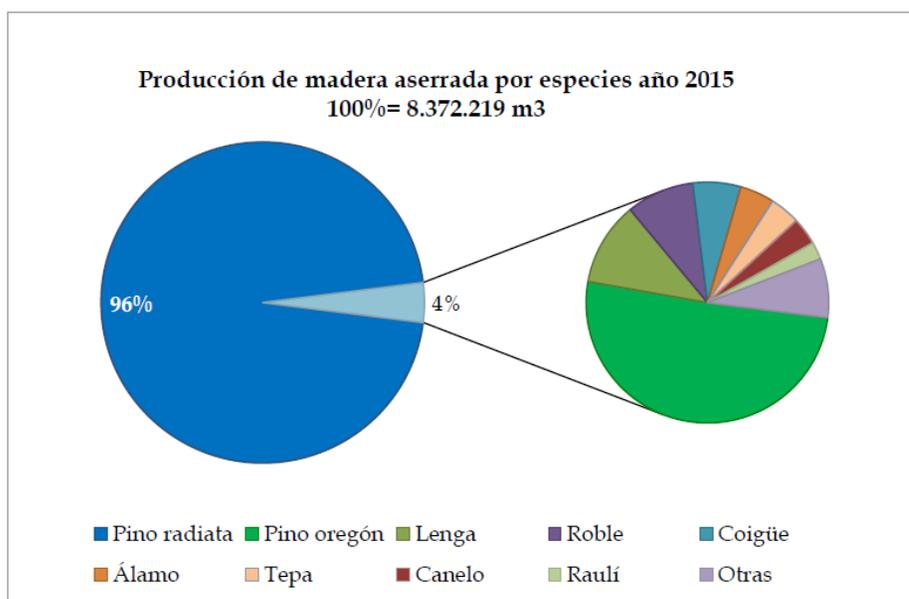


Figura 3. Producción de madera aserrada en Chile, 2015

Con el propósito de analizar posibles relaciones entre la densidad y el contenido de humedad de las maderas ensayadas y su velocidad de carbonización, se determinan además estas propiedades, respetando las especificaciones de la correspondiente normativa nacional.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivos Generales

Definir velocidades de carbonización en madera aserrada y madera laminada encolada aplicando protocolos de ensayo reconocidas internacionalmente. Utilizando el horno de dimensiones reducidas.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Calibrar el horno de escala reducida diseñado por IDIEM para el anteproyecto de norma de resistencia al fuego.
- Elaborar un programa de ensayos de puesta a punto para el horno de escala reducida.
- Realizar y analizar los ensayos de puesta a punto del horno de escala reducida.
- Realizar y analizar los ensayos para el anteproyecto de norma, asociados a la determinación de velocidades de carbonización del Pino Radiata, Pino Oregón, Roble y MLE de Pino Radiata.

2. MARCO TEÓRICO

Existen variados y amplios antecedentes de estudios relacionados con la medición experimental de la velocidad de carbonización para diversas especies madereras de diferentes regiones del mundo, los que explican que existan numerosas proposiciones relacionados con la interpretación y uso práctico de los resultados obtenidos.

2.1. Factores que Afectan la Carbonización

La multiplicidad de propiedades físicas y químicas de la madera pueden jugar un rol importante sobre la intensidad de avance del proceso de carbonización que induce la exposición al fuego y a las altas temperaturas en esta. En un estudio realizado por Kathinka [12] el año 2010, recopila distintos ensayos realizado en diversos países y entrega como conclusión que la densidad y humedad son las propiedades más importantes en cuanto a su efecto sobre la razón de carbonización.

En la mayoría de los estudios [12,14-17,21,31-35] se acepta que la velocidad de carbonización disminuye con el aumento de la densidad, aunque algunos autores [10 y 28] encuentran relaciones muy bajas o nulas entre estas propiedades.

Kathinka concluye que las propiedades más importantes que afectan la velocidad de carbonización son la densidad, la humedad, la composición química (porcentajes de lignina, celulosa y hemicelulosa), la orientación de la fibra, el factor de contracción de carbonización oxidación de la carbonización y efecto de escala. Dentro de los estudios recopilados por la autora se encuentran trabajos de Schaffer, HGadvig, Mikkola, White and Nordheim, entre otros.

Collier (1992) [14], reconociendo que la densidad y contenido de humedad son las propiedades de mayor influencia, le otorga mayor relevancia a la primera, ya que la humedad tiende a ser muy uniforme en la madera construida y puesta en servicio, pero hay que tomar algunas precauciones en localidades que presenten una baja humedad y alta temperatura, ya que la muestra podría secarse, provocando un aumento del 25% en la velocidad de carbonización para muestras completamente secas, dice el autor. Resume sus conclusiones con la siguiente proposición para la norma de diseño al fuego de estructuras de madera en Nueva Zelanda.

Tabla 1. Valores de velocidad de carbonización propuestos, Collier (1992) [14]

Densidad kg/m ³ (con contenido de humedad de 12%)	Velocidad de Carbonización (mm/min)
400	0.75
500	0.7
600	0.65

Gardner (1991) [35] ensayó distintas especies madereras, incluyendo el Pino Radiata, y ratificando las conclusiones generales ya mencionadas, propuso la siguiente relación entre la profundidad bajo la superficie original asociada a la temperatura de 288°, c_{char} , en mm/min, y la densidad anhidra característica, $\rho_{0,k}$, en kg/m³. realiza ensayos a distintas especies madereras, entre las cuales se encuentra el Pino Radiata y entrega una relación entre la profundidad carbonizada y la densidad concluyendo que la primera es mayor, mientras más bajo sea el valor de la densidad. En su trabajo desarrolla relaciones entre la profundidad de carbonización y la densidad.

Las distintas exposiciones corresponden a la duración de cada ensayo y la posición de las termocupas, para la exposición 1A, se ensayan las muestras por una hora con las termocupas colocadas en un plano a 300 mm bajo la base de la muestra, en la exposición 1B la duración es la misma, pero cambiar la posición de las termocupas, situándose a 150 mm bajo la base de la muestra, la exposición 2B es igual a la anterior solo que se ensayan las probetas durante 2 horas. Finalmente, la configuración 2BP se le agrega una protección de placas de yeso cartón.

- Para la exposición 1A: $c = \frac{472 * t}{\rho} + 2.8$ ($R^2 = 0.96, n = 55, p < 0.0001$)
- Para la exposición 1B y 2B: $c = \frac{413 * t}{\rho} + 1.6$ ($R^2 = 0.95, n = 72, p < 0.001$)
- Para la exposición 2BP: $c = \frac{234 * t}{\rho} - 5.8$ ($R^2 = 0.96, n = 42, p < 0.0001$)

En las expresiones anteriores t es el tiempo de exposición al fuego, en minutos, R² el coeficiente de determinación de los resultados, n el número de observaciones y p, el valor crítico, P-value.

Cachim y Franssen (2010) [31] proponen una regresión potencial en la que la relación de la velocidad de carbonización con la densidad es de tipo potencial

$$\beta_{\rho} = 14.28 * \rho_{12}^{-0.49}$$

Esta expresión la generalizan para cualquier densidad por medio de la relación $n \rho_{12}$ siendo la densidad de la madera a una humedad de 12% y β_{450} la velocidad de carbonización para una densidad de 450 kg/m³

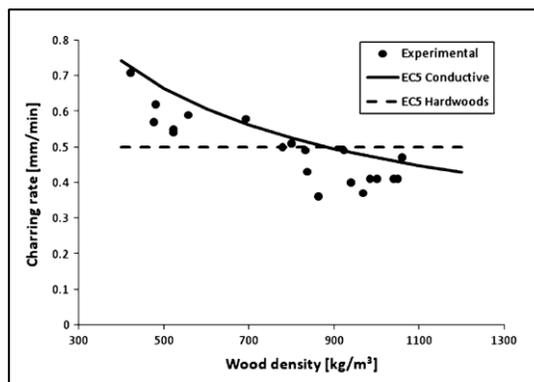


Figura 4. Relación densidad-velocidad de carbonización, Cachim (2010)

$$\beta_{\rho} = \beta_{450} * \sqrt{\frac{450}{\rho_{12}}}$$

Yang (2009) [28] encuentra una baja relación entre la velocidad de carbonización y la densidad, con apenas un coeficiente de correlación $r = 0.53$. lo cual se debe a que el estudio utiliza muestras con un rango de densidades estrecho (398-538 kg/m³). Los estudios se efectúan sobre probetas de madera laminada encola de 5 especies coníferas siguiendo una curva tiempo temperatura establecida en la normativa CNS 12514 similar a la entregada en la norma ISO 840.

Njankouo et al. (2004) [21] En su estudio, a pesar de no ser el objetivo principal de su investigación, procede a estudiar el comportamiento de la velocidad de carbonización y la densidad. Como se muestra en la tabla 2, se puede observar que la relación es evidente, ordenándose las especies madereras de mayor a menor densidad de referencia a la humedad de cada muestra.

Tabla 2. Velocidad de carbonización ordenada según densidad, Njankouo et al. (2004) [21]

Especie	Espécimen	Densidad (kg/m ³)	Velocidad de carbonización Experimental (mm/min)	Tasa de carbonización Exp/EC5
Bilinga	Bilinga 1	692	0,58	1,16
Merbau	Merbau 1	779	0,5	1
Afzelia	Afzelia 1	863	0,36	0,72
	Afzelia 2	836	0,43	0,86
	Afzelia 3	833	0,49	0,98
	Afzelia 4	800	0,51	1,02
	Afzelia 5	968	0,37	0,74
Wenge	Wenge 1	923	0,49	0,98
Balau	Balau 1	939	0,4	0,8
	Balau 2	984	0,41	0,82
Azobe	Azobe 1	1050	0,41	0,82
	Azobe 2	1040	0,41	0,82
	Azobe 3	1000	0,41	0,82
	Azobe 4	1060	0,47	0,94

Schaffter (1967) [16] encontró relaciones evidentes entre la densidad anhidra de la madera y su velocidad de carbonización. Entrega esta relación por cada especie maderera por separado como se ilustra en las Figuras 5 y 6. Las velocidades de carbonización en estas figuras se encuentran en inch /mm, al pasar a mm/min la relación queda, 0,027 inch/min = 0. 69 mm/min; 0,028 inch/min = 0,71 mm/min; 0,029 inch/min = 0,74 mm/min; 0,03 inch/min = 0,76 mm/min; 0,031 inch/min = 79 mm/min; 0,032 inch/min = 0,81 mm/min; 0,033 inch/min = 0,084 mm/min.

Sobre la base de los resultados obtenidos en 40 ensayos de carbonización unidimensional de losas de madera White (1992) [15] desarrolló un modelo de velocidad de carbonización lineal unidimensional que refleja la carbonización acelerada que se produce en el inicio de la exposición al fuego por medio la relación exponencial:

$$t = m * x_c^{1.25}$$

donde la velocidad de carbonización, m, en plgd/min.

$$m = 0.162 + 0.809 * p + 0.0107 * u + 0.0689 * c - 0.00655 * p * d - 0.0024 * c * d$$

$$(R^2 = 0.764)$$

con:

- p = Densidad anhidra de la especie maderera.
- u = Humedad en %.
- c = Clasificación que se da según su especie, 1 para Conífera o -1 para Latifoliada.
- d = Profundidad de tratamiento CCA (cupper chrome arsenat según sus siglas en ingles) en milímetros.

La aplicación de este modelo resultó bastante limitada, ya que la velocidad de carbonización m, en $min/in^{1.25}$ es una propiedad específica para cada especie maderera.

El modelo de White se modificó para adecuarlo a modelos bidimensionales no lineales incorporando el concepto de velocidad de carbonización nominal, β_n , que considera los efectos del redondeo de aristas, y mediciones discretas del avance de la carbonización cada aproximadamente 1 hora. Aplicando estas condiciones a la propuesta de White resulta

$$1 \text{ hora} = m * [(1 \text{ hora}) * \beta_n]^{1.25}$$

$$m = \beta_n^{-1.25}$$

Reemplazando y resolviendo para la profundidad de carbonización, x_{char} , en función del tiempo, t

$$x_{char} = \beta_n * t^{0.813}$$

El efecto de la reducción de las propiedades mecánicas asociadas a las resistencias y rigideces se incorpora incrementando un 20% los valores de la velocidad de carbonización nominal, por lo que la expresión de la velocidad de carbonización efectiva considerada en la normativa estadounidense es

$$\beta_{eff} = \frac{1.2 * \beta_n}{t^{0.187}}$$

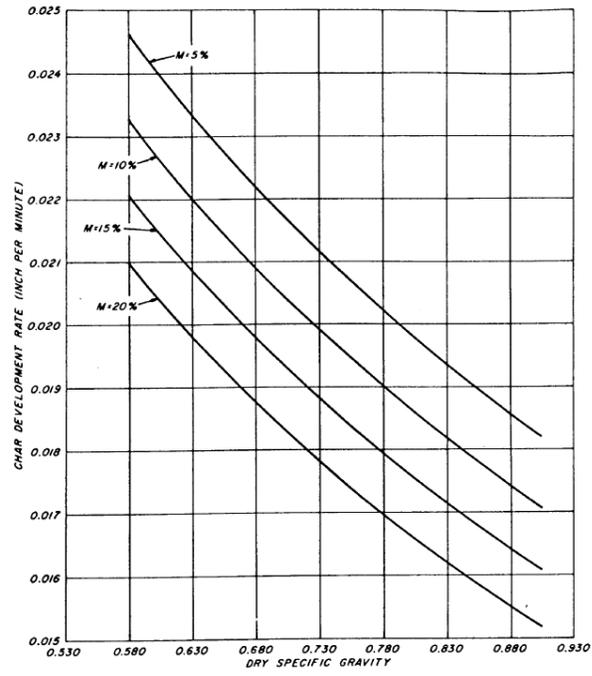


Figura 6. Relación Densidad- Velocidad de carbonización de Southern Pines

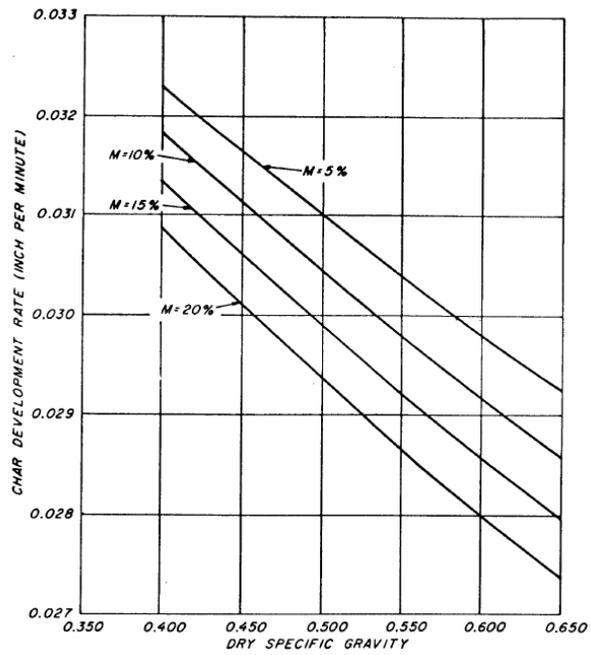


Figura 5. Relación Densidad- Velocidad de carbonización de Roble Blanco

2.2. Frente de Carbonización

La medición de la velocidad de carbonización mediante el uso de termocuplas requiere definir un valor de temperatura asociado al inicio del proceso de carbonización de la madera.

En los trabajos más antiguos resulta usual la referencia a la temperatura de 288 °C. Uno de los primeros ejemplos es el trabajo de Schaffer (1967) y posteriormente White (1992). En trabajos más recientes se ha optado por la temperatura 300 ° C (Konig et al. 1999, White 2003, Njankouo et al.2004, White 2006, Kathinka 2010). De hecho, en la normativa europea EN 1995-1-2 se asocia el frente de carbonización a la isoterma 300°C.

White (2003) explica el cambio a 300°C argumentando que 288°C corresponde a la conversión desde 550°F, referencia utilizada en las primeras investigaciones norteamericanas. La necesidad de adecuar las referencias de temperaturas en las investigaciones al sistema internacional SI que utiliza el grado Celsius definió el límite de 288° C. Este valor resulta poco práctico para controlar el desarrollo de temperaturas, por lo que se utilizó en una primera etapa y nivel 290°C, para en definitiva establecer el valor 300°C.

Otro motivo por el que se optó por el cambio, es que el valor antes utilizado requería de una gran precisión para su estudio la cual no era justificada, por lo que se pasó a utilizar una temperatura de 290°C y posteriormente 300°C.

Najankouo et al. (2003) concluye que el hecho de que no exista un cambio en la velocidad de la temperatura cuando las termocuplas alcanzan los 300°C en la al utilizar esta temperatura para determinar el frente carbonizado ninguna disminución lo que indica que estos valores son, en alguna forma, arbitrarios (Figura 8).

Diversas opiniones existen con respecto a la temperatura que se debiese utilizar. Kathinka (2010) en su trabajo concluye que el rango 288 °C - 300 °C es el más utilizado para la determinación del frente de carbonización, pero que puede variar dependiendo de distintos factores como la composición química, densidad, humedad y tiempo de exposición, por lo que se requieren mayores estudios al respecto.

En el trabajo de Esteban Reyes (2015) se miden las velocidades de carbonización para ambas temperaturas (288°C y 300°C) y se deja propuesto un estudio más acucioso sobre el tema.

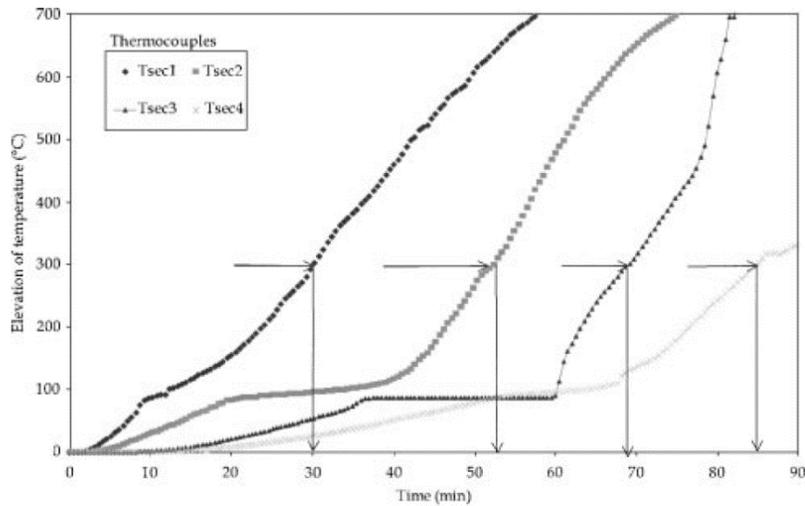


Figura 7. Temperatura en termocuplas donde no se evidencia un cambio al alcanzar los 300°C

2.3. Curva Tiempo Temperatura

El estudio del comportamiento al fuego de los materiales y componentes constructivos se lleva a cabo a menudo implementando ensayos en cámaras de combustión en las que se generan ambientes de temperaturas crecientes en el tiempo que simulan el desarrollo de incendios reales.

Con el propósito de favorecer la interpretación de los resultados, independientemente del laboratorio en que se realicen los ensayos se han definido desarrollo de temperatura en el tiempo muy precisos, conocidos como curvas normalizadas de temperaturas en el tiempo.

2.3.1. Chile

La curva tiempo-temperatura entregada en la normativa chilena NCh 935/1: 1997 se determina con la siguiente ecuación.

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

Donde:

- t = Tiempo expresado en minutos contados desde el inicio del ensayo.
- T = Temperatura del horno en el instante t, medido en grados Celsius.
- T_0 = Temperatura inicial del horno, medido en grados Celsius.

Esta curva tiempo-temperatura proviene de la normativa internacional ISO 834-1y en la norma europea EN 1991-1-2.

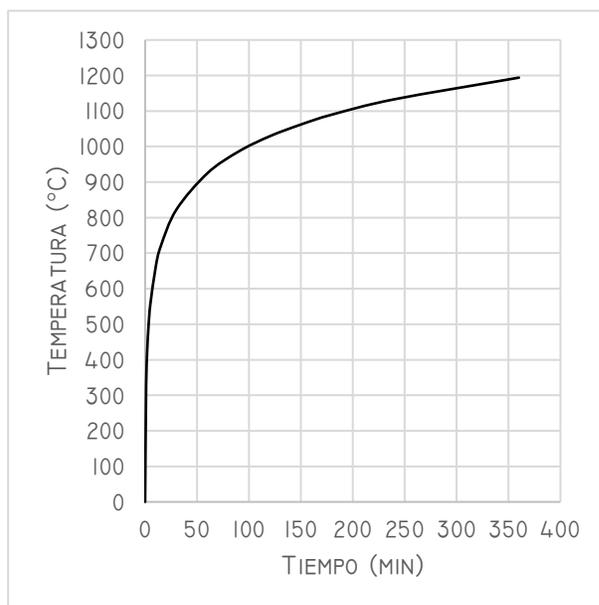


Gráfico 1. Curva Tiempo-Temperatura, norma chilena

2.3.2. Estados Unidos

La curva tiempo-temperatura que se encuentra en la norma ASTM E119-16a, a diferencia de la entregada en la normativa chilena, no sigue una ecuación, sino que se tabulan las temperaturas a partir de rangos de tiempo.

Tabla 3. Curva-tiempo temperatura ASTM E119-16^a

Temperatura °C	Tiempo (min)
539	5
704	10
843	30
927	60
1010	120
1093	240
1296	480

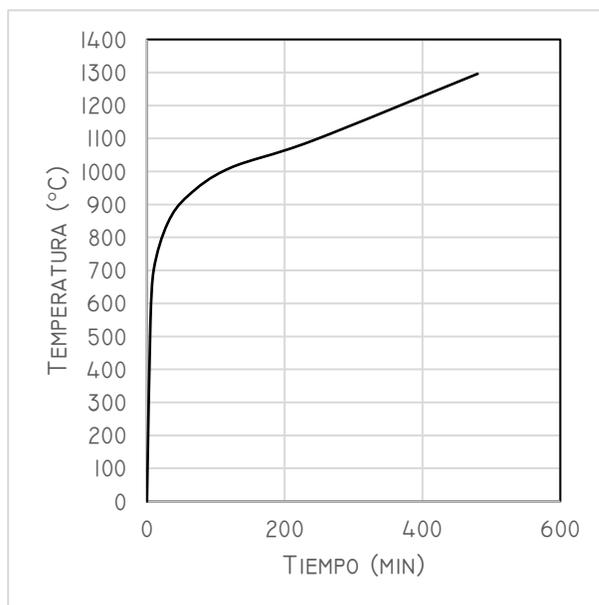


Gráfico 2. Curva Tiempo-Temperatura, normativa estadounidense

2.3.3. Unión Europea

La curva tiempo-temperatura a seguir, según el código europeo EN 1363-1, se modela a partir de la siguiente ecuación:

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1)$$

Donde t corresponde al tiempo expresado en minutos contados desde el inicio del ensayo y θ_g la Temperatura del horno en el instante t, medido en grados Celsius.

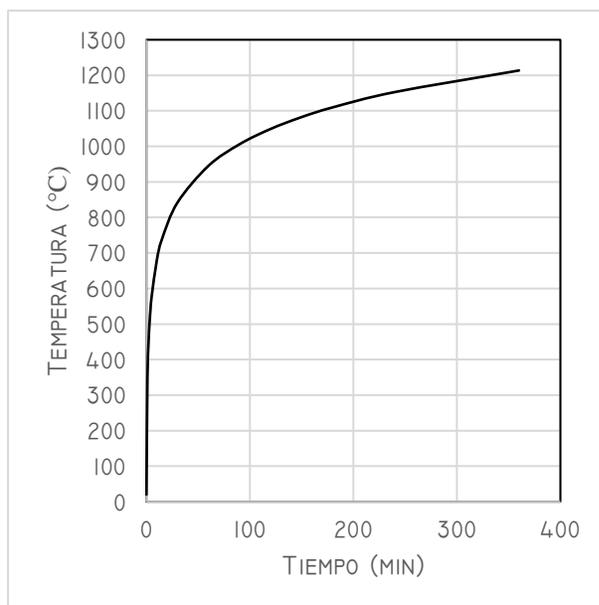


Gráfico 3. Curva Tiempo-Temperatura Eurocódigo

La ecuación es similar a la utilizada en la normativa nacional solo que asume una temperatura ambiente de 20°C.

Comparado las diferentes curvas tiempo-temperatura existe una concordancia muy alta, esto se debe a que estas curvas provienen de la normativa ISO 834, valores adoptados posteriormente por países como Estados Unidos, Australia y Nueva Zelanda.

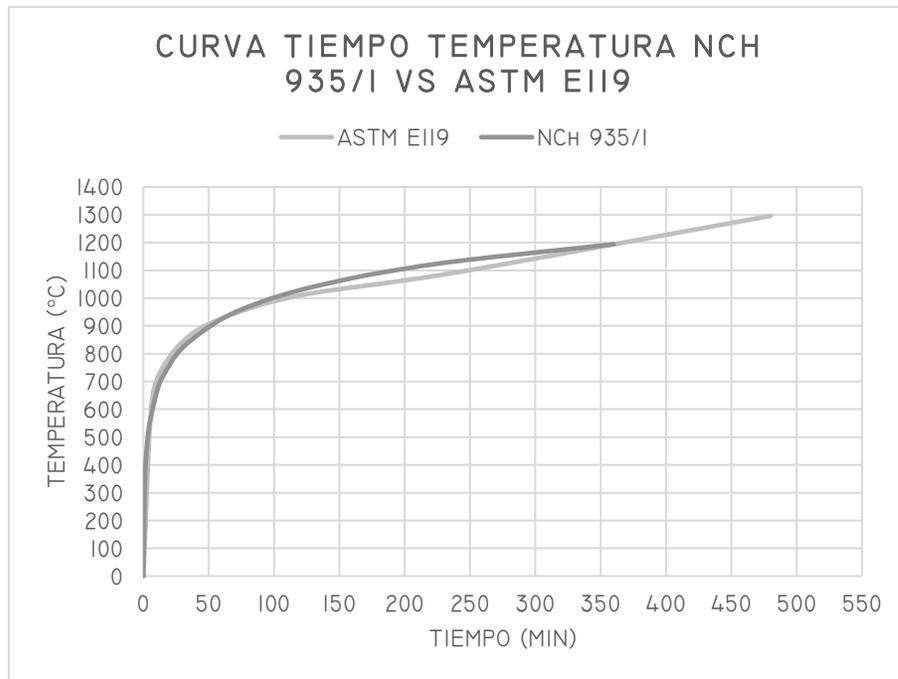


Gráfico 4. Comparación Curvas Tiempo-temperatura

2.4. Velocidad de carbonización

2.4.1. Valores Internacionales

- Norma Europea, Eurocodigo EN 1995-1-2:2004

Brinda dos alternativas de velocidad. Si se calcula la profundidad de carbonización en forma precisa incorporando el efecto del redondeo, se utiliza la velocidad de carbonización unidireccional β_0 . Si se opta por el camino más rápido que desprecia este efecto, pero con igual validez debe utilizar la velocidad de carbonización nominal β_n . En la tabla 4 se muestran ambos valores para distintos tipos de madera y materiales de madera. Los valores unidireccionales son siempre menores, “castigándose” el valor nominal por simplificar la realidad y el cálculo.

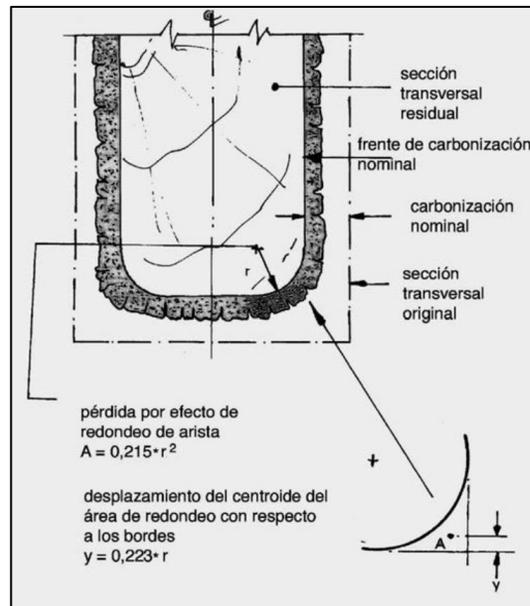


Figura 8. Efecto del redondeo de aristas

En la tabla 4 se entregan los valores discriminados a la madera como Conífera (softwood) y latifoliada (hardwood). Para la primera clasificación, no se hace una diferencia significativa en cuanto a la densidad, ya que el valor 250 kg/m^3 es pequeño y pocas especies caen en esta categoría, notar que para el caso unidireccional no existe diferencia por densidad.

De acuerdo con lo anterior para madera de Pino Radiata, con densidad normal característica bastante mayor que 250 kg/m^3 se podría considerar una velocidad de carbonización nominal de $0,7 \text{ [mm/min]}$.

Tabla 4. Velocidad de Carbonización, EN 1995-1-2:2004

	β_o mm/min	β_n mm/min
Conífera		
Madera laminada encolada con una densidad característica ≥ 290 kg/m ³	0,65	0,7
Madera aserrada con densidad característica ≥ 290 kg/m ³	0,65	0,8
Latifoliada		
Madera laminada encolada con una densidad característica ≥ 290 kg/m ³	0,65	0,7
Madera aserrada y lamida con densidad característica ≥ 450 kg/m ³	0,5	0,55
LVL		
con densidad característica ≥ 480 kg/m ³	0,65	0,7
Paneles		
Paneles de madera	0,9	-
Madera contrachapada	1	-
Paneles a base de madera que no sean de madera contrachapada	0,9	-

- Norma Australiana AS-1720.4

En esta normativa se entrega la velocidad de carbonización en función de la densidad de la especie maderera de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$\beta = 0.4 + \left(\frac{280}{\rho_{12}}\right)^2$$

La densidad se debe utilizar con un contenido de humedad de 12% (densidad de referencia).

Tabla 5. Velocidad de Carbonización, CSA-O86

	β_o mm/min	β_n mm/min
Cubierta de madera y tablas	0,65	0,8
Madera laminada encolada	0,65	0,7
Structural composite lumber	0,65	0,7
CLT	0,65	0,8

- Njankouo et al. (2004) [21]

En este trabajo se entregan valores de velocidad de carbonización para especies madereras latifoliadas (hardwood) tropicales utilizadas en Bélgica, dentro de las que se encuentra el Roble, con una velocidad de 0.59 mm/min para una densidad de 557 kg/m³.

Los ensayos se desarrollaron en un horno vertical con las probetas sellando la apertura frontal. Se sigue la curva tiempo temperatura entregada en la ISO 834.

Las probetas se elaboran con 7 capas de madera de 18-20 mm de espesor, no se especifica un adhesivo especial en su unión.

Se utilizan 4 termocuplas situadas a distintas profundidades para realizar la regresión lineal, la profundidad varía de acuerdo a la especie estudiada para el caso del roble es de 20,30,40,50 mm.

Tabla 6. Velocidades de Carbonización, latifoliadas tropicales. Njankouo et al. (2004) [21]

Especie	Espécimen	Contenido de Humedad (%)	Densidad (kg/m ³)	Velocidad de Carbonización (mm/min)
Spruce	SRN1	9	480	0,62
	SRN2	9	476	0,57
Fir	Fir1	13	421	0,71
Oak	Oak 1	10	557	0,59
Azoke	Azobe 1	13	1050	0,41
	Azobe 2	13	1040	0,41
	Azobe 3	13	1000	0,41
	Azobe 4	13	1060	0,47
Wenge	Wenge 1	13	923	0,49
Afzelia	Afzelia 1	13	863	0,36
	Afzelia 2	13	836	0,43
	Afzelia 3	11	833	0,49
	Afzelia 4	12	800	0,51
	Afzelia 5	20	968	0,37
Bilinga	Bilinga 1	11	692	0,58
Balau	Balau 1	9	939	0,4
	Balau 2	9	984	0,41
Merbau	Merbau 1	12	779	0,5
Meranti	Meranti 1	10	522	0,54
	Meranti 2	10	522	0,55

Las termocuplas se colocaron de tal forma que tomaría aproximadamente 90 minutos alcanzar la última. Sin embargo, el ensayo se declara finalizado cuando todas las termocuplas alcanzan los 300°C.

- Yang et al. (2009) [28]

Las nuevas investigaciones tienden a utilizar el cono calorímetro como medio de ensayo para las probetas de madera, debido a que al permitir un flujo de calor constante con intensidad variable según lo requerido entrega un mayor control de las condiciones de borde de los ensayos. Yang estudia la velocidad de carbonización de 5 especies Coníferas usando el cono calorímetro (ISO 5660) y aplicando el método estándar de resistencia al fuego (CNS12514).

Se estudian 5 especies madereras coníferas usualmente usadas en Taiwan (japanese cedar, taiwania, china fir, Douglas fir (Pino Oregón) y southern pine) con densidades entre 398-538 kg/m³. Se ocupan 5 réplicas para cada una de las 5 especies madereras. Se ensayan en tiempos de 35, 40 y 60 minutos utilizando un horno vertical, ajustando la apertura frontal al tamaño de las probetas.

Las probetas de ambas especies madereras, se confeccionan con 7 láminas de madera aserrada de 38 mm de espesor unidas con un adhesivo resorcinol con una densidad de aplicación de 0.250 kg/m³. Las probetas se confeccionan con dos medidas 38mm x 190 mm x 1800 mm y 38 mm x 140 mm x 1800 mm.

Finalmente se comparan los resultados de velocidad de carbonización con el estándar establecido por el Eurocodigo y la normativa australiana 1720.4.

Se llega a la conclusión de que la velocidad de carbonización de la base de las probetas fue mayor que la de los costados.

Tabla 7. Velocidades de Carbonización, Yang et al.

Especie de MLE	Grupo de muestra	Densidad de MLE (kg/m ³)	Tiempo de exposición	Lado lateral		Lado inferior	
				Profundidad de carbonización (mm)	Vel. de carbonización (mm/min)	Profundidad de carbonización (mm)	Velocidad de carbonización (mm/min)
China fir	6F	398	30	20.0 a (2,6)	0,668	23.5 a (2,6)	0,783
	6F	414	45	27,2 b (4.1)	0,604	33,2 b (3.0)	0,739
	8F	399	30	22.5 a, b (2,7)	0,75	26.9 a (5,3)	0,897
	8F	411	45	26,4 b (3.1)	0,587	31,9 b (2.7)	0,709
	8F	412	60	43.4 c (5.7)	0,723	46.0 c (5.9)	0,766
Japanese cedar	6F	450	30	20.4 a (2,3)	0,68	21.5 a (3,0)	0,718
	6F	454	45	34,6 b (4.2)	0,77	41.0 c (3.2)	0,911
	8F	445	30	21.3 a (2,2)	0,709	22.6 a (1,4)	0,753
	8F	444	45	28,9 b (2,8)	0,643	29.0 b (2,4)	0,644
	8F	464	60	42.1 c (3,3)	0,702	46,8 c (3.1)	0,781
Taiwania	6F	408	30	22.7 a, b (2,6)	0,756	23.5 a, b (2,2)	0,783
	6F	427	45	30.0 c (3,3)	0,668	36.0 b (3,1)	0,801
	8F	420	30	19.7 a (2,4)	0,655	20.0 a (2,0)	0,665
	8F	437	45	27,4 b, c (2,1)	0,608	27.7 a, b (2,6)	0,614
	8F	408	60	45,4 d (5,4)	0,757	49.0 c (3,5)	0,817
Douglas fir	6F	501	30	18.8 a (2,7)	0,627	20.8 a (2,0)	0,694
	6F	506	45	26,4 b (2,8)	0,588	30,3 b (2,4)	0,673
	8F	531	60	37,4 c (4,2)	0,624	37,9 c (1,6)	0,632
Southern pine	6F	524	30	17.0 a (2,0)	0,568	17.2 a (0,9)	0,574
	6F	535	45	23.8 b (2,1)	0,53	26,2 b (2,1)	0,583
	8F	538	60	32,8 c (4,2)	0,547	34.0 c (1,6)	0,566

- Collier (1992) [14]

Nueva Zelanda es uno de los mayores productores de Pino Radiata en el mundo, por lo que la investigación realizada por Collier resulta de gran relevancia al momento de presentar referencia en valores comparativos.

Se estudian piezas de madera aserrada de Pino Radiata y Pino Oregón (Douglas fir) y también de madera laminada encolada de Pino Radiata.

Se utilizan los dos métodos descritos anteriormente para obtener la velocidad de carbonización de las especies madereras, regresión lineal y ancho residual. Las velocidades de carbonización se calculan para tiempos comprendidos entre 0-29 minutos, 0-60 minutos y 29-60 minutos.

Se realizan 2 ensayos, instrumentándose en el primero, 7 probetas de las 28 que se insertan en la apertura del horno vertical, las termocuplas se sitúan a 16 y 38 mm de la superficie que quedara expuesta al fuego. Las demás probetas se analizan raspando la capa carbonizada.

En la tabla 8 se muestran los valores para la exposición completa de una hora ya que se asemejan a la metodología realizada en este trabajo.

Los valores con asterisco corresponden a las velocidades de carbonización obtenidas mediante el uso de termocuplas.

Tabla 8. Velocidades de Carbonización Pino Radiata, Collier.

Especie	Densidad anhidra (kg/m ³)	Contenido de Humedad (%)	Vel de carbonización predicha (mm/min)	Vel de carbonización actual (mm/min)	Tiempo de exposición (min)
Pino Radiata	409	0	0,77	0,8	0-60
Pino Radiata	483	0	0,71	0,72	0-60
Pino Radiata *1	544	0	0,75	0,93	0-60
Douglas fir	372	15	0,65	0,68	0-60
Pino Radiata *4	407	21	0,64	0,6	0-60
Pino Radiata	516	16	0,62	0,58	0-60
Pino Radiata	522	16	0,62	0,6	0-60
Douglas fir	536	24	0,48	0,48	0-60
Douglas fir *3	550	16	0,53	0,57	0-60
Pino Radiata *2	620	20	0,53	0,53	0-60
End Grain					
Pino Radiata	550	12	0,63	0,6	0-60
Pino Radiata	550	12	0,63	0,59	0-60
Pino Radiata	550	21	0,56	0,56	0-60
Pino Radiata	550	21	0,56	0,56	0-60
CCA madera tratada					
Pino Radiata H3	550	15	0,61	0,6	0-60
Pino Radiata H5 *5	550	13	0,62	0,53	0-60
MLE					
Pino Radiata *6	550	12	0,57	0,63	0-60
Pino Radiata *7	550	12	0,57	0,57	0-60
Pino Radiata	550	12	0,57	0,62	0-60

2.4.2. Valores Nacionales

- Alejandro Ramírez (2001) [6]

Durante parte de las dos últimas décadas del siglo pasado y como parte de su tesis de título de Ingeniero Civil de la FCFM, Alejandro realizó un estudio para determinar las velocidades de carbonización de diferentes especies madereras (Álamo, Pino Radiata, Roble y Coihue) y algunos tipos de protección contra incendios, como placas de yeso cartón y recubrimientos intumescentes.

Para los ensayos se utilizó un horno cilíndrico con una disposición vertical de las probetas dentro de él. En los ensayos se respetó la curva tiempo -temperatura establecida en la norma NCh 935/1 durante períodos de tiempo de 15, 30, 45 y 60 minutos. Transcurrido cada lapso las probetas se enfrían con agua, para cortar 3 a 4 muestras y raspar el carbón. No se utilizaron termocuplas dentro de la probeta. Dentro del horno las probetas se expusieron al fuego en forma cuadrilateral.

Se ensayaron probetas de madera aserrada de escuadría rectangular y de 50 cm de largo aproximadamente. Las probetas de madera laminada encolada se confeccionan con capas de 15-30 mm utilizando adhesivo resorcinol y urea formaldehído para comparar sus comportamientos. Se realizaron cerca de 170 ensayos de carbonización. El siguiente cuadro resume los ensayos realizados y las velocidades de carbonización determinadas.

Tabla 9. Velocidades de Carbonización, trabajo Alejandro Ramírez

Especie Forestal	Contenido de Humedad (%)	Densidad (kg/m ³)	Coef de contracción volumétrica	Densidad de Normal (kg/m ³)	Velocidad de carbonización (mm/min)
Álamo	23	403	0,4	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

- Esteban Reyes (2015) [7]

Dos décadas después y también como parte de su trabajo de titulación de Ingeniero Civil en esta Facultad, utilizando un horno vertical Reyes comparó las velocidades de carbonización medidas en probetas de madera aserrada y madera laminada encolada de Pino Radiata sometidas a exposiciones al fuego unilaterales y cuadrilaterales.

Compara también la forma de medir la velocidad de carbonización, incorporando el uso de termocuplas insertas en el interior de las probetas para registrar el tiempo requerido para alcanzar la temperatura de 300°C y midiendo la carbonización efectiva una vez finalizado los ensayos. En los ensayos se respetó la curva tiempo -temperatura establecida en la norma NCh 935/1.



Figura 9. Probetas compuestas, consistentes de micro probetas y marco de sacrificio

Las probetas se conforman de 3 o más mini-muestras, las cuales se recubren con un marco de sacrificio para asegurar su carbonización unidireccional e impedir que se quemen los cantos. El marco se une a las mini-muestras mediante clavos para mantenerlas estables durante todo el proceso de carbonización. Las mini-muestras están compuestas por láminas de 40 mm unidas con adhesivo urea-formaldehido. Se utilizan 2 probetas compuestas y 2 macizas por cada ensayo. El frente de carbonización se mide a los 288°C y 300°C.

La humedad de las probetas compuestas (madera laminada encolada) varía entre 7.8%-14.7%, para el caso de las muestras macizas esta se encuentra entre los 12.7%-13.3%. La densidad de referencia de las probetas compuestas tiene un rango entre 0.374 kg/m³ y 0.448 kg/m³. En el caso de las probetas macizas este es 0.391 kg/m³ y 0.440 kg/m³. En tabla 10 se muestran las velocidades determinadas, discriminadas de acuerdo con su criterio de derivación. En general, los resultados son similares a los registrados por Ramírez.

Tabla 10. Velocidad de Carbonización, Esteban Reyes

Velocidad de carbonización	Medido con	Valor
Unidimensional	Termocupla	0,8 (mm/min)
Unidimensional	Altura Residual	0,85 (mm/min)
Nominal	Sección Residual	0,82 (mm/min)

Tabla 11. Velocidad de Carbonización distintos medios de análisis, Esteban Reyes (2015)

Probeta	Método		
	Regresión. Lineal	Ancho Residual.	Rectángulo. Equivalente.
PC1	-	0,786	0,909
PC2	0,798	0,723	0,883
PC3	-	0,704	0,81
PC4	0,801	0,697	0,788
PM1	-	0,73	0,835
PM2	-	0,805	0,787
PM3	-	0,83	0,896
PM4	-	0,664	0,775

2.5. Determinación de la Velocidad de Carbonización

Existen diversas formas para determinar la velocidad de carbonización, sin embargo, dos metodologías destacan. El método más antiguo consiste en eliminar la capa carbonizada, raspando la pieza hasta que sea visible la madera sin quemar, para luego medir el ancho de la sección residual y compararlo con la medida original. El método más moderno consiste en determinar el avance del frente de carbonización mediante termocuplas.

La diferencia entre el ancho original y el residual corresponde a toda la madera que se carbonizo y por lo tanto no aporta resistencia alguna a la pieza, al dividir esto con el tiempo total del ensayo se obtiene la velocidad de carbonización. Koning (1999) [7] utiliza este método en su trabajo al igual que Alejandro Ramírez (2001) [6] y Esteba Reyes (2015) en sus trabajos de título.



Figura 10. Muestras utilizadas para la medición del ancho residual, Ramírez (2001)

El segundo método corresponde en medir el avance del frente carbonizado mediante sensores. El frente carbonizado se elige cuando la madera alcanza los 300°C como se explica en la sección 2.2. para medir este avance se posicionan termocuplas a distintas profundidades predeterminadas.

Mediante un programa de adquisición de datos se puede llevar un registro de las temperaturas en cada termocupla, que posteriormente permite la determinación del tiempo en que se alcanza dicha temperatura en la distancia seleccionada (Figura 11).

Diversos autores utilizan este método para determinar la velocidad de carbonización, White et al. (1992) [15] entrega formas para analizar estos datos con diferentes tipos de regresiones lineales y exponenciales. Este autor es de gran importancia ya que realiza extensas investigaciones para la modelación de la velocidad de carbonización y el efecto que tienen las distintas propiedades en esta.

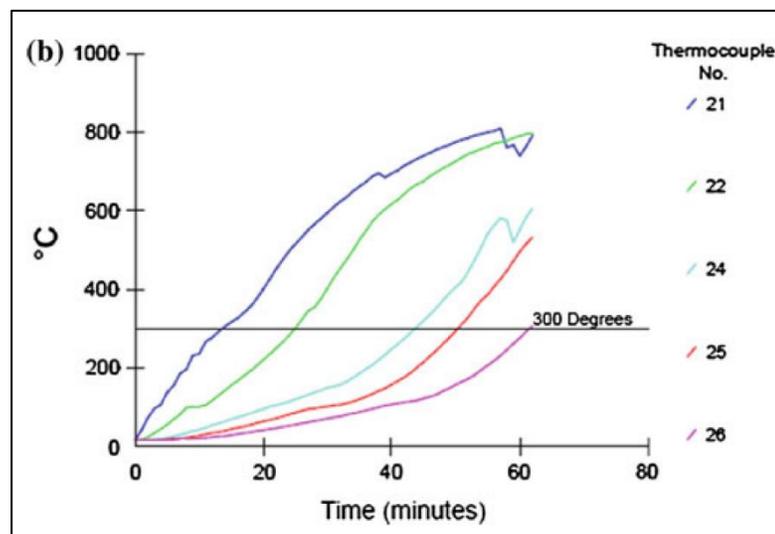


Figura 11. Frente carbonizado en termocuplas, Daud et al. (2015)

Las relaciones que entrega White en su trabajo son:

- $t = mx_c$
- $t = mx_c - b$
- $t = mx_c^a$

La forma lineal de la tercera ecuación:

- $\ln(t) = \ln(m) + a * \ln(x_c)$

Su trabajo concluye proponiendo la expresión:

- $t = mx_c^{1.23}$

Donde la constante m corresponde a la modelación de del efecto de las distintas propiedades sobre la velocidad de carbonización.

$$m = 0.162 + 0.809 * p + 0.0107 * u + 0.0689 * c - 0.00655 * p * d - 0.0024 * c * d$$

Diversos autores han analizados sus datos a partir de estas regresiones, como Fonseca et al. (2009) [36], A pesar de que el uso de regresiones no lineales entrega valores más acertados y modelan de mejor manera el comportamiento del frente de carbonización, es de común acuerdo utilizar una regresión lineal para la obtención de la velocidad de carbonización.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. Descripción de Equipos e Implementos

3.1.1. Horno

Para realizar los ensayos de resistencia al fuego se utiliza el horno de dimensiones reducidas construido e inaugurado recientemente en el laboratorio de incendios de IDIEM en la comuna de Cerrillos. Este horno se utiliza por primera vez, desde su instalación, para realizar los ensayos comprendidos en esta memoria, por lo que su calibración y puesta en marcha se encuentra dentro de los alcances de este trabajo. Un horno para ensayos de resistencia al fuego se compone de una cámara de combustión, un quemador y los equipos de medición (DIN 4102-8 [4]).

Este horno de dimensiones reducidas cuenta con tres ventanas laterales de dimensiones idénticas y una chimenea en la cara restante. En las ventanas se colocan las probetas, quedando una cara expuesta a las altas temperatura y la otra al exterior, permitiendo su instrumentalización.

El quemador se encuentra sobre la ventana 3 (ventana poniente). Las ventanas 1 y 2 se observan en la figura 13 (norte y oriente respectivamente).

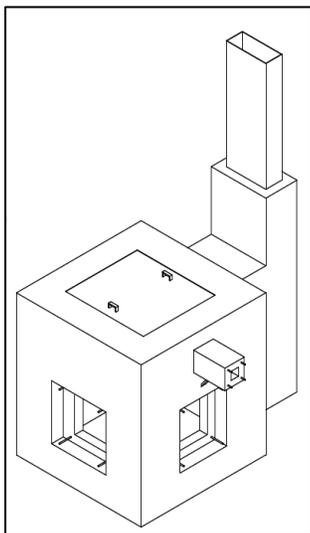


Figura 12. Horno de dimensiones reducidas, de izquierda a derecha, ventana 2 y ventana 1 respectivamente

3.1.1.1. Dimensiones

Las dimensiones exteriores de las ventanas son de 700 mm x 600 mm y para el apoyo de las probetas existe un rebaje de 100 mm por cada lado creando una ventana interior de 500 mm de alto y 400 mm de ancho, área que queda expuesta a las temperaturas de los ensayos.

El horno mide 1,8 m de alto, 1,6 m de ancho y 1,6 m de largo. La chimenea cambia de grosor a los 2,35 m, rebaje que se condiciona debido al cambio en la aislación requerida. En las Figuras 13-16 se detallan los cortes correspondientes al modelo del horno.

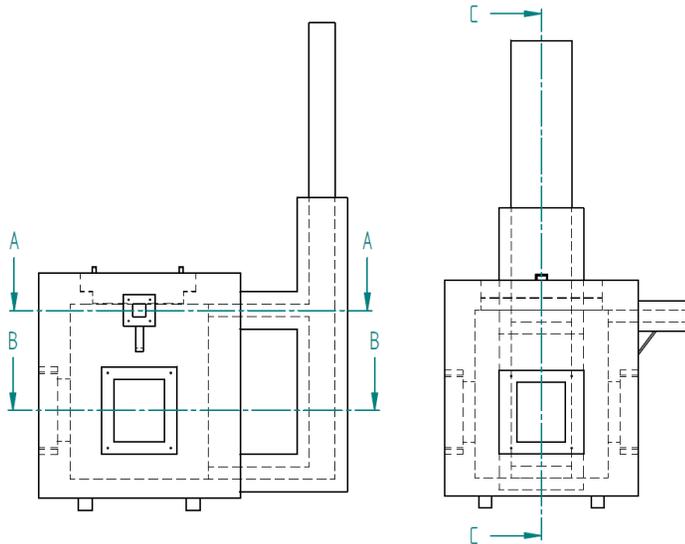


Figura 13. Vistas laterales del horno de dimensiones reducidas

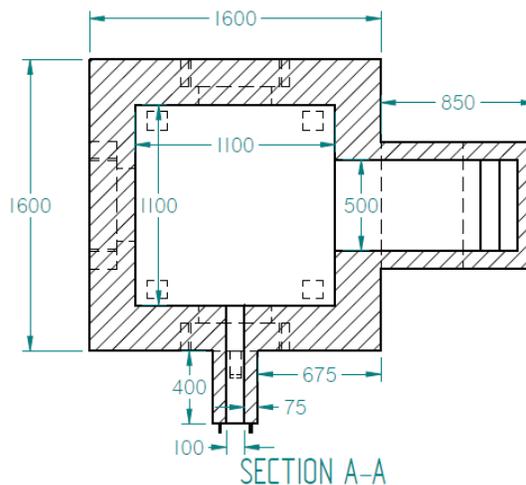
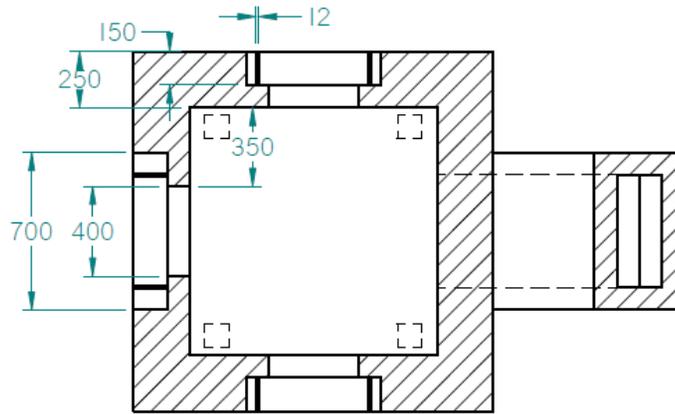
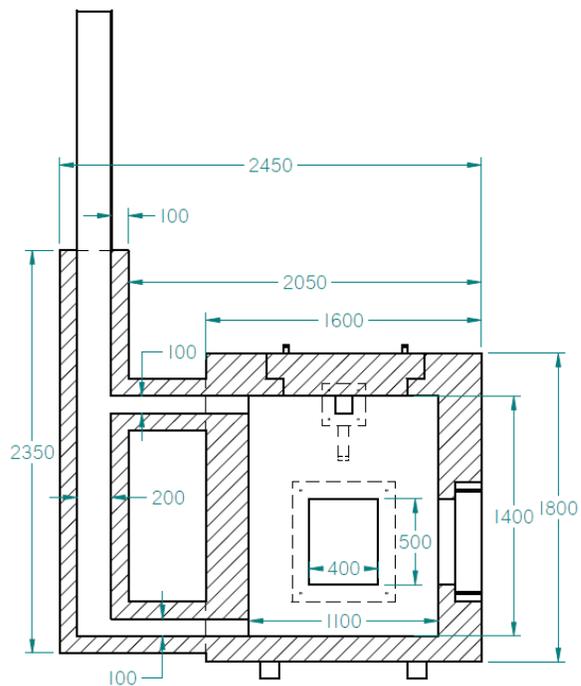


Figura 14. Vista superior, corte A-A



SECTION B-B

Figura 15. Vista superior, corte B-B



SECTION C-C

Figura 16. Vista interna, Corte C-C

3.1.1.2. Cámara de Combustión

Siguiendo lo dispuesto por la norma DIN 4102-8, la materialización del horno consiste de:

- Paredes: Ladrillos refractarios A35 de densidad $1.9 \frac{kg}{dm^3}$ hasta $2.1 \frac{kg}{dm^3}$
- Techo y piso: Concreto refractario de densidad $2 \frac{kg}{dm^3}$ hasta $2.2 \frac{kg}{dm^3}$
- Recubrimiento del horno: Plancha de acero de 2mm de espesor, con aislación térmica entre la plancha y las paredes de manera opcional

Solo puede existir una abertura para insertar probetas en cada cara del horno incluido el cielo. No pueden haber más de dos aberturas de inspección cada una de 100 cm^2 .

La salida de gas se diseña de manera de producir una presión de 12 Pa dentro de la cámara en los primeros 5 minutos del ensayo.



Figura 17. Cámara de combustión con llama

3.1.1.3. Quemador

En la norma DIN 4102-8 se especifica un quemador de petróleo. Sin embargo, debido a la configuración propia del laboratorio, acondicionado al uso de gas, se decide utilizar un quemador a gas.



Figura 18. Quemador de horno, sobre ventana poniente, vista frontal

El tamaño de la llama dentro de la cámara de combustión se ve afectado directamente por la cantidad de oxígeno y de gas disponible, siendo el quemador el encargado de regular el paso del gas al horno, El aire se regula de forma manual mediante una llave de paso sobre el quemador



Figura 19. Quemador de horno, sobre ventana poniente, vista lateral

3.1.1.4. Computador Horno

Un instrumento de control N1200 permite seguir la curva tiempo-temperatura establecida, en este caso, la incluida en la norma NCh 935/1. La curva se programa de manera discreta con una serie de puntos tiempo (segundos)- temperatura (°C). La tabla de datos se muestra en anexo E.



Figura 20. Controlador N1200

3.1.2. Termocuplas

Las termocuplas, designadas también como termopares, se componen de dos alambres de distinto material unidas en un extremo, punto denominado como junta fría y que corresponde al extremo que está en contacto con la temperatura que se desea medir. Al aplicarse temperatura en este extremo se produce un voltaje pequeño (del orden de los milivolts), el que aprovechando el efecto Seebeck, se transforma en temperatura mediante la tarjeta de adquisición de datos.

Existen diversos tipos de termocuplas, útiles para distintos rangos de temperaturas. Para realizar los ensayos de resistencia al fuego comprendidos en esta memoria se utilizan termocuplas tipo k, fabricadas con un alambre de cromel (aleación cromo/aluminio) y otro de alumel (aleación Nickel/aluminio) levemente magnético por su contenido de nickel, que resiste temperaturas de -200°C hasta 1250°C .

Para medir las temperaturas dentro de las probetas de madera aserrada y MLE se utilizan termocuplas tipo k, de diámetro 0.5 mm.



Figura 21. Termocupla tipo K, a la izquierda se muestra la junta fría.

3.1.3. Cable Compensado

Cuando por necesidades de la instalación, el aparato de medida se encuentra alejado del punto de medición, éstos dos puntos se unen por medio de una línea de compensación. Estos se fabrican con materiales que poseen la misma característica termoeléctrica que la de los termopares.



Figura 22. Cable Compensado

3.1.4. Adquisición de Datos

Para la obtención de la información proveniente de las termocuplas se utiliza una tarjeta de adquisición de datos "Measurement Computing TC-32" y su correspondiente módulo de expansión para alcanzar, de esta manera, 64 entradas. Para el procesamiento de los datos se utiliza el programa DAQami versión 4.2.1.



Figura 23. Tarjeta de adquisición de datos TC-32

3.1.5. Horno de secado

Para determinar la humedad de la madera se utiliza un horno de secado, que permite mantener aproximadamente 100°C por un prolongado periodo de tiempo, evaporando el agua libre comprendida en las muestras.



Figura 24. Horno de secado

3.1.6. Balanza

Para obtener la masa de las muestras se requiere utiliza una balanza. Para los ensayos se utiliza una balanza con precisión de 0.01 gramos, para cumplir con los requerimientos de la norma NCh 176-2 of. 1986 Mod 1988.



Figura 25. Balanza

3.1.7. Cámara Termográfica

La cámara termográfica, marca Flir modelo E5, permite observar puntos de calor en las probetas.



Figura 26. Cámara termográfica

3.2. Probeta

En este trabajo se designa como probeta a la unidad compuesta de 4 muestras y 2 soportes, que se coloca en las ventanas del horno. Los soportes permiten apoyar las piezas instrumentalizadas (muestras), que constituyen las probetas experimentales en los ensayos en los rebajes del horno.

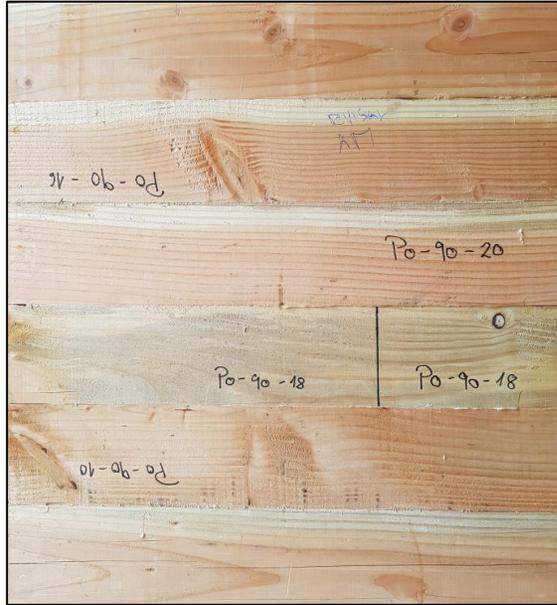


Figura 27. Prototipo de Probeta de Pino Oregón.

En este estudio se utilizan 2 tipos de probetas, uno para el estudio de la madera aserrada y otro para la madera laminada encolada (MLE). La probeta se fabrica uniendo las piezas mediante un adhesivo urea formaldehído.

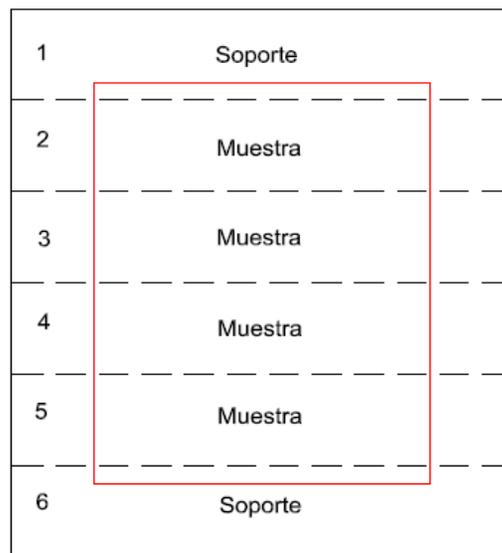


Figura 28. Probeta para madera aserrada

La probeta se compone de 4 muestras y 2 soportes como se muestra en la Figura 28. Se utilizan 4 muestras ya que son los únicos elementos que quedan completamente dentro del área expuesta al fuego (el recuadro rojo en la Figura 28 representa la venta expuesta al interior del horno. Las Termocuplas se ubican en estas muestras.

3.2.1. Probetas para Madera Aserrada

3.2.1.1. Dimensiones

Las dimensiones de las probetas quedan determinadas por el tamaño de las aberturas del horno (ventanas) y la duración prevista para el ensayo, además de las dimensiones disponibles en el mercado.

La cara de la probeta mide 600 mm de largo y 684 mm de alto, valor que resulta al unir 6 piezas de madera cepillada de 5 pulgadas (114 mm de alto, 6 x 114 mm =684 mm) y que es el que se aproxima de mejor manera a las dimensiones reales del horno. El espesor se obtiene con la expresión entregada por Reyes (2015).

$$b_m = \alpha \cdot \beta_n \cdot t$$

Donde:

- b_m = Ancho mínimo del elemento, en mm
- α = Factor de ajuste.
- β_n = Tasa de carbonización nominal según tabla 2.1 (EN 1995-1-2), en mm/min.
- t = Tiempo de duración para el ensayo en minutos.

El factor de ajuste α toma el valor 2 para marcos y 1.5 para muestras, en este estudio no se utilizan marcos de protección por lo que se toma el ultimo valor para el cálculo. Para ensayos de 60 minutos en probetas de Pino Radiata:

$$b_m = \alpha \cdot \beta_n \cdot t = 1.5 \cdot 0.7 \cdot 60 = 63 \text{ mm}$$

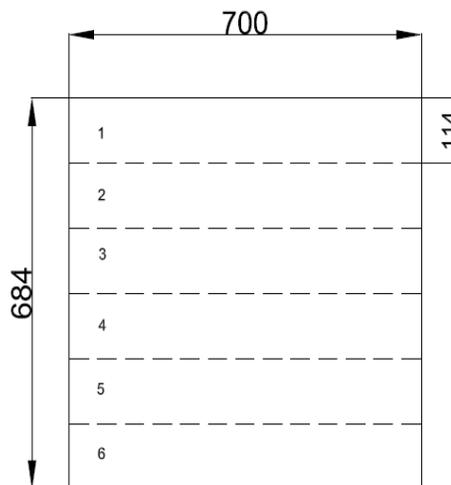


Figura 29. Vista frontal de probeta de madera aserrada

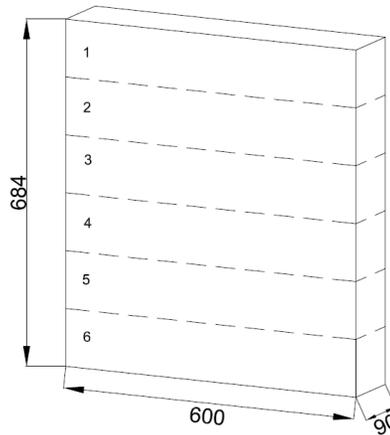


Figura 30. Dimensiones probeta de madera aserrada

Utilizando la norma NCh 2824, un espesor de 3" (65 mm) satisface la ecuación, sin embargo, se utilizan 4" (90 mm) para asegurar la estabilidad de la probeta luego de los 60 minutos de ensayos.

En resumen, las dimensiones de la probeta para especies coníferas son, alto de 684 mm (6 x 114 mm), largo de 600 mm y ancho de 90mm.

Estas dimensiones se utilizan para el caso del Pino Oregón ya que también es una especie conífera y posee una densidad mayor a 290 kg/m³.

Para el caso del Roble, la cara tendrá las mismas dimensiones (600 mm de largo y 684 mm de alto), pero su ancho podría cambiar ya que se utiliza un valor de velocidad de carbonización menor, de 0.55 mm/min (tabla 2.1 de EN 1995-1-2). se decide, sin embargo, utilizar para todas las probetas de madera aserrada el mismo espesor que el utilizado para el caso de las probetas de Pino Radiata.

$$b_m = \alpha \cdot \beta_n \cdot t = 1.5 \cdot 0.55 \cdot 60 = 49.5 \text{ mm}$$

3.2.1.2. Adhesivo

El adhesivo utilizado para unir las muestras es una resina Urea-Formaldehido entregado por Oxiquim, llamado Adelite 6238. Las proporciones para su confección las entrego el fabricante y se tabulan en la tabla 12.

Tabla 12. Especificaciones Adhesivo

Adelite 6238 (partes en peso)	85,9	86,0	86,2
Harina de trigo (partes en peso)	13,4	13,5	13,5
Catalizador (partes en peso)	0,7	0,5	0,3
Tiempo de agitación (min)	10-15	10-15	10-15
Potlife (min)	30	40	60

3.2.1.3. Muestras

Las dimensiones antes dadas corresponden a las medidas de la probeta completa, resultando la superficie expuesta al fuego algo menor. El área expuesta al fuego corresponde a la ventana interior del horno, con 500 mm de alto y 400 mm de ancho. En la Figura 31 se observa la cara de la probeta con un rectángulo rojo dentro de ella el que representa el área expuesta al fuego.

Por cada probeta ensayada solo 4 piezas quedan dentro del área expuesta al fuego, por lo que solo estas se utilizan en la obtención de datos. Como se muestra en la Figura 6, dentro del rectángulo rojo las muestras con las etiquetas I, II, III, IV son las consideradas en el estudio.

Para ambos casos de especies madereras (Conífera y Latifoliada) se utiliza la misma cantidad de muestras por probeta.

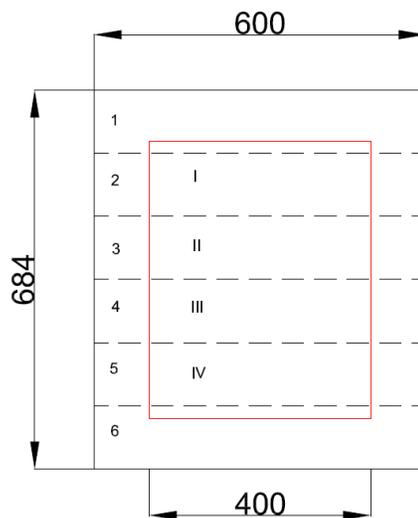


Figura 31. Muestras de madera aserrada

3.2.2. Probeta para MLE

La probeta de MLE de Pino Radiata se construye con 23 capas de 32mm de espesor y 600 mm de largo. La unión de capas condiciona una probeta de 700 mm de alto y 600 mm de largo con un espesor de 85 mm.

Se utilizan 3 muestras por cada probeta ya que esto permite determinar la velocidad de carbonización mediante el método del ancho residual y a su vez abarca una cantidad considerable de láminas (5 aproximadamente). Las muestras no están necesariamente delimitadas por los planos encolados de la madera.

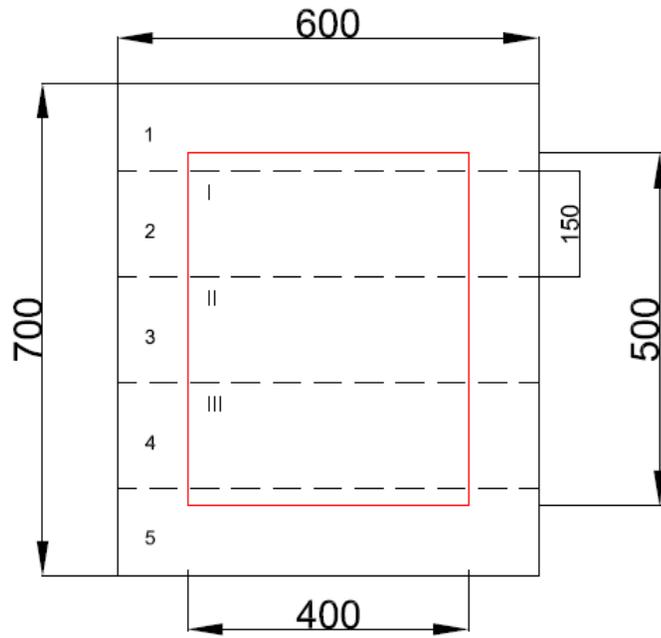


Figura 32. Esquema probeta MLE vista Frontal



Figura 33. Probetas de MLE, con sus divisiones predeterminadas para el estudio previo

3.3. Medición de Humedad y Densidad

Las mediciones de humedad y densidad para cada especie maderera se obtienen a partir de procedimientos planteados en la normativa nacional vigente.

3.3.1. Humedad

La humedad se mide respetando las especificaciones de la norma NCh 176-1 of.2009. Correspondiente al método de secado en estufa. Se nombra también el método de destilación, sin embargo, como se trata del estudio de madera sin sustancias volátiles ni impregnadas se procese a determinar la humedad por medio del método de secado en estufa.

Para realizar la medición se requieren los siguientes aparatos:

- Balanza, con precisión de 0.1 g.
- Estufa de secado, regulable a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$
- Desecador

Se utilizan probetas de $100 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ de largo tanto para las muestras de madera aserrada como para las muestras de MLE.



Figura 34. mini-muestras de MLE antes de ingresar al horno de secado.

El procedimiento para determinar la humedad comienza pesando la muestra en la balanza con una precisión del 5% de su masa, luego se deja secar en la estufa a 100°C hasta alcanzar una masa constante, recomendándose medir la masa 24 hrs después de iniciado el tiempo de secado. Se considera que la muestra se ha secado cuando en dos mediciones consecutivas, tomadas con un mínimo de 2 horas de espaciamento, la diferencia entre mediciones no es mayor que un 0.5% del peso de la probeta. Con la probeta a masa constante se deja secar la muestra en el desecador a temperatura ambiente tras lo que se pesa rápidamente para evitar variaciones de la masa mayores al 0.1%.

El cálculo del contenido de humedad expresado en porcentaje se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\text{Humedad} = H = \frac{m_1 - m_2}{m_2}$$

Donde:

- m_1 = Masa de la probeta antes del secado, en gramos (g)
- m_2 = Masa de la probeta después del secado, en gramos (g)

3.3.2. Densidad

La densidad de las muestras se determina según el procedimiento descrito en la norma NCh 176-2 of. 1986 Mod 1988. Permite determinar la densidad de referencia, anhidra, y nominal .

Los aparatos necesarios para determinar la densidad que se midieron en este estudio:

- Instrumento de medición, con precisión de 0.1mm.
- Balanza, con una precisión de 0.01g.
- Equipo para determinar la humedad.

A continuación, se describe el proceso para determinar las distintas densidades:

3.3.2.1. Densidad Anhidra

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0}$$

Donde:

- m_0 = Masa en kilogramos de la probeta en condición anhidra.
- V_0 = Volumen de la probeta en metros cúbicos de la probeta en condición anhidra.

3.3.2.2. Densidad de referencia

$$\rho_H = \frac{m_0}{V_0}$$

Donde:

- m_H = Masa en kilogramos de la probeta al contenido de humedad H
- V_H = Volumen de la probeta en metros cúbicos de la probeta al contenido de humedad H.

El volumen se mide de manera directa midiendo el largo, ancho y alto de las probetas de 100 mm.

Para determinar la densidad normal se utiliza la ecuación de Kollmann para una humedad del 12%.

$$d_H = d_0 * \frac{100 + H}{100 + \alpha_v * H}$$

En la ecuación d_0 corresponde a la densidad anhidra y α_v a la suma de los coeficientes de contracción lineal de cada especie maderera encontrados en la norma NCh 1198 Of. 2006.

Tabla 13. Coeficiente de contracción, Especies Madereras.

Especie maderera	Coeficiente de contracción lineal (%)	
	Tangencial	Radial
Pino Radiata	0,29	0,2
Pino Oregón	0,33	0,2
Roble	0,36	0,21

3.4. Numero de Termocuplas

La cantidad de termocuplas utilizadas en los ensayos se determina analizando estudios anteriores y de la disponibilidad del laboratorio. El número de mediciones que se utilizan para determinar la velocidad de carbonización afecta la resolución de la relación lineal, ya que una recta se puede desarrollar con solo 2 puntos, a mayor cantidad de datos se pueden eliminar algunos registros defectuosos o que no funcionan correctamente..

En los trabajos considerados, el mínimo de termocuplas utilizadas fueron 4. White (1992) [15] utilizo 4 sensores a distancias de 13 mm (½”), 25 mm (1”), 38 mm (1½”), 51 mm (2”) con respecto a la cara expuesta de la probeta ensayada y se duplican las termocuplas en las mismas profundidades para resguardo de los datos. En su trabajo posterior de 2012 se recurre a la misma configuración de termocuplas, dando a entender un buen funcionamiento de la elección.

Njankouo et al. (2003) [21] también dispone 4 termocuplas en cada probeta a profundidades de 20 mm, 30 mm, 40 mm y 50mm de la cara expuesta a las altas temperaturas y se separan 40 mm entre cada una horizontalmente mostrados en la Figura 34 (Figura 35).

Schaffer (1967) [21] en su trabajo utiliza termocuplas a 1/4, ½, 1, 1 1/2, y 2 pulgadas (5 en total) con respecto al frente expuesto al fuego, separadas una pulgada una de otra horizontalmente. Utiliza dos termocuplas a cada distancia para disponer valores duplicados.

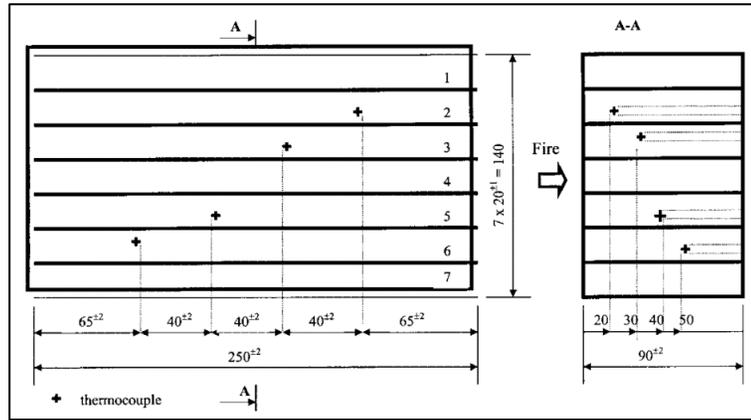


Figura 35. Probeta trabajo de Njankouo et al. (2003) [21]

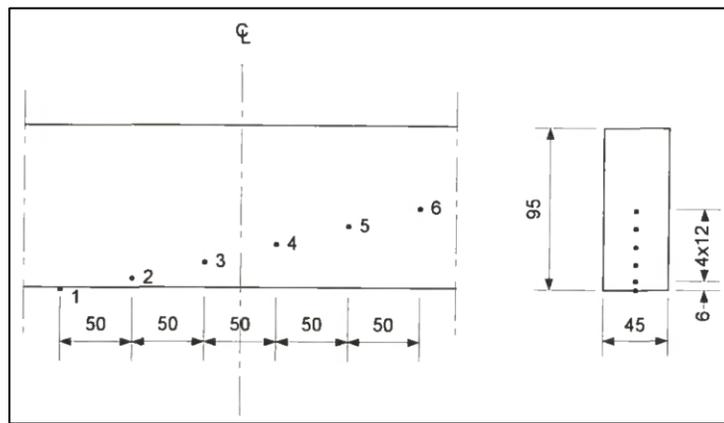


Figura 36. Konig et al. 1999 [17]

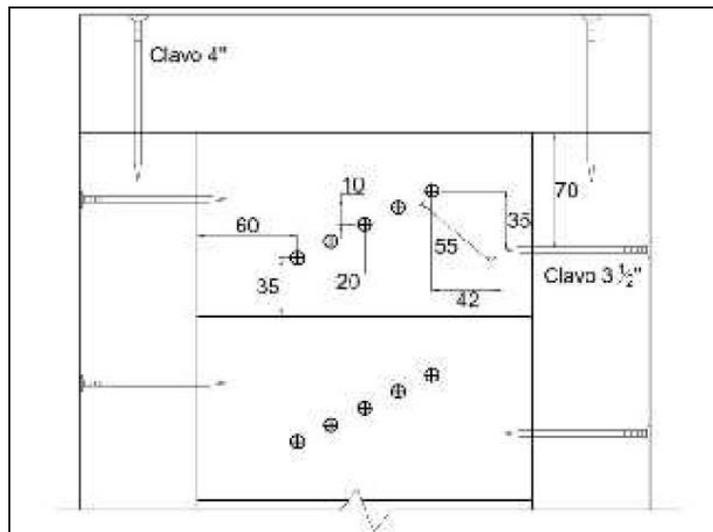


Figura 37. Posicionamiento trabajo Esteban Reyes (2015) [7]

En el estudio de König et al. (1999) [17], se utilizan 6 termocuplas distanciadas 12 milímetros unos con otra y 6 mm con respecto a la cara expuesta, distanciadas horizontalmente cada 50mm (Figura 36).

Reyes (2015) [7] estimó que la cantidad mínima de termocuplas a utilizar deben ser 4 lo que lo que permite generar una regresión lineal representativa. Se puede conseguir regresiones con 3, sin embargo, se utiliza una más para poder tener un respaldo en caso de que alguna no funcione adecuadamente.

En el laboratorio actualmente se dispone de una tarjeta de adquisición de datos que junto a su extensión cuenta con de 64 canales en total, 3 de estos se utilizarán para medir la temperatura dentro del horno, esto permite utilizar 6 termocuplas en cada muestra, 18 en total para cada probeta.

3.5. Posición de Termocuplas

La posición de las termocuplas está condicionada al tipo de probeta ensayada: madera aserrada y de madera laminada encolada.

3.5.1. Probeta de Madera Aserrada

Se utilizan 5 termocuplas por cada muestra, por lo que en cada probeta se disponen 20 termocuplas (4 muestras por cada probeta). Las termocuplas están distanciadas 50 mm entre cada una y 200 mm a los bordes de la ventana del horno, sumado el rebaje. En la Figura 38 se muestran las termocuplas como 5 puntos en las 4 muestras a estudiar.

La primera termocupla se coloca a 10 mm de la cara expuesta al fuego, las demás se distancian 10 mm cada una en profundidad, Las distancias con respecto a la cara carbonizada son 10, 20, 30, 40 y 50 mm.

Las profundidades de las termocuplas se eligen considerando los valores obtenidos en estudios anteriores para la velocidad de carbonización ($\beta = 0.8 \text{ mm/min}$), considerando

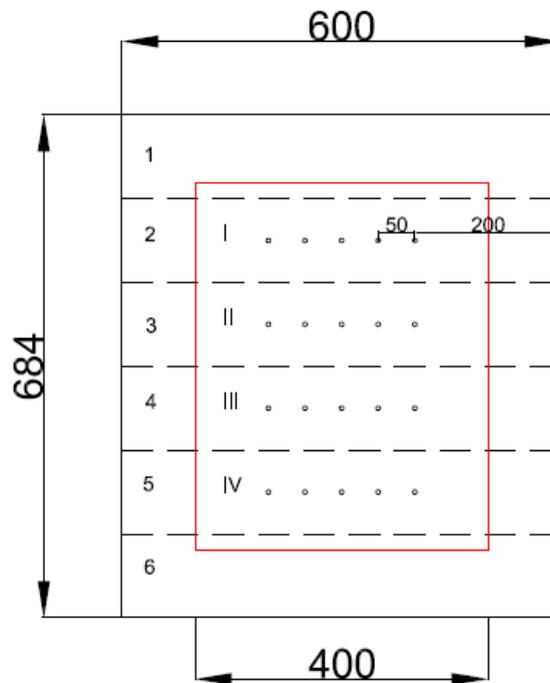


Figura 38. Termocuplas en probeta de madera aserrada

una profundidad de 50 mm (termocupla más alejada de la cara expuesta en el horno) a esta tasa de carbonización se requerirían 62.5 minutos para que el frente carbonizado alcance la termocupla, este valor es realista considerando los tiempos de ensayo.

3.5.2. Probeta de MLE

La disposición de las termocupas se hace de la misma forma que para las especies madereras, 6 para cada muestra.

La separación entre termocupas es de 50 mm de forma horizontal y 30 mm verticalmente. Con respecto al borde de la ventana (cuadro rojo Figura 39) se dejan 100 mm de separación. A diferencia de las probetas de madera aserrada solo se pueden determinar 3 valores de velocidad de carbonización por probeta.

Se utiliza una distribución diagonal de las termocupas debido a que al ser vigas de madera laminada esta configuración permite abarcar distintas láminas, por lo que se estudia mejor el comportamiento del elemento en general.

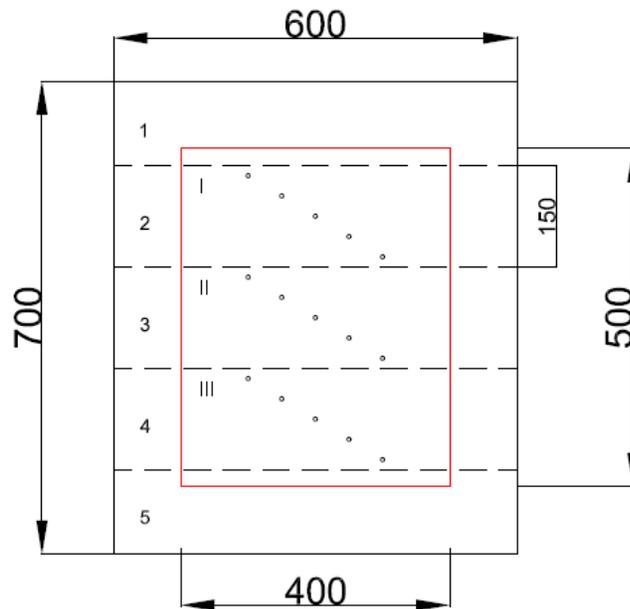


Figura 39. Termocupas probetas de MLE

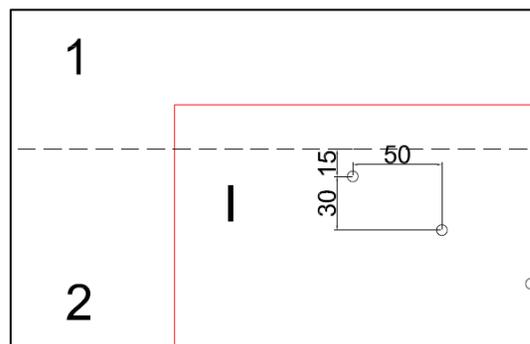


Figura 40. Detalle posicionamiento termocupas

3.6. Condiciones de Ensayo

La norma DIN 4102-8 entrega requisitos con respecto a las condiciones que se deben tener para realizar ensayos de resistencia al fuego en un horno acondicionado. Entre estas condiciones se encuentran:

- Se puede insertar por cada ensayo, por lo que las demás ventanas deben permanecer selladas con concreto refractario de la misma densidad y espesor que el utilizado en las paredes y cielo.
- La temperatura en el recinto en el que se encuentra el horno no debe ser inferior a 15°C o exceder 25°C en las 24 horas anteriores al ensayo.
- Luego de 5 minutos la temperatura en el horno no debe variar en más de $\pm 15^\circ$ K con respecto a la curva normalizada tiempo-temperatura.
- Los ensayos se deben llevar a cabo con una presión interna de 10 ± 2 Pa pasados 5 minutos desde su comienzo.

Para los ensayos de velocidad de carbonización de madera aserrada y MLE se colocan 2 probetas en el horno, ocupando las ventanas 1 y 2. No se utiliza la ventana 3 debido principalmente a un factor de seguridad, ya que se encuentra debajo del quemador donde se sitúan distintos instrumentos. Como el conducto de aire es de plástico y al momento de sacar las probetas están continúan quemándose presentando llamas, estas podrían dañar los equipos y causar un accidente. El acceso a la ventana también es restringido por lo que en el evento de una emergencia el proceder podría ser dificultoso.



Figura 41. Ventana 3, arriba en rojo, el Quemador

La duración de los ensayos está condicionada por el comportamiento de las probetas, teniendo como mínimo que tres termocuplas alcancen los 300°C.

3.6.1. Método de Ensayos

Los ensayos consideran distintas etapas.

- Comienzo: Las probetas se colocan en la ventana sellando los espacios entre la probeta y la pared de la ventana con manta refractante, para asegurar que no exista fuga de calor y para que la probeta mantenga su posición, como se muestra en la Figura 42.



Figura 42. Probeta con protección de manta en los espacios entre horno y probeta.

- El controlador del horno se encarga de determinar el paso del gas hacia el quemador de manera automática. Se decidió utilizar un procedimiento manual para asegurar una adecuada ignición de la llama, por lo que una vez iniciado el programa del controlador se procede a ajustar la apertura del paso de gas a un 80%, transcurridos 30 segundos desde el inicio del programa se enciende automáticamente la llama, momento en el que manualmente se disminuye la apertura hasta el 35%. Se dejan pasar aproximadamente 30 segundos más y se pasa de control manual a automático, siendo el controlador el encargado de seguir cumpliendo la curva tiempo-temperatura.



Figura 43. Controlador N1200 en automático y manual

- Combustión: El período comprendido entre el encendido y el apagado es cuando la probeta alcanza los 300°C en su cara expuesta. Durante esta etapa se debe observar el correcto desarrollo de la temperatura en el horno de manera que el seguimiento de la curva tiempo-temperatura se mantenga dentro de los márgenes establecidos por la norma (Anexo E).



Figura 44. Seguimiento de Controlador N1200 de la curva tiempo-temperatura, Arriba T° deseada, Abajo T° real

- Apagado: Una vez alcanzadas las condiciones para finalizar el ensayo, se procede a apagar el quemador, retirándose inmediatamente las probetas. Primero se retira la probeta de la ventana 2 para que los cables compensados no interfieran con el retirado de la siguiente probeta.

una vez sacadas las probetas se apagan con agua hasta que toda llama sea extinta. Luego se procede a reiterar el proceso con la probeta en la ventana 1. Con las dos probetas ya sin llama se sigue apagando por aproximadamente 5 minutos con agua hasta que el vapor liberado sea mínimo y la probeta al tacto tenga una baja temperatura. Se dejan secar por aproximadamente 2 días.



Figura 45. Probetas recién sacadas del horno con llamas presentes.

En las Figuras 46-48 se observa como la temperatura disminuye luego de que la probeta es apagada con agua, deteniéndose en poco tiempo la carbonización. Luego de transcurrido 1 minuto la temperatura máxima es de 49°C y a los 30 segundos siguiente pasa a 29°C, considerándose totalmente detenido el proceso de carbonización.

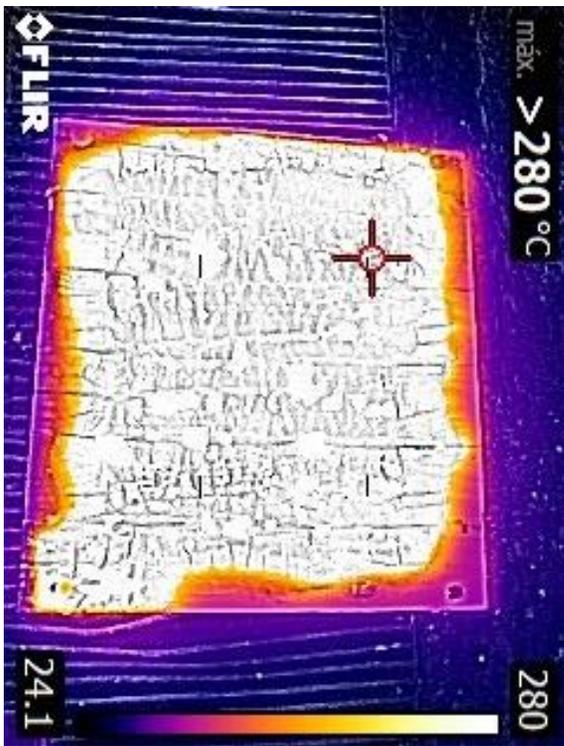


Figura 46. Termografía aun con llama visible.

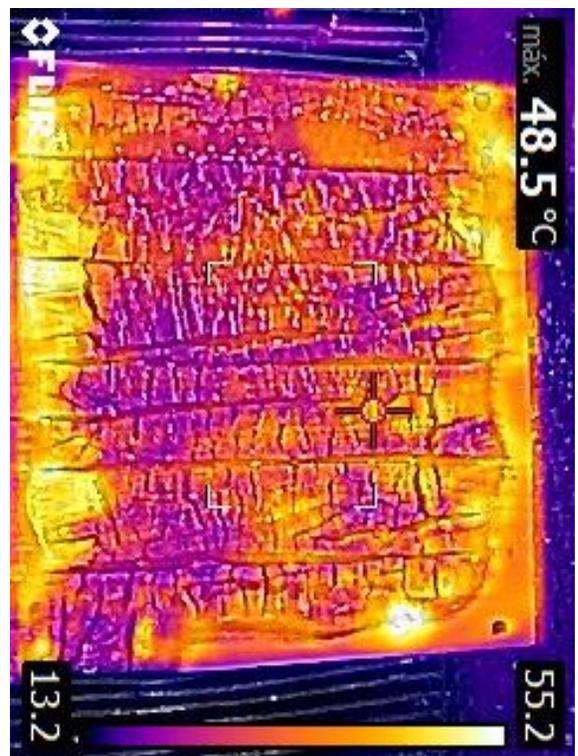


Figura 47. Termografía probeta 1 minutos después de apagada con agua

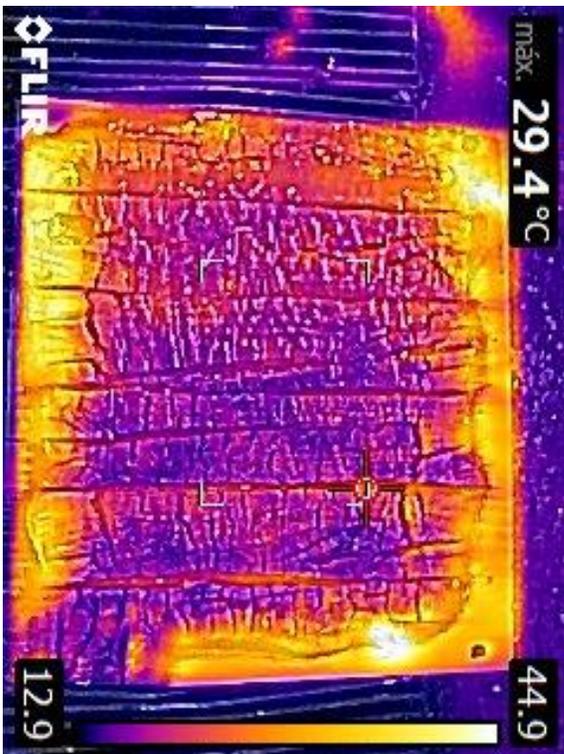


Figura 48. Termografía probeta 1,5 minutos después de apagada con agua

4. ITEMIZADO DE ENSAYOS

A continuación, se determina la cantidad de ensayos y los insumos requeridos para completarla investigación. Las glosas consideradas son: Madera Aserrada, MA; madera laminada encolada, MLE; Adhesivo Resorcinol Formaldehido; Termocuplas. En el anexo H se entregan detalles de los cálculos.

- Ensayos Preliminares

Para los ensayos preliminares se realizan 7 ensayos con el propósito de validar el uso simultáneo de dos ventanas del horno y comprobar el adecuado control del desarrollo de la curva tiempo respetando las tolerancias permitidas. Para simular los ensayos finales, se ejecutan 2 ensayos utilizando las ventanas 1 y 2, para estudiar el comportamiento del horno y asimilar el uso de la tarjeta de adquisición y su software.

Para llevar a cabo los ensayos de puesta en marcha, se requirieron 9 probetas de madera aserrada. No se ensayaron probetas de madera laminada encolada ya que no estuvieron disponibles al comienzo de los ensayos preliminares.

La estimación de la cantidad de madera aserrada se hace con vigas de largo 3200 mm la cual es la medida comercial estándar. No se controla la densidad ni la humedad por tratarse de ensayos preliminares. Se requieren 11 vigas de Pino Radiata de 4" cepilladas de espesor y de 600 mm de largo.

- Ensayos de Resistencia al Fuego

Para el estudio de la velocidad de carbonización de las distintas especies madereras (Pino Radiata, Pino Oregón y Roble) se realizarán 14 ensayos en total, 5 de Pino Radiata (9 probetas) y Pino Oregón (10 probetas); y 4 de Roble (8 probetas).

A diferencia de las probetas para los ensayos preliminares este estudio requiere la determinación de la densidad y el contenido de humedad de las muestras. Para esto se dejan sobrantes de 100 mm en cada muestra.

Se necesitan 6 vigas para cumplir con la cantidad de soportes, con esta configuración se obtienen a su vez 12 muestras, por lo que aún faltan 24 de estas para completar lo requerido. Obteniendo 4 muestras de una viga de 3200 mm son necesarias 6 vigas más. En total son 12 vigas de Pino Radiata. Para el Roble la cantidad de soportes se satisface con 6 vigas, para obtener las 20 muestras faltantes se necesitan 5 vigas, sumando un total de 11 vigas.

Para la estimación del adhesivo, se trabaja con razón gramaje/esparcido entregado por la empresa Oxiquim de $0.350 \frac{kg}{m^2}$. En total se necesitan 3.214 kg de adhesivo.

5. ESTUDIO DE DATOS

En esta sección se explican los métodos utilizados para el estudio de los datos y el cómo se obtuvieron.

5.1. Métodos para para obtener la velocidad de carbonización

La velocidad de carbonización se obtiene de dos maneras; método residual y método de regresión lineal.

5.1.1. Método ancho residual

En lo siguiente se describen los pasos a seguir para obtener la velocidad de carbonización mediante el método del ancho residual. Finalizado el ensayo el ensayo las probetas se dejan secar por un par días. Las muestras luego de quemarse permanecen unidas y deben separarse para ser analizadas



Figura 49. Probeta carbonizada posterior a su apagado



Figura 50. Muestras y soportes separadas de probeta

Una vez separadas se eliminan los soportes (muestra superior e inferior que se encuentran perforadas) y se procede a raspar de manera preliminar el carbón suelto de la superficie. Luego con una escobilla se elimina la capa de carbón adherida a la madera.



Figura 51. Muestras a estudiar, sin los soportes.



Figura 52. Muestras raspadas

Las muestras se encuentran listas para ser estudiadas, pero su gran tamaño impide un estudio adecuado. Por esta razón se cortan primero los bordes no quemados, se eliminan 15 cm de madera desde los bordes en ambos lados para dejar una muestra de 30 cm de la zona media de la muestra total, eliminando así, problemas en las secciones de transición entre área carbonizada y no carbonizada.

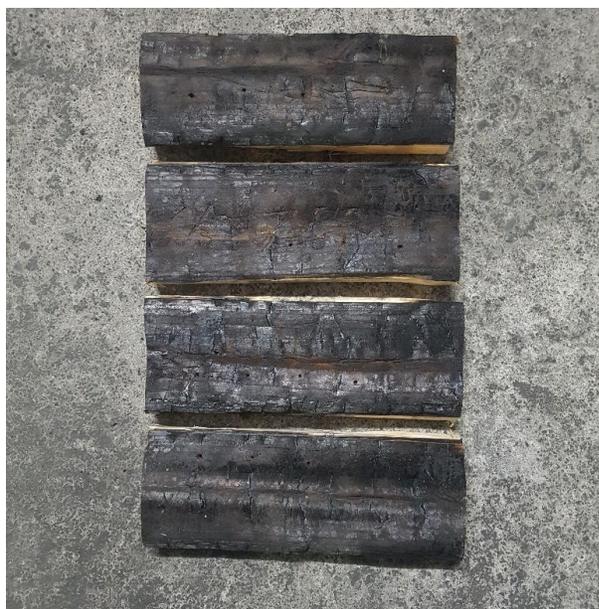


Figura 53. Muestras sin bordes

La madera se carboniza de manera irregular por lo que para obtener una altura residual promedio se cortan 6 mini-muestras de 5 cm de espesor. En las que se miden 4 alturas por cada cara, obteniéndose un total de 8 alturas por cada una. Estas se promedian para obtener la altura promedio de la mini-muestra (tabla 14), se hace esto con las 5 mini-muestras restantes y finalmente se promedian las 6 alturas promedio para así obtener la altura residual de la muestra, la que se compara con la altura original, para de esta forma obtener finalmente la velocidad de carbonización de esa muestra.

Tabla 14. Ejemplo Alturas mini-muestras, muestra 7

Muestra	Submuestra	Alturas (mm)								Promedio	Promedio Caras	Promedio final
		1	2	3	4	5	6	7	8			
7	I	32,9	34,6	29,1	30,1	31,7	29,8	34,2	32,4	31,9		
	II	29,7	28,4	32	30,4	30,1	30,4	29,5	28,9	29,9	30,5	
	III	30,6	28,2	29,9	29,1	30,3	32,2	28,2	29,5	29,8		31,3
	IV	32,5	34,8	31,4	30,2	30	29,1	30,1	31,3	31,2		
	V	31,6	31	35,7	32,2	32,1	30,6	34,9	33,1	32,7	32,0	
	VI	31,4	30,5	34,5	31,7	31,6	30,4	36,1	31,8	32,3		



Figura 54. Mini-muestras para el cálculo del ancho residual

5.1.2. Método mediante regresión lineal

La velocidad de carbonización expresa el avance del frente de hacia el interior de la madera en el tiempo, y es por esto que se cuantifica en unidades de velocidad. Para obtener su valor mediante el método de regresión lineal se disponen termocuplas a distancias determinadas de la superficie de las probetas para determinar los tiempos en que se alcanza en dichas ubicaciones la temperatura de 300°C.

En el caso de la madera aserrada se utilizan 5 termocuplas por muestra alineadas sobre un mismo eje. Para la MLE se utiliza la misma cantidad dispuestos según una diagonal.

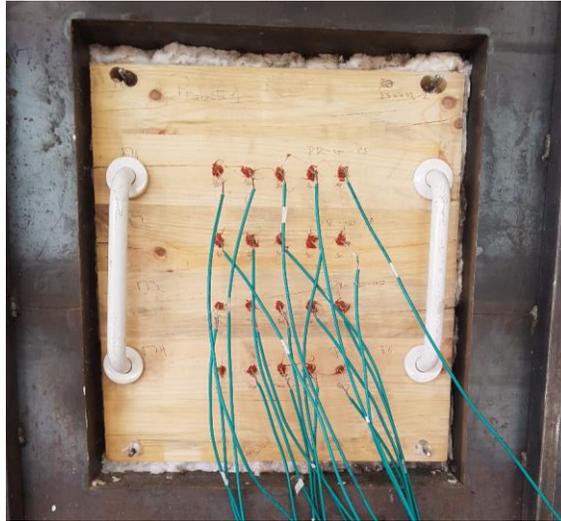


Figura 55. Disposición de termocuplas madera aserrada

Los sensores se conectan a la tarjeta de adquisición de datos mediante los cables compensados. Los valores de temperatura son grabados por el programa de análisis de datos y luego desplegados en una hoja de Excel.



Figura 56. Tarjeta de adquisición

Con los valores registrados se procede a identificar cada sensor con su respectiva entrada de la tarjeta de adquisición. El registro de temperaturas se compara con el tiempo desde el inicio del ensayo, por lo que es de suma importancia iniciar a grabar los datos al mismo tiempo en que se enciende el horno.

Para un análisis visual del comportamiento de los sensores, se grafican las temperaturas con respecto al tiempo para detectar así anomalías en la obtención de los datos.

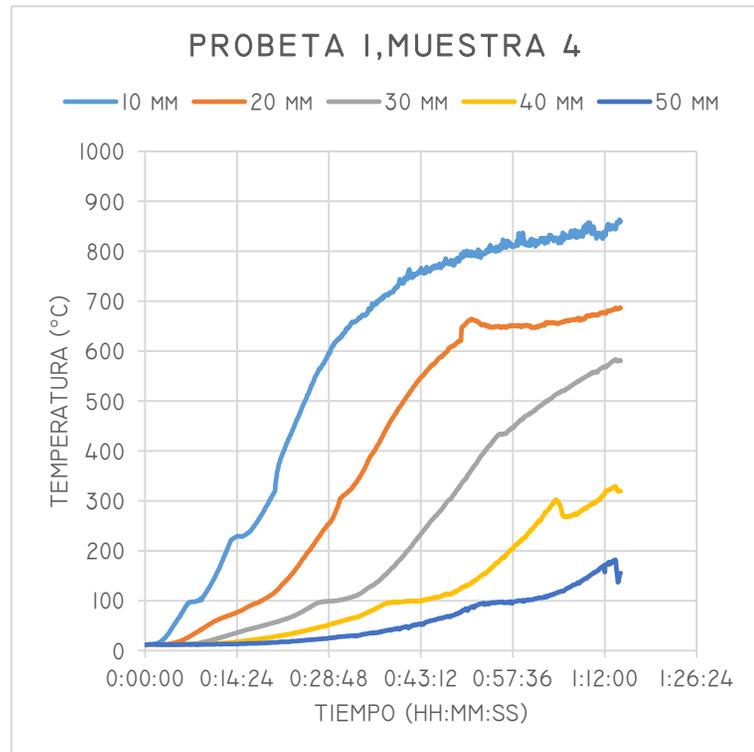


Gráfico 5. Ejemplo de método por regresión lineal Ejemplo de método por regresión lineal

Para cada termocupla se identifica el tiempo en que alcanza los 300 grados y se grafica en conjunto a las demás profundidades para así, mediante una regresión lineal, obtener los valores de velocidad de carbonización.

Con la regresión ya calculada, basta con obtener el inverso de la pendiente para obtener la velocidad de carbonización β .

$$y = m * x$$

$$\beta = \frac{1}{m}$$

Para una mayor precisión en la medición de los datos, una vez perforados los orificios de las termocuplas se mide la distancia con un pie de metro para tener la profundidad real y asociar el tiempo en que alcanza los 300°C con dicha profundidad real.

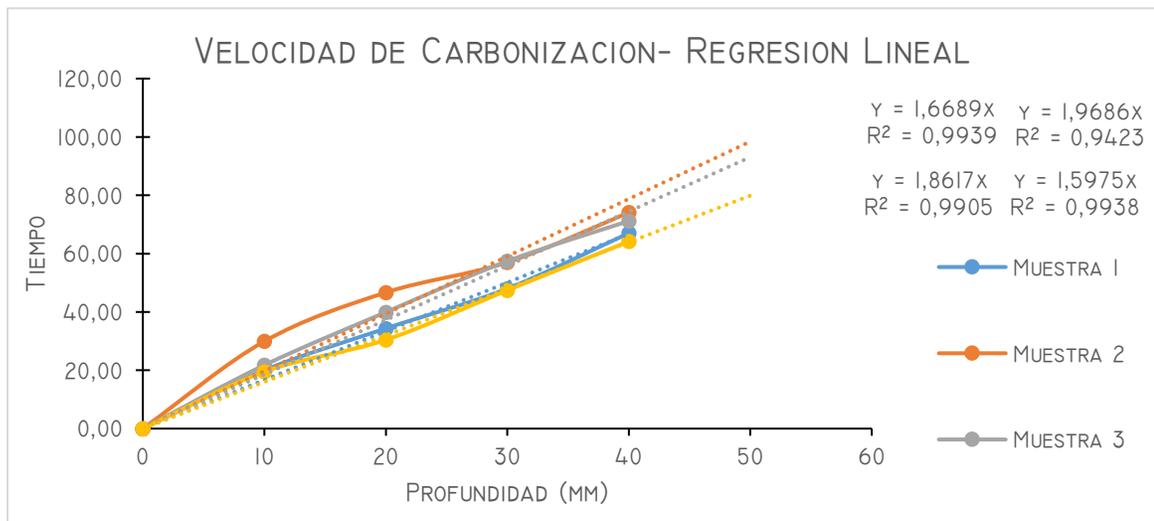


Gráfico 6. Velocidad de carbonización mediante Regresión lineal

5.1.3. Método rectángulo equivalente

Este método se ocupa para reflejar en forma simplificada la carbonización irregular que experimentan las probetas (Figura 58).



Figura 57. Irregularidades en la carbonización de probetas de MLE

El análisis de una imagen de la sección transversal de la probeta carbonizada y su procesamiento mediante el programa AUTOCAD permite modelar su forma y posteriormente obtener el área de la sección escalando la imagen con una distancia conocida. Con el área residual y el valor del largo inicial de la muestra (se utiliza carbonización unidireccional) se obtiene el ancho residual.

$$Area_{residual} = Largo_{inicial} \times Ancho_{residual}$$

$$Ancho_{residual} = \frac{Area_{residual}}{Largo_{inicial}}$$

El método del ancho residual solo involucra la medición de 4 puntos por cara, pero las irregularidades de las muestras podrían afectar y comprometer las mediciones debido a la arbitrariedad de las mediciones. Al obtener el área total de la sección se puede determinar el ancho residual equivalente con mayor precisión.

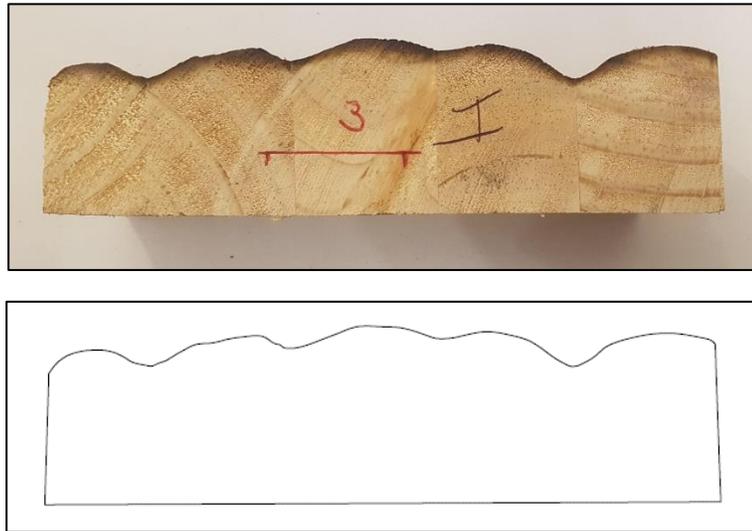


Figura 58. comparación mini-muestras MLE. arriba, imagen tomada de la mini-muestra. abajo, modelación de la sección en AutoCAD.

Con la modelación en AutoCAD se puede obtener el área total de la sección y el largo de su base valor que no se ve afectado ya que se mide carbonización unidireccional. 3

En la Figura 60 se observa el rectángulo que se obtiene al analizar la sección mediante el método descrito.

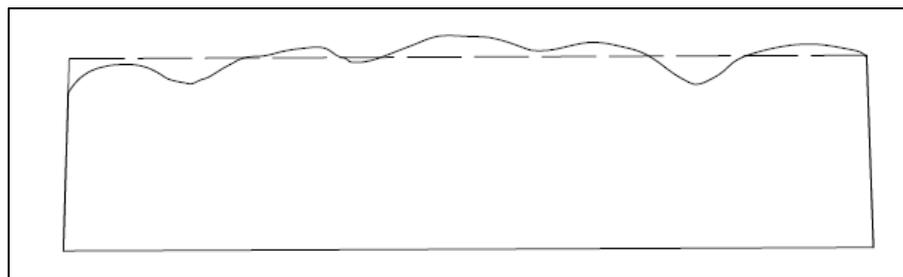


Figura 59. rectángulo equivalente que resulta de la modelación de AutoCAD

5.2. Método de Análisis de Datos

Con las velocidades de carbonización ya calculadas se procede al análisis de los datos para obtener sus tendencias y sus relaciones con las demás propiedades estudiadas. A continuación, se da una breve explicación de los métodos utilizados.

5.2.1. Estudio de Normalidad

Muchas de las pruebas de inferencia estadísticas (intervalos de confianza, regresión, correlación, análisis de varianza, pruebas de hipótesis, entre otros) exigen que las variables se distribuyan de manera normal, por lo que resulta crítico realizar una prueba para determinar el cumplimiento de esto.

En el caso que los datos se ajusten a una distribución normal se les puede aplicar los métodos estadísticos denominados paramétricos.

Para conocer si las propiedades de las muestras ensayadas distribuyen de manera normal se realiza una prueba de Shapiro-Wilks. La prueba se ejecuta con las tres propiedades a estudiar (velocidad de carbonización, densidad y humedad) y son representadas mediante los gráficos Q-Q y tablas resumen.

- Test de Shapiro-Wilk

Se utiliza el test de normalidad de Shapiro-Wilk ya que se están analizando variables cuantitativas intervalares y porque se tiene una muestra con un número de variables igual o menor a 50.

Este test entrega un valor estadístico W y su p -value. Se plantea como hipótesis nula que la población estudiada se distribuye de manera normal, por lo que se espera no rechazar esta hipótesis en el contraste.

- H_0 = Hipótesis nula, se define como que la variable aleatoria no se distribuye de manera normal.
- H_1 = Hipótesis alternativa, se define como que la variable aleatoria si posee una distribución normal.

No se puede rechazar la hipótesis nula si p -value es mayor a su grado de significancia, para estos casos 0.05 o 5% (expresado como Alpha en la tabla).

Los gráficos Q-Q son un método gráfico que permite comparar la distribución de una población obtenida de manera aleatoria y una distribución normal. Se comparan los cuantiles de las poblaciones (quantile en inglés) y si existe una relación lineal perfecta entre las dos distribuciones se seguirá una línea diagonal, mientras menor es la relación entre las poblaciones más alejada de la diagonal estarán los datos.

- Velocidad de Carbonización

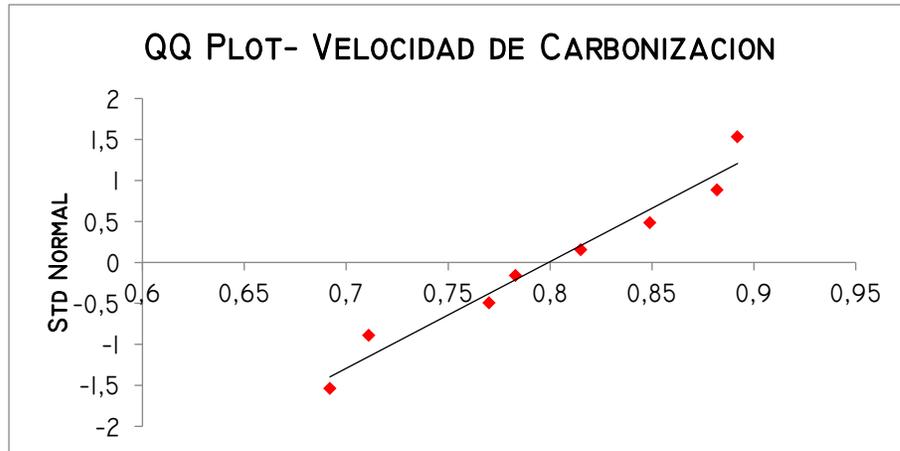


Gráfico 7. Gráfico Q-Q para demostrar normalidad de la distribución de la velocidad de carbonización

Tabla 15. Resultados test Shapiro Wilk

W-stat	0,94294645
p-value	0,64028362
alpha	0,05
normal	yes

Los datos de velocidad de carbonización distribuyen de manera normal, con una probabilidad crítica de 0.64.

- Densidad

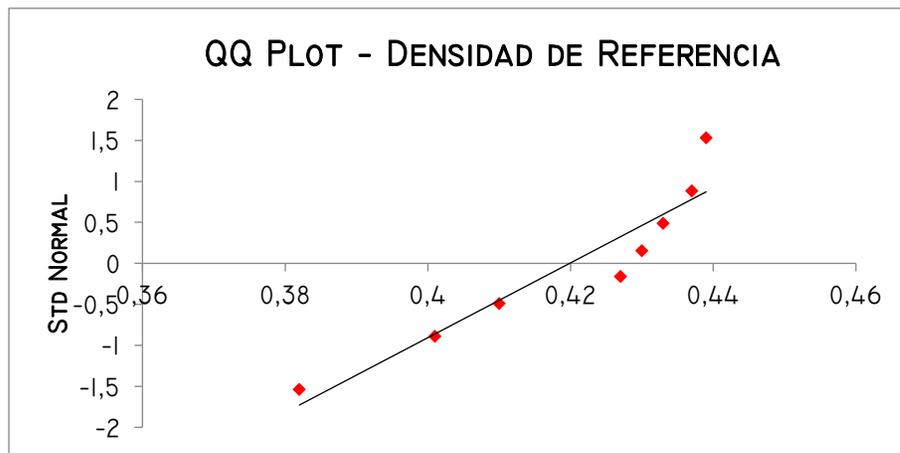


Gráfico 8. Gráfico Q-Q para demostrar normalidad de la distribución de la densidad

En este caso tanto la velocidad de carbonización como la densidad si distribuyen de manera normal, esta última con un p-value de 0.16.

5.2.2. Estudio de Cuartiles

Determinada la normalidad de las propiedades, se procede a obtener los estadísticos de tendencia central, tales como la mediana y media.

En el gráfico 13 se muestran los gráficos de caja para la velocidad de carbonización de los ensayos de resistencia al fuego.

Los gráficos de caja permiten visualizar la distribución de los datos en este caso de la velocidad de carbonización del pino Radiata.

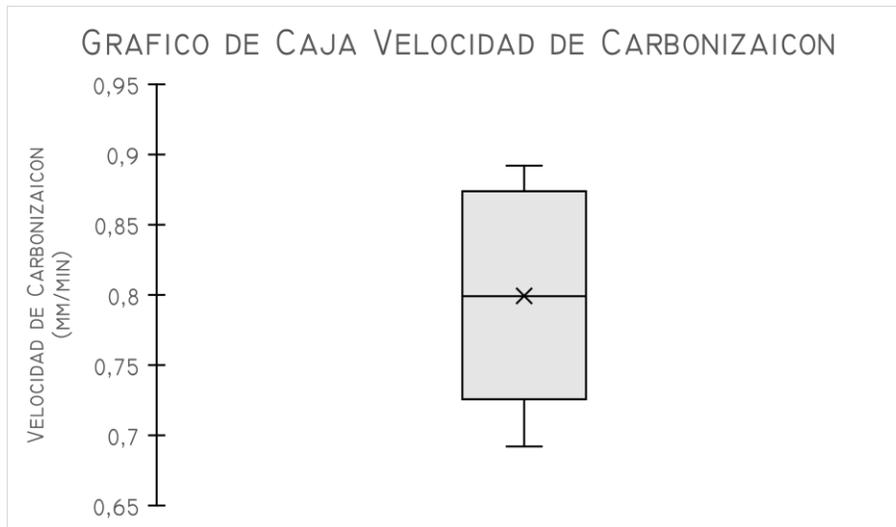


Gráfico 9. Gráfico de Caja

Tabla 16. Resumen valores cuartiles

Estadístico	X1
Nº observaciones	8
Mínimo	0,692
Máximo	0,892
1st Cuartil	0,755
Mediana	0,799
3rd Cuartil	0,857
Media	0,799
Varianza (n-1)	0,006
Desviación standrd (n-1)	0,074

La media de los datos es 0,799 mm/min con una desviación standard de 0.074. no se presentan valores atípicos y la media y mediana están muy cercanas lo que permite ratificar la existencia de una fuerte distribución normal.

La densidad presenta un valor p-value bajo y puntos alejados de la diagonal como se muestra en el gráfico 8. Observando su gráfico de caja (gráfico 11) para ver cómo se distribuyen los valores.

5.2.3. Estudio de Correlación

Para encontrar relaciones entre variables se procede a desarrollar un estudio de correlaciones y regresiones lineales. Es necesario entender que una correlación se hace sobre propiedades donde se espera una dependencia entre ellas al igual que las regresiones lineales.

Con anterioridad se analizó la normalidad en la distribución de las variables lo que permite utilizar el coeficiente de correlación Pearson para muestras numéricas continuas en el estudio de las relaciones entre la Velocidad de Carbonización-Densidad y Velocidad de Carbonización-Humedad.

El coeficiente de correlación de Pearson solo entrega la fuerza y la dirección de una relación lineal entre las variables, por lo que una baja correlación mediante este método no implica inmediatamente una baja relación entre las variables, pueden existir otro tipo de relaciones, por ejemplo, una regresión exponencial o logarítmica.

Graficar las relaciones es de gran ayuda ya que permite entender el grado de relación que existe y si se está ocupando la herramienta correcta para el análisis, debido a que permite identificar curvas que podrían asociarse a relaciones de otro tipo.

Para determinar que existe una relación entre variables se debe estudiar el valor del coeficiente de correlación de Pearson conocido comúnmente como r , el que toma valores entre -1 y 1 siendo 1 una relación lineal perfecta y un valor cercano a 0 una baja relación. El signo del valor expresa la dirección de la relación, si es positivo existe una relación creciente mientras que un valor negativo una decreciente.

Este coeficiente es muy sensible a valores extremos en las mediciones por lo que los gráficos de caja ayudan a identificar si existen outliers para así identificarlos y estudiar por qué se registraron. Para determinar si el valor del coeficiente de Pearson es significativo se debe compara el valor p-value con el grado de significancia (α) que se determina, parecido al análisis de normalidad. Se suele utilizar un valor de $\alpha = 0.05$ (5%).

- $p\text{-value} \leq \alpha$, La correlación es significativa
- $p\text{-value} > \alpha$, La correlación no es significativa

Tabla 17. Interpretación de valores coeficiente de Pearson

Coeficiente	Interpretación
$r = 1$	Correlación perfecta
$0.8 < r < 1$	Muy Alta
$0.6 < r < 0.8$	Alta
$0.4 < r < 0.6$	Moderada
$0.2 < r < 0.4$	Baja
$0 < r < 0.2$	Muy Baja
$r = 0$	Nula

- Correlación Velocidad de Carbonización y Densidad

p-values (Pearson):

Variables	velocidad carb	den referencial
velocidad carb	0	0,169
den referencial	0,169	0

Coefficients of determination (Pearson):

Variables	velocidad carb	den referencial
velocidad carb	1	0,289
den referencial	0,289	1

Tabla 18. P-value y coeficiente de correlación, Densidad -Velocidad de Carbonización

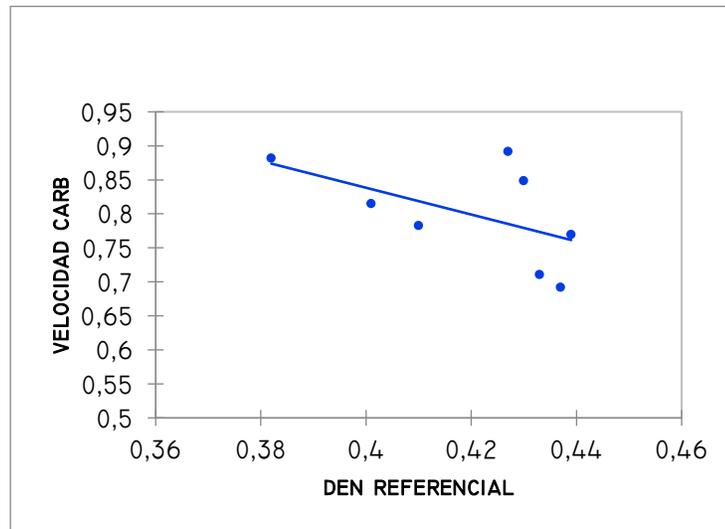


Gráfico 10. Relación lineal Densidad-Velocidad de Carbonización

Se puede concluir que al no existir una significancia suficiente en los datos no se puede rechazar la hipótesis nula por lo que no se puede asegurar una relación entre las variables.

5.2.4. Estudio de Concordancia

Para la determinación de la velocidad de carbonización se utilizan dos métodos diferentes, los cuales entregan valores diferentes. Una prueba que se puede hacer para determinar si existe una relación entre las medidas es realizar un análisis de concordancia.

Aprovechando los valores numéricos de la velocidad de carbonización obtenidas mediante termocuplas y el método de la sección residual se puede hacer un análisis de concordancia entre ambos métodos para ver si son intercambiables.

El método que se utiliza para esto es el de Bland-Altman, que gráficamente permite determinar si existen similitudes entre ambos métodos de medición. Este método fue desarrollado para el análisis de métodos clínicos el año 1986, sin embargo, su campo de aplicación puede variar al ser una herramienta simple y fácil de entender.

El método Bland-Altman consiste en representar de manera gráfica la diferencia entre las mediciones frente a su media. Con la media de todos los pares de puntos se obtiene la diferencia media que se muestra en la Figura 60 luego se grafican las diferencias entre las mediciones alrededor de esta, quedando algunos valores sobre la recta y otros por debajo.

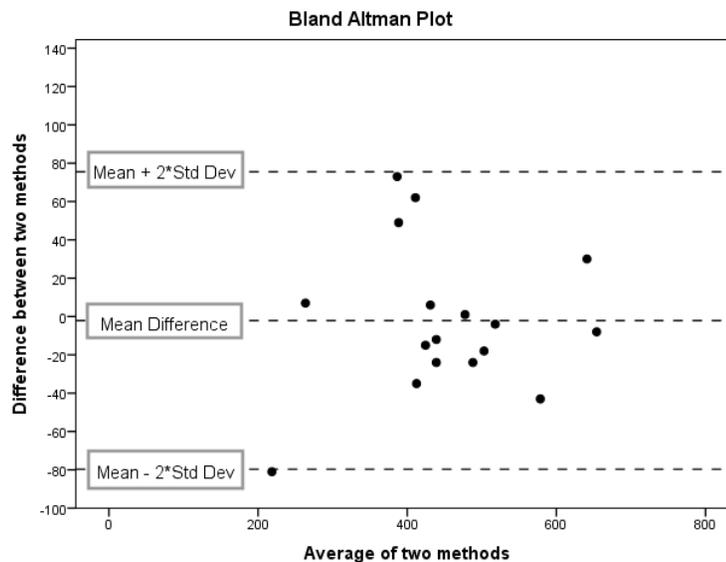


Figura 60. Ejemplo de uso para grafico Bland-Altman

Usualmente se determinan límites de confianza correspondientes a la línea superior e inferior de la Figura 59. de un 95%, por lo que se establece un rango en el que las diferencias en los datos se deberán encontrar un 95% de las veces. Si muchos datos caen fuera de estas márgenes se debe considerar que no existe concordancia entre estos. Si dentro de los límites de confianza no se encuentra el cero, las mediciones se consideran no concordantes de manera inmediata.

6. RESULTADOS

6.1. Madera Aserrada

La velocidad de carbonización se obtiene de las dos diferentes formas especificadas en la sección 5.1. La densidad y la humedad de las muestras se calcula aplicando el procedimiento descrito en la sección 3.3.1. y 3.3.2. tablas con los datos completos se encuentran en el anexo I.

6.1.1. Pino Radiata

A continuación se entregan los resultados obtenidos en los ensayos realizados para el conjunto de muestras de madera aserrada de Pino Radiata. Los tiempos de ensayos varió entre 63.6 y 75.9 minutos y se esperó obtener al menos 3 Termocuplas con temperaturas mayores a 300°C.

6.1.1.1. Velocidad de Carbonización

Los promedios de las velocidades de carbonización son 0.7 mm/min y 0.59 mm/min con medianas de 0.69 mm/min y 0.58 mm/min para los valores obtenidos mediante ancho residual y regresión lineal respectivamente. Con coeficientes de variación de 9.25% y 16.95% respectivamente.

Tabla 19. Velocidades de carbonización para muestras de Pino Radiata

Muestra	Velocidad de Carbonización (mm/min)	
	Residual	Termocuplas
1	0,73	0,67
3	0,64	0,5
4	0,58	0,55
6	0,73	0,63
7	0,70	0,54
8	0,81	0,47
9	0,74	0,49
10	0,69	0,61
12	0,68	0,81
13	0,66	0,49
14	0,57	0,45
15	0,64	0,49
16	0,65	0,48
17	0,61	-
18	0,63	0,51
19	0,63	0,49
20	0,73	0,65
23	0,75	0,69
24	0,72	0,67
25	0,70	0,6
26	0,80	0,61
27	0,66	0,56
29	0,64	0,52

32	0,70	0,54
33	0,78	0,66
34	0,69	0,58
36	0,71	0,63
38	0,66	0,61
39	0,81	0,8
41	0,76	0,65
42	0,64	0,54
43	0,68	0,56
44	0,66	-
48	0,83	0,76
49	0,77	0,81
50	0,72	-

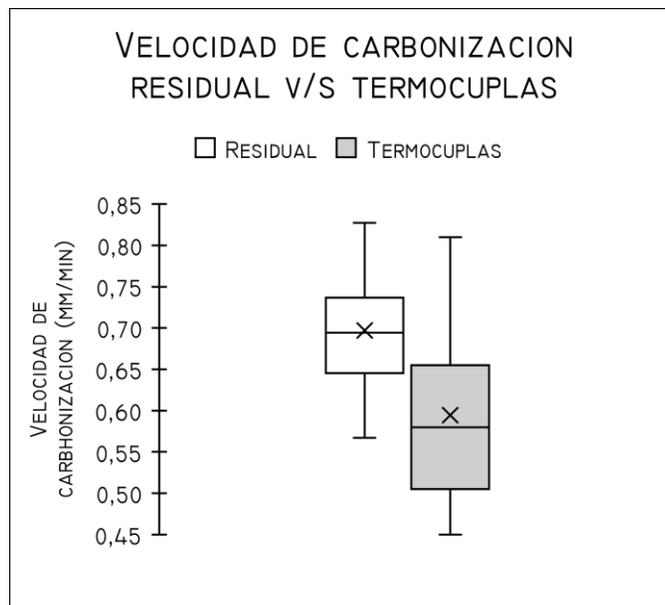


Gráfico 11. Comparación velocidades de carbonización

6.1.1.1. Humedad

Las humedades de las muestras de Pino Radiata fluctuaron entre el 9.7% y 14.7 %, con un promedio de 12,8% y un coeficiente de variación de 11.1%. En el grafico 13, la cruz dentro del cajón representa el promedio y la línea que atraviesa el rectángulo corresponde a la media de las humedades

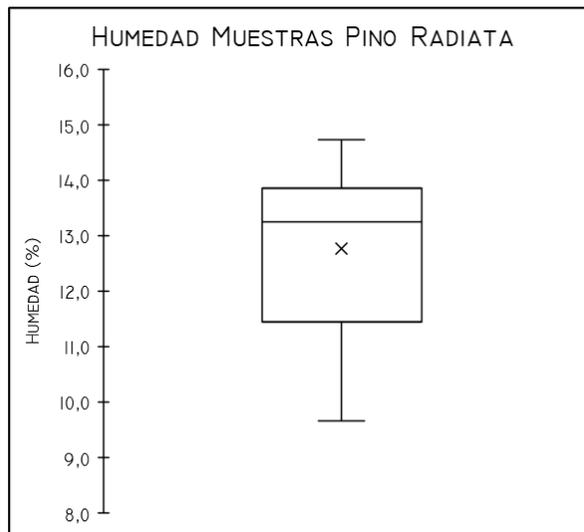


Gráfico 12. Gráfico de caja humedades Pino Raditata

6.1.1.2. Densidad

Las densidades presentan promedios de 471.01 kg/m³ y 498.24 kg/m³ para las densidades anhidra y normal respectivamente con coeficientes de variación de 12.01%. Con medianas de 466.01 kg/m³ y 492.95 kg/m³. Las densidades características son de 393.53 kg/m³ y 416.28 kg/m³ respectivamente.

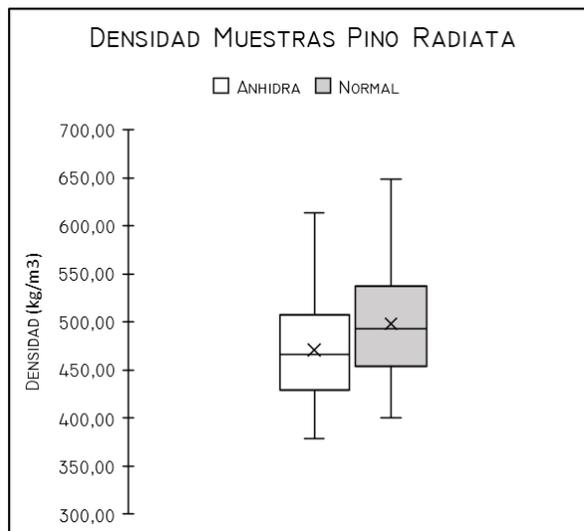


Gráfico 13. Densidades Pino Radiata

Tabla 20. Densidad normal y característica, Pino Radiata

	Anhidra		Normal	
	Promedio	Característica	Promedio	Característica
Promedio	471,01	393,53	498,24	416,28
Mediana	466,01	389,35	492,95	411,86
CV	12,01	12,01	12,01	12,01

6.1.2. Pino Oregón

La duración de los ensayos de muestras de madera aserrada de Pino Oregón varió entre 70.2 y 84.08 minutos.

6.1.2.1. Velocidad de Carbonización

Los promedios de las velocidades de carbonización son 0.63 mm/min con una mediana de 0.63 mm/min con un coeficiente de variación de 5.87%.

Tabla 21. Velocidades de carbonización para muestras de Pino Radiata

Muestra	Velocidad de carbonización (mm/min)
1	0,67
5	0,64
6	0,62
7	0,59
9	0,56
10	0,56
11	0,62
12	0,66
13	0,60
14	0,73
15	0,62
16	0,56
17	0,62
18	0,58
19	0,66
20	0,63
21	0,64
22	0,64
23	0,62
24	0,64
25	0,66
26	0,68
27	0,64
28	0,59
29	0,65
30	0,68
31	0,67
32	0,62
33	0,60

34	0,67
35	0,64
36	0,60
37	0,62
38	0,58
39	0,62
40	0,64
41	0,64
42	0,65
43	0,58
44	0,59

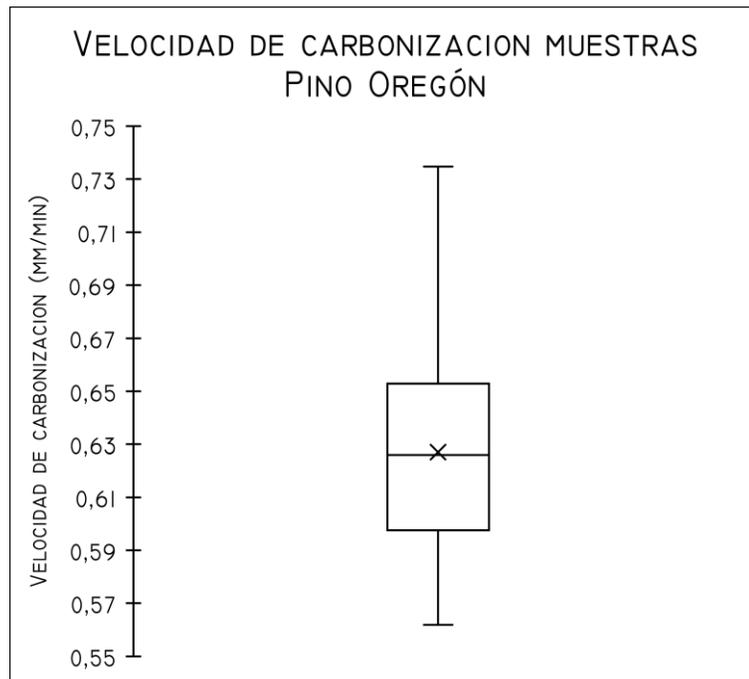


Gráfico 14. Gráfico de Caja velocidad de carbonización Pino Oregón

6.1.2.2. Humedad

Las humedades de las muestras de Pino Oregón se encuentran entre el 11 % y 14.7 %, con un promedio de 13.3% y un coeficiente de variación de 6.57% con una mediana de 13.6%.

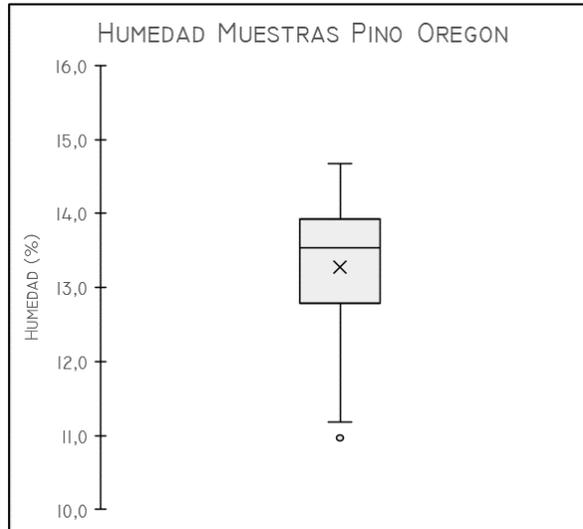


Gráfico 15. Distribución humedad Pino Oregón

6.1.2.3. Densidad

Las densidades presentan promedios de 442.2 kg/m³ y 465.67 kg/m³ con coeficientes de variación de 9.71% para la anhidra y normal respectivamente. Las medianas correspondientes son de 436.39 kg/m³ y 459.42 kg/m³. Las densidades características son de 369.48 kg/m³ y 389.07 kg/m³ respectivamente.

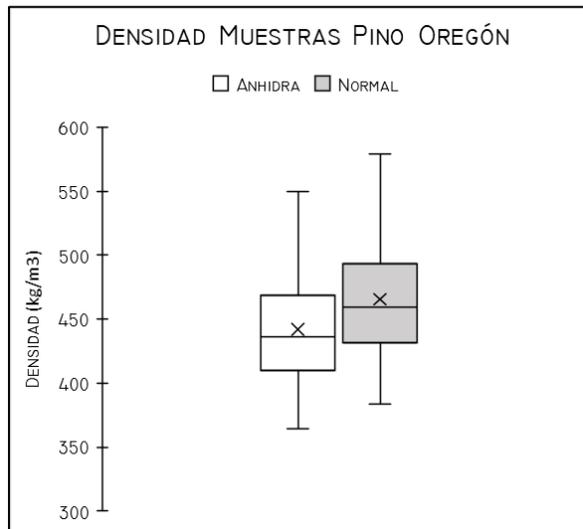


Gráfico 16. Densidades Pino Oregon

Tabla 22. Densidad normal y característica, Pino Oregón

	Anhidra		Normal	
	Promedio	Característica	Promedio	Característica
promedio	442,22	369,48	465,67	389,07
CV	9,71	9,71	9,71	9,71
mediana	436,29	364,52	459,42	383,85

6.1.3. Roble

A continuación, se entregan los resultados obtenidos en los ensayos realizados para el conjunto de muestras de madera aserrada de Roble.

la duración de los ensayos varió entre 80.37 y 82.77 minutos, se esperó obtener al menos 3 termocuplas con temperaturas mayores a 300°C.

6.1.3.1. Velocidad de Carbonización

El promedio de la velocidad de carbonización es de 0.39 mm/min con una mediana de 0.37 mm/min con coeficiente de variación de 21.3%.

Tabla 23. Velocidades de carbonización para muestras de Roble

Muestra	Velocidad de carbonización (mm/min)
1	0,30
2	0,30
3	0,31
4	0,36
7	0,40
8	0,36
10	0,52
11	0,55
12	0,57
13	0,38
14	0,35
16	0,31
18	0,34
22	0,41
23	0,38
24	0,43
25	0,42
26	0,45
27	0,47
30	0,34
34	0,51
35	0,52
36	0,52
37	0,32
39	0,37
40	0,38
41	0,34
42	0,40

43	0,36
50	0,30
51	0,27
52	0,29

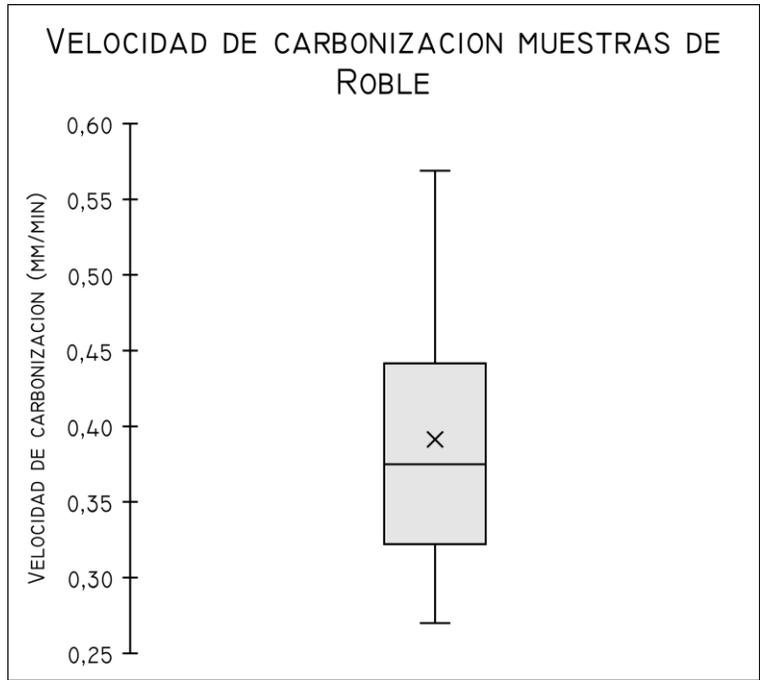


Gráfico 17. Gráfico de Caja velocidad de Carbonización muestras de Roble

6.1.3.2. Humedad

Las humedades de las muestras de Roble se encuentran entre el 13.5 y 55.8 %, con un promedio de 25.5%, una mediana de 21.7% y un coeficiente de variación de 38.66%

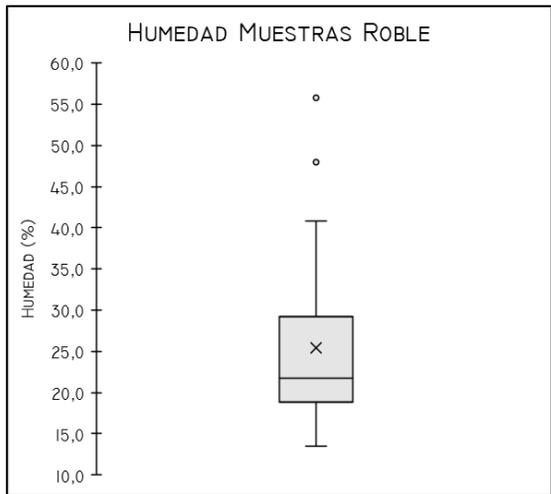


Gráfico 18. Distribución humedad roble

6.1.3.3. Densidad

Las densidades presentan promedios de 649.99 kg/m³ y 681.39 kg/m³ para las densidades anhidra y normal respectivamente con coeficientes de variación de 10.3%. Las medianas correspondientes son de 640.85 kg/m³ y 671.8 kg/m³. Las densidades características son de 543.07 kg/m³ y 569.3 kg/m³ respectivamente.

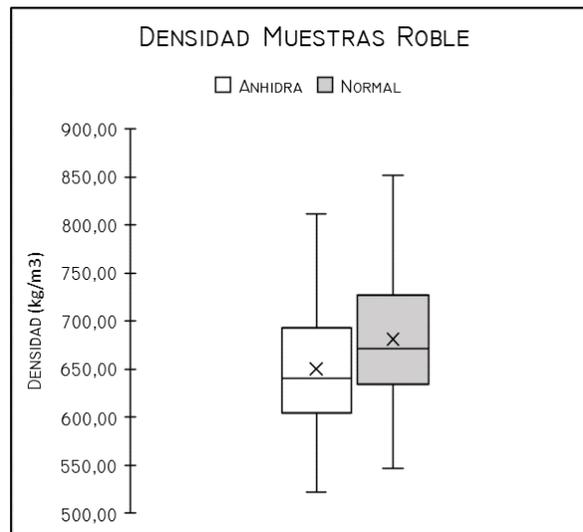


Gráfico 19. Densidades Pino Radiata

Tabla 24. Densidad normal y característica, Roble

	Anhidra		Normal	
	Promedio	Característica	Promedio	Característica
Promedio	649,99	543,07	681,39	569,30
CV	10,03	10,03	10,03	10,03
mediana	640,85	535,43	671,80	561,29

6.2. Madera laminada encolada

A continuación, se entregan los resultados obtenidos en los ensayos realizados para el conjunto de muestras de madera laminada encolada. La duración de los ensayos varió entre 63.05 y 70.75 minutos y se esperó obtener al menos 3 termocuplas con temperaturas mayores a 300°C.

6.2.1. Velocidad de Carbonización

La velocidad de carbonización se obtiene de las dos diferentes formas especificadas en la sección 5.1. En el Anexo G se encuentran las tablas con las mediciones particulares para cada cara de cada mini-muestra de MLE.

Tabla 25. Velocidades de carbonización para muestras de MLE

Muestra	Velocidad de carbonización (mm/min)	
	Ancho residual	Rectángulo equivalente
1.01	0,786	0,783
1.02	0,782	0,792
1.03	0,827	0,833
2.01	0,799	0,809
2.02	0,732	0,748
2.03	0,764	0,769
3.01	0,786	0,792
3.02	0,767	0,772
3.03	0,780	0,789
4.01	0,836	0,852
4.02	0,796	0,808
4.03	0,808	0,814
5.01	0,775	0,775
5.02	0,790	0,790
5.03	0,842	0,844
6.01	0,770	0,766
6.02	0,837	0,834
6.03	0,838	0,849
7.01	0,718	0,732
7.02	0,788	0,782
7.03	0,776	0,769
8.01	0,753	0,738
8.02	0,868	0,871
8.03	0,789	0,791
9.01	0,680	0,650
9.02	0,735	0,716
9.03	0,669	0,694
10.01	0,742	0,738
10.02	0,770	0,782
10.03	0,704	0,736
11.01	0,742	0,736
11.02	0,770	0,785
11.03	0,824	0,860
12.01	0,751	0,757
12.02	0,775	0,806
12.03	0,781	0,777

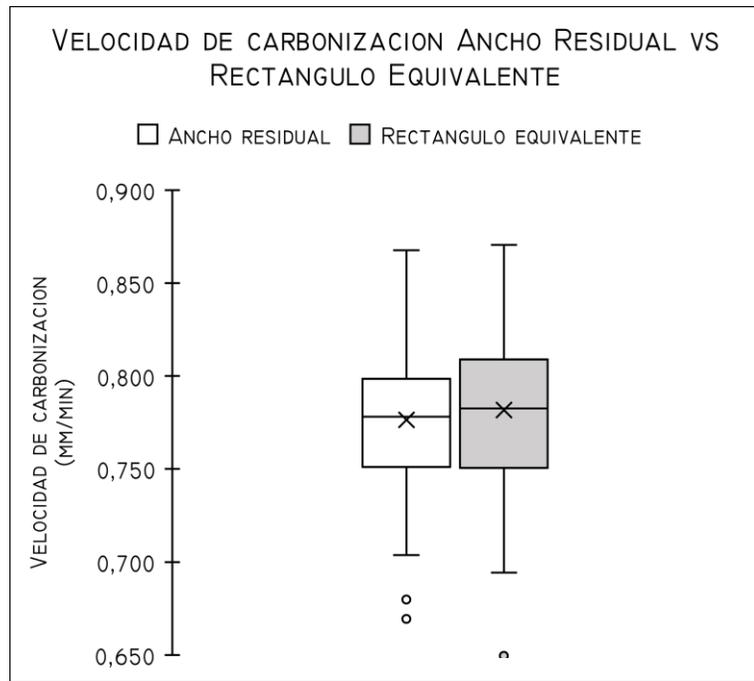


Gráfico 20. Gráfico de caja comparación velocidad de carbonización ancho residual y rectángulo equivalente

Los promedios de las velocidades de carbonización son 0.776 mm/min y 0.782 mm/min con medianas de 0.778 mm/min y 0.783 mm/min para los valores obtenidos mediante ancho residual y rectángulo equivalente respectivamente. Con coeficientes de variación de 5.69% y 6.07%.

6.2.2. Humedad

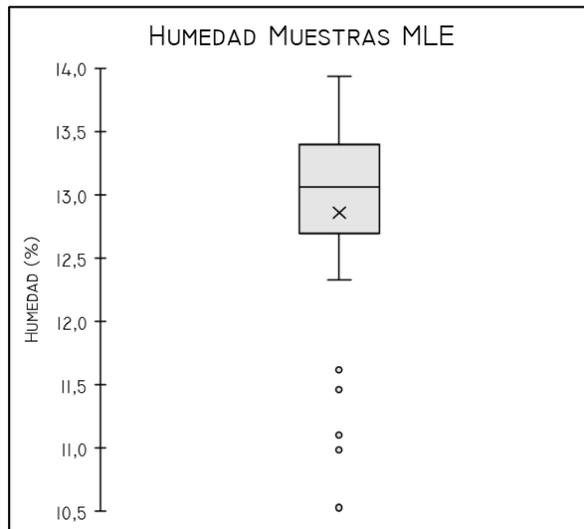


Gráfico 21. Humedad Muestras de MLE

El contenido de humedad de las muestras se obtiene a partir de lo especificado en la sección 3.3.1. Las humedades de las muestras de MLE se encuentran entre el 10.5% y 13.9%, con un promedio de 12.9%, una mediana de 13.1% con un coeficiente de variación de 6.81%.

6.2.3. Densidad

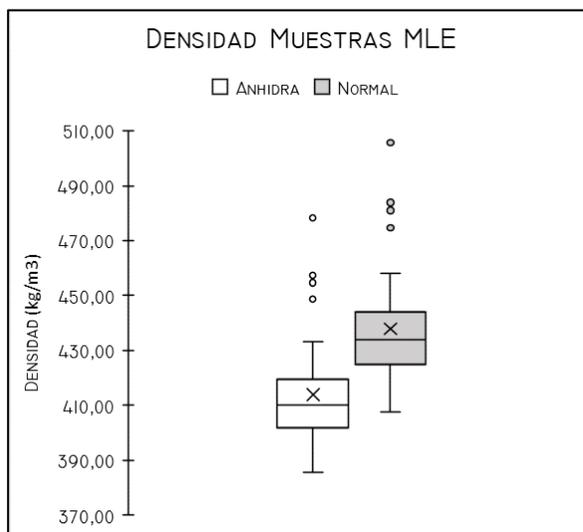


Gráfico 22. Densidades Muestras de MLE

Las densidades presentan promedios de 414.96 kg/m³ y 437.89 kg/m³ para las densidades anhidra y normal respectivamente con coeficientes de variación de 4.9%. Las medianas correspondientes son de 410.23 kg/m³ y 362.56 kg/m³. Las densidades características son de 345.87 kg/m³ y 365.86 kg/m³ respectivamente.

Tabla 26. Densidad normal y característica, MLE

	Anhidra		Normal	
	Promedio	Característica	Promedio	Característica
Promedio	413,96	345,87	437,89	365,86
CV	4,90	4,90	4,90	4,90
mediana	410,23	342,75	433,94	362,56

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Realizados los ensayos se analizan los resultados obtenidos para la velocidad de carbonización de las distintas especies madereras y de MLE junto con la relación de la densidad y humedad con está.

7.1. Velocidad de carbonización

○ Pino Radiata

La velocidad de carbonización promedio para las muestras de madera aserrada de Pino Radiata se determina mediante los métodos del Ancho Residual y de la Regresión Lineal. Para esto, se ejecutan 5 ensayos con duraciones entre 63.6 y 77.9 minutos con un promedio de 69.7 minutos.

Al comparar los valores de la velocidad de carbonización calculadas mediante ambos métodos, se observan diferencias que van desde el 4.8% al 41.9%, situación que se visualiza en la tabla 27.

Las mayores diferencias entre las velocidades de carbonización se encuentran en las muestras 8 y 9, las que conforman parte de la probeta 1, utilizada en el primer ensayo, que además se compone de las muestras 1 y 43, estas dos últimas no presentaron diferencias tan significativas entre métodos (8.5% y 18.0%). Como se observa en el anexo D. el comportamiento del horno fue normal y de acuerdo a lo esperado.

Las diferencias entre las mediciones se estudian determinando sus parámetros de tendencia central. Para el análisis mediante el método del Ancho Residual se obtiene una velocidad media de 0.7 mm/min con un cv de 9.25%, mientras que aplicando el método de la regresión lineal esta desciende a 0.59 mm/min con un coeficiente de variación de 16.95, mayor que para el primer método, demostrando una mayor dispersión de los datos.

Para obtener los intervalos de confianza de las velocidades de carbonización, se debe determinar la distribución de los datos. Realizando la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk (descrita en la sección 5.2.1.) sobre los valores obtenidos mediante el método del Ancho Residual se obtiene un p-value de 0.768 para un grado de significación de 0.05, dando cuenta de que, sí se sigue una distribución normal, siendo estadísticamente significativos.

Tabla 27. Diferencias velocidades de carbonización muestras
De Pino Radiata

Muestra	Residual	Termocuplas	Diferencia (%)
1	0,73	0,67	8,5
3	0,64	0,5	21,4
4	0,58	0,55	5,8
6	0,73	0,63	14,2
7	0,70	0,54	22,8
8	0,81	0,47	41,9
9	0,74	0,49	33,5

10	0,69	0,61	11,9
12	0,68	0,81	-18,5
13	0,66	0,49	26,1
14	0,57	0,45	20,6
15	0,64	0,49	22,9
16	0,65	0,48	26,2
18	0,63	0,51	18,8
19	0,63	0,49	22,7
20	0,73	0,65	11,2
23	0,75	0,69	7,5
24	0,72	0,67	7,3
25	0,70	0,6	13,8
26	0,80	0,61	24,0
27	0,66	0,56	15,1
29	0,64	0,52	19,1
32	0,70	0,54	22,8
33	0,78	0,66	15,2
34	0,69	0,58	15,4
36	0,71	0,63	11,1
38	0,66	0,61	7,3
39	0,81	0,8	0,7
41	0,76	0,65	14,3
42	0,64	0,54	16,1
43	0,68	0,56	18,0
48	0,83	0,76	8,1
49	0,77	0,81	-4,8

Tabla 28. Resumen valores muestras de Pino Radiata

	Ancho residual (mm/min)	Regresión Lineal (mm/min)
Media	0,7	0,59
Mediana	0,69	0,58
CV	9.25	16.95

El intervalo de confianza para la velocidad de carbonización obtenida mediante este método es de [0.679 mm/min-0.721 mm/min], esto quiere decir que con un grado de confianza del 95% la media poblacional de la velocidad de carbonización del Pino Radiata debería encontrarse dentro de estos valores.

Para el caso de los valores determinados mediante el método de regresión lineal, al realizar el test de Shapiro Wilk los valores no distribuyen de manera normal, un p-value de 0.028 para un grado de significancia de 0.05 permite concluir esto. Observando su grafico QQ (Grafico 24.) se determina que los valores no distan mucho de la recta esperada, la diferencia se hace evidente en los extremos. Lo cercano a una distribución normal se observa también en el p-value del análisis, que, a pesar de ser menor al grado de significación, no se encuentra muy alejado de este. Se propone otro análisis de normalidad para descartar el análisis de intervalos de confianzas.

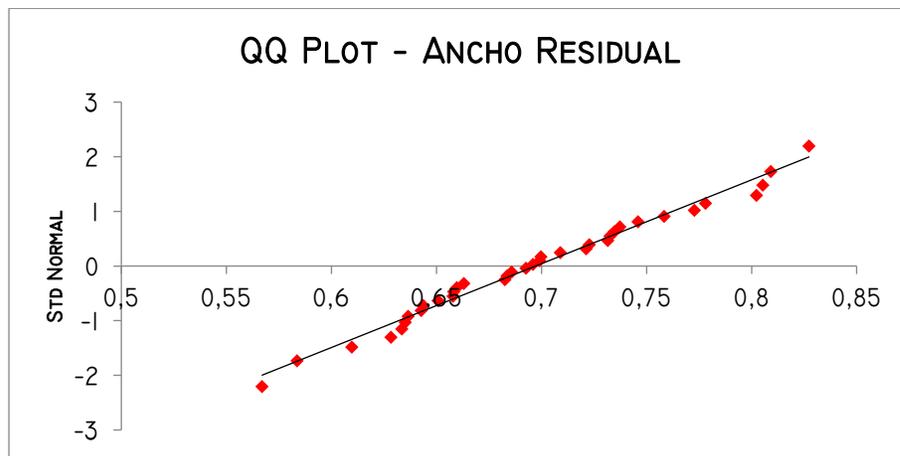


Gráfico 23. Gráfico Q-Q Pino Radiata- Método del Ancho Residual



Gráfico 24. Gráfico Q-Q Pino Radiata- Método de Regresión Lineal

Un método alternativo al de Shapiro Wilk es el de d'Agostino-Pearson, y al realizar esta prueba para un grado de significancia de 0.05 se obtiene un p-value de 0.734. En consecuencia, de acuerdo con este método la muestra si distribuye de manera normal. Para los valores de velocidad de carbonización obtenidos mediante regresión lineal el intervalo de confianza es de [0.558 mm/min-0.623 mm/min].

En el Eurocodigo para el cálculo de resistencia al fuego de estructuras de madera aserrada de Pino Radiata se utiliza un valor de velocidad de carbonización nominal de 0.8 mm/min, superior a los determinados a partir de los ensayos, por lo su utilización permite un cálculo conservador, dando una mayor seguridad.

Collier (1992) [14] en un amplio estudio con muestras de Pino Radiata y utilizando un método similar al del ancho residual determinó que para probetas con una humedad de 16% , densidad anhidra promedio de 519 kg/m³ se obtiene tiene una velocidad de carbonización de 0.59 mm/min utilizando un método similar al del ancho residual. En los ensayos actuales para el mismo método, la velocidad calculada es de 0.7 mm/min en

muestras con una densidad anhidra media de 471 kg/m³. Buscando muestras con densidades similares a las del trabajo neozelandés, se encuentra la muestra 17, con una densidad de 521.97 kg/m³ y una velocidad de carbonización de 0.61 mm/min, muy similar a lo obtenido por Collier, lo que permite reflejar la similitud en el comportamiento de la madera de Pino Radiata en nueva Zelanda y Chile.

Este investigador analiza también tres muestras de Pino Radiata con contenido de humedad distinto de cero mediante el método de la regresión lineal. El promedio de densidad para estas muestras es de 525.7 kg/m³, 19% de humedad y una velocidad de carbonización de 0.57 mm/min. En este trabajo la velocidad promedio, obtenida mediante el método de regresión lineal, es de 0.59 mm/min para una densidad de 519 kg/m³, encontrándose una gran similitud entre los resultados.

Comparando los resultados con aquellos obtenidos en el trabajo de Alejandro Ramírez (2001) [6] se hace evidente una gran diferencia entre velocidades de carbonización. Alejandro obtiene una tasa de carbonización de 0.87 mm/min para una densidad normal media de 496 kg/m³, y si se promedian las velocidades de su trabajo esta asciende a 0.873 mm/min. En los ensayos actuales el valor obtenido es menor para una densidad normal similar de 498.24 kg. La diferencia de velocidad de carbonización en porcentaje entre ambos trabajos es de un 19,5 %.

- Pino Oregón

Para el estudio de las muestras de pino Oregón y por problemas en la adquisición de las termocupas solo se utilizó el método del ancho residual. mediana de 0.63 mm/min con un coeficiente de variación de 5.87%.

Se realizaron 5 ensayos utilizando 40 muestras en total. Mediante el test de Shapiro Wilk se puede concluir que las muestras se distribuyen de manera normal con un valor p-value de 0.332 para un grado de significancia de 0.05. La velocidad de carbonización tiene una media de 0.627 mm/min con un coeficiente de variación de 5.87% y una mediana de 0.626 mm/min. El Intervalo de confianza para la velocidad de carbonización es [0.616 mm/min- 0.638 mm/min].

De acuerdo con las especificaciones del Eurocodigo el valor de velocidad de carbonización asignado al Pino Oregón es idéntico al del Pino Radiata. Este valor queda por sobre la media muestral y el intervalo de confianza antes mencionados, por lo que su uso resultaría en resultados conservadores con respecto a lo medido en este estudio.

Comparando los resultados con algunos antecedentes internacionales, en Nueva Zelanda, por ejemplo, Collier (1992) [14] determinó para muestras de Pino Oregón (Douglas fir) con una densidad anhidra 372 kg/m³ una velocidad de carbonización de 0.68 mm/min, este valor es mayor al obtenido en este trabajo, que con una densidad anhidra media de 442.22 kg/m³ se determina una velocidad de 0.627 mm/min.

En el estudio de Yang et al. (2009) [28], para vigas de madera laminada encolada de pino Oregón ensayas durante 60 minutos, se midió una velocidad de carbonización de 0.624 mm/min lateral y 0.632 mm/min en su base, con una densidad de 531 kg/m³. La similitud con respecto a la velocidad conseguida los ensayos actuales es considerable, a pesar de que la densidad de la madera utilizada es mayor, obteniéndose un mejor acercamiento a los resultados en este trabajo.

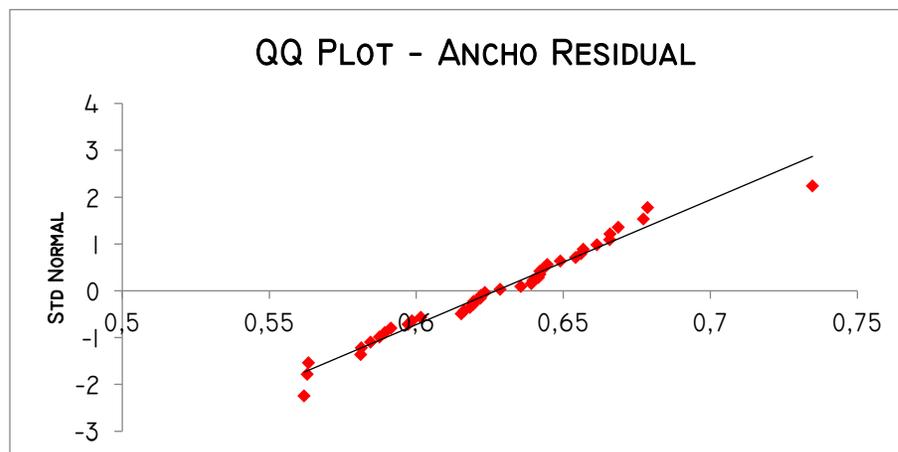


Gráfico 25. Gráfico Q-Q Pino Oregón- Método del Ancho Residual

- Roble

La velocidad de carbonización del roble se determina realizando 4 ensayos, con un total de 32 muestras. Los ensayos tuvieron duraciones entre 80.37 y 82.77 minutos, con un promedio de 81.62 minutos.

Para el estudio de los intervalos de confianza, según el test de Shapiro Wilk los datos no se distribuyen de manera normal, entregando un p-value de 0.035. Sin embargo, al realizar el análisis alternativo de d'Agostino-Pearson si se determina la normalidad, con un p-value de 0.212 para un grado de significancia de 0.05.

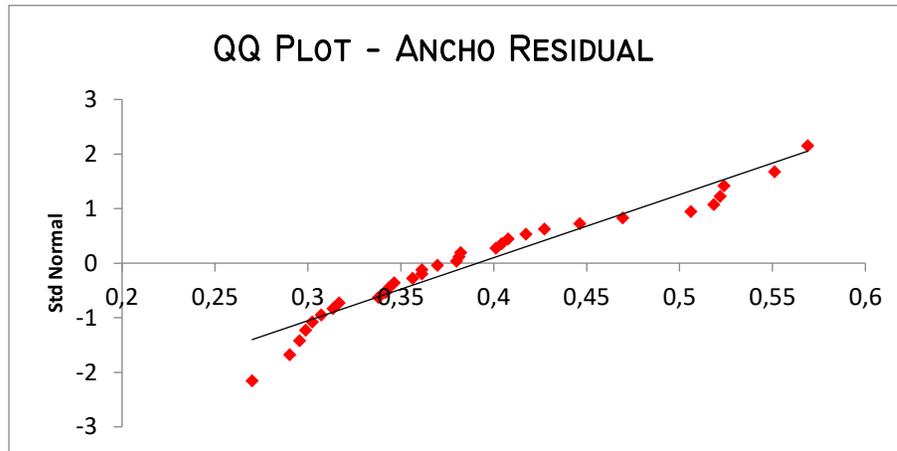


Gráfico 26. Gráfico Q-Q Roble - Método del Ancho Residual

El intervalo de confianza para la velocidad de carbonización del Roble es de [0.361 mm/min- 0.419 mm/min] con una media de 0.39 mm/min. con una mediana de 0.37 mm/min con coeficiente de variación de 21.3%.

El roble corresponde a una especie Latifoliada por lo que de acuerdo con el Eurocodigo corresponde un valor nominal de 0.55 mm/min. Si bien este valor no se encuentra dentro del intervalo de confianza, es mayor al estimado en el presente estudio y al ser utilizado brinda soluciones conservadoras.

En el estudio realizado por Njankouo et al. (2004) [21] para el roble con una densidad de 557 kg/m³ para un contenido de humedad del 10% se determinó una velocidad de carbonización de 0.59 mm/min, valor bastante superior al determinado en el presente trabajo. La muestra con una mayor similitud a los resultados de Njankouo es la número 40, con una humedad del 13%, una densidad normal de 621 kg/m³, pero con una velocidad de carbonización de solo 0.38 mm/min.

Ramírez (2001) [6] determinó una velocidad de carbonización de 0.69 mm/min, mayor a la obtenida por Njankouo (2014). La humedad promedio es de 24%, similar al 25,5% registrado en el actual trabajo, a la vez que la densidad de referencia de 695 kg/m³ en la muestra de Ramírez resulta sutilmente mayor a los 681.39kg/m³ medidos en este trabajo.

- MLE

La velocidad de carbonización, de las muestras de Madera Laminada de Pino Radiata, se obtiene mediante los métodos del Ancho Residual y del Rectángulo Equivalente. Se realizan 6 ensayos con 12 probetas divididas en 3 muestras cada una.

A diferencia de la comparación que se hace en el estudio de las muestras de madera aserrada de Pino Radiata, para la MLE, no se utilizan termocuplas, sino que dos métodos para evaluar el ancho posterior a la carbonización de las secciones residuales.

Debido a la gran variabilidad en la sección residual de las mini-muestras de MLE en la estimación de la velocidad de carbonización se utiliza adicionalmente el método del rectángulo equivalente explicado en la sección 5.1.3. Al comparar los resultados brindados por ambos métodos, se observan diferencias menores que varían entre 0.07% y 4.66%, lo que permite concluir que el método del ancho residual entrega valores representativos a pesar de la variabilidad en alturas de la sección residual.

Las muestras se distribuyen de manera normal para ambos métodos de estudio. Imponiendo el grado de significancia de 0,05 para el método del ancho residual se tiene un p-value de 0.47 mientras que para el método del rectángulo equivalente este valor resulta 0.524

Tabla 29. Diferencias velocidades de carbonización muestras de Pino Radiata

Muestra	Ancho residual	Rectángulo equivalente	Diferencia %
1.01	0,786	0,783	0,3
1.02	0,782	0,792	-1,3
1.03	0,827	0,833	-0,7
2.01	0,799	0,809	-1,3
2.02	0,732	0,748	-2,1
2.03	0,764	0,769	-0,6
3.01	0,786	0,792	-0,7
3.02	0,767	0,772	-0,6
3.03	0,780	0,789	-1,1
4.01	0,836	0,852	-1,9
4.02	0,796	0,808	-1,4
4.03	0,808	0,814	-0,8
5.01	0,775	0,775	0,1
5.02	0,790	0,790	-0,1
5.03	0,842	0,844	-0,2
6.01	0,770	0,766	0,5
6.02	0,837	0,834	0,3
6.03	0,838	0,849	-1,3
7.01	0,718	0,732	-1,9
7.02	0,788	0,782	0,8
7.03	0,776	0,769	0,9
8.01	0,753	0,738	2,0
8.02	0,868	0,871	-0,3
8.03	0,789	0,791	-0,2
9.01	0,680	0,650	4,7
9.02	0,735	0,716	2,5
9.03	0,669	0,694	-3,6
10.01	0,742	0,738	0,6

10.02	0,770	0,782	-1,5
10.03	0,704	0,736	-4,5
11.01	0,742	0,736	0,8
11.02	0,770	0,785	-1,9
11.03	0,824	0,860	-4,2
12.01	0,751	0,757	-0,8
12.02	0,775	0,806	-3,8
12.03	0,781	0,777	0,4

El intervalo de confianza para la velocidad de carbonización mediante el método del Ancho Residual es de [0.762, 0.791] con una media de 0.776 mm/min, mientras que para el método del Rectángulo Equivalente este aumenta levemente a [0.766, 0.797] con una media de 0.782 mm/min. con medianas de 0.778 mm/min y 0.783 mm/min para los valores obtenidos mediante ancho residual y rectángulo equivalente respectivamente. Con coeficientes de variación de 5.69% y 6.07%.

El valor entregado por el Eurocodigo para el cálculo de resistencia al fuego de estructuras de MLE de Pino Radiata es de 0.7 mm/min, valor inferior a los intervalos de confianza determinados en este estudio, lo que podría ser una preocupación para el cálculo este tipo de material, ya que la madera se está carbonizando a una tasa mayor que la actualmente reconocida.

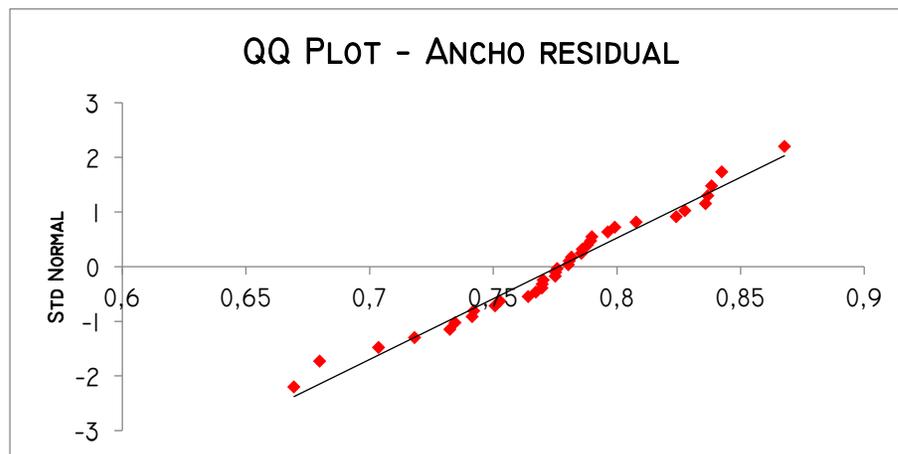


Gráfico 27. Gráfico Q-Q MLE - Método del Ancho Residual

En los antecedentes nacionales, Ramírez (2001) [6], se realizan ensayos de MLE con adhesivo urea formaldehído midió una velocidad de 0.77 mm/min, valor casi idéntico al determinado en este trabajo para el método del Ancho Residual (0.776 mm/min y 0.782 con el método del Rectángulo Equivalente), a pesar de que las densidades normales son distintas con 569 kg/m³ y 437.89 kg/m³ para el estudio de Ramírez y el actual respectivamente. El contenido de humedad medido por Ramírez es 17%, mientras que el del presente estudio es 12.9%.

Collier (1992) [14] en sus ensayos con probetas de Madera laminada encolada con una densidad de 500 kg/m³ y una humedad de 12% determinó una velocidad de 0.62 mm/min, velocidad menor al promedio en este trabajo. Para los ensayos actuales de MLE el menor valor de velocidad de carbonización tanto para el método del ancho residual como el del rectángulo equivalente corresponde a la muestra 9,03 de 0.664 mm/min, con una densidad normal de 429.44 kg/m³. La muestra con la mayor densidad es la 3.01 con una densidad normal de 505.79 kg/m³, sin embargo, tiene una velocidad de carbonización de 0.786 m/min.

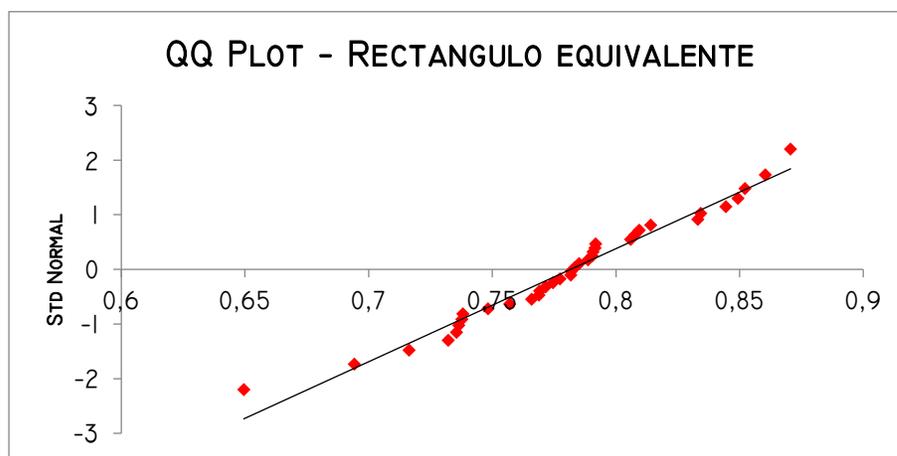


Gráfico 28. Gráfico Q-Q MLE - Método del Rectángulo Equivalente

Tabla 30. Resumen valores muestras de Pino Radiata

	Ancho residual (mm/min)	Rectángulo Equivalente (mm/min)
Media	0,776	0,782
Mediana	0,778	0,783
CV	5.69	6.07

7.2. Correlación entre Densidad y Velocidad de Carbonización

Se grafican las relaciones para tener una referencia visual de la distribución de los datos, realizándose el análisis para cada método por separado. En el gráfico 29 y 30 se representa la regresión lineal mediante una línea punteada, sin entregar su ecuación, ya que solo se está evaluando el grado de correlación entre las propiedades y no su modelación.

La relación se realiza solamente con la densidad anhidra, ya que la densidad normal se obtiene a partir de esta, las relaciones con la velocidad de carbonización serán iguales.

- Pino Radiata

Se analiza la relación entre la densidad y las diferentes velocidades de carbonización para determinar el grado de relación entre estas. En el gráfico 29 se grafican los resultados obtenidos.

- Método Regresión Lineal

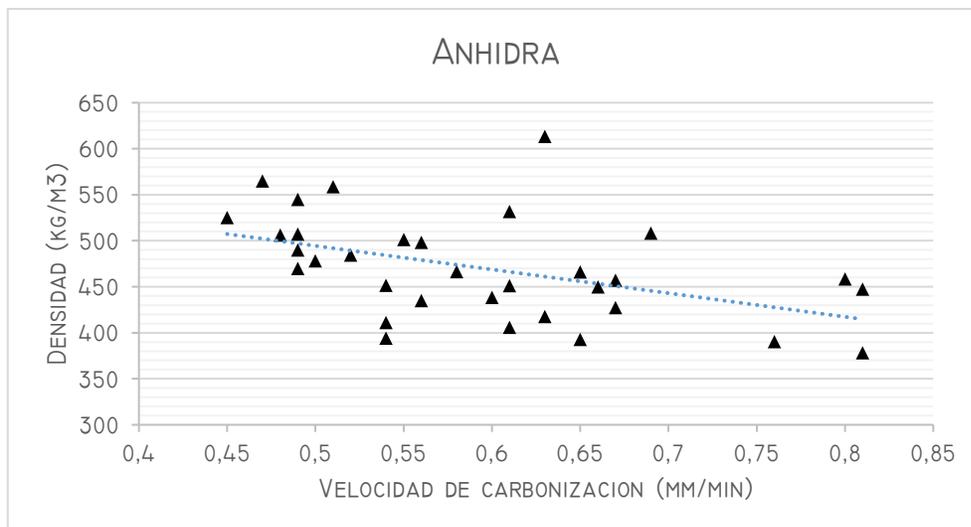


Gráfico 29. Velocidad de carbonización vs Densidad Anhidra Pino Radiata para el Método de regresión Lineal

La tabla 31 muestra los valores de la correlación, esta es moderada siendo estadísticamente significativa .

Tabla 31. Correlación Densidad Pino Radiata, Ancho Residual

	Anhidra
Coeff de Pearson	0,47
p-value	0,006
Grado de relación	Moderado

- Ancho Residual

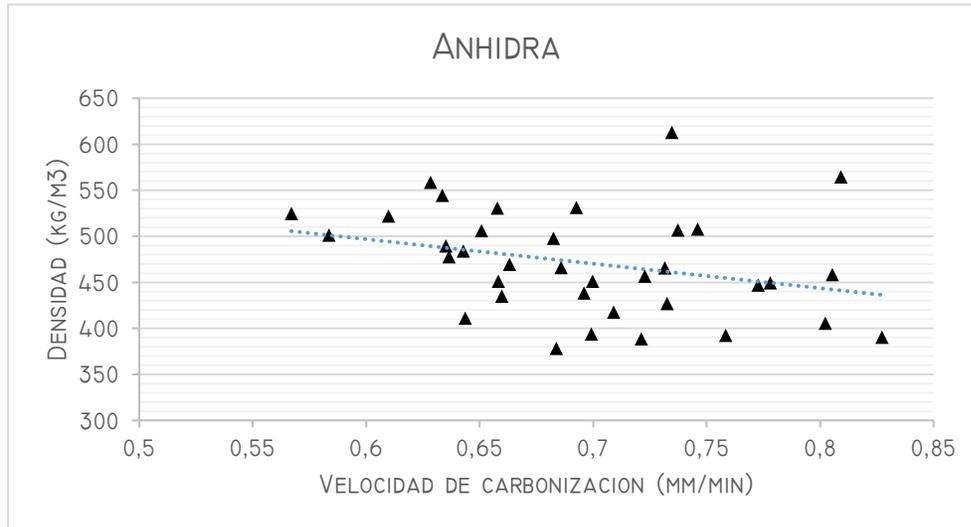


Gráfico 30. Velocidad de carbonización vs Densidad Anhidra Pino Radiata para el Método de Ancho Residual

A diferencia de lo ocurrido con el método de regresión lineal, para este método de análisis la relación entre la densidad anhidra y la velocidad de carbonización no es estadísticamente significativa, por lo que no se puede determinar una relación lineal entre las variables para un nivel de significancia de 0.05.

Tabla 32. Correlación Densidad Pino Radiata, Ancho Residual

	Anhidra
Coeff de Pearson	0,3
p-value	0,07
Grado de relación	-

- Pino Oregón

Se analiza la relación entre la densidad y la velocidad de carbonización obtenida mediante el método del Ancho Residual para determinar el grado de relación entre estas propiedades, de existir alguno. En el gráfico 31 muestran los resultados.

La relación entre densidad y velocidad de carbonización es estadísticamente significativa. Con un p-value de 0.0029 y un grado de correlación moderada.

Se puede observar un dato que se distancia de los demás con una baja densidad y alta velocidad de carbonización. Este valor corresponde a la muestra 14. Se evalúa la relación de las muestras si este valor se elimina, sin embargo, el coeficiente de Pearson disminuye a 0.348 transformándose en una relación baja, por lo que esta muestra mejora la relación estando cercana a la modelación. No existe razón para pensar que este valor representa una anomalía.

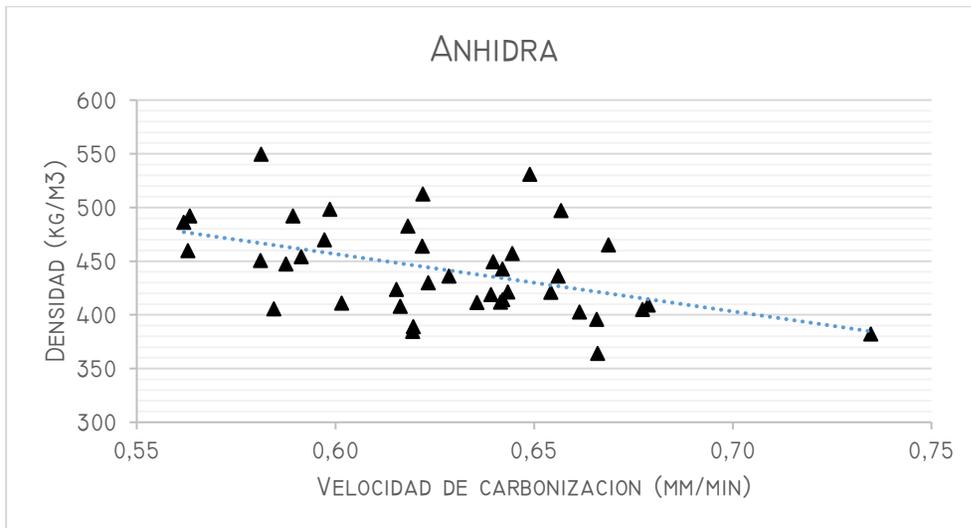


Gráfico 31. Velocidad de carbonización vs Densidad Anhidra Pino Oregon

Tabla 33. Correlación Densidad Pino Oregon

	Anhidra
Coeff de Pearson	0,46
p-value	0,0029
Grado de relación	Moderada

- Roble

Se analiza la relación entre la densidad y la velocidad de carbonización obtenida mediante el método del Ancho Residual para determinar el grado de relación entre estas propiedades. En el grafico 32 se muestran los resultados.

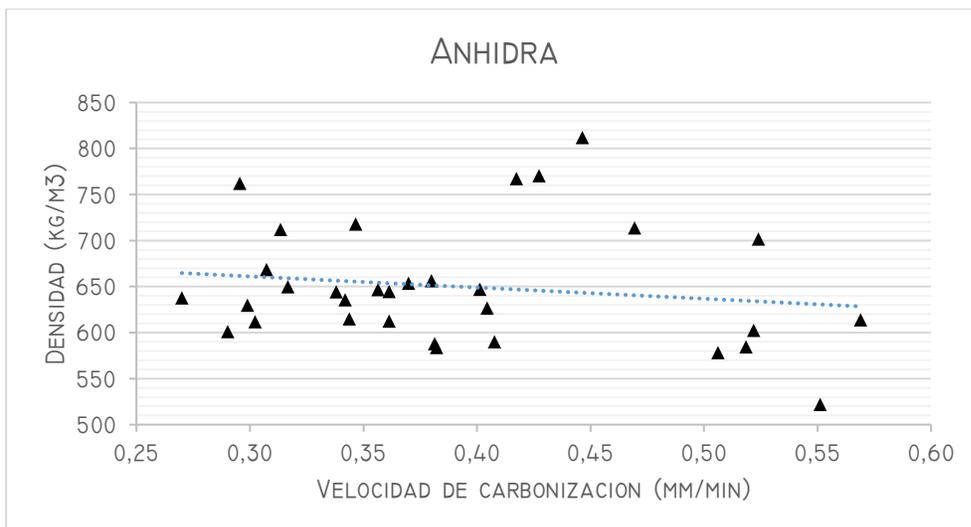


Gráfico 32. Velocidad de carbonización vs Densidad anhidra Roble

No se puede determinar un grado de relación debido a que el p-value es mayor al grado de significancia, como se muestra en la tabla 34.

Tabla 34. Correlación Densidad Roble

	Anhidra
Coeff de Pearson	0,16
p-value	0,397
Grado de relación	-

- MLE

Se analiza la relación entre la densidad y las diferentes velocidades de carbonización para determinar el grado de relación entre estas. Los métodos para la determinación de la velocidad son el método del Ancho residual y el del Rectángulo Equivalente. En los gráficos 33 y 34 se muestran los resultados.

- Ancho Residual

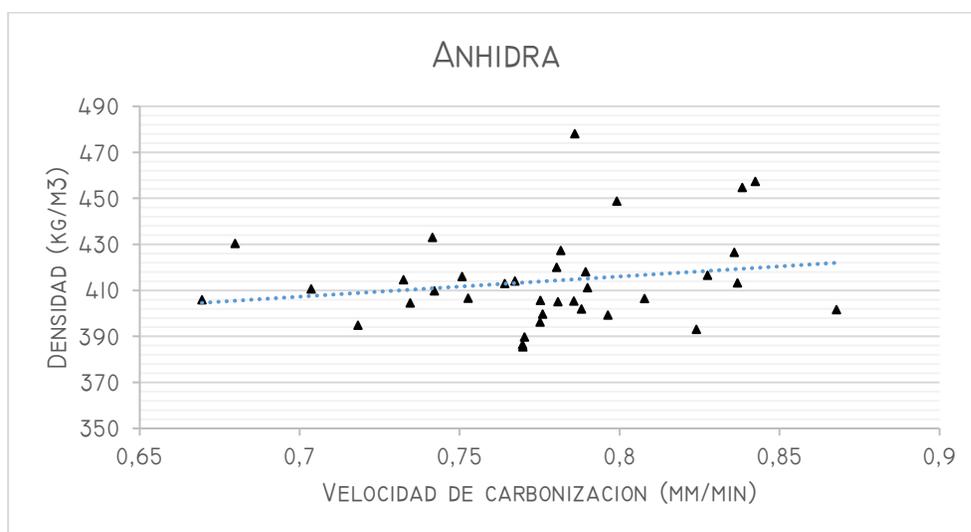


Gráfico 33. Velocidad de carbonización vs Densidad anhidra, Ancho Residual para MLE

No existe relación entre la densidad anhidra y la velocidad de carbonización para las muestras de MLE de Pino Radita mediante el método del ancho residual ya que no es estadísticamente significativa para el grado de significancia escogido.

Tabla 35. Correlación Densidad, MLE método Ancho Residual

	Anhidra
Coeff de Pearson	0,19
p-value	0,264
Grado de relación	-

○ Rectángulo Equivalente

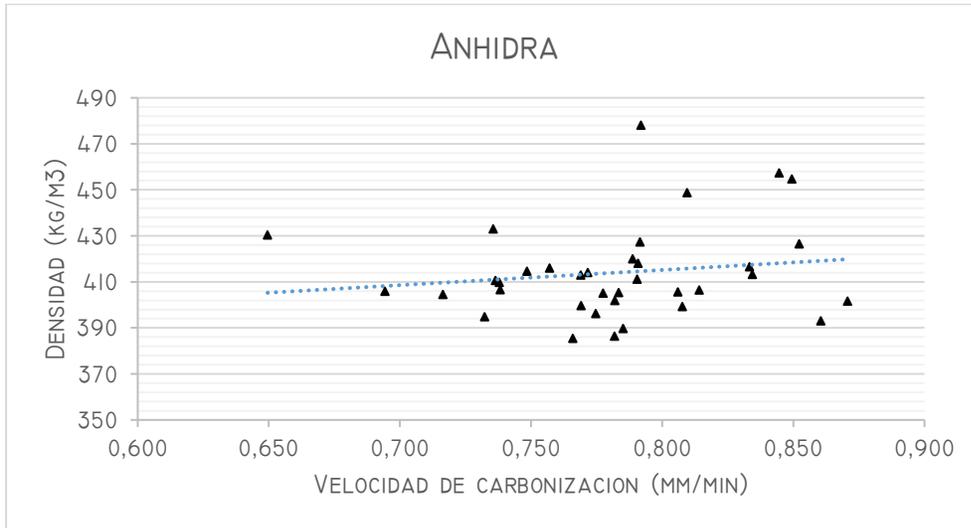


Gráfico 34. Velocidad de carbonización vs Densidad anhidra, Regresión Lineal para MLE

Al igual que para el caso del método anterior, no es posible determinar algún grado de relación lineal para los valores de velocidad de carbonización obtenidos mediante el método del rectángulo equivalente y las densidades.

Tabla 36. Correlación Densidad, MLE método Ancho Residual

	Anhidra
Coeff de Pearson	0,15
p-value	0,374
Grado de relación	-

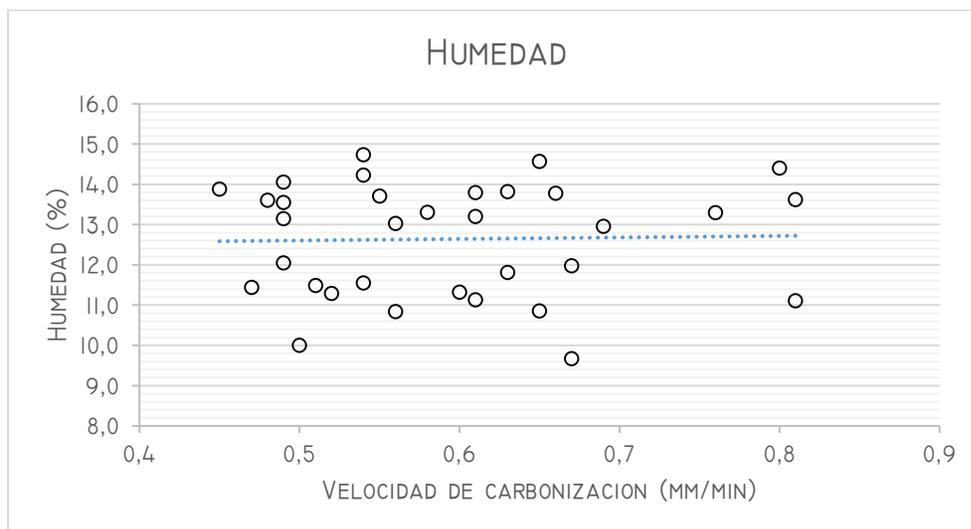
7.3. Correlación entre Humedad y Velocidad de Carbonización

Según diversos autores, la humedad, aunque de menor manera que la densidad, afecta la velocidad de carbonización tendiendo está a disminuir mientras mayor sea el contenido de agua en la muestra. Se estudian las relaciones entre la humedad y las probetas ensayadas para determinar el grado de relación que existe.

- Pino Radiata

El efecto de la humedad en la velocidad de carbonización para las muestras de madera aserrada de Pino Radiata se evalúa de manera separada para los valores obtenidos mediante el método del ancho residual y aquellos obtenidos mediante el método de la regresión lineal.

- Regresión Lineal



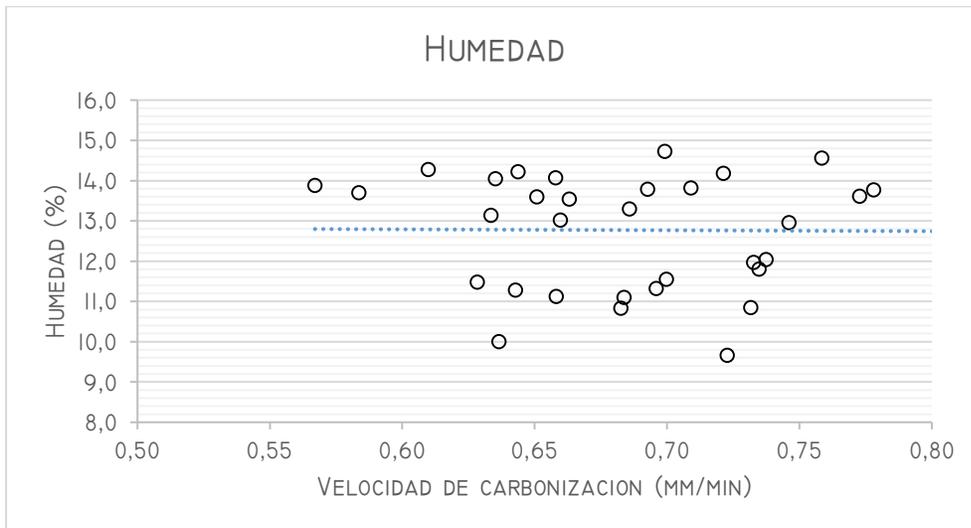


Gráfico 36. Velocidad de carbonización y Humedad, Pino Radiata método de regresión lineal

- Pino Oregón

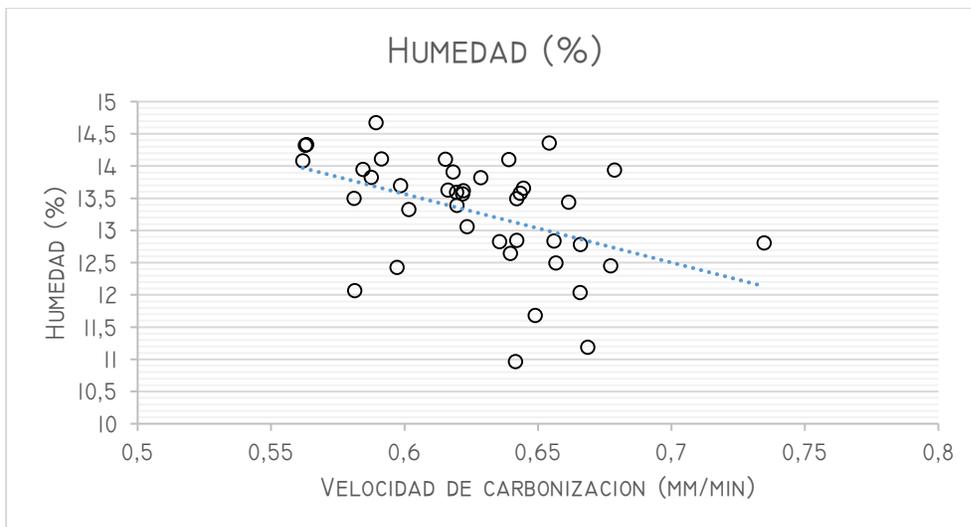


Gráfico 37. Velocidad de carbonización y Humedad, Pino Oregón

A diferencia del caso del Pino Radiata, para el Pino Oregón se encuentra una relación entre el contenido de humedad y la velocidad de carbonización, con un p-value de 0.0037 se obtiene un coeficiente de Pearson de 0.44 dando cuenta de una relación moderada y que son estadísticamente significativas.

- Roble

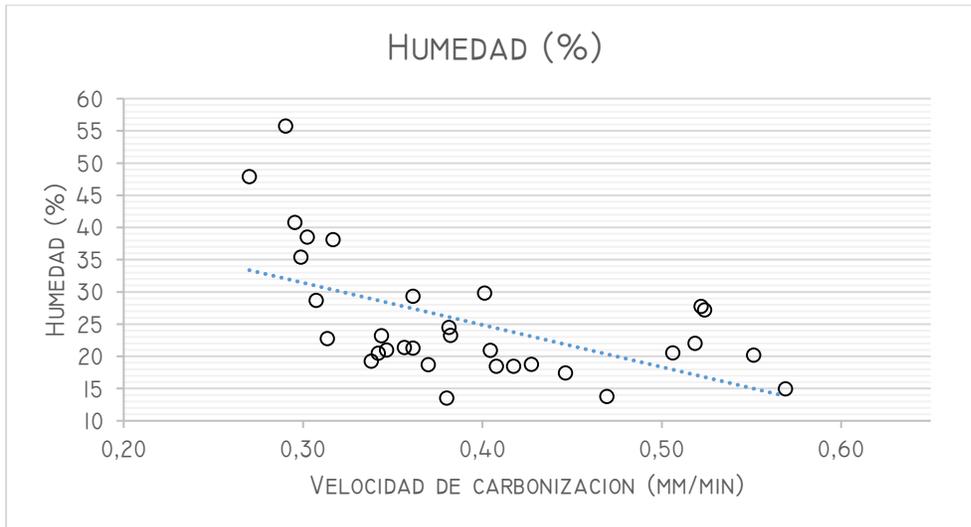


Gráfico 38. Velocidad de carbonización y Humedad, Roble.

De la misma forma que el Pino Oregón, con un p-value de 0.001, se tiene una relación estadísticamente significativa entre la humedad y la velocidad de carbonización, con un coeficiente de Pearson de 0.55, correspondiendo a una relación moderada.

Debido a la forma en se distribuyen los datos se hace posible evaluar otras relaciones que puedan modelar de mejor manera la relación descrita, en el grafico 58 se muestra una relación logarítmica entregando un coeficiente de 0.609 correspondiendo a una relación alta, mejorando el ajuste a una regresión lineal.

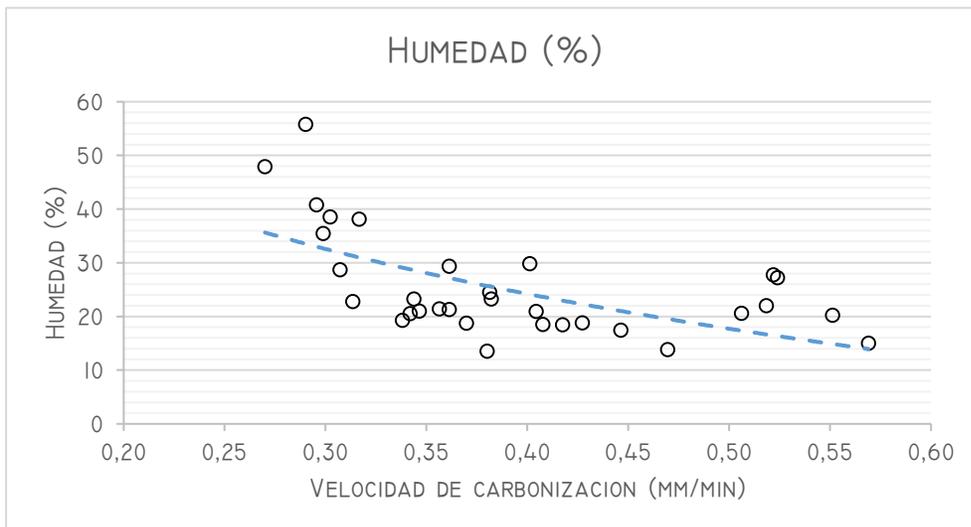


Gráfico 39. Velocidad de carbonización y Humedad relación logarítmica, Pino Radiata método de regresión lineal

- MLE

La relación entre la velocidad de carbonización y el contenido de humedad para las muestras de MLE de Pino Radiata se determinan para los dos métodos del ancho residual y del rectángulo equivalente.

Para los valores de velocidad de carbonización obtenidos mediante el método del ancho residual se tiene una relación débil ya que el p-value es de 0.042, muy cercano al grado de significación 0.05, junto a esto, el coeficiente de Pearson es de 0.35 correspondiente a una relación baja.

Para el caso de los valores obtenidos mediante el método del rectángulo equivalente, no se alcanza a determinar una relación linear, ya que el p-value es de 0.055, superando el grado de significación.

- Ancho Residual

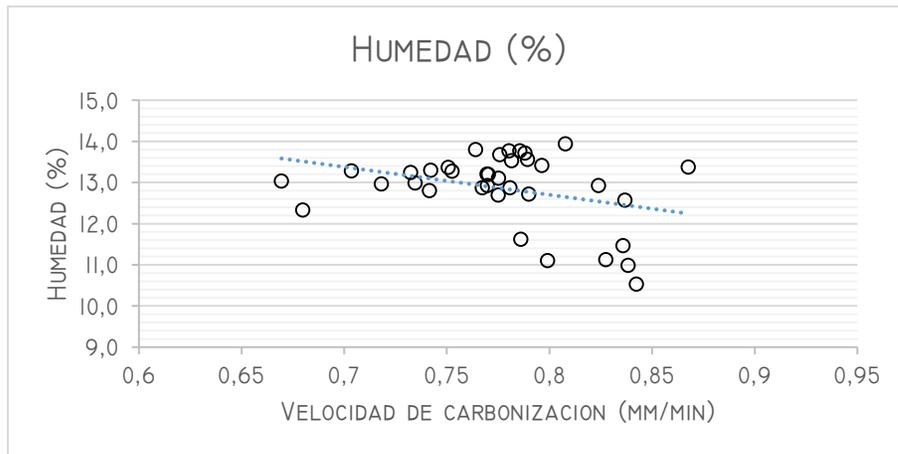


Gráfico 40. Velocidad de carbonización y Humedad, MLE de Pino Radiata método de Ancho Residual

- Rectángulo Equivalente

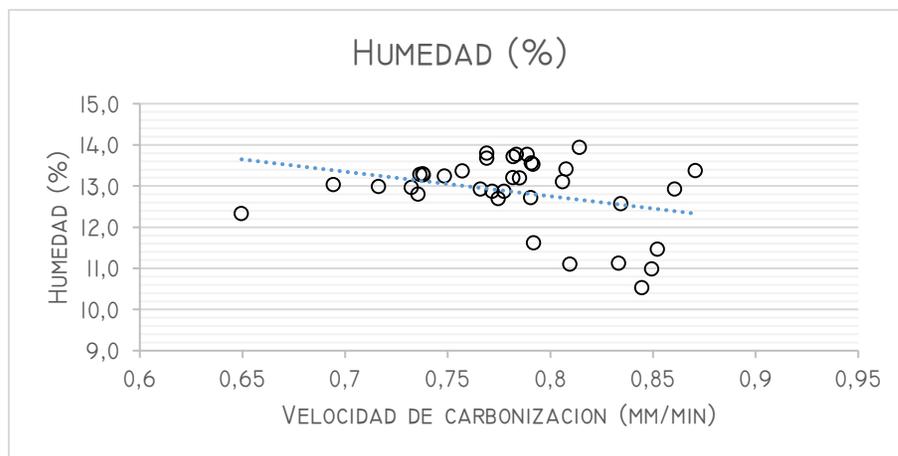


Gráfico 41. Velocidad de carbonización y Humedad, MLE de Pino Radiata método de Rectángulo Equivalente.

7.5. Diferencias en los patrones de quemado

Como curiosidad es interesante observar las diferencias entre los patrones de carbonización de las distintas especies madereras.



Figura 61. De izquierda a derecha, arriba. Pino Radiata y Pino Oregón. Abajo Roble y MLE de Pino Radiata

7.6. Evaporación del Agua

Najankouo et al. (2003) expresa que en la mayoría de los casos se observa una meseta cuando se alcanzan 100°C lo que se debe al contenido de humedad de las muestras, ya que se evapora el agua libre para luego proseguir con la pirólisis de la madera, efecto interesante que también se observa en esta investigación (grafico 44).

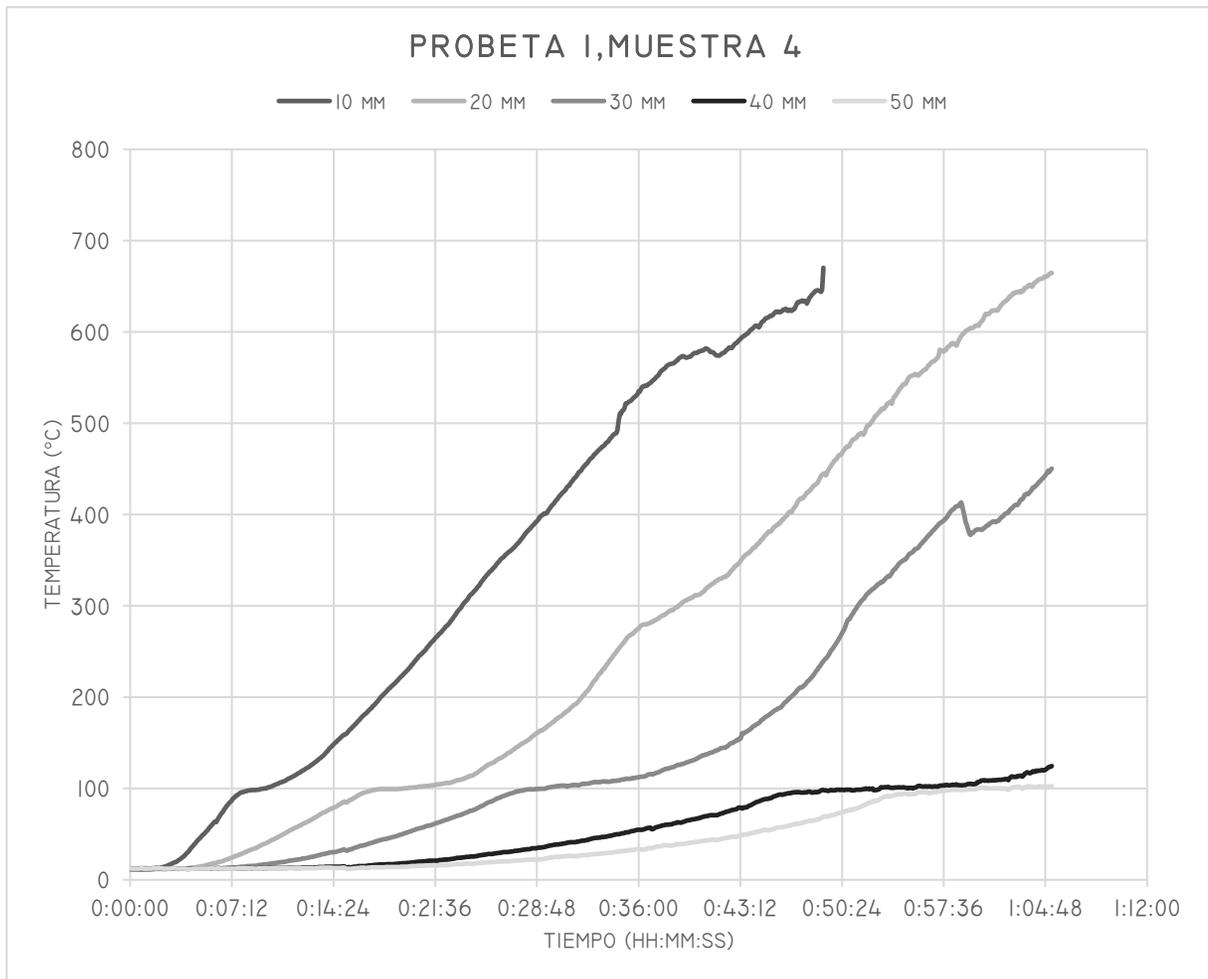


Gráfico 44. Registro de termocupas con meseta a los 100°C

8. CONCLUSIONES

8.1. Velocidad de Carbonización

8.1.1. Conclusión Principal

De acuerdo con los resultados de velocidad de carbonización obtenidos en el presente trabajo de investigación, considerando los métodos mediante los que se derivaron y los análisis realizados a la información registrada, se puede concluir que, para el caso de las especies madereras de Pino Radiata, Pino Oregón y Roble resulta confiable usar los valores correspondientes especificados en el Eurocodigo, EN 1995-1-2. La excepción la constituye la madera laminada encolada de Pino Radiata, para la que se debe considerar una velocidad de carbonización nominal de 0,8 mm/min.

La afirmación anterior se justifica en la comprobación que sus valores experimentales promedio son menores que los valores especificados para madera aserrada de especies coníferas y latifoliadas en la norma europea EN 1995-1-2: 2004 [5]. Como se trabajó con medias muestrales que representan una pequeña selección de la población total, se complementa el estudio estadístico con la determinación de intervalos de confianza correspondientes. Esto nos acerca de cierta manera a los valores esperables si se analizara toda la población, ya que todos los intervalos de confianza están bajo los valores normativos.

No se recomienda utilizar las velocidades del Eurocódigo en el caso de madera laminada encolada de pino radiata, ya que estos son algo menores a los derivados mediante los métodos de Ancho Residual y Rectángulo Equivalente. Como se puede apreciar en la siguiente Tabla la diferencia entre estos y los de la norma europea es relativamente pequeña (10,9% y 11,7 % cuando se aplican los criterios de ancho residual y rectángulo equivalente, respectivamente), pero las velocidades de la norma europea se encuentran por sobre los intervalos de confianza calculado en este estudio. Por otra parte, en los trabajos anteriores, a nivel nacional, la velocidad de carbonización medida en madera laminada encolada de Pino Radiata fue aún mayor : (Ramírez (2001) 0.89mm/min (Resorcinol) y 0.77 mm/min(Urea); Reyes (2015) 0.82 mm/min). Debe tenerse presente, en todo caso, que esos valores reflejan una condición exposición al fuego cuadrilateral en lugar de la condición unilateral que se ha impuesto en las últimas décadas para los ensayos en estudios de este tipo .

Tabla 37. Comparación velocidad de carbonización con normativa internacional

Especie Maderera	Método de Análisis	Velocidad de Carbonización [mm/min]	
		Trabajo Actual	Eurocodigo
Pino Radiata	Ancho Residual	0,7	0,8
	Regresión Lineal	0,59	0,8
Pino Oregón	Ancho Residual	0,627	0,8
Roble	Ancho Residual	0,39	0,55
MLE	Ancho residual	0,776	0,7
	Rectángulo Equivalente	0,782	0,7

La representatividad de la muestra también podría ser cuestionada ya que refleja la producción de una sola empresa. Debiera coordinarse un estudio con muestras obtenidas de las principales fábricas de madera laminada del país.

8.1.2. Interpretación de Diferencias

Al comparar las velocidades de carbonización calculada a partir de los métodos del Ancho Residual y Regresión lineal para las probetas confeccionadas con Pino Radiata, se tiene una diferencia del 15.7% traducido en 0.11 mm/min siendo mayor la velocidad para el primer método. La obtención de una velocidad de carbonización más rápida cuando se usa el método de regresión lineal se informa también en los estudios de Reyes (2015) y Collier (1992).

Podría atribuirse esta diferencia a errores de medición de la profundidad exacta de colocación de las termocuplas en las perforaciones, pero aun así no se explica una diferencia tan grande.

Si se tiene presente que la carbonización física constituye la medición que mejor refleja el avance real del proceso que se desea medir, lo más realista es asumir que en comparación con las coníferas europeas, que están al menos 60 años creciendo en el bosque, por tratarse el Radiata de una especie de crecimiento rápido de a lo más 20 a 25 años, la isoterma de inicio de la carbonización necesariamente es menor que 300°C. La tarea pendiente es poder derivar un nivel de isoterma que permita igualar las mediciones de la velocidad de carbonización aplicando ambos métodos.

Cabe tener presente que Najankouo et al. (2003) advierten que no se encuentra razón para determinar que el frente carbonizado corresponde a la isoterma 300° C y que en la norma alemana DIN 4102- 4 como resultado de las investigaciones de Scheer, C., Naif, Th., y Meyer-Oteas se asociaba el frente de carbonización a la isoterma 200°C.

8.1.3. Carbonización irregular en las probetas de Madera Laminada Encolada

Un aspecto interesante que se pudo observar es que en la mayoría de las muestras se aprecia una carbonización más intensa en el entorno de las líneas de encolado, dando a entender que en estos planos se alcanzan temperaturas mayores que en el interior de las láminas.

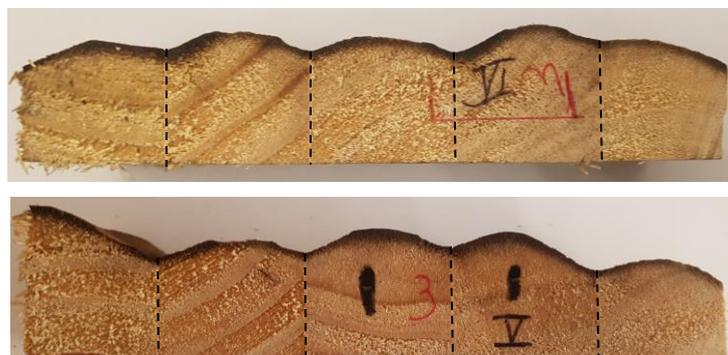


Figura 62. Mini-muestras de MLE con planos encolados carbonizados

8.1.4. Efecto del tipo de Exposición al Fuego

La comparación directa entre los resultados obtenidos con los realizados anteriormente en el IDIEM no resulta del todo realista, ya que considera diferentes condiciones de exposición al fuego de las probetas, las que a su vez pueden determinar condiciones de temperatura diferentes en el frente de carbonización. El tipo de horno utilizado en los ensayos influye igualmente en los resultados.

El efecto del horno sobre las velocidades de carbonización se puede observar en que las mediciones con probetas de madera laminada encolada de pino radiata en un horno cilíndrico de tamaño muy reducido reportadas por Ramírez (2001) resultan similares a las determinadas en este estudio. Sin embargo, la densidad de ambas muestras es distinta, con una diferencia de un 21.4 % a favor de la muestra de Ramírez.

De acuerdo a los estudios que sugieren una relación entre la velocidad de carbonización y la densidad, las muestras de Ramírez deberían carbonizarse a una tasa menor, pero esto no ocurre, por lo que el efecto del horno podría ser una variable a considerar, acelerando el proceso de combustión en las probetas al estar en contacto directo con la llama en el horno cilíndrico. Esto no se puede comprobar con los resultados actuales ya que no se determinó ninguna relación entre densidad y velocidad de carbonización para la MLE. Todos los valores de velocidad de carbonización registrados en el presente estudio resultan menores a los reportados en los trabajos nacionales anteriores.

8.2. Relación entre Densidad y Humedad con la Velocidad de Carbonización

No se encuentra una relación significativa entre la densidad y la velocidad de carbonización.

Para el Pino Radiata y aplicando una regresión lineal solo se encuentra una relación para las velocidades con la densidad anhidra, determinándose un coeficiente de Pearson de 0,47 que refleja una correlación moderada.

Para el Pino Oregón se encuentra una relación moderada entre las propiedades, mientras que en el caso del Roble no se infiere una relación lineal con la densidad, situación que se da igualmente para las probetas de MLE.

8.3. Densidades de las muestras que constituyen las probetas.

A partir de los resultados obtenidos no se puede inferir que las especies madereras más densas poseen una velocidad de carbonización menor. Así, por ejemplo, para el Pino Oregón se midió una densidad normal promedio de 466 kg/m³, valor menor que el de 498 kg/m³ determinado para el Pino radiata. Sin embargo, para el método de análisis del ancho residual en esta última especie, se midió una velocidad de carbonización de 0.69mm/min, mayor que los 0.63 mm/min medidos para el Pino Oregón. Esta aparente contradicción debe explicarse en las características morfológicas de cada especie y su mayor o menor permeabilidad al paso del aire y la humedad en las paredes celulares.

Tabla 38. Resumen resultados de correlación Densidad -Velocidad de Carbonización

Especie Maderera	Método de Análisis	Anhidra	
		Coef de Pearson	Grado de Relación
Pino Radiata	Ancho Residual	0,3	-
	Regresión Lineal	0,47	Moderada
Pino Oregón	Ancho Residual	0,46	Moderada
Roble	Ancho Residual	0,16	-
MLE	Ancho Residual	0,19	-
	Rectángulo Equivalente	0,15	-

En relación a las densidades registradas y su comparación con los correspondientes valores indicados en el Anexo E de la norma nacional para el cálculo de construcciones de madera NCH 1198 :2014 cabe consignar que para los valores anhidros promedios resultaron superiores en 4,5 %, 7,3% y 3,1 % para Pino radiata, Pino Oregón y Roble, respectivamente. Se puede afirmar, en consecuencia, que la muestra ensayada resulta representativa de la madera nacional.

En la normativa europea para el caso de las especies Coníferas la velocidad de carbonización se divide entre aquellas con una densidad característica mayor a 290 kg/m³ y las con densidades menores. Esta división, bajo las densidades especificadas en la norma NCh 1198 of 2006 [8], no tiene mucho sentido, ya que ninguna especie posee una densidad normal característica menor a los 350 kg/m³ correspondiendo al Pino Oregón.

8.4. Contenido de Humedad de la madera utilizada en la fabricación de Muestras

Para el contenido de humedad no se encuentra una relación lineal clara con la velocidad de carbonización en ninguna de las tres especies madereras ensayadas. Para las muestras de Pino Radiata la regresión lineal conduce a una línea prácticamente horizontal en ambos métodos de análisis. En el caso del Pino Oregón se determina una relación lineal moderada, y lo mismo ocurre para el Roble. Sin embargo, al cambiar a una relación logarítmica, esta aumenta pasando a ser Alta. Para las muestras de MLE de pino Radiata solo se encuentra que para el método del Ancho Residual existe un grado de correlación, la cual es baja, encontrándose en el límite de lo admisible.

Los bajos niveles de correlación pueden deberse al acotado rango de humedades registradas. Se evidencia esta situación para la muestra de roble, donde el rango de humedades es el más grande (13.5%-55.8%) y se obtiene el mayor coeficiente de correlación.

Dado que las buenas prácticas de construcción exigen un contenido de humedad que las más veces varía entre el 12 % y el 18 %, el efecto del contenido de humedad sobre la velocidad de carbonización se diluye.

8.5. Estudios de Concordancia entre los métodos de medición de la velocidad de carbonización.

8.5.1. Método de Regresión Lineal y Ancho Residual

Se realiza un estudio de concordancia entre los métodos de análisis para las muestras de Pino Radiata y de Madera lamina encolada de la misma especie. Se procede a comparar las velocidades de carbonización de la misma muestra para ambos métodos. Para los dos métodos de análisis se encuentra concordancia en los métodos de análisis con pocos valores fuera de los intervalos de confianza.

Para el análisis de concordancia entre los métodos de medición de la velocidad de carbonización de la madera aserrada de pino radiata se determina un sesgo de 0,1 mm/min, esta diferencia entre mediciones se evidencia también en el trabajo de Reyes. Para determinar el porqué de este sesgo se deben realizar una mayor cantidad de ensayos.

8.5.2. Método del Ancho Residual y Rectángulo Equivalente

La mejor concordancia se da en la MLE donde la diferencia de las medias es casi nula, de 0.77%, esto representa una mejora a lo obtenido por Reyes (2015) donde la diferencia de las velocidades determinada por ambos métodos, es de 5,88% para probetas carbonizadas por una sola cara. Esta baja en las diferencias puede deberse a que para el método del Ancho Residual se hicieron 4 mediciones en cada cara, en vez de las 3 realizadas por Reyes. A pesar de esto las diferencias son bajas en ambos estudios dando cuenta que ambos métodos son válidos. En los dos estudios la velocidad determinada mediante el método del rectángulo equivalente es mayor a la del Ancho Residual, lo que Reyes explica en que en el método del rectángulo equivalente se considera de mejor manera el efecto de la presencia de planos encolados cuando ya se modela toda la sección.

8.6. Recomendaciones para la realización de ensayos

Cuando se realizan ensayos de resistencia al fuego se entrega una curva tiempo-temperatura que se debe seguir. Sin embargo, no se especifican parámetros para la carga de fuego que se debe entregar: es distinto ensayar con una llama directa sobre la probeta, aunque se siga la curva de la misma forma, que si se siguiera con una llama pequeña donde la llama nunca toca la probeta. Esto puede influir en las diferencias obtenidas con los trabajos anteriores donde se utilizan hornos que permiten un contacto directo de la llama con las probetas.

La forma de las probetas no constituyó un problema al ser ensayadas, pero se debe prestar especial atención cuando se cubren los espacios entre el rebaje de la ventana del horno y la probeta, ya que un ajuste débil puede comprometer la hermeticidad que se debe conservar al realizar los ensayos.

La cantidad de termocuplas utilizadas para medir el avance del frente carbonizado podría ser menor a 5, debido a que, para ensayos de una hora, en tan solo una muestra, se alcanzaron los 300°C en las 5 termocuplas, no teniendo un efecto significativo en el cálculo final, por lo que utilizar 4 sensores seguiría siendo representativo.

Al construir las probetas de madera aserrada constituidas de una agregación encolada de mini-muestras se debe lograr que la unión de las muestras sea lo más pareja posible ya que los planos encolados presentaron una profundidad de carbonización mayor al de las mini-muestras individuales.

Se deben llevar a cabo una mayor cantidad de ensayos, especialmente para la madera laminada encolada, ya que el aumento en el desarrollo de estos elementos, exige valores certeros. La preocupación radica en que, en todos los ensayos realizados, se observa que el valor utilizado actualmente subestima la velocidad de las probetas confeccionadas a nivel nacional. Se deben estudiar probetas de distintos proveedores, ya que en el presente trabajo se obtuvieron de una única empresa.

Se propone finalmente utilizar los valores de velocidad de carbonización especificados en la norma europea EN 1991-1-2 para el cálculo de resistencia al fuego de elementos estructurales de madera tanto para Coníferas como Latifoliadas, mientras se realizan más ensayos para abarcar una mayor cantidad de especies madereras. La realización de más ensayos de probetas de MLE es imperativo y debiese ser prioritario, teniendo en cuenta una mayor cantidad de ejemplares y empresas.

9. 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].-ASTM. Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. ASTM E119 - 16^a
- [3].-ISO. Fire resistance test- Elements of building construction. ISO 834: 2012.
- [4].-DIN (Deutsches Institut für Normung) (GERMANY). Fire behaviour of building materials and elements. Part 8: Small-scale test furnace. DIN 4102-8: 2003. 4p.
- [5].-EUROPEAN STANDARD. Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural Fire design. EN 1995-1-2: 2004. 69p.
- [6].-RAMÍREZ C., Alejandro. (2001). Comportamiento de la madera frente al fuego y su protección. Tesis (Ingeniero Civil). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- [7].-REYES V., Esteban. (2015). Proposición de procedimiento experimental normativo para estimar la velocidad de carbonización de la madera laminada encolada de pino Radiata. Tesis (Ingeniero Civil). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- [8].-INN (CHILE). (2006). Madera – Construcción en madera – Cálculo. NCh 1198 Of2006. Santiago, Chile, 213p.
- [9].-Historie der Abbrandmessung von Holz und Holzwertestoffen bei HFM-TUM. T339. Fraunhofer IRB Verlag. 2016 .
- [10].-Frangi, A., & Fontana, M. (2003). Charring rates and temperature profiles of wood sections. *Fire and Materials*, 27(2), 91-102.
- [11].-Friquin, K. L. (2009). Evaluation of natural and parametric temperature-time curves for the fire design of cross-laminated wood slabs. In *Proceedings of International Conference Application of Structural Fire Engineering* (pp. 563-568).
- [12].-Friquin, K. L. (2011). Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber. *Fire and materials*, 35(5), 303-327.

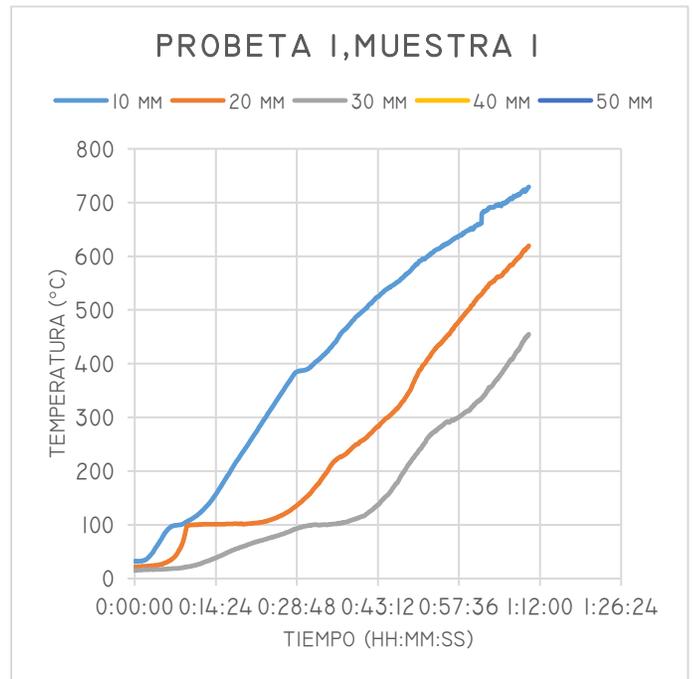
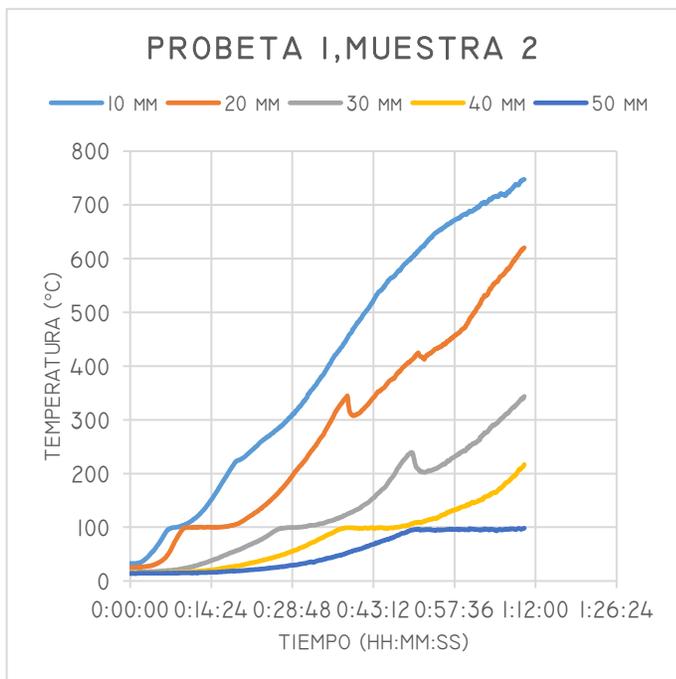
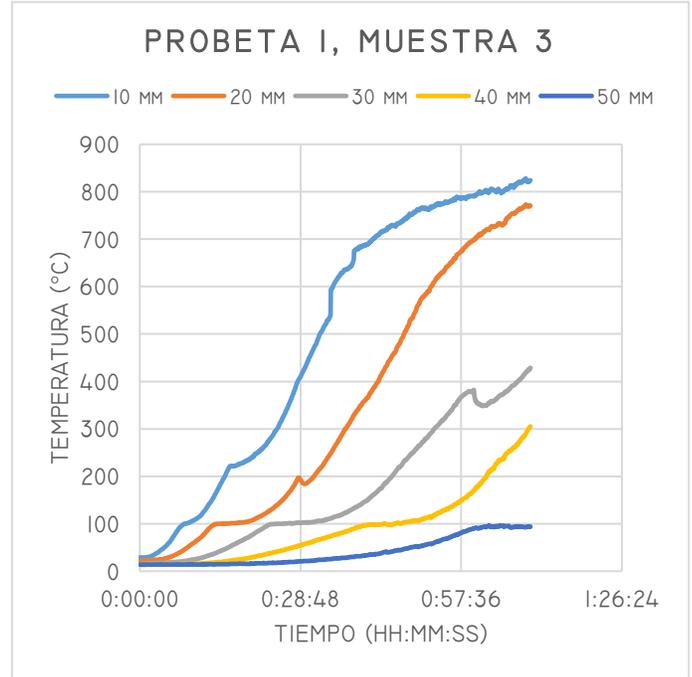
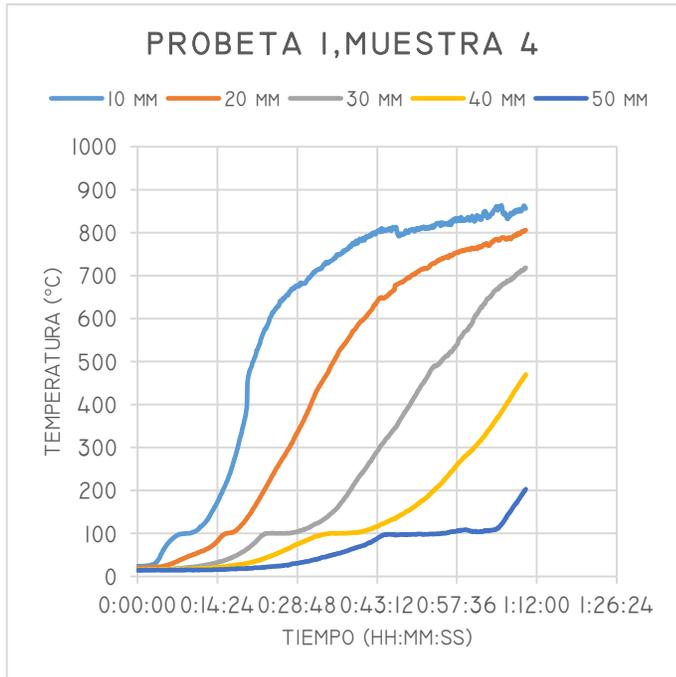
- [13].-EN 1991-1-2. Actions on structures. Part 1-2: General actions – Action on structures exposed to fire. 2003, European Committee for Standardization. Brussels, Belgium.
- [14].-Collier, P. C. R. (1992). Charring rates of timber. Building Research Association of New Zealand.
- [15].-White, R. H., & Nordheim, E. V. (1992). Charring rate of wood for ASTM E 119 exposure. *Fire Technology*, 28(1), 5-30.
- [16].-Schaffer, E. L. (1967). CHARRING RATE OF SELECTED WOODS--TRANSVERSE TO GRAIN (No. FSRP-FPL-69). FOREST PRODUCTS LAB MADISON WIS.
- [17].-König, J. (1999). One-dimensional charring of timber exposed to standard and parametric fires in initially unprotected and postprotection situations.
- [18].-Informe Anual de Edificación, Instituto Nacional de Estadística (2016). Santiago de Chile. 134 p.
- [19].-White, R. H. (2003). Fire resistance of engineered wood rim board products. Res. Pap. FPL-610. Madison, WI: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2003. 22 pages., 610.
- [20].-White, R. H. (2006). Fire resistance of structural composite lumber products. Research Paper FPL-RP-633. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 28 p., 633.
- [21].-Njankouo, J. M., Dotreppe, J. C., & Franssen, J. M. (2004). Experimental study of the charring rate of tropical hardwoods. *Fire and materials*, 28(1), 15-24.
- [22].- Norma Chilena Oficial. 2009. NCh 176/1. Determinación del contenido de humedad. Santiago de Chile. 10 p.
- [23].- Norma Chilena Oficial. 1999. NCh 176/2. Determinación de densidad. Santiago de Chile. 11 p.
- [24].-Norma Chilena Oficial. 2003. NCh 2824. Maderas - Pino Radiata - Unidades, dimensiones y tolerancias. 9 p.
- [25].-Norma Chilena Oficial. 1985. NCh 174. Maderas - Unidades empleadas, dimensiones nominales, tolerancias y especificaciones. 11 p.
- [26].-EN 13501-2+A1:2009 Fire classification of construction products and buildings elements – Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services.

- [27].-Reszka, P. (2008). In-depth temperature profiles in pyrolyzing wood.
- [28].-Yang, T. H., Wang, S. Y., Tsai, M. J., & Lin, C. Y. (2009). The charring depth and charring rate of glued laminated timber after a standard fire exposure test. *Building and Environment*, 44(2), 231-236.
- [29].-EN 13381-7 .-2001. "Método de ensayo para la determinación de la contribución a la resistencia al fuego de elementos estructurales: Protección aplicada a elementos de madera".
- [30].-Bland, J. M., & Altman, D. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The lancet*, 327(8476), 307-310.
- [31].-Cachim, P. B., & Franssen, J. M. (2010). Assessment of Eurocode 5 charring rate calculation methods. *Fire technology*, 46(1), 169.
- [32].-Frangi, A., & Fontana, M. (2003). Charring rates and temperature profiles of wood sections. *Fire and Materials*, 27(2), 91-102.
- [33].-Daud, A. F. M., Ahmad, Z., & Hassan, R. (2015). Charring Rate of Glued Laminated Timber (Glulam) Made from Selected Malaysian Tropical Timber. In *InCIEC 2014* (pp. 1107-1116). Springer, Singapore.
- [34].-Yang, T. H., Wang, S. Y., Tsai, M. J., & Lin, C. Y. (2009). Temperature distribution within glued laminated timber during a standard fire exposure test. *Materials & Design*, 30(3), 518-525.
- [35].-Gardner, W. D. (1991). Charring of Glued-laminate Beams of Eight Australian-grown Timber Species and the Effect of 13mm Gypsum Plasterboard Protection on Their Charring. NSW Timber Advisory Council.
- [36].- Fonseca, E. M. M., & Barreira, L. M. S. (2009). Charring rate determination of wood pine profiles submitted to high temperatures. *WIT Transactions on The Built Environment*, 108, 449-457.

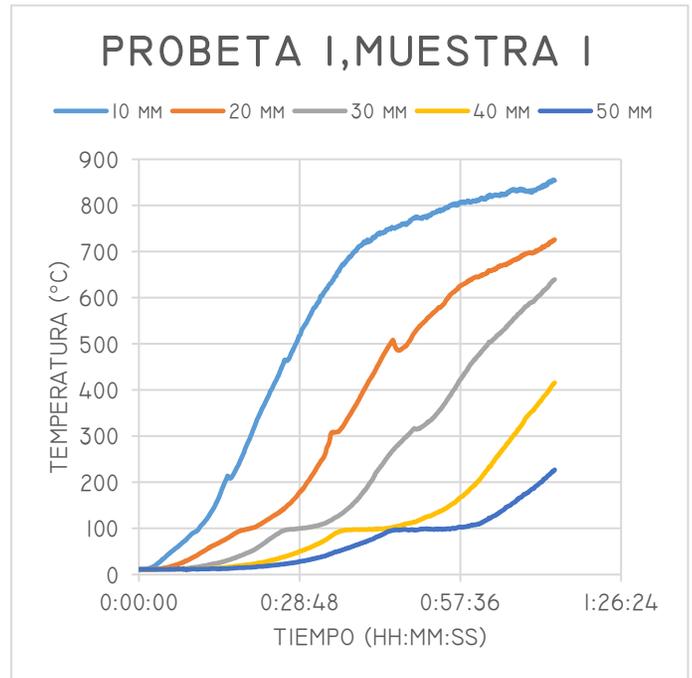
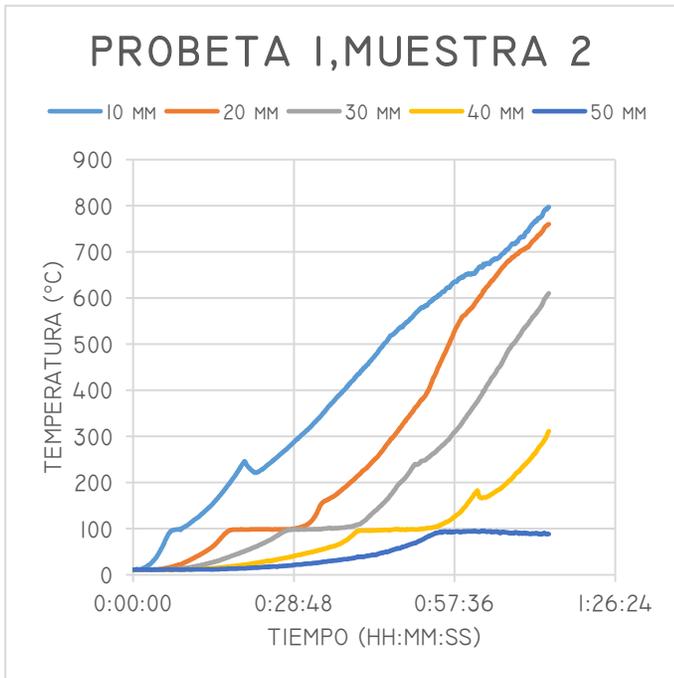
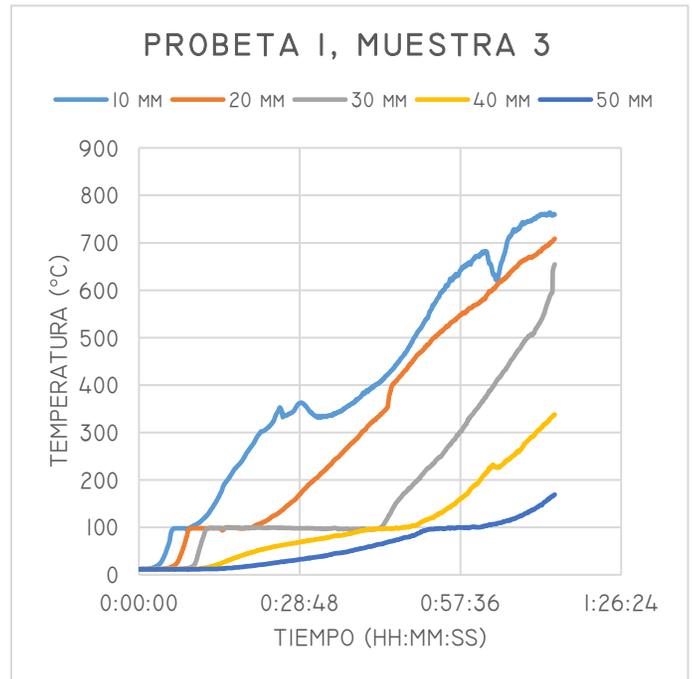
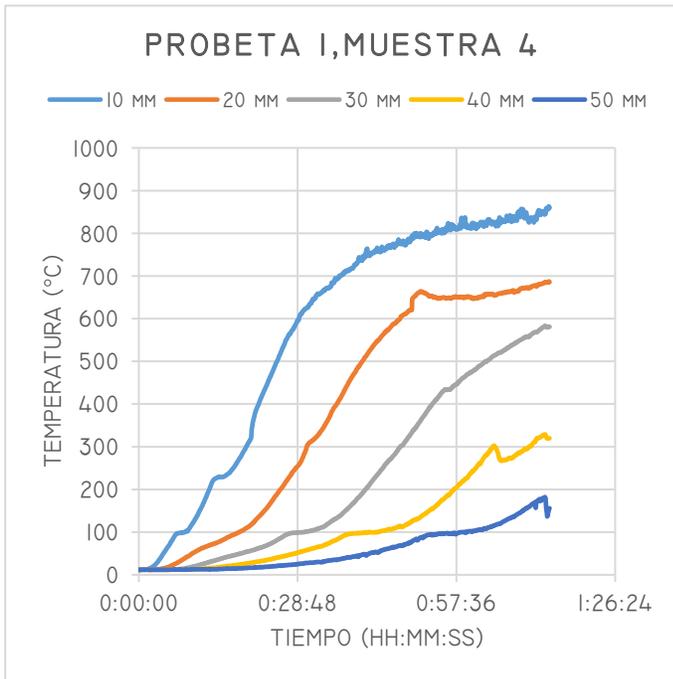
ANEXO A

Gráficos velocidad de carbonización de distintas especies madereras

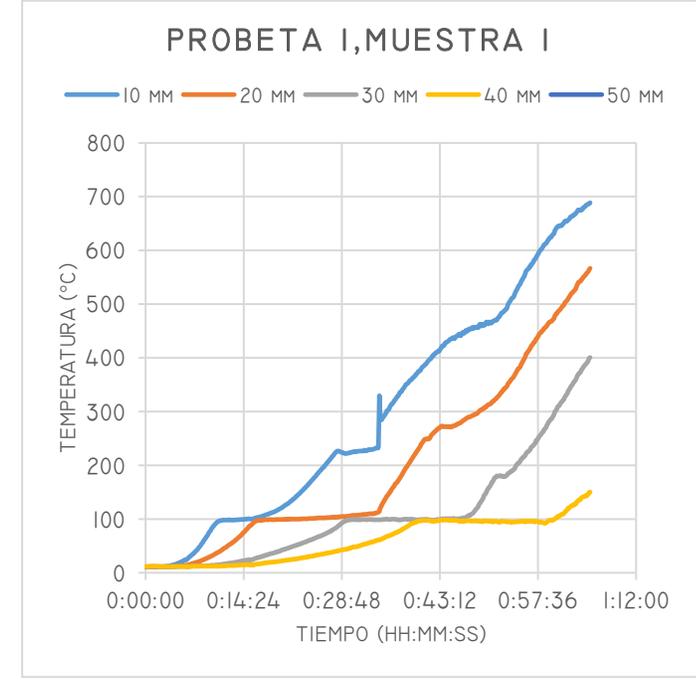
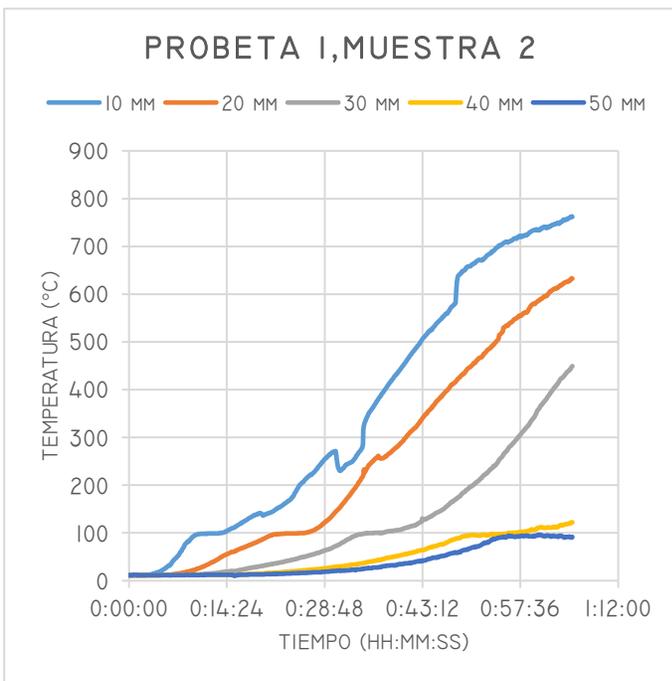
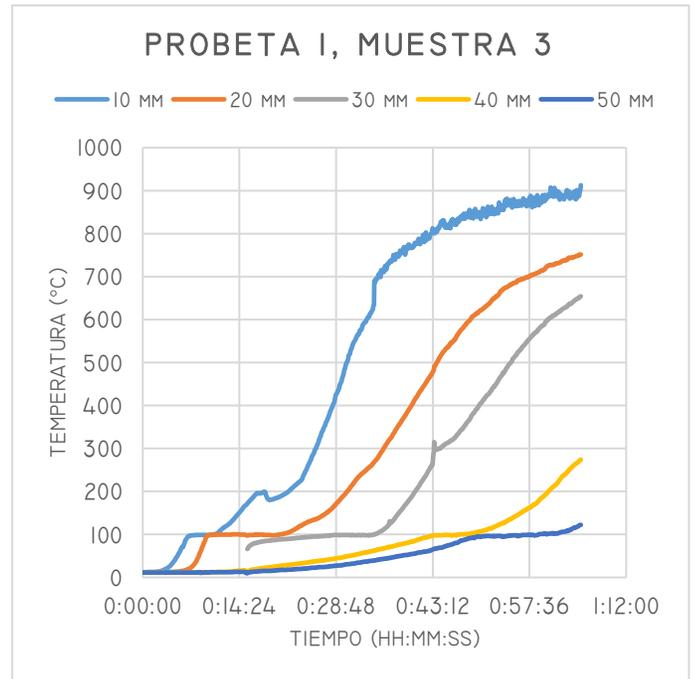
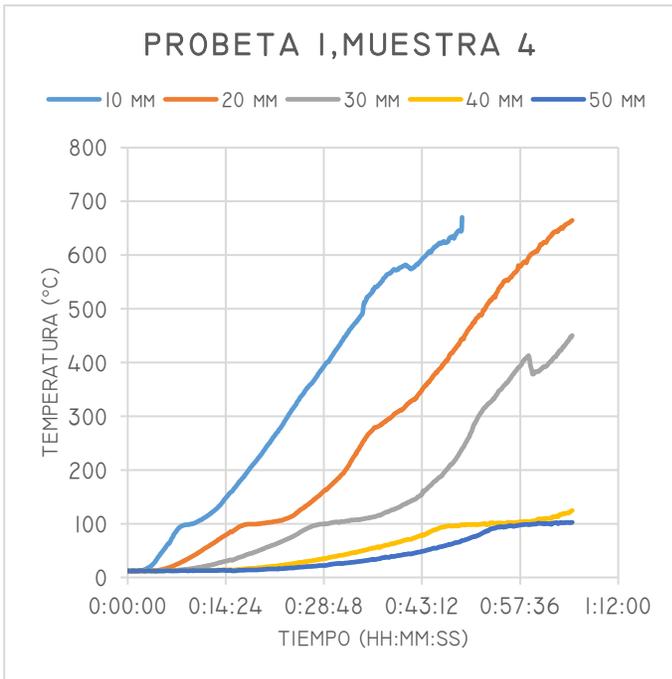
- Pino Radiata
 - Ensayo 1



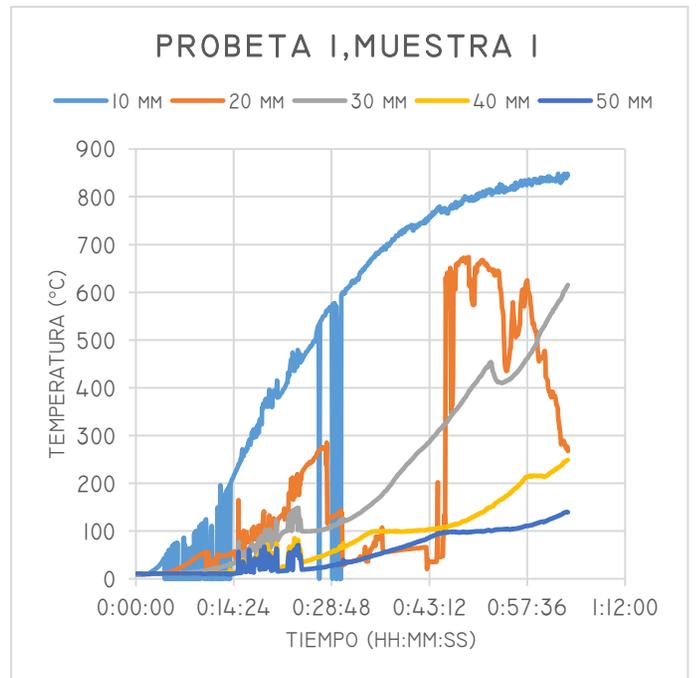
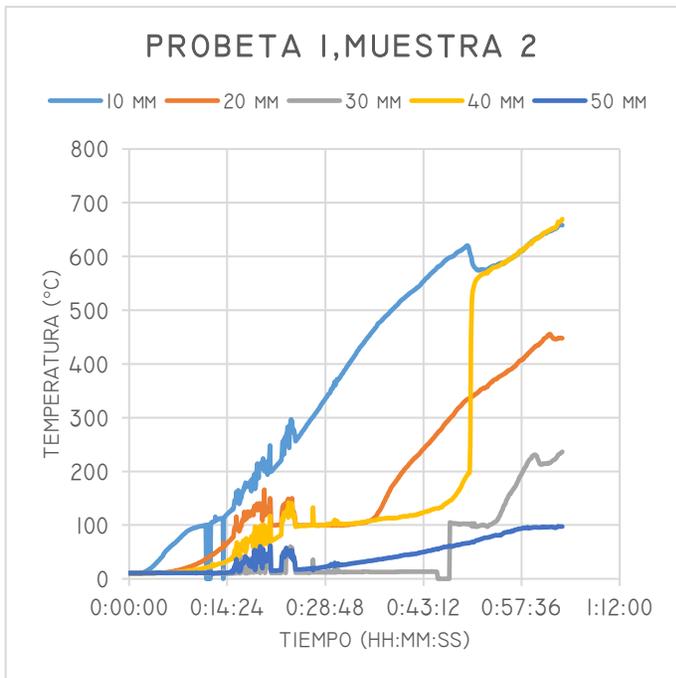
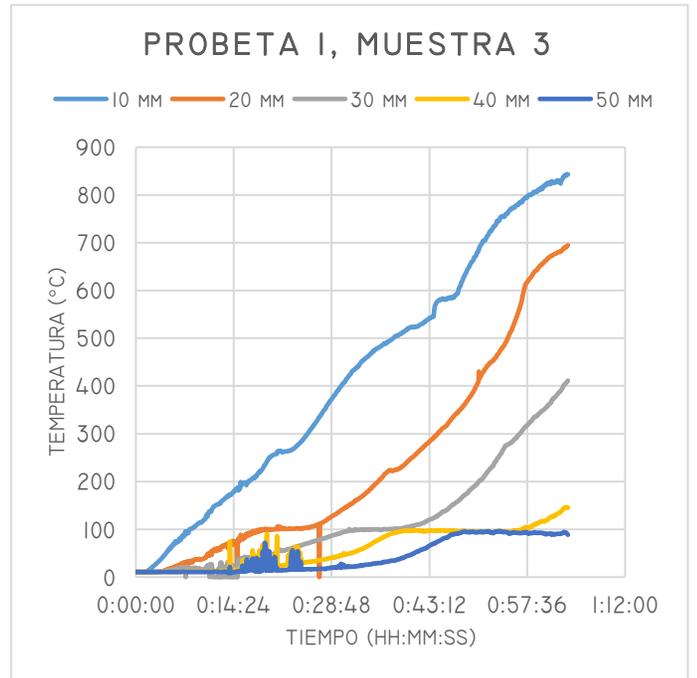
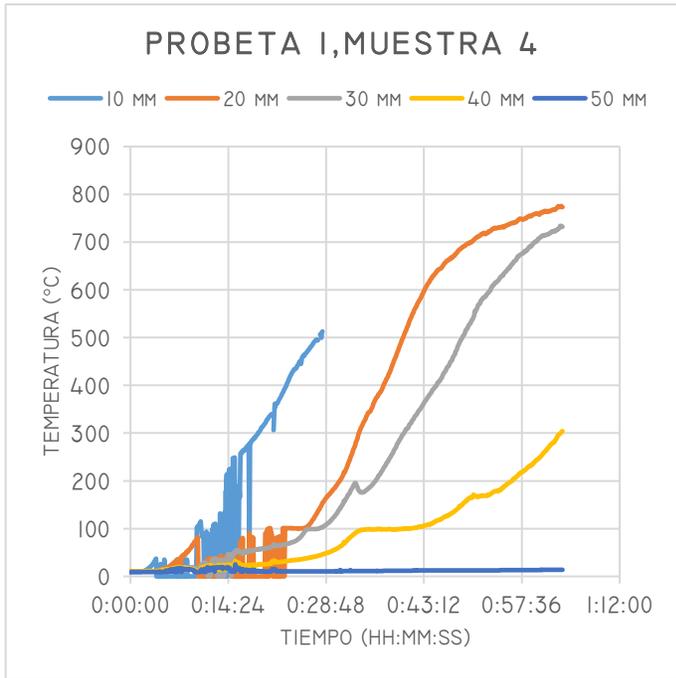
○ Ensayo 2



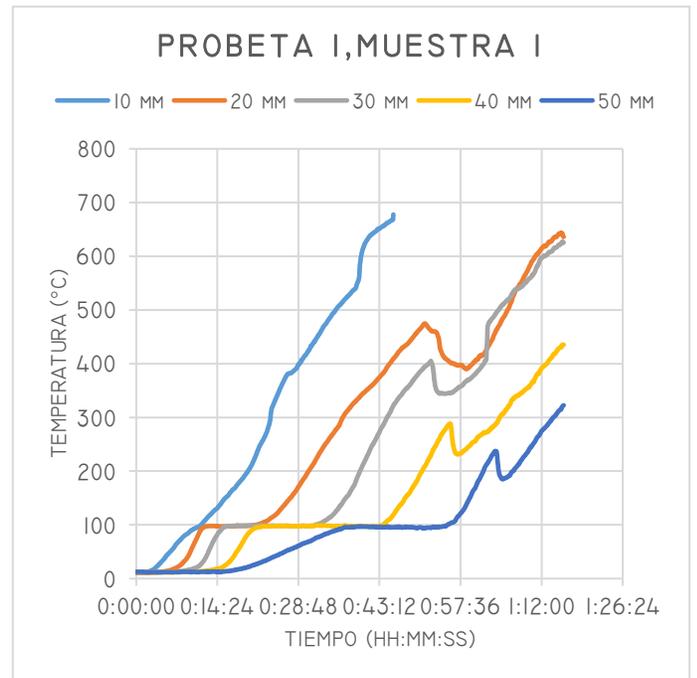
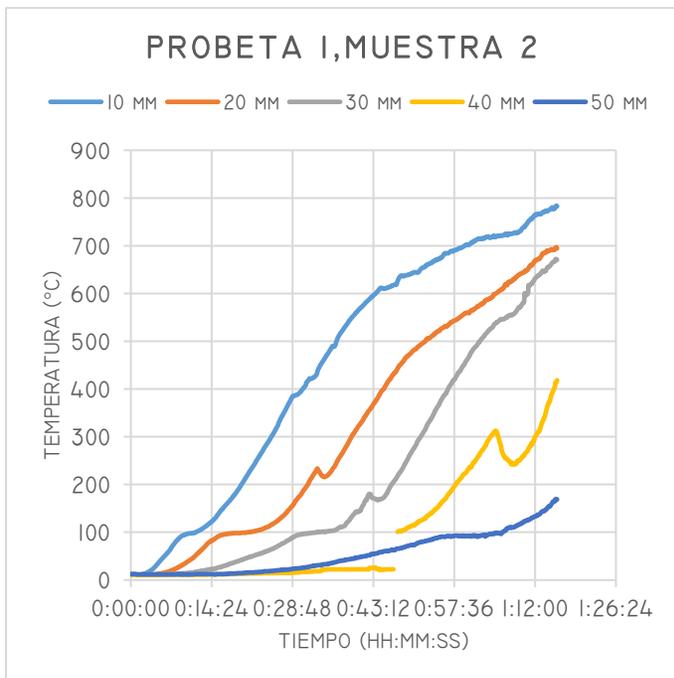
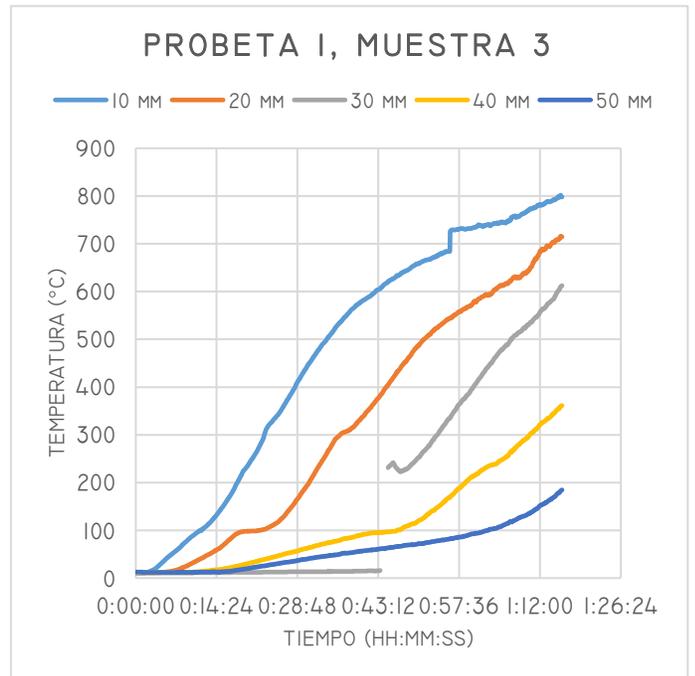
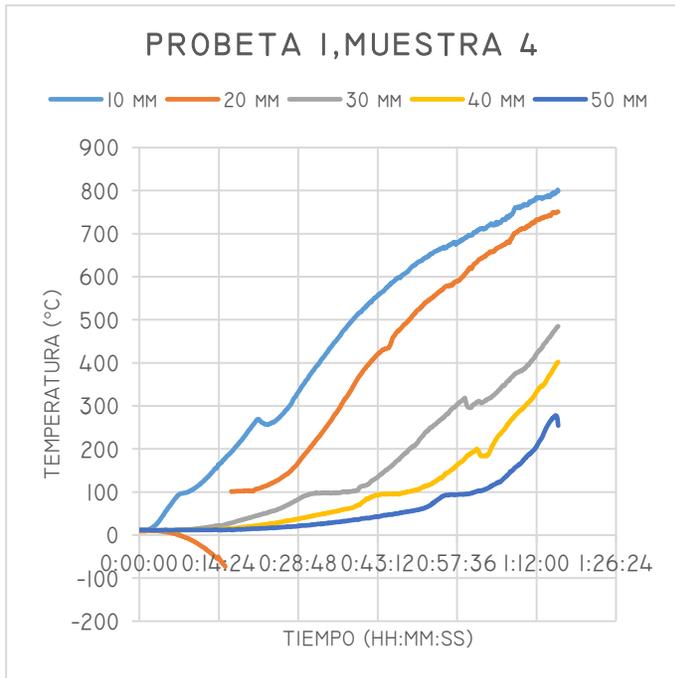
○ Ensayo 3



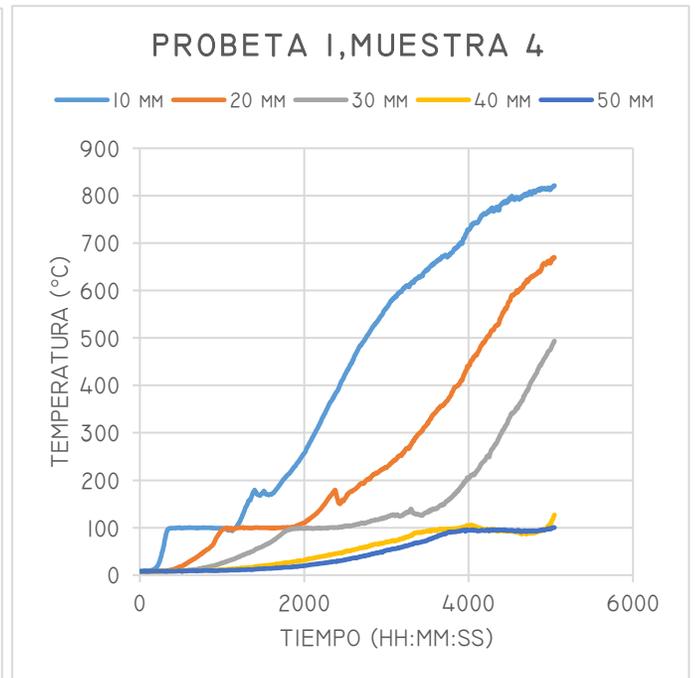
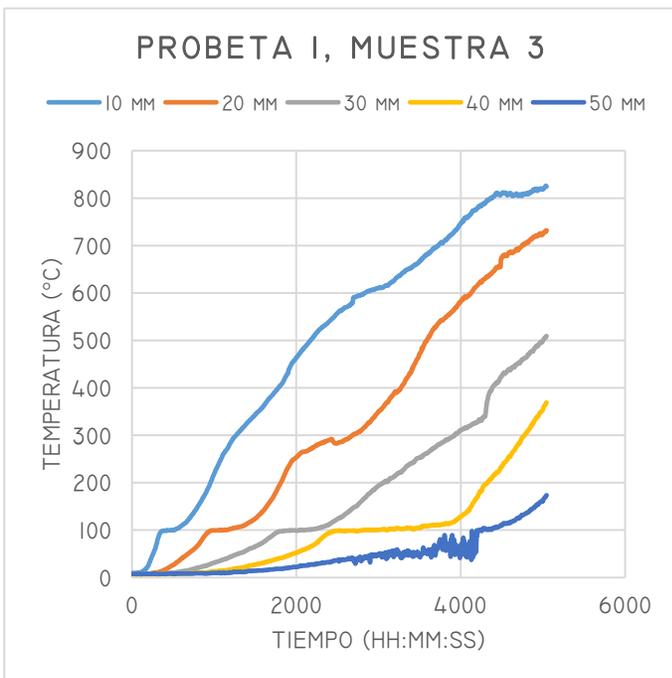
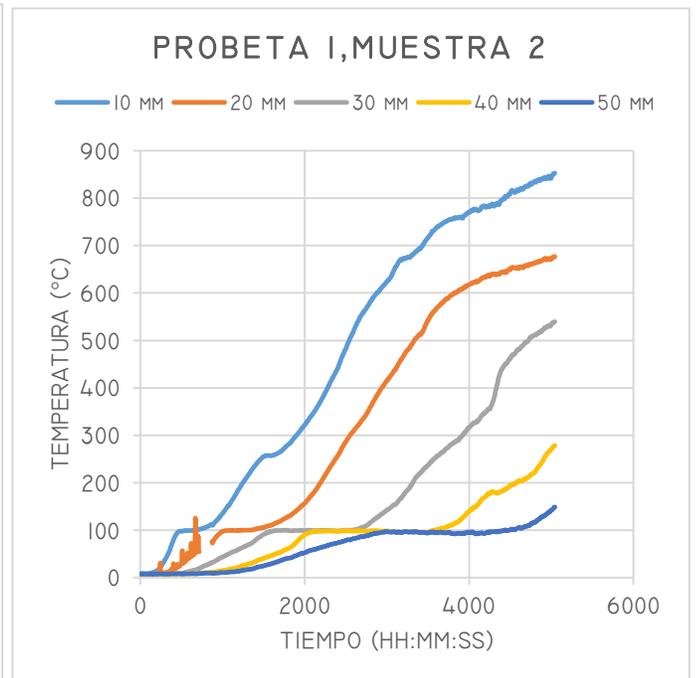
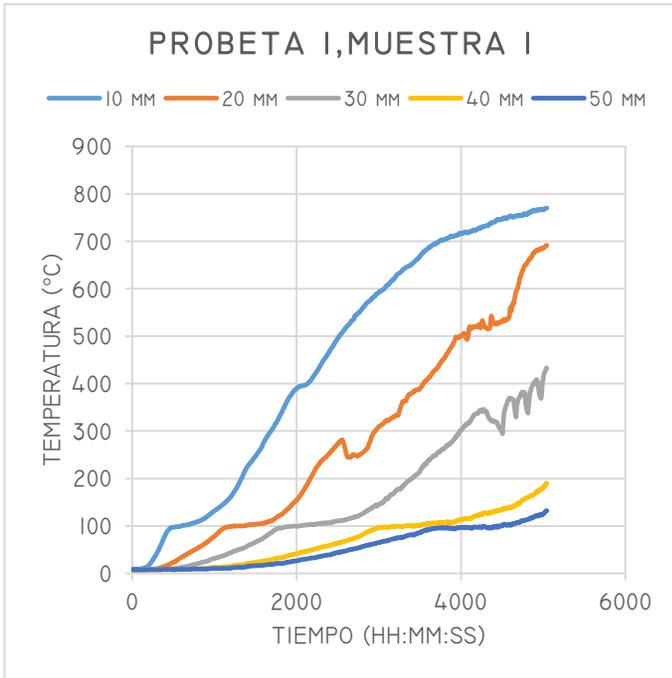
○ Ensayo 4



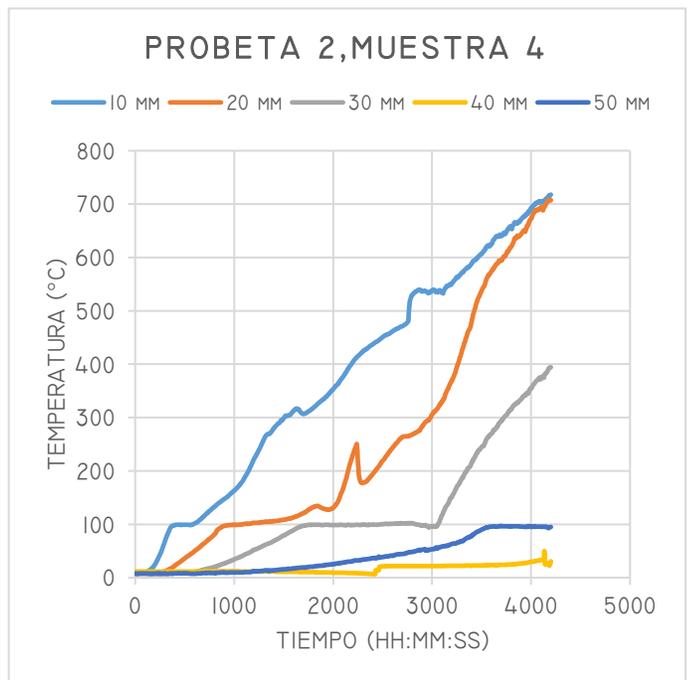
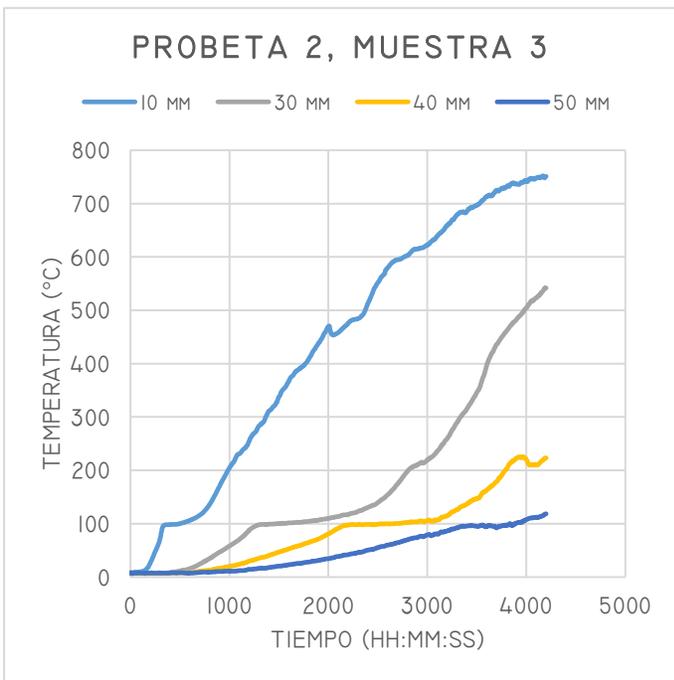
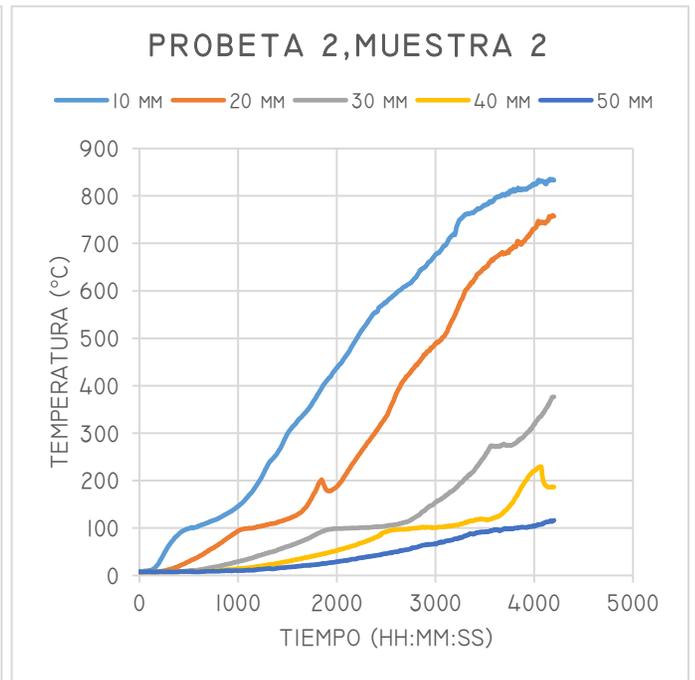
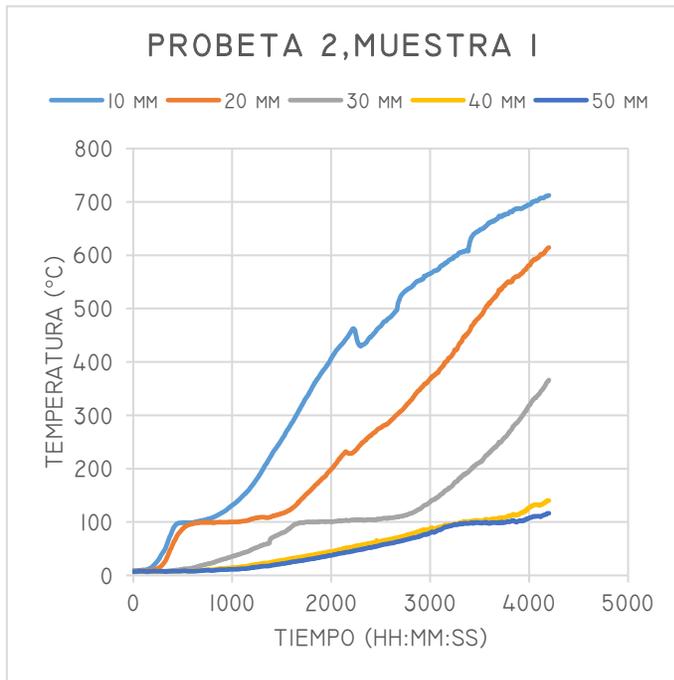
○ Ensayo 5



- Pino Oregón
 - Ensayo 1



○ Ensayo 2



ANEXO B

Tablas para obtención de densidad y humedad de las distintas especies madereras.

- Pino Radiata
 - Dimensiones muestras húmedas.

Muestra	Alto 1	Alto 2	Alto 3	Alto 4	Ancho1	Ancho 2	Ancho 3	Ancho 4	Largo 1	Largo 2	Largo 3	Largo 4
1	87	85,4	88	87	112,7	113,2	114,3	114,3	196	195	195	194
3	85,6	84,9	85,3	85,5	111,9	111,9	112	111	196	196	196	197
4	86	86,6			113,4	112,5			148,6	147,8		
6	85,4	85,8			110	111,3			149,7	147,2		
7	86	86,4	87,9	87,8	112	113,4	113,7	113,5	147	149	148	148
8	87,1	86,6	86,8	88	113	112,5	114,1	113,6	195	195	195	195
9	83,9	85,6	84,7	85,3	112,2	110,5	112,2	110,8	193	194	193	193
10	85,8	87,5			112,4	111,6			146,7	148,5		
12	84,5	85,2	85,3	84,7	113	111,6	112,1	112	197	197	197	198
13	85,2	84,9	85	84,7	110,3	111,8	111,6	111,9	146,2	148,1	149,2	148,9
14	86,2	86,9			111,8	113,1			146,1	148,8		
15	85,5	86	84,3	84,4	110,1	111,3	109,7	111,5	146,7	148,2	148,7	148,6
16	87,4	87,5	87,2	88,1	113,1	113,9	113,3	113,9	147,7	147,6	146,9	146,7
17	85,9	86,9	86,5	86,6	112,5	113,1	112,7	113,3	150,3	148,9	150	147,3
18	85,6	84,9	84,5	85,7	111,8	111,8	111	111,3	150	148	149	147
19	85,7	87			112,3	112,2			148,8	148,1		
20	85	85	84,1	83,3	111	111,9	112	113	199	200	200	201
23	85,8	85,3	87,7	87,9	109,8	112,4	111,9	113,4	149	148	147	147
24	86,8	85,9	86,1	86,7	112,5	111,8	112,4	113,1	143	146	145	145
25	85,2	85,8	85,3	84,9	111,7	111	111,4	112	148	149	149	149
26	85,2	85,4	85,3	86	112,3	111,6	111,3	111,8	149,2	148,3	148,2	146,8
27	85,1	84,6	86,3	84,9	113	112,7	110,9	112,4	147,6	147,5	148,9	147,8
29	85,8	85,7	85,1	85,4	110	112,1	111,5	111,6	147	146	148	148
32	85,8	86			111,7	111,9			149,5	148,3		
33	84,9	84,5	84,9	85,2	111,1	111,6	110,6	112,6	146,2	145,8	147,5	147
34	85	85,1	85,5	85,4	112,7	110	112,7	110,7	147,6	148,4	149,2	147,4
36	85	84,2	85,3	85	112,6	111,2	112,6	111,8	150	150	149	150
38	85,8	85,2	85,2	84,5	112	110,6	112	110,7	196	195	195	193
39	85,5	85			111,5	111,7			147,6	148,6		
41	86	86,3	86,1	86,4	113,1	113,9	112,7	113,6	148,7	147,4	147,7	147,6
42	85	86,8	85	86,7	112,4	113,7	112,2	113,4	149,9	147,9	147,3	147
43	85,7	87,4	85,7	86,8	113	111,9	115	114,2	195	194	195	194
44	85,3	85,2	85,7	84,9	110,9	111,5	110	110,2	147	145,7	148,3	148,2
48	86,6	84,9	85,5	86,6	112,2	113,4	112,4	113,7	145	146	144	146
49	86,6	88,6			113,5	113,1			148,7	149,4		
50	86,9	86,8	87,8	87,7	112,9	114,2	112,1	114	148,8	149,1	147,8	147,7

- Dimensiones muestras secas

Muestra	Alto 1	Alto 2	Alto 3	Alto 4	Ancho1	Ancho 2	Ancho 3	Ancho 4	Largo 1	Largo 2	Largo 3	Largo 4
1	84,5	85,7			111,05	112,2			195,6	194,3		
3	83,8	84,85			109,55	109,8			196,15	196,65		
4	83,1	83,4	82,4	82,7	108,6	112,7	109,6	113,3	148,2	149	148,2	148,9
6	82,3	84	81,2	83,9	110,2	108,8	108,2	109,6	148,3	144,4	149,8	148,9
7	84,9	84,1	85,8	85,6	111,7	112,5	111,8	110,9	148,3	147,2	147	147,6
8	85	84,8			109,15	111,6			194,6	195,5		
9	82,55	84,35			109,1	109,2			193,15	193		
10	82,6	82,2	84,8	83,4	110,7	108,7	110,2	110,3	146,8	147,4	148	149,2
12	93,6	84,05			110,3	109,85			197,45	197,7		
13	83,8	82,1	82,8	82,1	107,1	109,4	109,5	109,4	145,2	147,9	148,5	148,8
14	82,8	83,1	84,1	83,8	110,4	112,4	109,1	110,3	105,7	106,7	147,9	148,5
15	83,7	83,2	83,1	81,4	109,1	106,9	108,7	105,9	146,2	148,2	147,7	147,3
16	84,1	84,4	84,4	84,8	109,8	112,9	110,4	112,9	147,5	147,2	146,6	146,5
17	84,4	83,8	83,3	84,1	110,3	110,6	109,9	110,3	149,8	147,1	150,3	148,8
18	82,3	82,9	81,4	84,1	108,8	108,1	110,2	108,02	147,9	150,1	149,1	147,5
19	84,1	82,9	82,9	82,6	108,9	111,1	108,8	110,6	148,9	148,3	147,6	148,8
20	83,7	83,15			109,8	109,6			199,1	200,15		
23	83,7	82,8	85,3	83,8	110	107,3	109,9	106,6	147,9	147,3	146,8	146,7
24	85,98	84,4	85,3	83,1	112,5	111,2	111,4	110,2	144,8	144,1	145	145,4
25	83,7	82,3	84,4	82,7	110,3	110,98	110,01	109,4	147,6	148,8	148,6	149
26	83,1	83,8	83,5	84,8	111,2	109,1	109,4	108,6	146,8	147,9	148,1	148,9
27	83,7	82,2	85,4	82,5	111,5	110,4	111,7	108,8	147,3	148,5	147,2	147,1
29	83,9	83,8	84,2	83	108,2	109,3	109,6	109,3	147,7	148,7	146,8	145,7
32	83,3	83,2	82,9	83,9	108,9	111,6	108,8	111,5	150	149,2	148,5	147,6
33	81,9	82,1	81,6	83,1	109,1	108,6	108	110,7	145,9	145,7	147,1	147,9
34	83,4	83,7	83,2	83,9	111,1	108,4	108,7	109,5	147,8	147,3	147	148,8
36	82,6	82,8	82,1	82,4	109,4	111,1	109,3	112,1	149,3	149,7	149,3	148,7
38	84,5	84,4			109,7	108,7			194,7	193,8		
39	85,6	82,2	85,4	82,3	109,9	107,5	110,2	107,7	148,8	148,4	147,2	146,5
41	83,6	84,1	83,5	84,1	109,8	112,6	111,8	109,8	148,7	147	147,2	147,1
42	83,7	85,4	85,3	82,9	112,1	110,4	111,8	109,5	146,7	146,3	149,6	147,1
43	85,25	84,45			112,6	110,2			194,9	194,15		
44	82,6	83,5	82,7	83,1	105,9	107,5	108,7	107,1	145,1	146,3	147,9	148,1
48	85,5	83,1	85,4	83,6	112,3	109,9	112,6	109,7	145,9	146,2	144,9	145,7
49	86,2	85,4	87,1	86,3	111	111,6	111,5	111,8	149,2	146,9	147,9	148,8
50	85,1	84,5	85,6	85,3	113,7	109,9	113,1	109	147,4	148,1	148,3	148,8

- Pino Oregón

- Dimensiones muestras húmedas.

Muestra	Alto 1	Alto 2	Alto 3	Alto 4	Ancho1	Ancho 2	Ancho 3	Ancho 4	Largo 1	Largo 2	Largo 3	Largo 4
1	90,1	89,03	89,61	89,2	113,64	114,06	112,01	111,79	100,68	98,42	99,09	97,26
5	87,35	87,37	88,25	88,81	112,98	111,92	112,19	113,04	97,85	100,7	99,98	100,7
6	89,22	89,04	89,02	89,22	112,88	113,24	112,29	111,86	97,76	98,28	98,84	98,29
7	88,66	88,13	88,46	88,64	112,56	110,78	112,1	111,18	99,61	97,06	99,67	100,57
9	88,25	88,02	88,71	88,56	112,89	112,69	113,12	113,03	105,98	105,27	107,78	105,62
10	88,9	89,26	88,15	89,67	110,46	113,14	111,87	113,45	101,42	104,89	104,05	102,04
11	88,69	89,51	88,78	88,55	113,5	112,47	112,75	112,67	93,91	93,15	93,35	95,78
12	90,41	88,78	88,76	90,16	112,16	112,72	114,54	114,21	102,64	100,12	98,38	101,43
13	88,22	88,94	89,12	88,78	113,47	113,56	111,1	111,42	93,93	93,81	93,31	94,08
14	88,07	87,98	89,66	89,6	114,17	113,65	113,65	114,21	94,64	98,55	96,36	94,89
15	88,77	89,37	88,48	89,29	113,81	112,39	111,82	113,49	91,44	91,86	92,62	93,95
16	89,47	88,2	88,95	88,26	112,86	113,56	112,83	114,02	96,63	95,9	97,6	97,32
17	88,38	87,94	89,82	89,21	112,18	113,15	112,65	111,97	97,54	100,2	99,79	99,42
18	89,16	88,61	88,86	87,7	111,72	113,16	111,67	113,64	101,23	98,29	99,94	97,45
19	88,22	89,43	87,91	88,37	113,26	113,02	113,14	113,44	97,86	99,36	97,97	96,5
20	87,55	89,49	87,83	89,04	112,42	114,22	114,18	112,52	93,45	94,03	93,64	95,04
21	89,02	88,78	88,98	88,57	113,02	113,86	114,41	112,87	95,72	96,92	94,82	94,71
22	89,21	89,05	88,92	88,94	112,42	112,28	113,41	113,54	97,15	95,98	96,47	97,81
23	88,24	88,27	89,06	88,29	113,46	112,96	112,99	112,55	102,58	100,5	98,66	102,08
24	89,22	88,66	89,41	90,17	112,71	113,87	111,52	112,98	97,38	96,58	95,32	96,65
25	90,13	90,36	89,3	90,17	113,33	111,93	113,21	112,36	96,84	97,82	95,77	97,48
26	89,01	88,46	88,48	87,41	112,24	111,58	113,83	113,53	98,77	97,01	100,33	99,04
27	88,05	88,51	88,78	88,17	113,96	114,01	113,52	113,12	97,45	100,98	98,48	98,21
28	84,57	85,25	86,47	86,81	113,77	113,17	112,15	112,75	96,68	94,09	99,51	97
29	89,67	90,77	90,22	90,48	114,88	114,49	114,75	115,73	91,31	95,86	89,75	95,6
30	90,18	89,23	89,18	90,35	112,97	113,42	113,76	113,68	99,97	101,51	99,08	103,08
31	90,33	90,77	89,87	89,95	113,32	112,61	113,55	113,21	95,02	93,76	92,32	93,04
32	89,55	89,95	89,72	89,8	113,03	113,56	113,67	113,44	98,58	98,17	95,99	99,01
33	89,66	89,86	88,44	88,65	112,24	113,47	113,81	112,56	98,36	99,12	99,62	98,35
34	89,24	89,06	89,08	89,66	114,08	113,58	113,22	112,74	94,89	96,42	92,88	94,64
35	89,93	89,57	89,93	89,8	114,29	114,17	113,54	112,87	102,11	101,64	98,23	100,84
36	89,23	88,72	88,97	88,98	113,14	112,19	112,42	112,64	99,25	100,11	96,98	96,28
37	88,85	88,08	88,25	88,47	112,92	112,91	112,57	112,21	98,39	97,14	97,6	95,51
38	90,15	90,02	91,03	90,39	112,98	112,51	113,09	112,48	100,28	98,96	98,18	97,81
39	89,3	89,37	89,81	89,71	113,41	113,58	113,09	113,17	96,11	94,47	96,18	94,3
40	89,15	90,06	89,55	89,07	112,91	112,56	113,66	114,91	102,1	97,66	100,36	97,08
41	89,02	88,21	88,89	88,55	111,7	112,09	113,26	113,45	98,04	95,37	98,62	97,77
42	90,28	89,78	89,06	89,78	111,96	113,9	113,84	113,09	100,53	99,43	101,96	98,72
43	88,57	88,7	88,36	88,45	112,4	112,96	112,52	112,65	89,61	93,06	90,9	92,56
44	89,12	90,23	89,16	90,04	115,9	115,86	113,08	113,23	97,66	100,06	100,76	98,63

○ Dimensiones muestras secas.

Alto 1	Alto 2	Alto 3	Alto 4	Ancho1	Ancho 2	Ancho 3	Ancho 4	Largo 1	Largo 2	Largo 3	Largo 4
88,86	88,52	89,14	86,44	109,84	109,08	112,87	112,12	98,39	97,6	97,13	100,65
86,91	85,87	84,97	85,17	110,08	112,38	108,41	110,04	100,54	100,07	97,64	100,34
87,67	86,19	87,77	86,27	110,78	111,18	108,87	110,41	98,56	98,06	98,69	97,65
86,98	86,71	86,28	85,26	107,29	107,79	110,37	108,9	100,24	99,59	96,39	99,33
85,29	84,54	87,06	86,65	110,92	111,14	109,14	110,91	105,31	107,12	104,97	105,38
86,19	87,47	85,12	87,29	110,35	107,24	108,13	111,22	101,36	104,37	101,65	103,89
85,36	85,63	86,06	87,81	110,48	110,33	111,22	110,13	95,8	93,58	93,64	93,4
88,78	86,56	89,2	86,46	112,44	112,89	109,58	110,08	99,09	102,39	97,89	100,78
87,25	86,68	86,56	86,29	111,69	111,76	109,02	108,75	93,22	93,24	94,62	93,88
85,42	86,23	87,83	88,51	109,96	109,83	111,92	112,61	94,62	94,2	96,28	98,25
86,74	85,95	87,95	87,74	112,41	111,94	110,09	109,21	93,35	92,84	91,68	92,46
87,12	84,38	85,78	84,09	111,08	109,32	111,31	109,79	97,11	97,43	95,51	96,32
85,77	86,94	87,59	87,72	111,53	109,41	110,02	108,65	99,44	99,39	96,68	100,31
87,56	86,04	87,37	84,89	107,86	110,7	108,74	111,74	97,93	101,06	97,2	99,65
85,95	84,99	87,99	86,49	110,89	110,49	111,47	112,09	96,7	97,75	97,65	99,29
84,65	87,79	85,18	87,82	108,95	111,63	112,65	109,93	93,87	93,05	94,69	93,29
84,89	86,8	85,48	86,76	110,65	110,03	111,79	112,18	96,56	94,93	95,48	94,56
85,77	86,92	86,38	86,97	111,15	109,06	110,87	109,45	96,86	97,89	95,98	97,18
86,05	86,06	87,05	86,59	108,52	110,09	109,29	110,54	98,66	101,69	102,26	101,86
88,34	88,57	86,8	86,56	109,01	110,77	110,87	112,09	96,64	94,79	96,41	97,35
88,72	88,24	87,74	88,26	109,07	109,05	111,34	111,68	97,39	96,92	97,51	95,69
86,39	84,54	87,4	86,94	109,69	108,75	112,28	111,47	98,92	100,21	97,01	99,82
85,95	86,49	86,41	87,57	112,1	111,46	111,67	111,41	97,23	97,76	98,71	100,45
82,05	83,19	82,96	84,21	110,28	109,67	109,93	109,46	96,7	93,68	99,35	100,49
87,92	90,13	87,98	89,44	112,63	111,93	115,15	112,78	95,21	91,22	95,36	89,24
88,69	88,74	87,8	87,66	111,6	111,59	110,61	111,08	100,17	99,23	102,46	101,06
88,89	89,48	87,7	88,68	109,78	110,57	111,74	112,42	92,59	92,53	92,75	95,29
88,34	88,01	88,11	87,06	109,34	110,09	111,73	112,25	96,2	97,95	98,04	98,23
87,05	86,48	88,05	87,96	109,45	109,76	112,27	111,95	99,45	98,12	98,03	98,75
88,72	87,89	87,03	87,48	110,65	112,09	111,76	111,67	94,91	93,2	95,83	94,62
87,48	88,33	88,24	88,86	112,2	111,79	111,84	111,57	101,1	101,6	98,5	102,01
87,43	87,1	85,52	87,08	111,62	110,52	108,75	110,16	98,76	100,09	96,07	96,89
86,23	85,73	86,47	85,79	110,43	109,83	109,93	109,55	98,27	97,26	95,2	97,71
88,53	88,2	84,71	86,44	110,38	110,04	109,58	109,83	99,87	98,11	98,31	98,57
87,01	87,56	88,31	88,92	111,94	110,83	112,3	111,24	94,37	95,84	96,23	94,36
87,95	87,28	88,77	87,76	112,04	111,91	110,89	110,59	97,06	100,17	97,54	102,18
87,06	87,18	86,07	85,52	108,89	108,92	111,66	111,27	97,88	95,31	98,55	97,86
88,92	87,66	88,18	88,13	111,92	111,43	112,29	109,41	98,62	98,17	100,26	101,88
86,38	86,47	86,86	87,21	109,63	110,08	110,93	110,56	90,8	89,19	92,02	93,21
86,41	87,82	86,67	87,11	110,2	107,71	107,74	110,61	99,34	97,33	100,67	98,27

- Roble
 - Dimensiones muestras húmedas.

Muestra	Alto 1	Alto 2	Alto 3	Alto 4	Ancho1	Ancho 2	Ancho 3	Ancho 4	Largo 1	Largo 2	Largo 3	Largo 4
1	87,67	88,43	87,09	87,39	113,73	113,31	114,62	114,15	98,42	96,97	96,83	97,64
2	88,02	88,89	87,51	88,31	113,64	113,62	115,24	114,67	97,63	96,96	96,29	96,08
3	88,77	87,92	88,56	88,21	114,23	113,88	115,01	114,91	99,19	96,36	96,79	96,19
4	89,7	90,58	88,57	89,38	115,07	114,75	114,46	114,34	97,88	98,48	98,45	97,12
7	88,91	88,23	89,37	89,09	113,21	113,49	112,57	112,59	96,45	96,86	97,65	96,57
8	88,97	87,8	88,88	87,61	112,91	112,83	113,79	113,59	96,6	98,39	96,41	99,53
10	88,88	88,08	88,65	87,22	113,1	113,12	114,6	114,4	98,57	97,65	98,56	98,34
11	87,86	87,41	88,39	87,98	112,87	112,65	111,98	112,17	98,13	97,82	97,76	100,88
12	87,53	87,86	88,49	88,41	108,38	107,94	112,86	112,32	97,26	101,85	98,23	100,23
13	88,45	88,28	87,81	87,83	112,52	112,14	112,41	111,39	95,9	99,48	96,09	95,79
14	88,91	88,67	88,29	88,54	113,46	112,31	113,08	111,35	97,17	100,68	97,92	97,99
16	88,21	88,28	88,11	88,22	112,29	111,75	113,71	113,56	99,64	99,62	102,27	98,86
18	88,59	89,44	87,83	87,86	112,81	111,83	111,81	112,21	99,14	99,31	100,64	98,01
22	87,64	87,34	88,47	88,18	111,07	110,51	111,34	110,71	98,05	99,19	99,98	98,44
23	88,03	89,57	88,76	89,64	113,04	114,04	111,74	112,15	101,09	99,84	101,86	97,49
24	89,81	89,16	89,75	88,83	111,85	112,15	114,33	114,21	100,32	98,99	98,72	100,16
25	88,79	87,47	87,09	88,54	112,33	111,16	113,96	114,02	99,57	98,82	96,95	99,96
26	89,63	89,75	89,12	89,68	114,84	115,39	110,69	111,13	98,11	96,26	98,55	98,16
27	88,84	89,35	89,12	88,85	114,96	113,01	115,36	111,76	99,72	97,57	98,34	97,27
30	83,03	82,82	85,51	81,55	107,57	107,84	107,74	110,17	104,04	101,28	104,42	104,19
34	88,39	88,01	89,27	88,35	113,34	113,25	113,39	112,89	94,93	96,47	95,71	94,26
35	88,51	87,91	88,45	88,85	112,11	112,92	111,17	111,94	97,93	97,19	98,14	96,61
36	89,53	89,62	89,81	89,84	113,62	113,57	113,67	113,65	102,52	97,16	99,37	98,26
37	88,25	88,29	88,62	88,84	112,79	113,13	112,52	112,89	98,69	100,61	97,02	100,55
39	90,23	88,73	90,47	89,62	115,34	114,83	114,05	113,18	97,9	100,51	99,53	96,93
40	87,41	88,81	87,19	89,08	109,41	107,99	111,14	110,83	95,43	95,04	94,94	92,54
41	85,34	84,63	84,52	84,09	113,15	114,44	113,75	113,96	98,73	99,56	98,79	97,45
42	85,43	85,05	84,04	84,78	113,12	113,79	112,83	112,81	98,35	96,27	100,01	96,17
43	85,04	84,01	85,56	83,75	113,25	113,17	112,79	112,92	100,88	100,85	100,51	98,83
50	85,36	84,96	83,96	82,19	116,78	116,04	116,58	115,36	99,81	98,9	101,2	99,18
51	87,03	86,63	86,56	86,28	117,45	117,1	117,75	117,47	92,12	94,95	90,16	94,13
52	85,33	86,44	85,09	86,06	114,32	118,07	114,56	118,09	97,33	94,28	97,21	94,49

○ Dimensiones muestras secas.

Muestra	Alto 1	Alto 2	Alto 3	Alto 4	Ancho1	Ancho 2	Ancho 3	Ancho 4	Largo 1	Largo 2	Largo 3	Largo 4
1	85,13	85,45	85,69	86,49	111,2	111,02	111,87	111,88	96,94	98,24	97,51	96,76
2	85,98	85,75	86,18	86,19	112,13	112,06	111,18	110,58	97,41	96,96	96,29	95,61
3	86,55	86,61	86,31	86,41	111,64	110,89	111,74	111,46	96,01	96,59	98,77	95,86
4	89,46	88,47	87,39	86,64	111,6	111,34	112,71	112,27	97,03	98,03	98,01	96,48
7	87,12	87,62	86,04	86,55	109,35	110,29	107,98	108,76	96,53	96,33	96,15	97,47
8	85,88	86,29	86,21	86,29	111,05	109,07	111,15	109,45	96,13	98,93	96,33	98,23
10	86,38	85,59	85,78	85,76	109,28	108,98	110,08	109,7	97,26	98,51	97,91	98,15
11	85,33	85,74	86,62	86,57	109,29	109,52	107,82	108,32	100,24	97,51	97,43	98,11
12	85,29	86,49	86,53	86,68	104,89	105,55	108,91	110,49	101,05	96,83	99,95	98,01
13	85,72	86,25	86,2	87,16	110,11	108,82	108,52	108,19	99,14	95,19	95,69	95,45
14	86,48	86,45	86,58	87,08	108,04	108,91	105,2	106,81	100,13	97,23	97,83	96,96
16	86,62	86,54	85,89	85,73	107,13	107,18	109,34	109,28	99,1	98,97	102,05	98,08
18	87,14	86,33	85,82	85,32	107,26	109,74	107,41	108,55	98,89	98,78	97,65	100,32
22	85,72	85,84	86,59	86,44	106,48	108,02	107,53	108,68	99,55	98,23	98,14	98,94
23	86,16	88,01	88,08	86,6	108,71	109,11	109,97	108,96	99,47	100,34	97,23	100,83
24	87,72	87,62	87,86	87,41	108,89	108,08	112,06	112,05	98,58	100,65	99,85	98,55
25	87,45	87,6	85,01	85,35	111,92	111,78	109,61	108,52	97,02	99,61	99,07	98,59
26	87,77	87,96	87,19	87,53	96,28	98,08	98,33	98,46	97,94	96,41	98,44	98,11
27	87,81	87,37	86,98	87,35	112,26	107,53	112,43	110,76	97,38	99,29	97,2	98,16
30	81,7	82,25	80,99	76,58	104,14	106,34	105,79	105,16	103,42	104,22	100,17	102,9
34	86,02	86,16	86,76	86,96	110,27	109,87	109,26	108,99	95,14	93,37	94,72	96,14
35	86,21	86,47	85,52	86,31	109,51	108,31	110,68	109,29	96,87	97,62	97,81	95,62
36	88,39	88,22	87,18	87,42	110,94	111,07	111,54	111,17	96,31	102,65	97,52	99,19
37	87,29	86,13	86,1	86,38	109,61	110,53	108,96	110,12	100,2	98,41	100,11	96,41
39	88,85	89,33	86,47	87,22	112,91	111,09	111,76	110,06	99,89	97,52	99,25	96,6
40	86,11	85,97	85,95	86,87	105,05	107,63	106,93	107,8	91,89	94,63	94,28	94,97
41	82,34	82,66	80,16	80,4	110,52	110,93	110,95	111,69	97,57	99,19	98,08	98,22
42	82,65	83,17	80,67	82,25	109,63	111,01	110,64	111,34	99,88	96,28	97,76	95,93
43	82,44	83,19	83,13	80,48	110,33	111,09	110,33	111,13	98,56	100,63	100,49	100,66
50	82,93	81,77	82,49	81,31	113,11	113,32	112,36	112,07	99,58	99,03	101,03	99,02
51	83,86	83,88	85,05	84,35	113,05	112,55	113,08	112,75	90,14	93,96	91,54	94,71
52	82,81	83,99	82,61	83,71	114,43	110,69	113,93	109,34	96,74	94,11	97,01	93,82

- MLE
 - Dimensiones muestras húmedas.

Muestra	Alto 1	Alto 2	Alto 3	Alto 4	Ancho1	Ancho 2	Ancho 3	Ancho 4	Largo 1	Largo 2	Largo 3	Largo 4
1,01	84,74	85,13	84,91	84,7	98,9	98,51	98,39	97,91	146,37	147,88	146,27	147,42
1,02	84,51	84,64	84,3	84,57	98,98	99,45	98,71	98,79	148,25	147,83	146,52	146,41
1,03	84,21	84,49	84,08	84,29	98,81	98,56	98,86	99,47	146,43	144,67	146,93	147,73
2,01	84,48	84,28	84,64	84,59	96,61	96,38	97,39	97,27	148,74	150,03	149,84	148,14
2,02	84,63	84,57	84,26	84,34	96,44	95,38	96,52	96,26	145,96	146,2	144,04	146,02
2,03	84,58	84,73	84,68	84,85	96,63	96,96	95,62	96,67	147,71	146,19	148,43	147,37
3,01	84,93	84,92	84,59	84,35	98,34	98,06	98,08	96,66	148,44	148,45	147,76	149,01
3,02	84,74	84,77	84,65	84,57	96,4	98,08	97,66	97,93	145,99	147,42	146,52	146,79
3,03	84,69	84,92	84,7	84,93	97,86	96,53	97,78	97,03	147,81	147,56	148,33	148,08
4,01	84,27	84,15	84,48	84,45	98,95	96,62	97,38	96,57	146,76	148,25	147,39	148,66
4,02	84,53	84,55	84,23	84,3	94,22	97,06	96,09	96,65	147,77	147,51	148,31	145,37
4,03	84,13	84,36	84,13	84,26	98,07	97,02	99,62	97,21	146,3	144,74	145,31	145,81
5,01	84,05	84,08	84,34	84,39	95,37	95,85	96,06	95,88	145,94	147,56	146,06	146,96
5,02	84,26	84,29	84,65	84,52	96,28	97,67	96,02	95,88	146,44	146,4	144,35	145,26
5,03	84,46	84,49	84,65	84,46	96,94	97,95	96,43	97,71	148,21	148,45	150,07	149,77
6,01	84,49	84,77	84,74	84,77	97,38	97,19	96,58	96,53	146,59	144,65	146,55	146,36
6,02	84,76	84,59	84,69	84,7	96,98	96,99	96,68	96,15	147,43	146,13	147,36	149,01
6,03	84,35	84,57	84,75	84,76	96,59	96,87	97,9	97,11	147,88	147,51	147,25	145,35
7,01	84,31	84,39	84,41	84,35	97,7	97,65	97,85	98,42	146,2	147,52	148,22	147,03
7,02	84,43	84,32	84,2	84,58	97,67	97,81	97,11	97,14	148,45	144,11	142,82	142,97
7,03	84,24	84,15	83,8	83,82	97,01	97,55	97,15	97,25	132,27	129,09	129,22	130,63
8,01	84,28	84,01	84,17	84,11	96,84	96,75	96,73	96,77	147,22	146,52	146,67	145,66
8,02	84,14	84,06	84,11	83,96	96,8	96,74	96,93	96,81	145,15	150,4	149,46	146,45
8,03	83,96	84,16	83,51	83,67	95,76	98,92	96,57	96,93	144,38	145,36	145,95	146,42
9,01	83,44	82,85	83,83	83,01	97,66	97,54	98,06	97,7	147,01	148,02	145,93	147,48
9,02	83,93	83,44	83,76	83,64	96,84	96,98	97,39	97,56	143,87	144,56	145,12	145,35
9,03	83,75	83,87	83,53	83,34	96,58	97,59	96,74	96,62	149,11	149,18	146,42	147,44
10,01	84,33	84,3	84,56	84,46	97,11	98,7	99,36	98,96	148,08	147,02	148,38	145,93
10,02	84,12	84,08	84,37	84,38	98,18	96,5	98,58	98,21	141,73	147,09	141,85	148,17
10,03	84,14	84,24	83,95	83,97	96,64	96,37	98,16	96,29	148,15	145,59	146,65	145,05
11,01	84,55	84,41	84,69	84,48	98,17	97,96	99,45	98,07	147,94	145,22	146,29	144,72
11,02	84,06	84,08	84,61	84,63	98,14	97,93	97,49	96,93	148,11	147,86	146,34	146,96
11,03	83,89	83,97	83,94	83,83	99,52	96,99	96,97	97,32	142,63	146,93	140,81	143,98
12,01	83,31	83,22	83,91	83,96	99,23	98,22	99,07	98,31	146,86	143,47	144,76	143,96
12,02	83,92	84,11	83,81	84,61	96,66	98,56	98,34	99,32	147,6	151,12	148,64	149,16
12,03	84,53	84,21	84,17	84,54	96,86	98,51	96,52	98,09	145,37	142,91	143,57	143,59

○ Dimensiones muestras secas.

Muestra	Alto 1	Alto 2	Alto 3	Alto 4	Ancho1	Ancho 2	Ancho 3	Ancho 4	Largo 1	Largo 2	Largo 3	Largo 4
1,01	83,43	83,23	82,49	82,69	97,03	98,31	98,23	98,51	141,89	143,52	144,58	144,66
1,02	82,79	82,75	83,19	83,06	98,59	98,02	98,58	99,33	144,67	145,01	142,67	143,16
1,03	82,21	82,07	82,88	83,03	98,43	99,13	98,52	98,22	144,08	142,04	144,89	144,98
2,01	82,46	82,26	83,27	83,07	96,28	96,41	97,2	97,12	147,89	145,39	146,17	147,2
2,02	82,37	82,77	83,08	82,88	95,85	95,24	96,41	95,97	142,21	142,54	141,26	143,29
2,03	83,08	83,31	83,01	82,93	95,3	96,13	96,44	96,94	143,52	142,38	145,46	143,58
3,01	82,75	82,61	82,16	82,56	97,63	97,98	96,42	97,99	145,62	146,21	145,58	145,43
3,02	82,73	82,76	83,78	83,41	96,26	97,36	96,43	97,57	144,57	145,56	144,29	144,58
3,03	82,75	83,29	83,88	83,82	97,51	97,65	96,19	97,04	143,84	142,78	145,51	141,59
4,01	82,79	82,48	82,9	82,95	98,78	96,49	97,16	96,39	144,33	145,92	144,23	145,63
4,02	82,36	82,61	82,81	83,05	96,88	93,99	96,47	95,96	142,39	143,91	144,27	144,45
4,03	83,21	82,84	83,11	82,87	96,39	98,43	96,62	99,15	142,08	141,96	141,45	142,67
5,01	83,08	83,12	82,81	82,87	95,9	95,24	95,2	95,58	143,86	142,43	143,12	142,69
5,02	82,98	83,09	82,35	82,33	96,22	97,46	95,7	95,17	142,51	142,82	141,06	141,94
5,03	82,86	82,73	83,55	83,23	96,44	97,52	96,15	97,34	144,78	145,95	147,67	147,76
6,01	82,97	82,78	83,67	83,56	96,82	96,11	96,78	96,31	143,73	142,18	142,88	142,9
6,02	83,56	83,38	82,61	82,97	96,54	96,73	96,87	95,94	142,48	143,75	146,35	144,94
6,03	82,2	82,39	82,85	83,01	97,64	96,96	96,82	96,79	145,36	145,24	145,26	143,41
7,01	82,85	82,83	83,15	83,28	97,64	97,34	98,11	97,67	145,17	143,75	142,71	143,24
7,02	82,91	83,15	83,43	83,12	96,89	96,67	97,39	97,34	139,26	138,54	144,51	139,61
7,03	83,36	82,81	82,34	82,39	97,74	96,82	96,89	96,71	126,54	126,8	125,22	129,21
8,01	82,72	83,09	82,17	82,49	96,95	96,76	96,32	96,62	142,38	143,34	143,48	143,39
8,02	82,57	82,73	83,2	82,86	96,39	96,37	96,65	96,29	141,15	145,9	142,44	145,93
8,03	82,71	82,45	81,63	81,74	99,02	95,69	96,71	96,04	142,4	142,48	140,97	141,95
9,01	82,46	82,02	82,62	81,63	97,63	97,29	97,59	96,83	144,15	142,2	145,1	143,98
9,02	82,52	81,86	82,46	82,21	96,52	96,83	97,18	97,45	141,67	141,86	140,02	140,71
9,03	82,21	82,12	82,13	81,81	96,55	97,58	96,52	96,31	145,14	145,73	143,49	142,81
10,01	82,66	82,59	82,88	82,98	98,03	98,55	96,78	99,13	143,78	145,45	142,15	144,17
10,02	83,29	83,54	83,26	83,03	96,27	98,01	98,09	98,46	143,03	138,64	144,71	139,17
10,03	83,01	82,96	82,81	82,69	96,11	95,97	96,59	97,84	141,49	144,01	140,26	142,26
11,01	83,11	83,07	83,25	83,56	97,69	97,66	99,19	97,76	144,79	141,89	142,66	141,37
11,02	83,43	83,29	82,73	82,71	96,65	97,32	97,66	97,9	142,25	142,95	144,11	143,93
11,03	82,55	82,42	92,61	82,48	99,55	96,97	96,85	97,09	137,97	142,81	137,08	140,31
12,01	81,76	81,82	82,51	82,47	98,11	98,81	97,83	98,8	140,52	140,04	142,89	139,93
12,02	82,26	82,43	81,69	82,47	97,95	98,81	96,38	98,18	144,21	147,55	144,69	145,94
12,03	83,19	83,27	82,68	82,16	98,09	96,77	97,65	96,26	140,39	140,06	141,72	139,42

ANEXO C

Tablas comparativa Densidad-Velocidad de carbonización y Humedad-Velocidad de Carbonización para las distintas especies madereras.

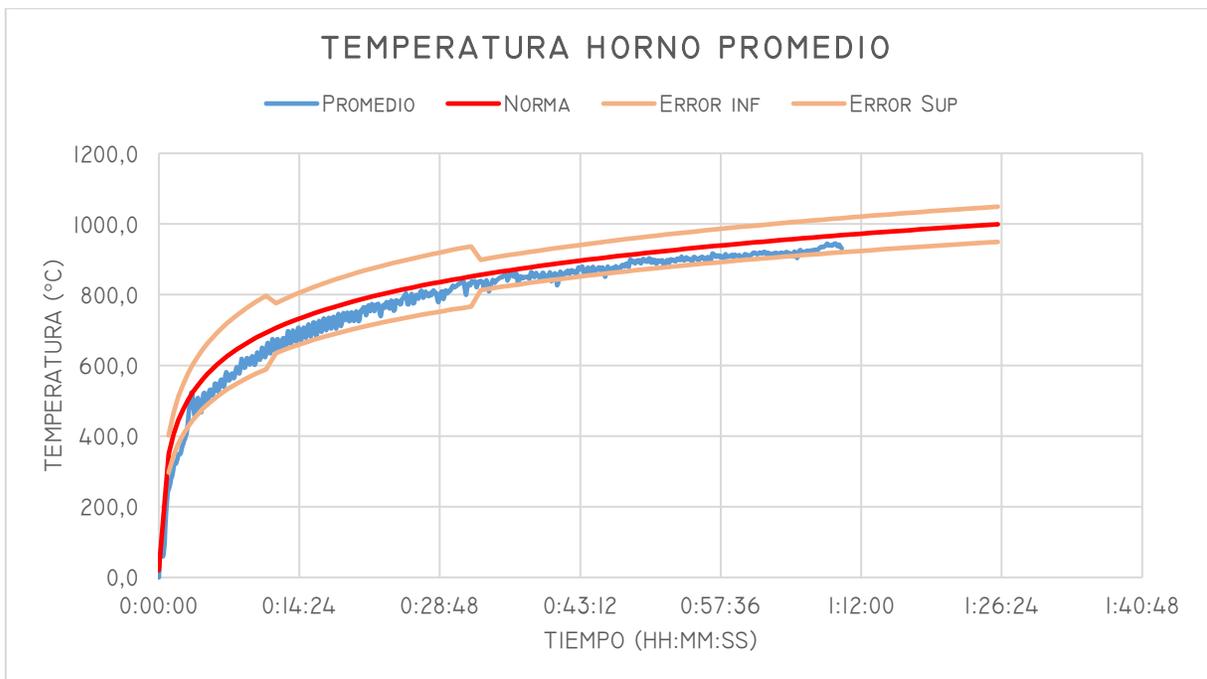
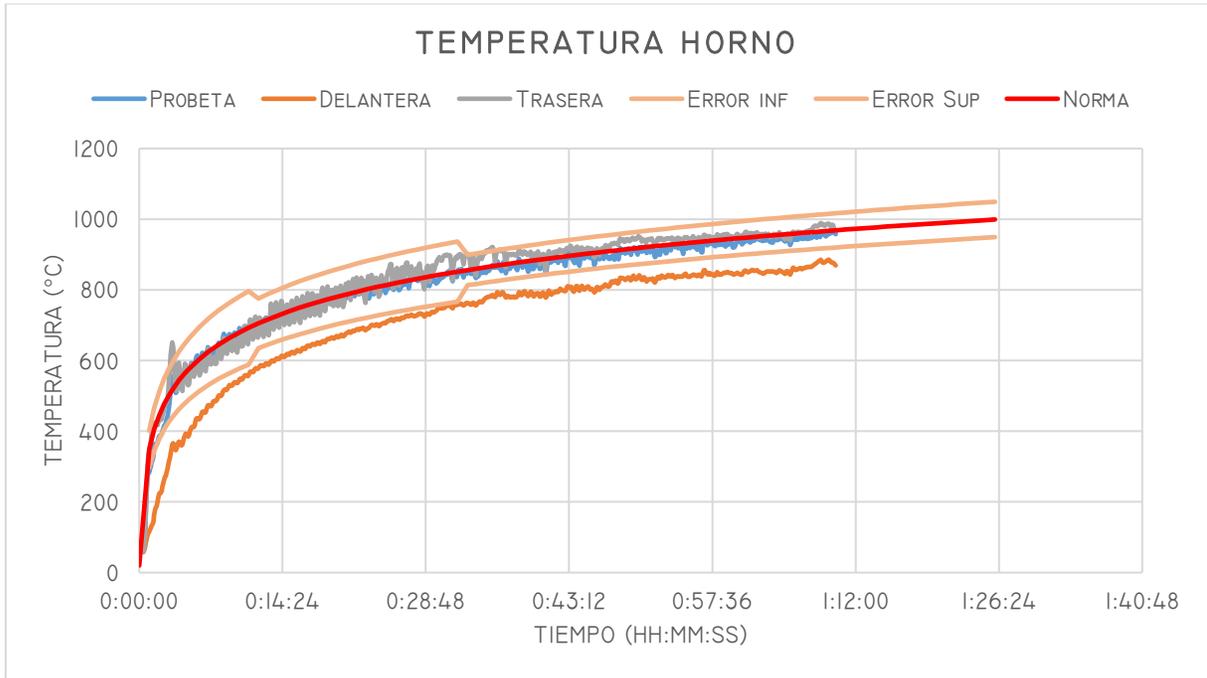
- Pino Radiata

Muestra	Densidad (kg/m ³)			Humedad	Velocidad de Carbonización (mm/min)	
	Nominal	Anhidra	Referencia		Residual	Termocuplas
1	411,1	427,2	460,3	12,0	0,73	0,67
3	464,1	477,9	510,5	10,0	0,64	0,5
4	474,6	501,2	539,6	13,7	0,58	0,55
6	583,2	613,0	652,0	11,8	0,73	0,63
7	434,3	451,3	484,5	11,6	0,70	0,54
8	536,1	564,6	597,4	11,4	0,81	0,47
9	487,8	506,9	546,6	12,0	0,74	0,49
10	502,2	531,5	571,5	13,8	0,69	0,61
12	388,8	378,2	432,0	11,1	0,68	0,81
13	445,3	469,7	505,6	13,5	0,66	0,49
14	429,2	524,9	488,8	13,9	0,57	0,45
15	461,9	489,7	526,8	14,1	0,64	0,49
16	478,3	506,1	543,3	13,6	0,65	0,48
17	494,2	522,0	564,8	14,3	0,61	
18	529,6	558,6	590,5	11,5	0,63	0,51
19	512,9	544,6	580,3	13,1	0,63	0,49
20	450,6	465,9	499,5	10,9	0,73	0,65
23	474,8	508,0	536,3	13,0	0,75	0,69
24	443,8	456,9	486,7	9,7	0,72	0,67
25	422,1	438,4	469,9	11,3	0,70	0,6
26	389,6	405,8	441,0	13,2	0,80	0,61
27	418,4	434,9	472,9	13,0	0,66	0,56
29	464,6	484,1	517,1	11,3	0,64	0,52
32	376,4	393,9	431,8	14,7	0,70	0,54
33	426,0	449,5	484,7	13,8	0,78	0,66
34	446,9	466,1	506,4	13,3	0,69	0,58
36	398,8	417,6	453,9	13,8	0,71	0,63
38	437,7	451,2	486,4	11,1	0,66	0,61
39	438,7	458,4	501,8	14,4	0,81	0,8
41	373,1	392,6	427,4	14,6	0,76	0,65
42	395,0	411,0	451,1	14,2	0,64	0,54
43	480,0	498,0	532,0	10,8	0,68	0,56
44	499,1	530,6	569,4	14,1	0,66	
48	378,5	390,4	428,9	13,3	0,83	0,76
49	430,7	447,1	489,3	13,6	0,77	0,81
50	372,2	388,7	425,0	14,2	0,72	

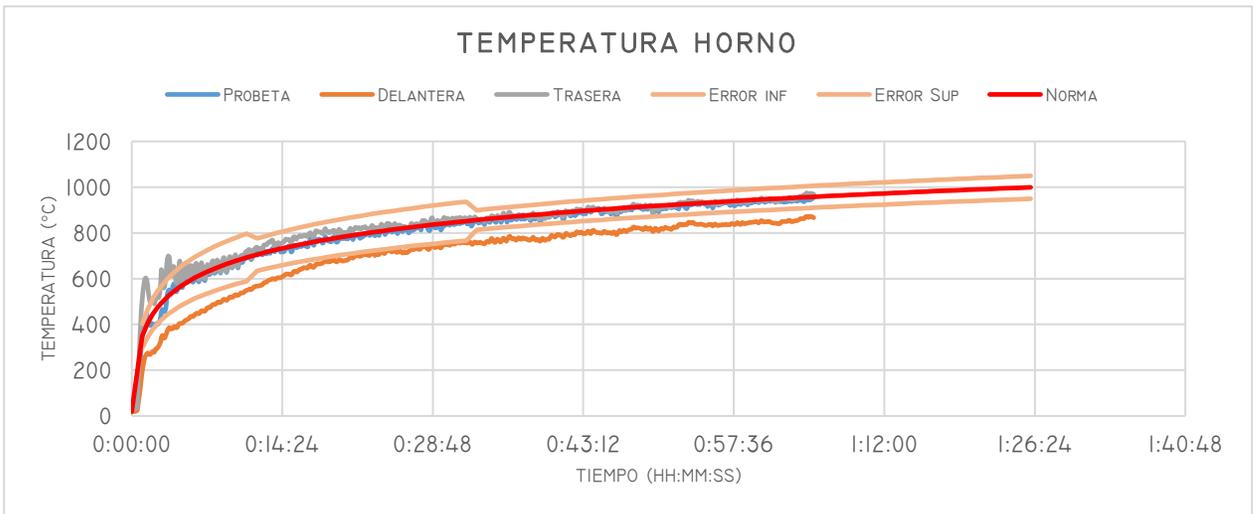
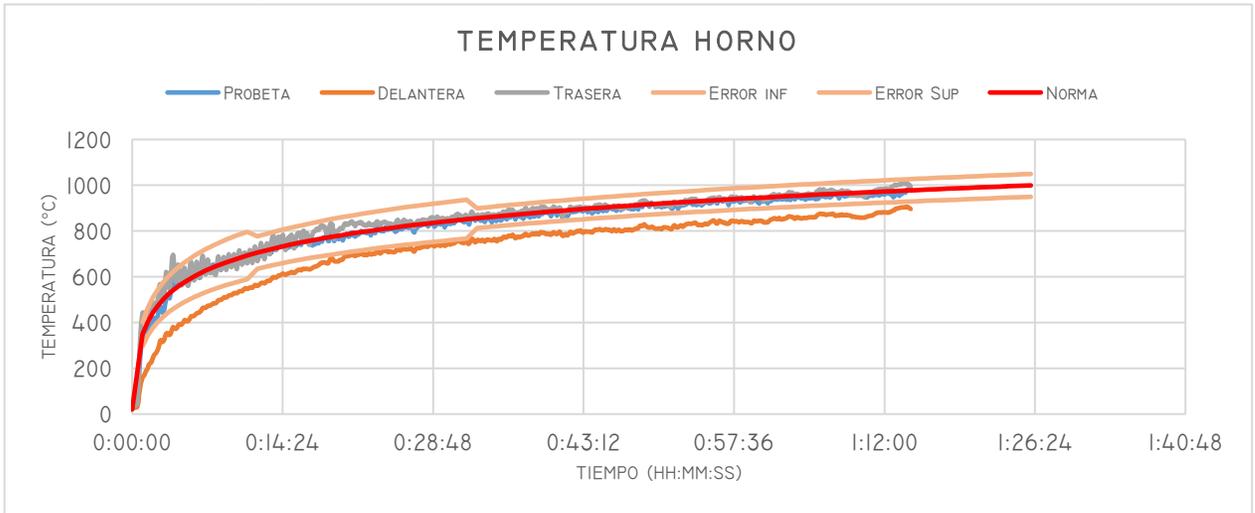
ANEXO D

Comportamiento del horno para los ensayos.

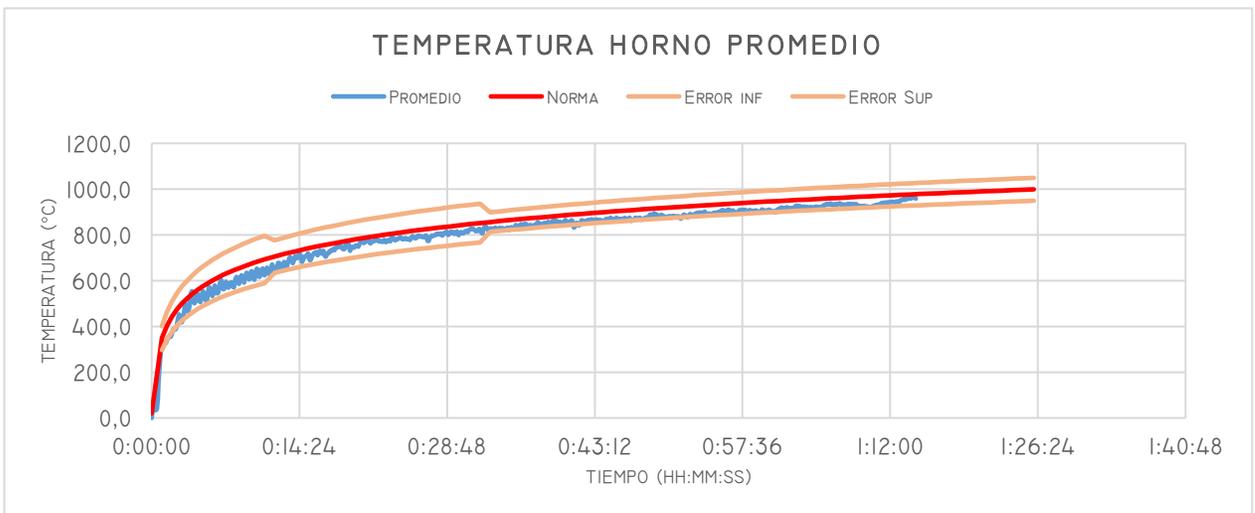
- Pino Radiata
 - Ensayo 1

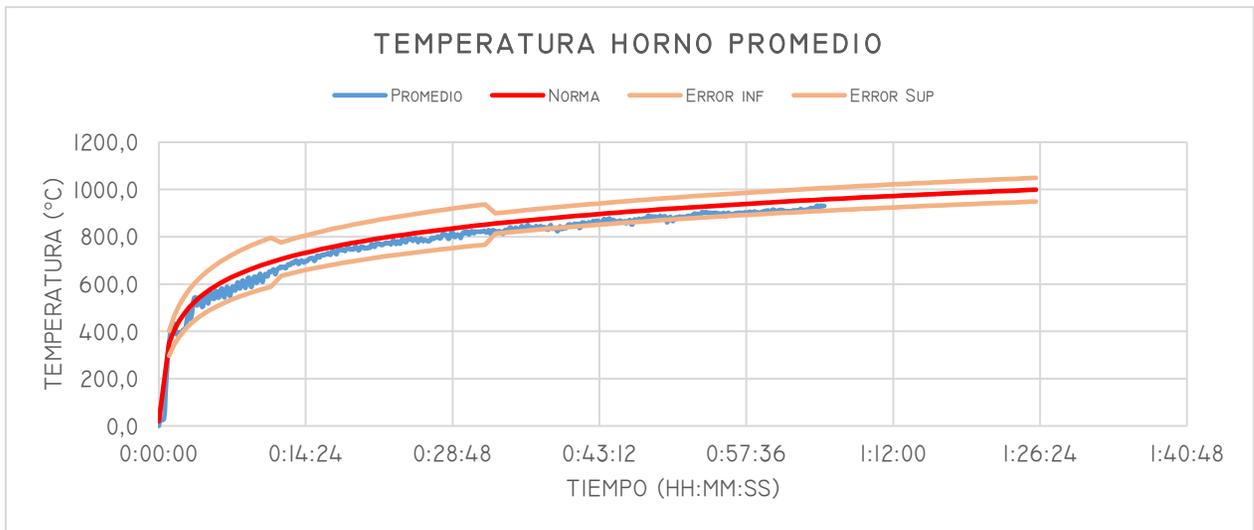


○ Ensayo 2

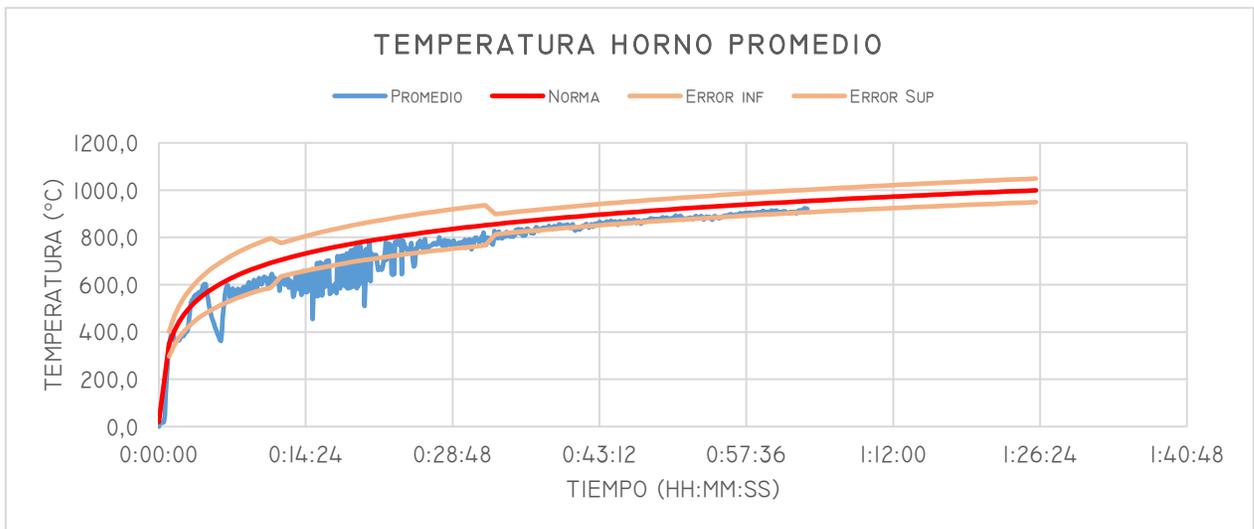
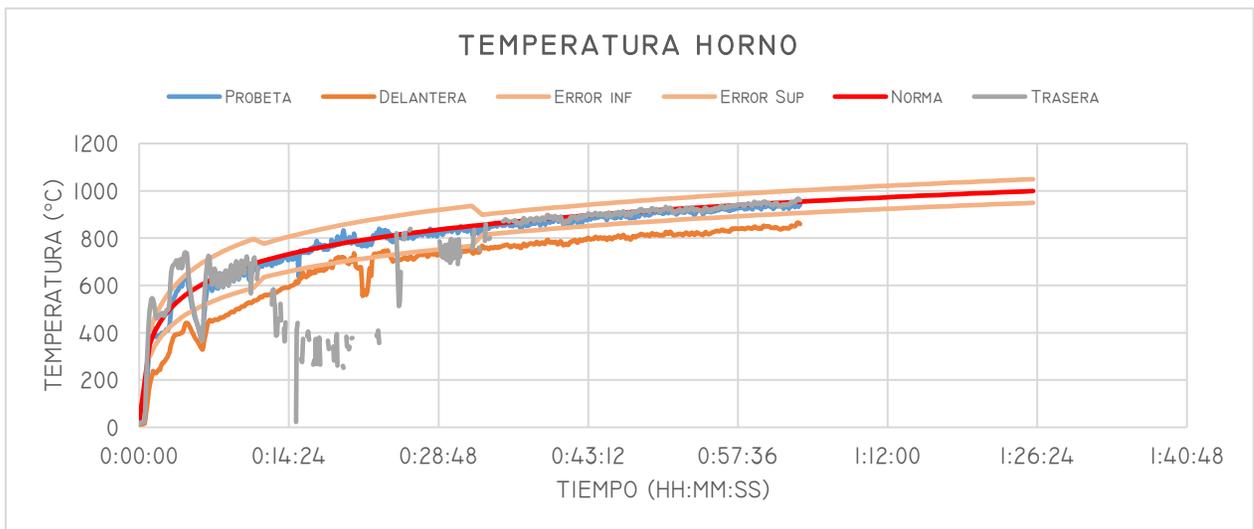


○ Ensayo 3

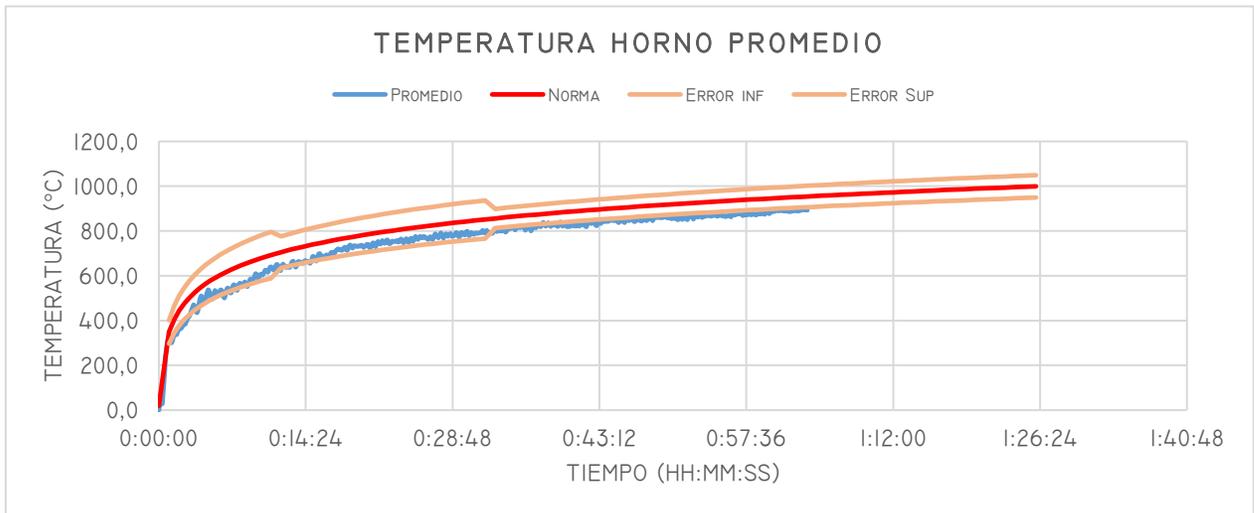
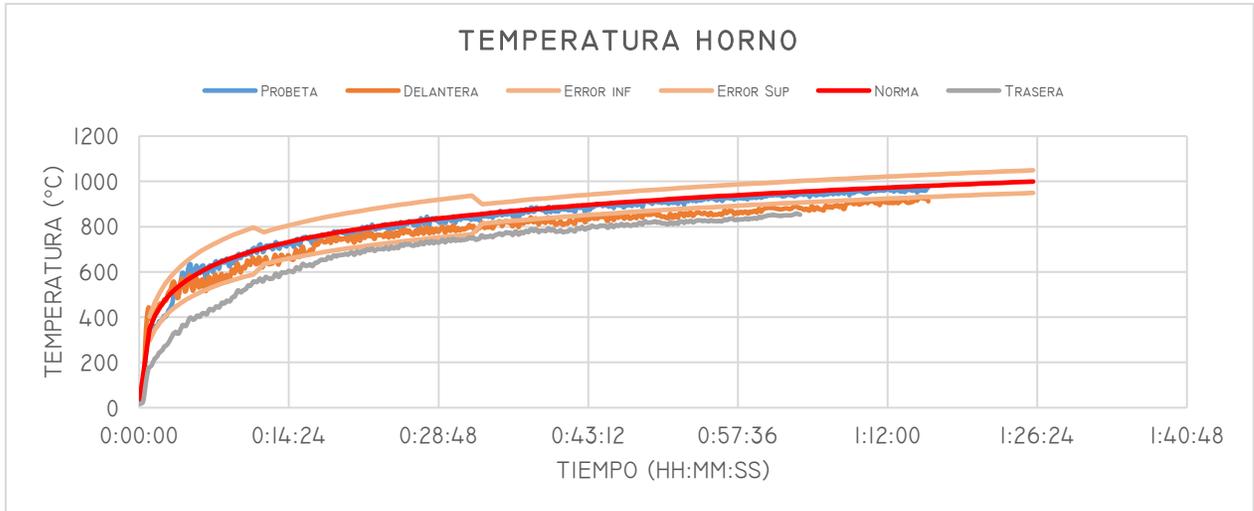




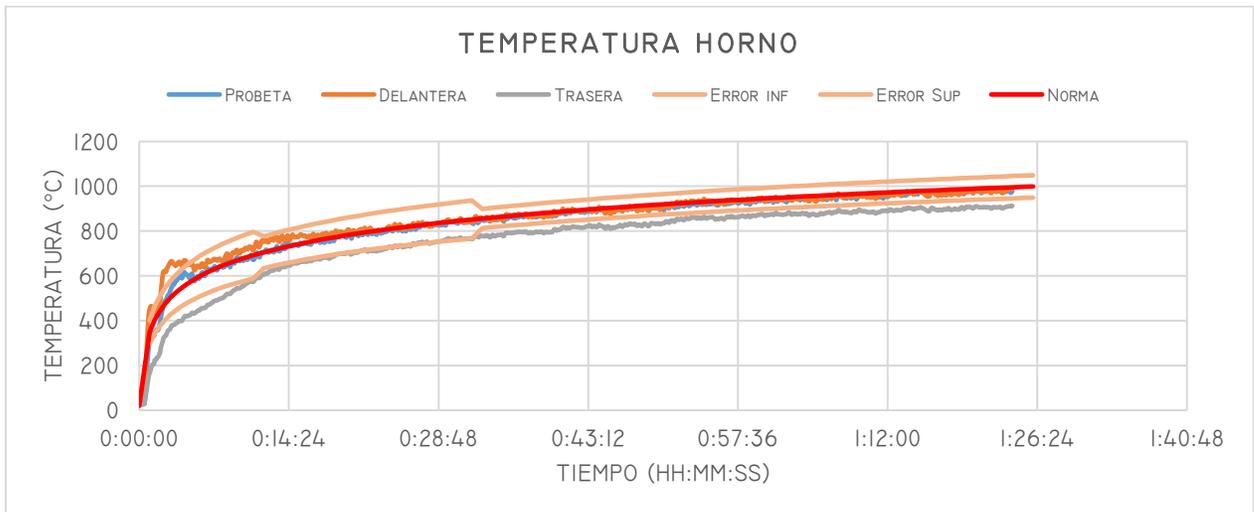
○ Ensayo 4

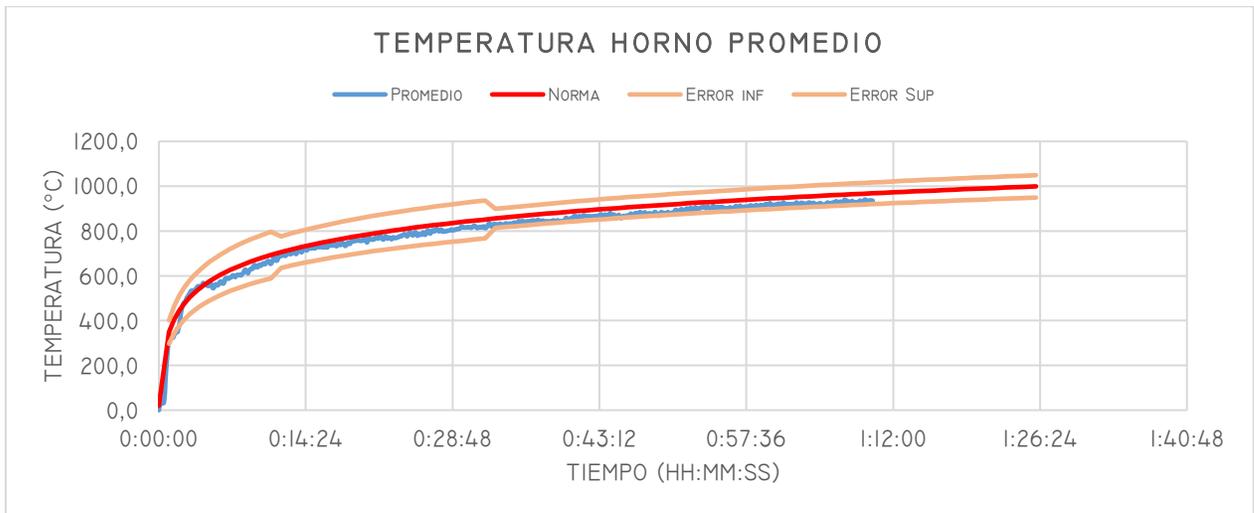


- Ensayo 5

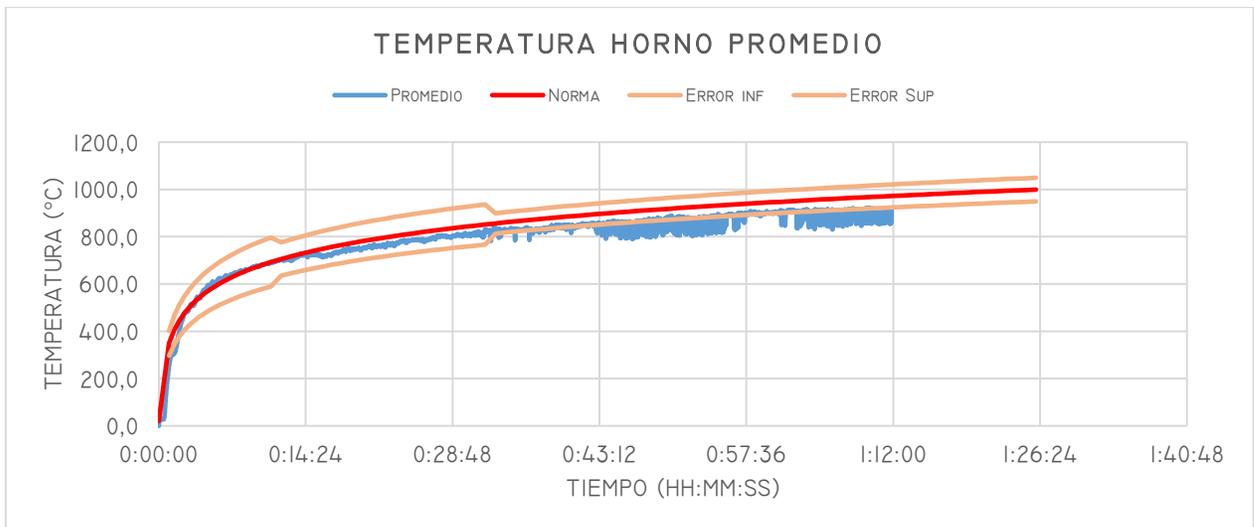
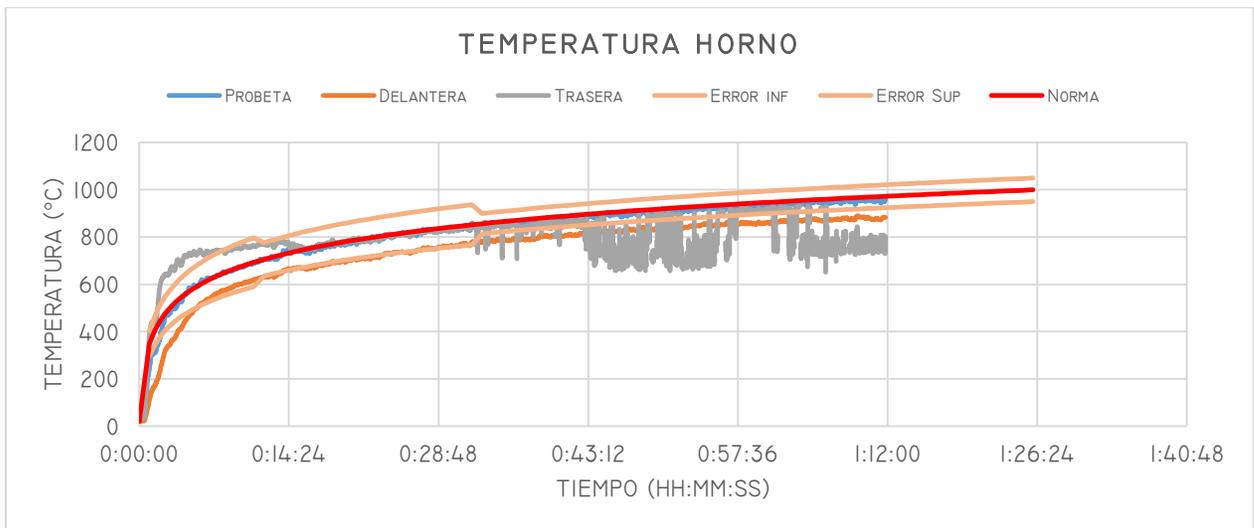


- Pino Radiata
 - Ensayo 1

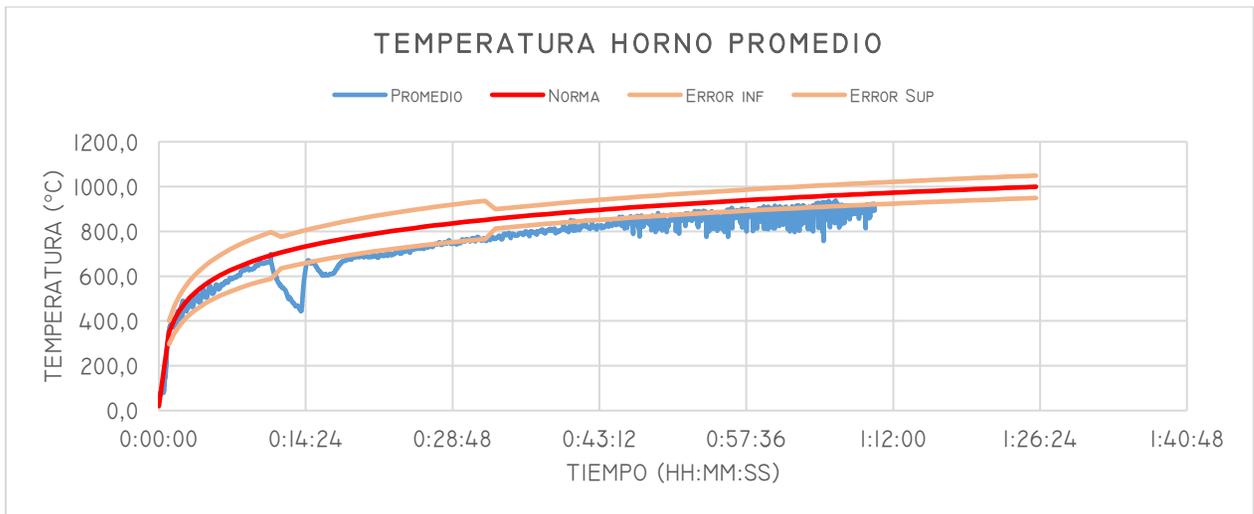
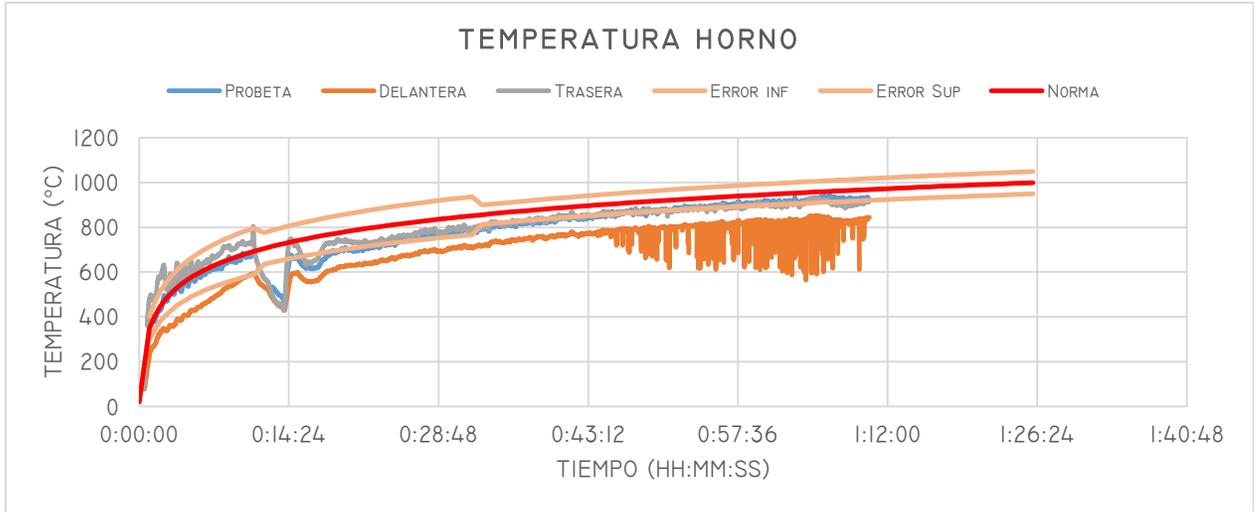




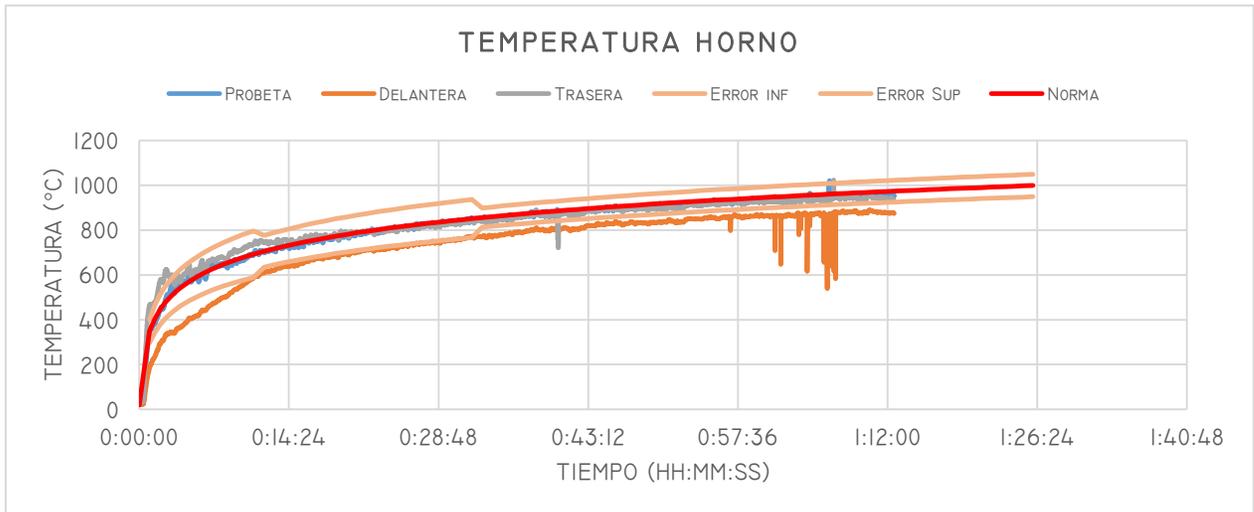
○ Ensayo 2

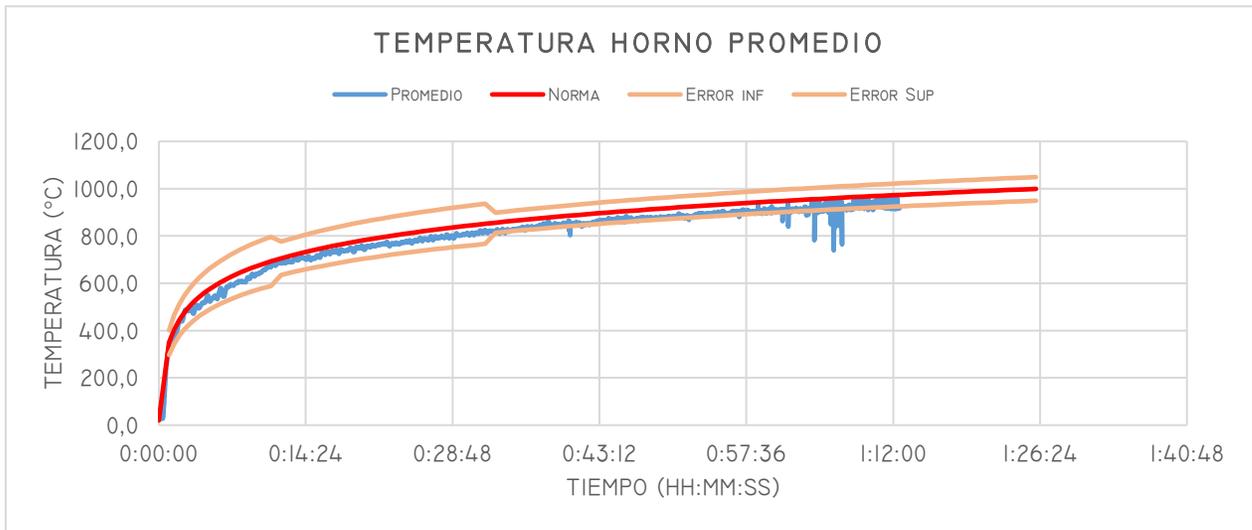


○ Ensayo 3

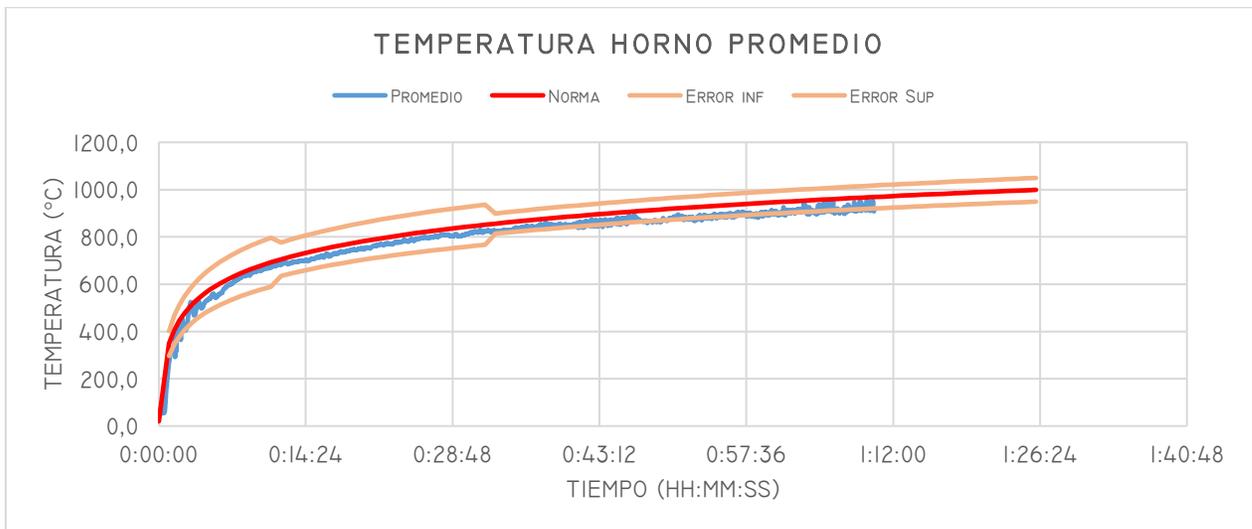
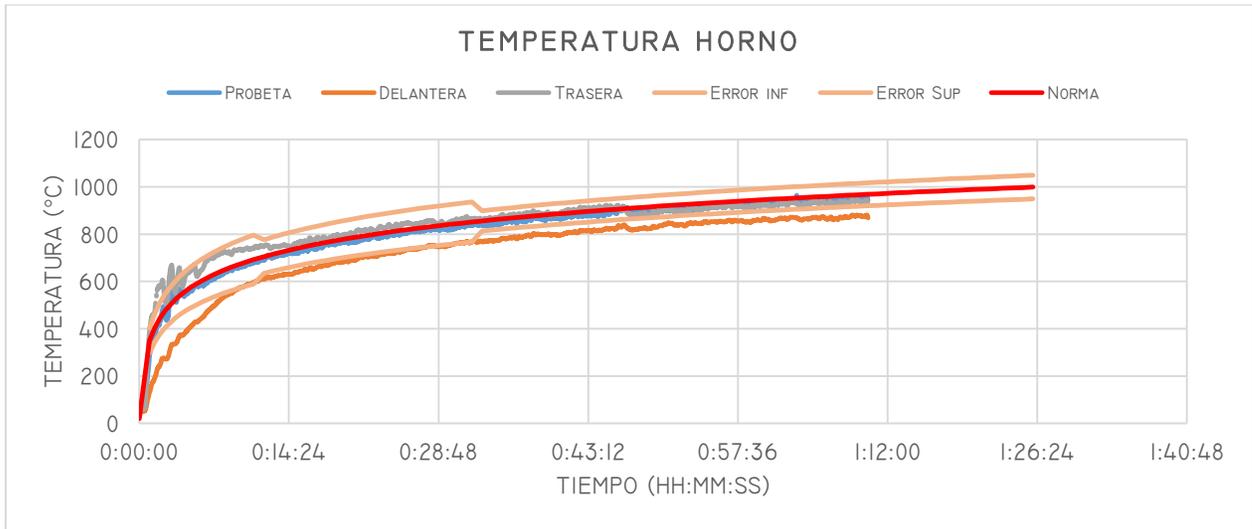


○ Ensayo 4

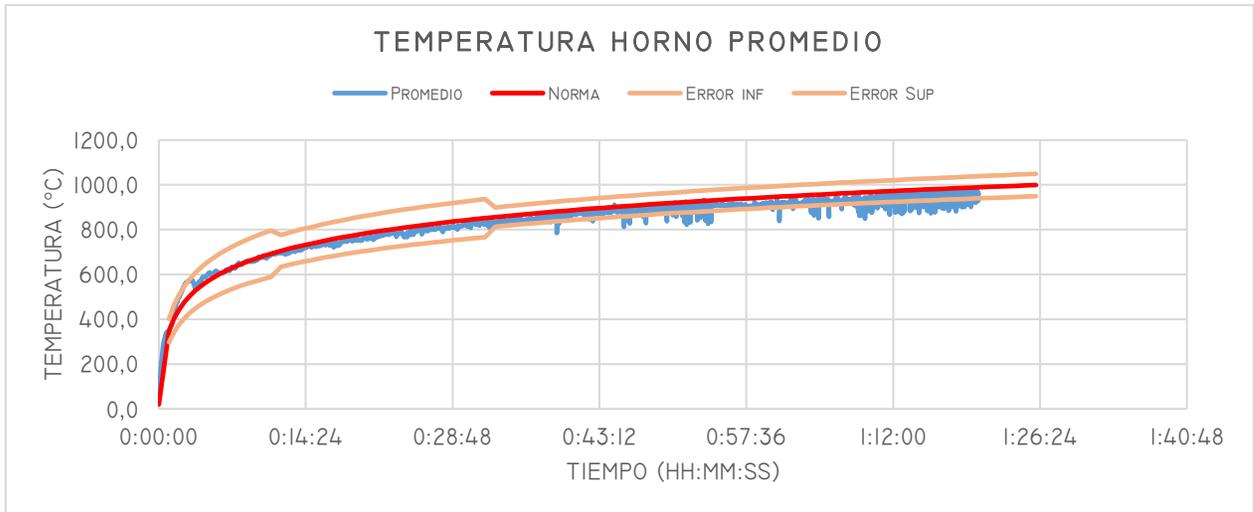
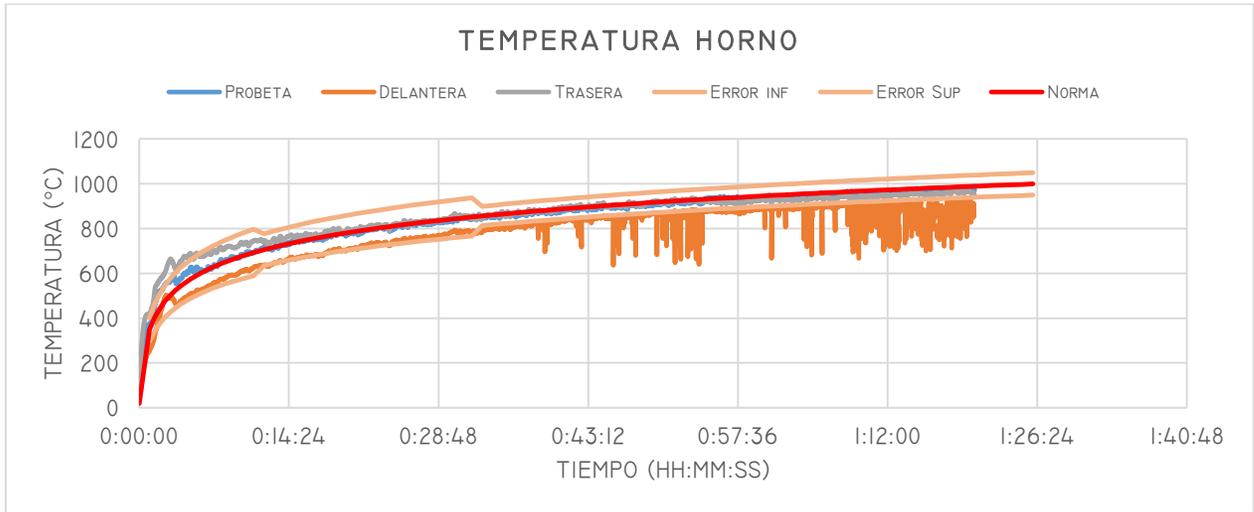




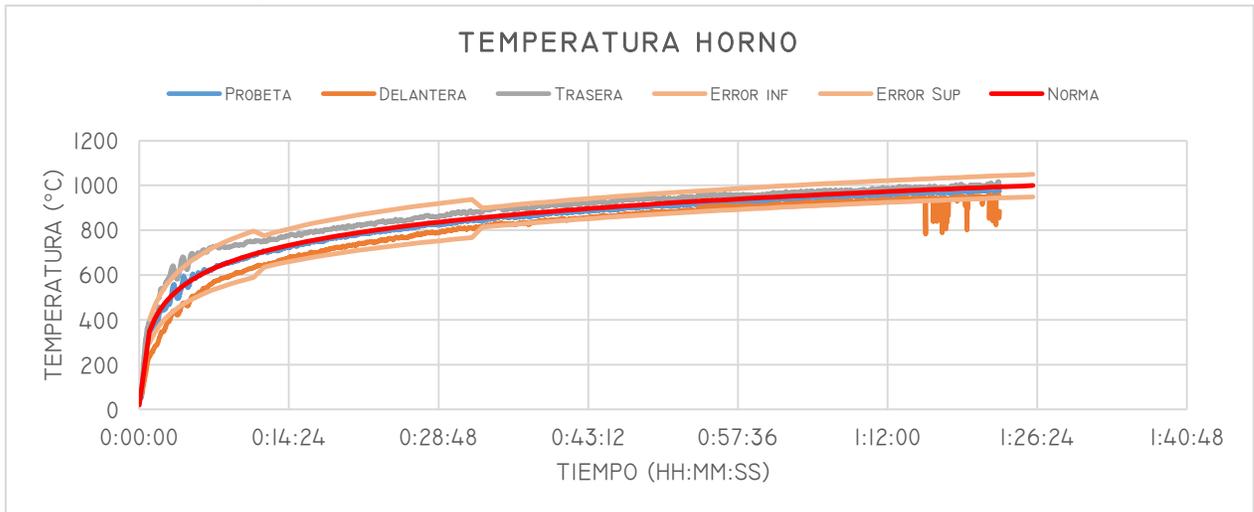
○ Ensayo 5

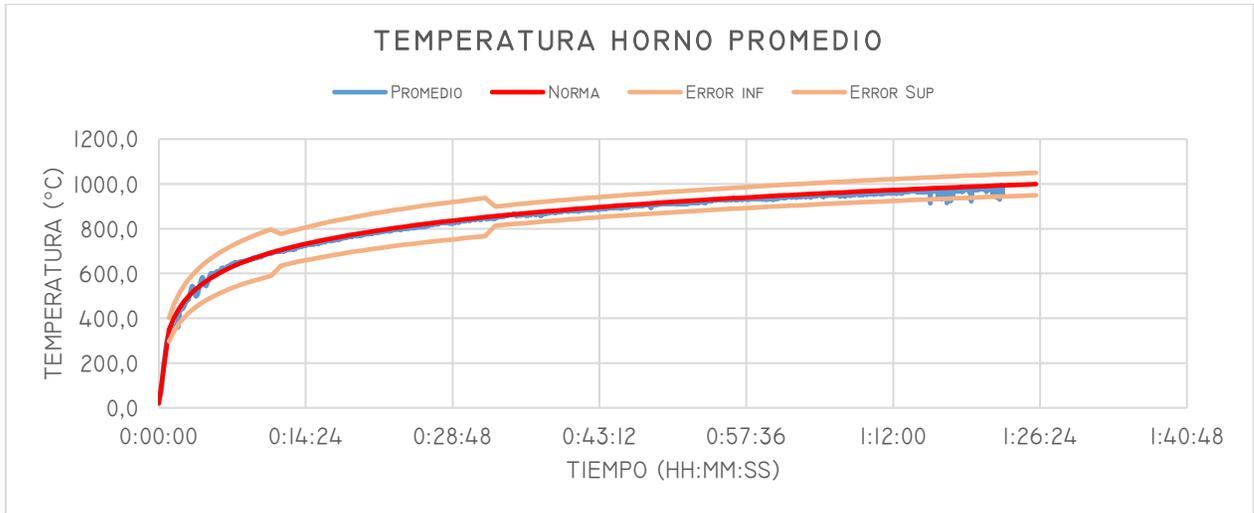


- Roble
 - Ensayo 1

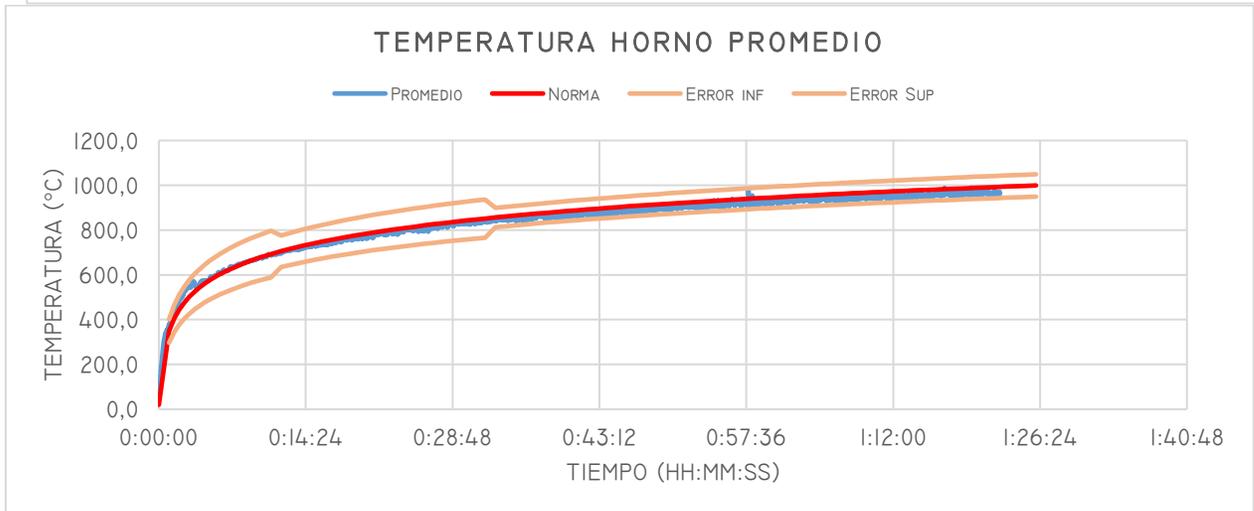
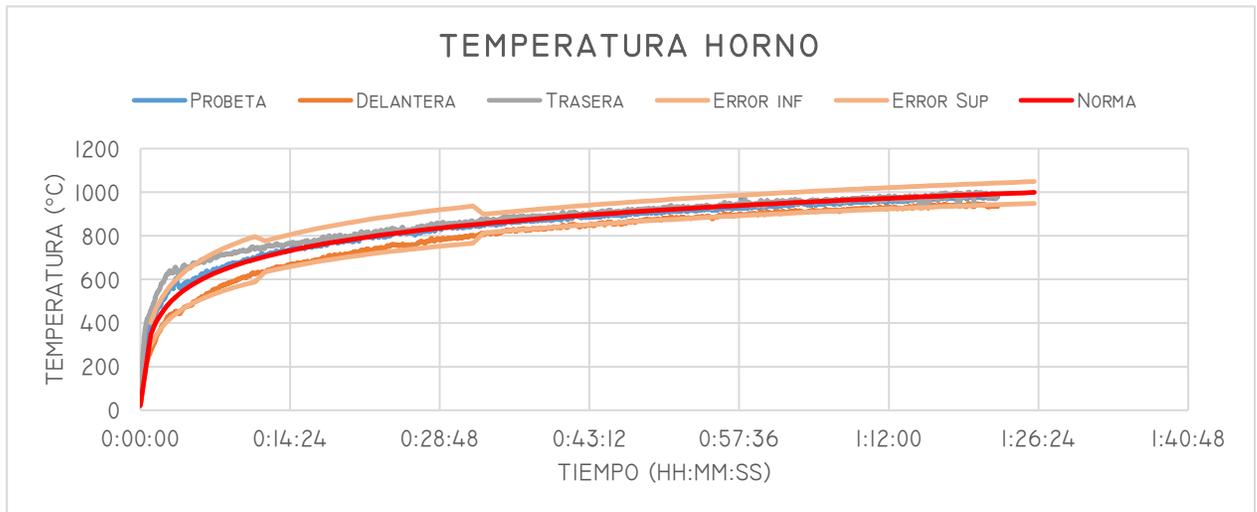


- Ensayo 2

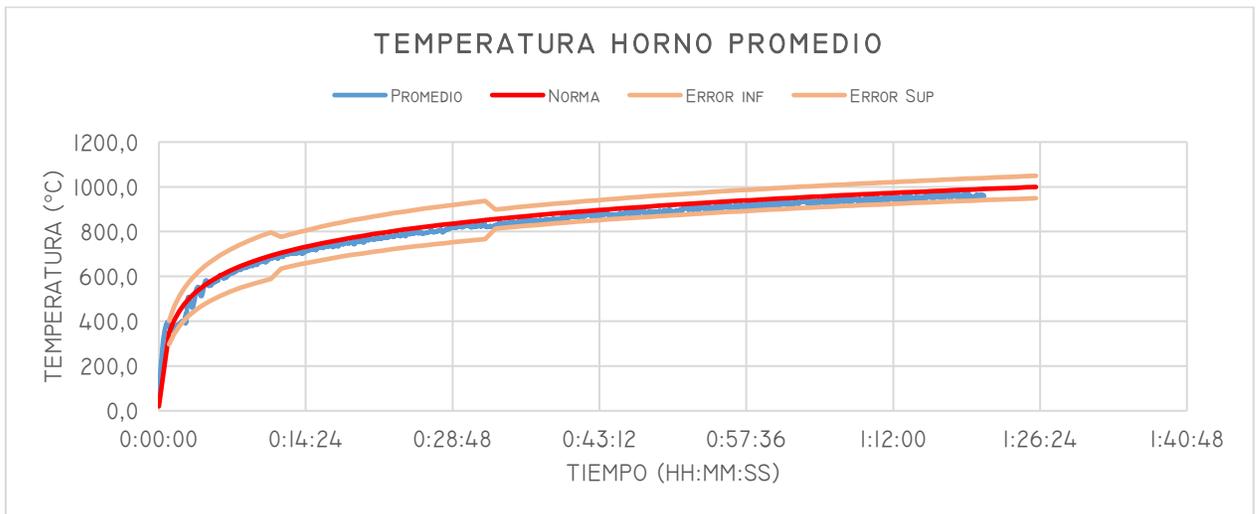
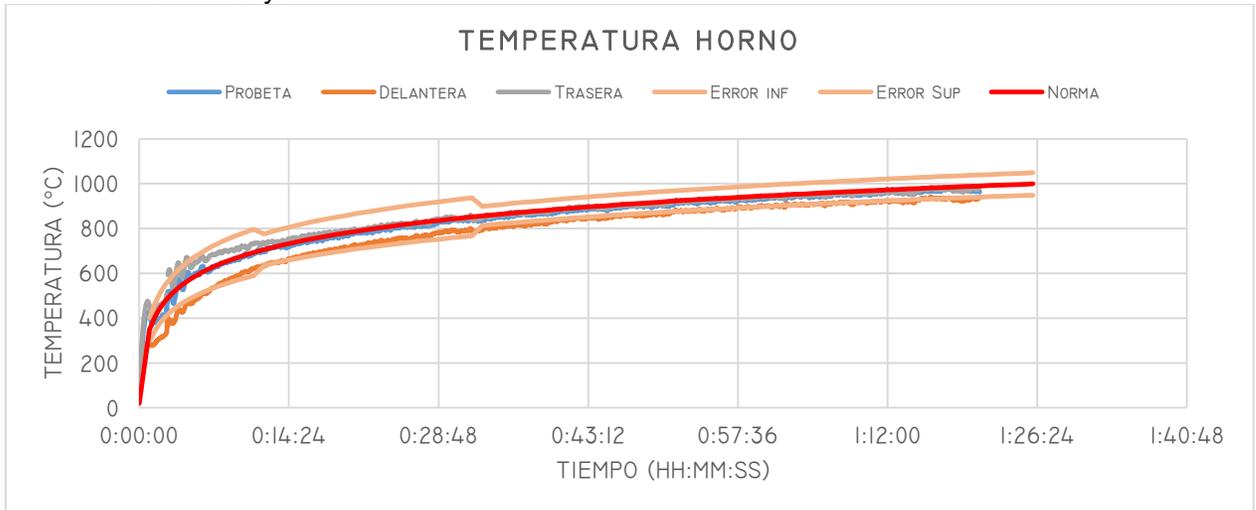




○ Ensayo 3

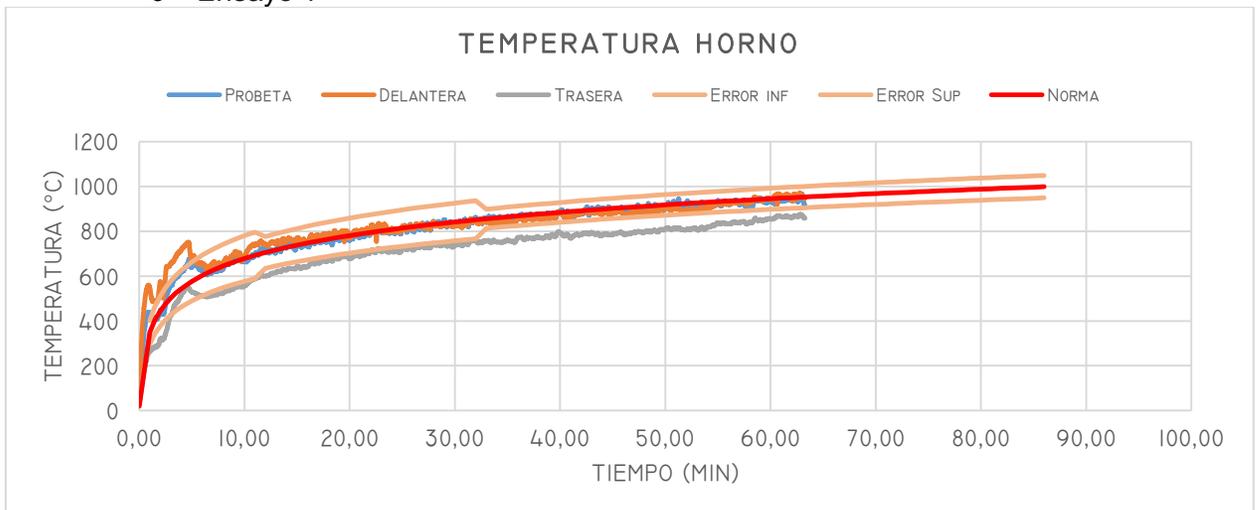


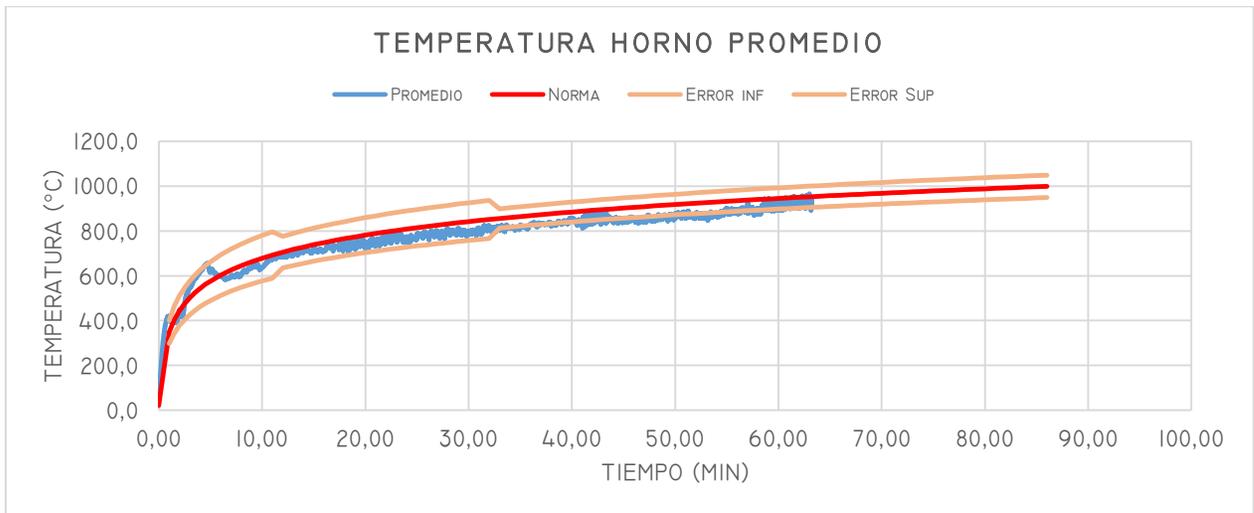
- Ensayo 4



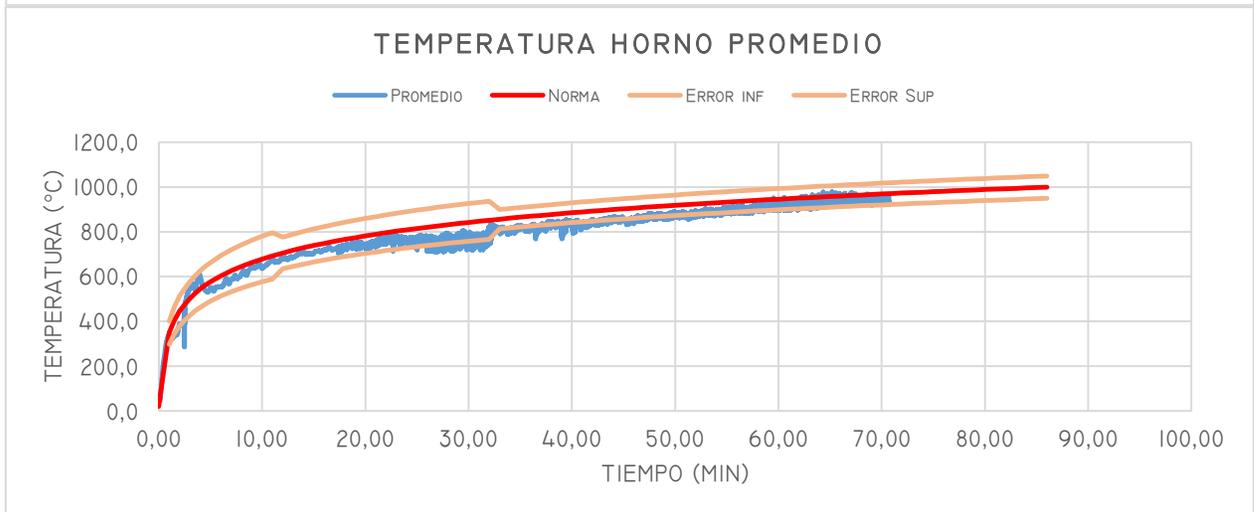
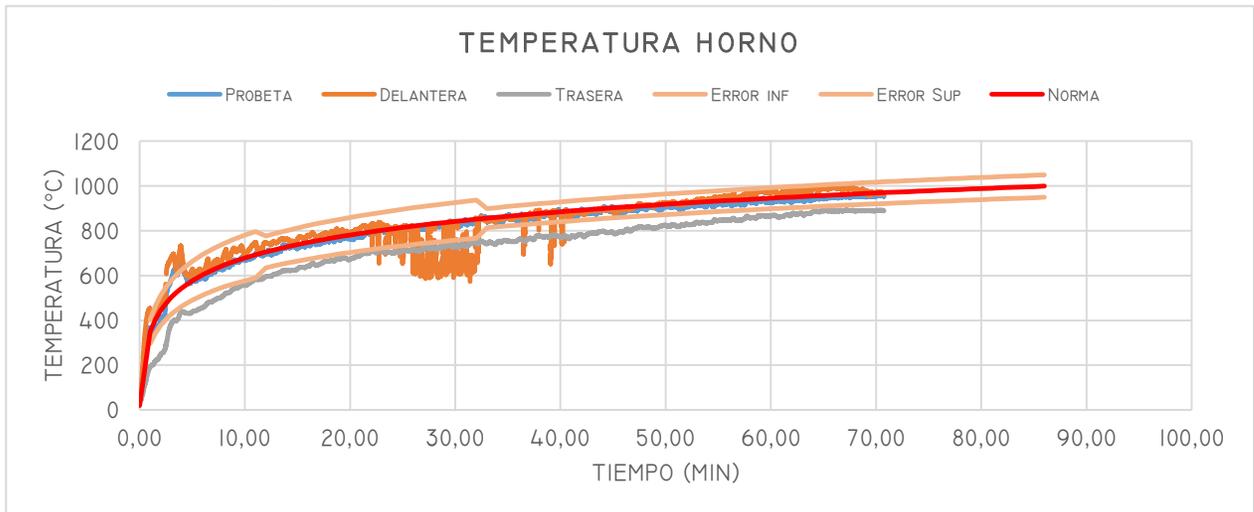
- MLE

- Ensayo 1

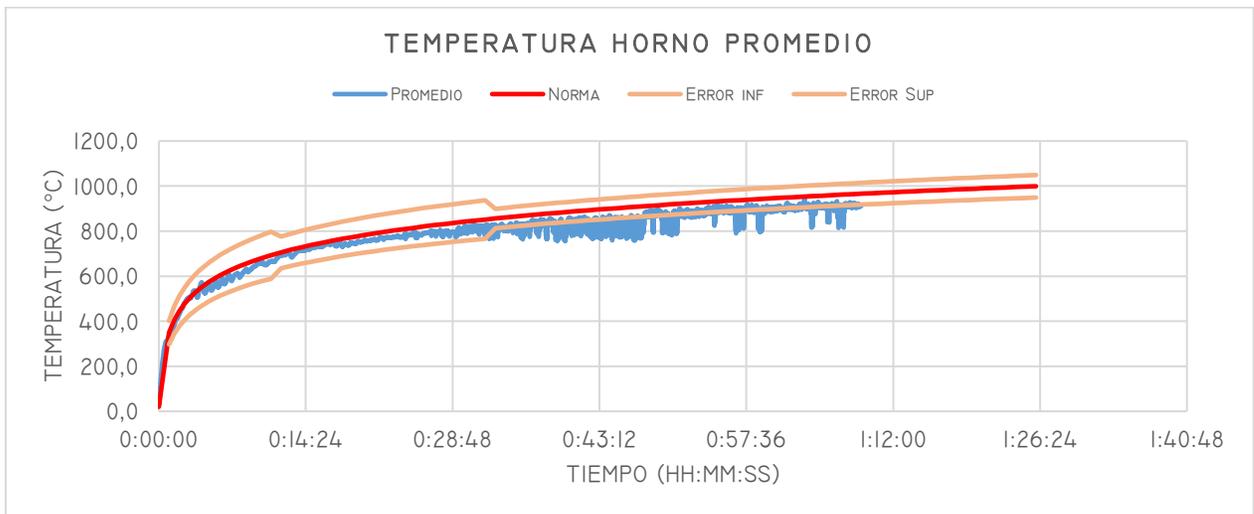
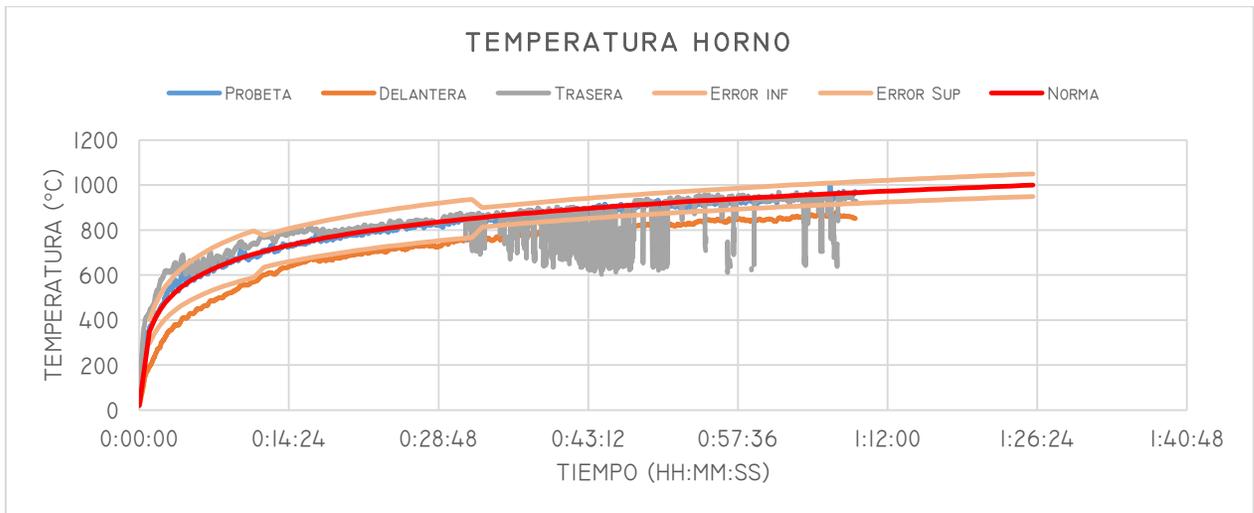




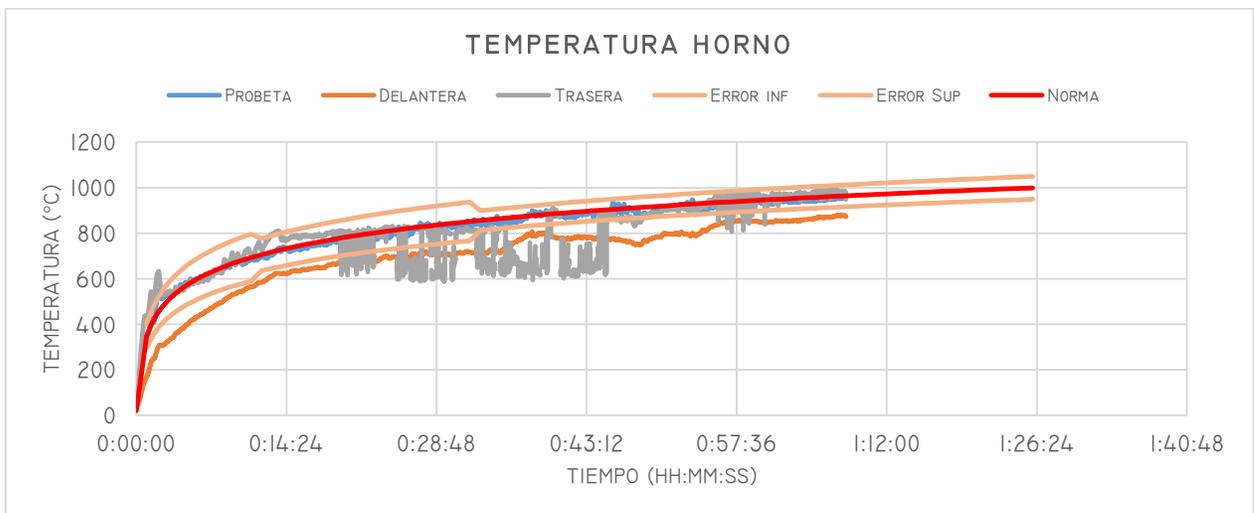
○ Ensayo 2

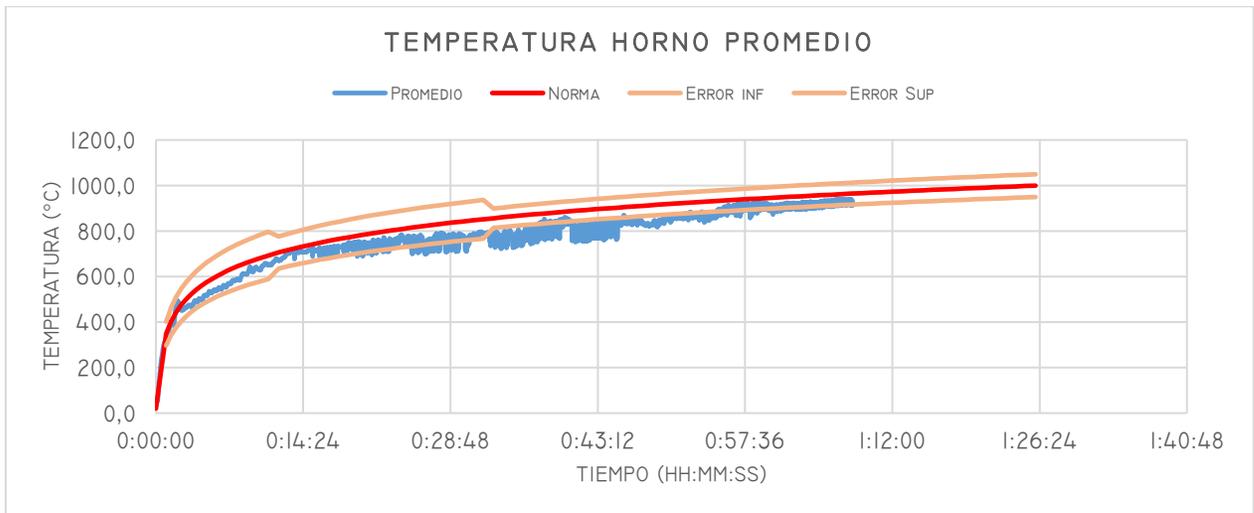


○ Ensayo 3

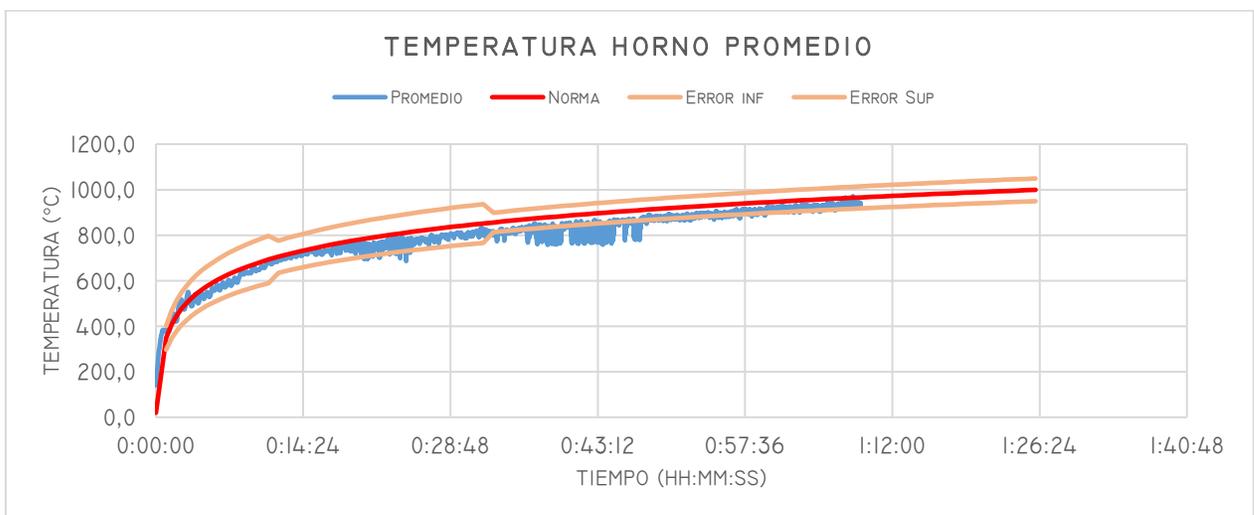
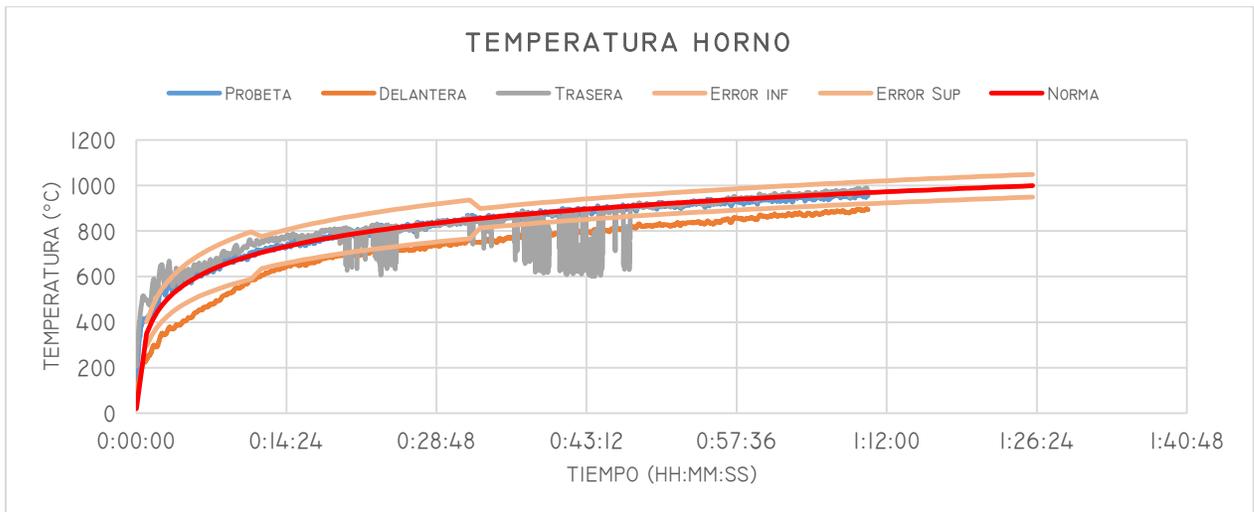


○ Ensayo 4

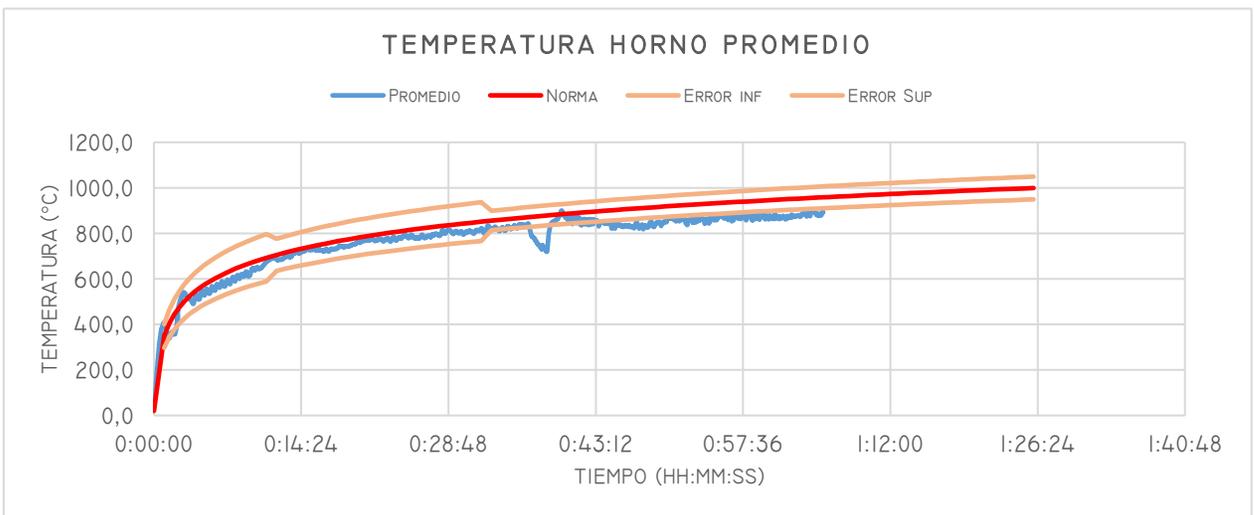
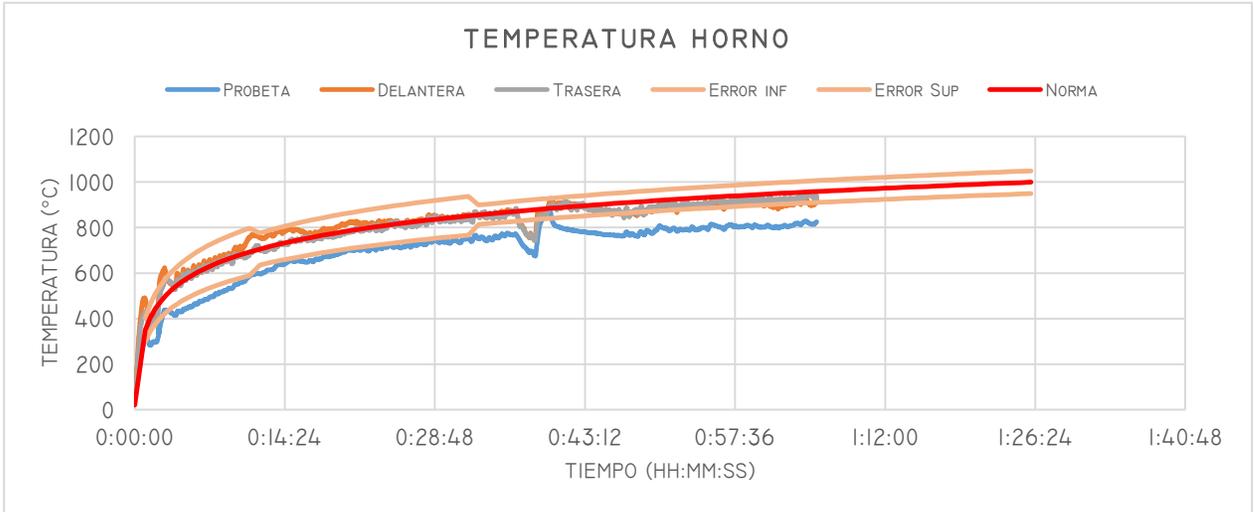




○ Ensayo 5



○ Ensayo 6



ANEXO E

Programación de curva tiempo-temperatura

		Delta tº	tiempo (seg)	tiempo (min)	Delta T	Error Inf	Error Sup
Ciclo 1	0	0	0	0,0	20		
	1	60	60	1,0	349	297	402
	2	30	90	1,5	404	344	465
	3	30	120	2,0	445	378	511
	4	30	150	2,5	476	405	548
	5	30	180	3,0	502	427	578
	6	30	210	3,5	525	446	603
	7	30	240	4,0	544	462	625
	8	30	270	4,5	561	477	645
Ciclo 2	9	30	300	5,0	576	490	663
	0		300	5,0	576	490	663
	1	60	360	6,0	603	513	694
	2	60	420	7,0	626	532	720
	3	60	480	8,0	645	549	742
	4	60	540	9,0	663	563	762
	5	60	600	10,0	678	577	780
	6	60	660	11,0	693	623	762
	7	60	720	12,0	705	635	776
Ciclo 3	8	60	780	13,0	717	646	789
	9	60	840	14,0	728	655	801
	0		840	14,0	728	655	801
	1	60	900	15,0	739	665	812
	2	60	960	16,0	748	673	823
	3	60	1020	17,0	757	681	833
	4	60	1080	18,0	766	689	842
	5	60	1140	19,0	774	696	851
	6	60	1200	20,0	781	703	859
Ciclo 4	7	60	1260	21,0	789	710	867
	8	60	1320	22,0	796	716	875
	9	60	1380	23,0	802	722	882
	0		1380	23,0	802	722	882
	1	60	1440	24,0	809	728	889
	2	60	1500	25,0	815	733	896
	3	60	1560	26,0	820	738	902
	4	60	1620	27,0	826	743	909
	5	60	1680	28,0	832	748	915
Ciclo 5	6	60	1740	29,0	837	753	920
	7	60	1800	30,0	842	800	884
	8	60	1860	31,0	847	804	889
	9	60	1920	32,0	851	809	894
	0		1920	32,0	851	809	894
	1	60	1980	33,0	856	813	899
	2	60	2040	34,0	860	817	903
	3	60	2100	35,0	865	822	908
	4	60	2160	36,0	869	826	912
	5	60	2220	37,0	873	829	917
	6	60	2280	38,0	877	833	921

		7	60	2340	39,0	881	837	925
		8	60	2400	40,0	885	841	929
		9	60	2460	41,0	888	844	933
Ciclo	6	0		2460	41,0	888	844	933
		1	60	2520	42,0	892	847	937
		2	60	2580	43,0	896	851	940
		3	60	2640	44,0	899	854	944
		4	60	2700	45,0	902	857	947
		5	60	2760	46,0	906	860	951
		6	60	2820	47,0	909	863	954
		7	60	2880	48,0	912	866	958
		8	60	2940	49,0	915	869	961
		9	60	3000	50,0	918	872	964
Ciclo	7	0		3000	50,0	918	872	964
		1	60	3060	51,0	921	875	967
		2	60	3120	52,0	924	878	970
		3	60	3180	53,0	927	880	973
		4	60	3240	54,0	930	883	976
		5	60	3300	55,0	932	886	979
		6	60	3360	56,0	935	888	982
		7	60	3420	57,0	938	891	985
		8	60	3480	58,0	940	893	987
		9	60	3540	59,0	943	896	990
Ciclo	8	0		3540	59,0	943	896	990
		1	60	3600	60,0	945	898	993
		2	60	3660	61,0	948	900	995
		3	60	3720	62,0	950	903	998
		4	60	3780	63,0	953	905	1000
		5	60	3840	64,0	955	907	1003
		6	60	3900	65,0	957	909	1005
		7	60	3960	66,0	960	912	1008
		8	60	4020	67,0	962	914	1010
		9	60	4080	68,0	964	916	1012
Ciclo	9	0		4080	68,0	964	916	1012
		1	60	4140	69,0	966	918	1015
		2	60	4200	70,0	968	920	1017
		3	60	4260	71,0	971	922	1019
		4	60	4320	72,0	973	924	1021
		5	60	4380	73,0	975	926	1023
		6	60	4440	74,0	977	928	1026
		7	60	4500	75,0	979	930	1028
		8	60	4560	76,0	981	932	1030
		9	60	4620	77,0	983	934	1032
Ciclo	10	0		4620	77,0	983	934	1032
		1	60	4680	78,0	985	935	1034
		2	60	4740	79,0	986	937	1036
		3	60	4800	80,0	988	939	1038
		4	60	4860	81,0	990	941	1040
		5	60	4920	82,0	992	942	1042
		6	60	4980	83,0	994	944	1044
		7	60	5040	84,0	996	946	1045
		8	60	5100	85,0	997	948	1047
		9	60	5160	86,0	999	949	1049

ANEXO F

Curva tiempo temperatura según norma americana ASTM E119-16^a.

Time h:min	Temperature, °F	Area Above 68°F Base		Temperature, °C	Area Above 20°C Base	
		°F-min	°F-h		°C-min	°C-h
0:00	68	00	0	20	00	0
0:05	1 000	2 330	39	538	1 290	22
0:10	1 300	7 740	129	704	4 300	72
0:15	1 399	14 150	236	760	7 860	131
0:20	1 462	20 970	350	795	11 650	194
0:25	1 510	28 050	468	821	15 590	260
0:30	1 550	35 360	589	843	19 650	328
0:35	1 584	42 860	714	862	23 810	397
0:40	1 613	50 510	842	878	28 060	468
0:45	1 638	58 300	971	892	32 390	540
0:50	1 661	66 200	1 103	905	36 780	613
0:55	1 681	74 220	1 237	916	41 230	687
1:00	1 700	82 330	1 372	927	45 740	762
1:05	1 718	90 540	1 509	937	50 300	838
1:10	1 735	98 830	1 647	946	54 910	915
1:15	1 750	107 200	1 787	955	59 560	993
1:20	1 765	115 650	1 928	963	64 250	1 071
1:25	1 779	124 180	2 070	971	68 990	1 150
1:30	1 792	132 760	2 213	978	73 760	1 229
1:35	1 804	141 420	2 357	985	78 560	1 309
1:40	1 815	150 120	2 502	991	83 400	1 390
1:45	1 826	158 890	2 648	996	88 280	1 471
1:50	1 835	167 700	2 795	1 001	93 170	1 553
1:55	1 843	176 550	2 942	1 006	98 080	1 635
2:00	1 850	185 440	3 091	1 010	103 020	1 717
2:10	1 862	203 330	3 389	1 017	112 960	1 882
2:20	1 875	221 330	3 689	1 024	122 960	2 049
2:30	1 888	239 470	3 991	1 031	133 040	2 217
2:40	1 900	257 720	4 295	1 038	143 180	2 386
2:50	1 912	276 110	4 602	1 045	153 390	2 556
3:00	1 925	294 610	4 910	1 052	163 670	2 728
3:10	1 938	313 250	5 221	1 059	174 030	2 900
3:20	1 950	332 000	5 533	1 066	184 450	3 074
3:30	1 962	350 890	5 848	1 072	194 940	3 249
3:40	1 975	369 890	6 165	1 079	205 500	3 425
3:50	1 988	389 030	6 484	1 086	216 130	3 602
4:00	2 000	408 280	6 805	1 093	226 820	3 780
4:10	2 012	427 670	7 128	1 100	237 590	3 960
4:20	2 025	447 180	7 453	1 107	248 430	4 140
4:30	2 038	466 810	7 780	1 114	259 340	4 322
4:40	2 050	486 560	8 110	1 121	270 310	4 505
4:50	2 062	506 450	8 441	1 128	281 360	4 689
5:00	2 075	526 450	8 774	1 135	292 470	4 874
5:10	2 088	546 580	9 110	1 142	303 660	5 061
5:20	2 100	566 840	9 447	1 149	314 910	5 248
5:30	2 112	587 220	9 787	1 156	326 240	5 437
5:40	2 125	607 730	10 129	1 163	337 630	5 627
5:50	2 138	628 360	10 473	1 170	349 090	5 818
6:00	2 150	649 120	10 819	1 177	360 620	6 010
6:10	2 162	670 000	11 167	1 184	372 230	6 204
6:20	2 175	691 010	11 517	1 191	383 900	6 398
6:30	2 188	712 140	11 869	1 198	395 640	6 594
6:40	2 200	733 400	12 223	1 204	407 450	6 791
6:50	2 212	754 780	12 580	1 211	419 330	6 989
7:00	2 225	776 290	12 938	1 218	431 270	7 188

Time h:min	Temperature, °F	Area Above 68°F Base		Temperature, °C	Area Above 20°C Base	
		°F-min	°F-h		°C-min	°C-h
7:10	2 238	797 920	13 299	1 225	443 290	7 388
7:20	2 250	819 680	13 661	1 232	455 380	7 590
7:30	2 262	841 560	14 026	1 239	467 540	7 792
7:40	2 275	863 570	14 393	1 246	479 760	7 996
7:50	2 288	885 700	14 762	1 253	492 060	8 201
8:00	2 300	907 960	15 133	1 260	504 420	8 407

ANEXO G

En las tablas se resumen las áreas, valores de las bases y anchos obtenidos de la modelación de las secciones de mini-muestras de MLE.

Probeta	Muestra	Mini muestra	Cara	Área [mm ²]	Base [mm]	Ancho [mm]	Ancho promedio [mm]
1	1	I	1	5158,5	147,28	35,03	34,25
			2	4782,1	142,83	33,48	
		II	1	5274,98	148,66	35,48	35,29
			2	5094,38	145,18	35,09	
		III	1	4771,6	141,67	33,68	34,07
			2	4943,03	143,48	34,45	
		IV	1	4791,13	142,27	33,68	34,51
			2	5124,8	145,01	35,34	
		V	1	4368,8	142,44	30,67	31,87
			2	4728,79	142,98	33,07	
		VI	1	4447,49	137,36	32,38	31,41
			2	4239,18	139,28	30,44	
	2	I	1	4860,09	147,87	32,87	33,46
			2	5048,31	148,26	34,05	
		II	1	4870,14	147,09	33,11	32,73
			2	4684,67	144,84	32,34	
		III	1	4699,85	146,75	32,03	32,22
			2	4780,78	147,5	32,41	
		IV	1	4556,96	145,62	31,29	31,56
			2	4567,28	143,54	31,82	
		V	1	4847,61	146,26	33,14	33,62
			2	4865,55	142,72	34,09	
		VI	1	4949,7	143,94	34,39	34,67
			2	4966,47	142,09	34,95	
3	I	1	4452,97	151,69	29,36	29,49	
		2	4380,64	147,88	29,62		
	II	1	4515,79	151,74	29,76	29,20	
		2	4367,63	152,45	28,65		
	III	1	4489,43	151,31	29,67	29,51	
		2	4431,53	150,96	29,36		
	IV	1	4396,62	149,56	29,40	30,32	
		2	4663,96	149,29	31,24		
	V	1	4908,73	151,28	32,45	32,53	
		2	4905,14	150,37	32,62		
	VI	1	4717,2	150,98	31,24	29,03	
		2	3378,54	126,01	26,81		

Probeta	Muestra	Mini muestra	Cara	Área [mm ²]	Base [mm]	Ancho [mm]	Ancho promedio [mm]
2	1	I	1	4764,81	152,52	31,24	32,21
			2	4931,44	148,65	33,17	
		II	1	4836,88	153,67	31,48	30,79
			2	4472,87	148,56	30,11	
		III	1	4763,92	144,34	33,00	31,87
			2	4576	148,92	30,73	
		IV	1	5127,77	155,16	33,05	33,23
			2	4910,56	146,97	33,41	

		V	1	4878,83	153,96	31,69	30,87		
			2	4421,17	147,17	30,04			
		VI	1	4820,82	152,53	31,61		31,42	
			2	4620,95	147,98	31,23			
	2	I	I	1	5227,25	148,84	35,12	34,56	
				2	5042,29	148,28	34,01		
			II	1	5286,22	147,82	35,76		35,33
				2	5045,5	144,59	34,90		
			III	1	5615,23	147,61	38,04		36,73
				2	5159,64	145,71	35,41		
		IV	1	4863,23	143,33	33,93	35,15		
			2	5279,16	145,14	36,37			
V		1	5290,03	144,21	36,68	35,61			
		2	5039,35	145,88	34,54				
VI		1	5147,27	140,88	36,54	36,16			
		2	5060,88	141,41	35,79				
3	I	I	1	5650,13	148,66	38,01	35,52		
			2	4823,93	146,02	33,04			
		II	1	5316,56	149,46	35,57		36,29	
			2	5380,57	145,42	37,00			
		III	1	4814,77	145,81	33,02		34,05	
			2	5138,3	146,49	35,08			
	IV	1	5103,59	145,81	35,00	34,27			
		2	4949,22	147,54	33,54				
	V	1	5283,79	149,52	35,34	34,24			
		2	4675,76	141,07	33,14				
	VI	1	4832,95	146,06	33,09	33,23			
		2	4711,46	141,2	33,37				

Probeta	Muestra	Mini muestra	Cara	Área [mm ²]	Base [mm]	Ancho [mm]	Ancho promedio [mm]	
3	1	I	1	3950,29	146,99	26,87	27,49	
			2	4201,84	149,54	28,10		
		II	1	3577,16	141,05	25,36		25,56
			2	3640,65	141,37	25,75		
		III	1	3807,13	144,55	26,34		26,03
			2	3628,9	141,08	25,72		
	IV	1	3609,14	142,23	25,38	25,21		
		2	3440,91	137,39	25,04			
	V	1	3828,16	139,32	27,48	27,15		
		2	3811	142,11	26,82			
	VI	1	4008,86	143,7	27,90	27,57		
		2	3896,2	143,07	27,23			
2	I	I	1	4617,22	152,99	30,18	30,73	
			2	4675,35	149,45	31,28		
		II	1	4255,38	149,14	28,53		28,30
			2	4170,1	148,54	28,07		
		III	1	4556,54	153,32	29,72		28,89
			2	4271,59	152,22	28,06		
	IV	1	4121,14	147,87	27,87	27,70		
		2	4108,13	149,26	27,52			
	V	1	4124,22	147,36	27,99	27,84		
		2	4093,17	147,82	27,69			
	VI	1	4180,13	146,04	28,62	28,00		

			2	3993,11	145,84	27,38	
	3	I	1	3936,48	150,56	26,15	26,81
			2	4216,35	153,42	27,48	
		II	1	3931,88	152,95	25,71	26,57
			2	4413,12	160,87	27,43	
		III	1	4066,78	148,23	27,44	26,67
			2	3927,98	151,66	25,90	
		IV	1	4862,58	158,96	30,59	29,41
			2	4431,88	156,98	28,23	
		V	1	4438,39	155,36	28,57	29,25
			2	4828,17	161,34	29,93	
		VI	1	3937,99	146,13	26,95	27,10
			2	4001,92	146,8	27,26	

Probeta	Muestra	Mini muestra	Cara	Área [mm ²]	Base [mm]	Ancho [mm]	Ancho promedio [mm]
4	1	I	1	3420,75	145,57	23,50	22,42
			2	3035,41	142,22	21,34	
		II	1	3325,27	145,06	22,92	21,85
			2	2886,36	138,97	20,77	
		III	1	3389,05	145,16	23,35	23,15
			2	3243,44	141,29	22,96	
		IV	1	3277,41	143,77	22,80	23,18
			2	3403,07	144,42	23,56	
		V	1	3076,39	142,91	21,53	22,24
			2	3226,61	140,59	22,95	
		VI	1	3283,25	142,6	23,02	22,07
			2	2961,35	140,22	21,12	
	2	I	1	3521,39	148,66	23,69	24,37
			2	3731,14	148,93	25,05	
		II	1	3695	150,93	24,48	24,32
			2	3608,01	149,32	24,16	
		III	1	3484,55	145,23	23,99	23,90
			2	3534,33	148,47	23,81	
		IV	1	3946,27	144,33	27,34	25,92
			2	3566,98	145,64	24,49	
		V	1	4052,7	148,45	27,30	27,89
			2	4330,4	152,03	28,48	
		VI	1	4034,81	147,97	27,27	26,99
			2	3935,77	147,39	26,70	
3	I	1	3420,44	148,76	22,99	22,51	
		2	3180,52	144,42	22,02		
	II	1	3635,6	154,47	23,54	23,10	
		2	3433,92	151,58	22,65		
	III	1	4299,62	153,37	28,03	25,57	
		2	3452,37	149,43	23,10		
	IV	1	3909,24	146,91	26,61	26,95	
		2	4080,52	149,49	27,30		
	V	1	4335,31	155,08	27,96	27,28	
		2	3878,98	145,81	26,60		
	VI	1	4279,15	153,02	27,96	27,05	
		2	3873,64	148,2	26,14		

Probeta	Muestra	Mini muestra	Cara	Área [mm ²]	Base [mm]	Ancho [mm]	Ancho promedio [mm]
5	1	I	1	4220,42	145,68	28,97	29,69
			2	4509,86	148,32	30,41	
		II	1	4249,19	146,92	28,92	29,17
			2	4322,09	146,94	29,41	
		III	1	4591,05	149,09	30,79	30,31
			2	4537,25	152,08	29,83	
		IV	1	4483,04	149,93	29,90	30,28
			2	4636,31	151,19	30,67	
		V	1	4613,32	144,29	31,97	30,46
			2	4168,42	144,04	28,94	
		VI	1	4539,08	145,15	31,27	31,52
			2	4678,69	147,32	31,76	
	2	I	1	4120,88	150,95	27,30	27,81
			2	4388,06	154,94	28,32	
		II	1	4372,69	154,71	28,26	27,93
			2	4245,44	153,81	27,60	
		III	1	4620,47	150,23	30,76	29,06
			2	4055,83	148,27	27,35	
		IV	1	4562,57	150,63	30,29	30,23
			2	4471,8	148,25	30,16	
		V	1	4280,51	149,12	28,71	29,33
			2	4459,64	148,92	29,95	
		VI	1	4461,61	151,05	29,54	28,92
			2	4203,65	148,55	28,30	
3	I	1	3578,43	146,91	24,36	23,50	
		2	3243,49	143,24	22,64		
	II	1	3866,41	147,7	26,18	25,27	
		2	3631,68	149,03	24,37		
	III	1	4120,82	146,84	28,06	26,91	
		2	3655,85	141,94	25,76		
	IV	1	3850,91	143,61	26,82	26,68	
		2	3671,94	138,38	26,54		
	V	1	3642,51	143,63	25,36	26,33	
		2	3983,75	145,97	27,29		
	VI	1	3549,81	142,86	24,85	24,91	
		2	3650	146,11	24,98		

Probeta	Muestra	Mini muestra	Cara	Área [mm ²]	Base [mm]	Ancho [mm]	Ancho promedio [mm]
6	1	I	1	3861,32	140,56	27,47	27,90
			2	3987,19	140,76	28,33	
		II	1	4157,85	139,12	29,89	29,34
			2	4196,4	145,73	28,80	
		III	1	4923,5	143,37	34,34	32,23
			2	4160,17	138,09	30,13	
		IV	1	5257,15	150,62	34,90	34,69
			2	4961,22	143,88	34,48	
		V	1	4542,27	146,09	31,09	32,29
			2	5010,34	149,66	33,48	
		VI	1	4402,87	146,01	30,15	30,17
			2	4437,62	147,04	30,18	
	2	I	1	4119,22	146,46	28,13	27,60
			2	3977,02	146,9	27,07	

		II	1	4029,61	148,37	27,16	27,12	
			2	3947,67	145,78	27,08		
		III	1	3875,75	147,67	26,25	26,06	
			2	3761,77	145,38	25,88		
		IV	1	3596,14	147,43	24,39	25,18	
			2	3869,6	148,99	25,97		
	V	1	3944,88	147,58	26,73	25,43		
		2	3599,26	149,21	24,12			
	VI	1	3897,05	144,94	26,89	26,59		
		2	3813,16	145,08	26,28			
	3		I	1	3197,69	149,97	21,32	21,17
				2	3233,25	153,83	21,02	
II			1	3832,41	154,38	24,82	22,90	
			2	3119,84	148,8	20,97		
III			1	4295,42	155,05	27,70	25,69	
			2	3517,2	148,53	23,68		
IV		1	4413,38	152,05	29,03	28,49		
		2	4374,09	156,52	27,95			
V		1	3398,72	142,82	23,80	26,15		
		2	4328,51	151,9	28,50			
VI		1	3129,63	123,11	25,42	24,33		
		2	2700,71	116,25	23,23			

Probeta	Muestra	Mini muestra	Cara	Área [mm ²]	Base [mm]	Ancho [mm]	Ancho promedio [mm]
7	1	I	1	4564,28	144,22	31,65	31,56
			2	4518,51	143,61	31,46	
		II	1	4468,72	147,12	30,37	31,25
			2	4670,4	145,37	32,13	
		III	1	4895,16	145,64	33,61	32,33
			2	4659,44	150,05	31,05	
		IV	1	5271,18	149,41	35,28	34,66
			2	5058,11	148,62	34,03	
		V	1	4867,77	148,05	32,88	33,51
			2	5036,28	147,55	34,13	
		VI	1	4861,23	148,98	32,63	32,16
			2	4537,07	143,18	31,69	
	2	I	1	4544,15	150,94	30,11	30,08
			2	4487,68	149,3	30,06	
		II	1	4069,16	150,97	26,95	28,51
			2	4514,19	150,09	30,08	
		III	1	4496,06	151,11	29,75	27,85
			2	3852,42	148,46	25,95	
		IV	1	4003,39	143,42	27,91	27,90
			2	3989,89	143,11	27,88	
		V	1	4726,37	145,52	32,48	30,82
			2	4306,17	147,63	29,17	
		VI	1	4302,87	145,34	29,61	30,50
			2	4580,65	145,86	31,40	
3	I	1	4319,03	147,18	29,35	28,87	
		2	4327,98	152,42	28,40		
		1	4334,29	148,37	29,21		
	II	1	4181,02	145,66	28,70	28,96	
		2	4181,02	145,66	28,70		
	III	1	4820,06	153,45	31,41	29,98	

	IV	2	4164,12	145,83	28,55	30,67		
		1	4705,87	154,46	30,47			
		2	4691,35	152	30,86			
		V	1	4321,34	145,95		29,61	29,85
			2	4545,58	151,09		30,09	
		VI	1	4336,16	149,68		28,97	30,08
2	4790,56		153,56	31,20				

Probeta	Muestra	Mini muestra	Cara	Área [mm ²]	Base [mm]	Ancho [mm]	Ancho promedio [mm]	
8	1	I	1	5031,43	154,52	32,56	33,31	
			2	5283,57	155,11	34,06		
		II	1	5361,27	159,67	33,58		33,26
			2	5029,99	152,73	32,93		
		III	1	5224,85	159,27	32,80		34,18
			2	5673,26	159,54	35,56		
		IV	1	5030,34	156,41	32,16		34,08
			2	5839,95	162,27	35,99		
		V	1	4240,74	155,5	27,27		30,15
			2	5223,09	158,1	33,04		
		VI	1	3729,38	156,83	23,78		25,56
			2	4245,13	155,22	27,35		
	2	I	1	3517,68	146,02	24,09	23,78	
			2	3443	146,7	23,47		
		II	1	3736,51	150,34	24,85		23,76
			2	3266,79	144,18	22,66		
		III	1	3391,55	145,74	23,27		23,17
			2	3563,35	154,5	23,06		
		IV	1	3036,01	143,28	21,19		21,26
			2	3074,48	144,13	21,33		
		V	1	3209,56	148,69	21,59		21,54
			2	3119,55	145,12	21,50		
		VI	1	3413,85	150,52	22,68		23,62
			2	3685,56	150,03	24,57		
3	I	1	3940,24	145,79	27,03	27,63		
		2	4104,68	145,41	28,23			
	II	1	4100,42	147,03	27,89		28,47	
		2	4459,77	153,46	29,06			
	III	1	3950,48	143,57	27,52		27,47	
		2	4079,24	148,71	27,43			
	IV	1	3667,1	142,6	25,72		26,38	
		2	3908,47	144,48	27,05			
	V	1	3956,68	140,78	28,11		27,53	
		2	3970,86	147,37	26,94			
	VI	1	3971,45	141,49	28,07		28,41	
		2	4168,44	145,01	28,75			

Probeta	Muestra	Mini muestra	Cara	Área [mm ²]	Base [mm]	Ancho [mm]	Ancho promedio [mm]	
9	1	I	1	6003,43	149,91	40,05	39,90	
			2	6090,57	153,23	39,75		
		II	1	6282,18	156	40,27		39,23
			2	5768,48	151,01	38,20		
		III	1	5735,05	149,33	38,41		38,53
			2	5761,4	149,02	38,66		

		IV	1	6232,31	153,11	40,70	40,39
			2	6234,61	155,61	40,07	
		V	1	6298,13	153,81	40,95	40,17
			2	5893,23	149,61	39,39	
		VI	1	5994,38	149,3	40,15	39,89
			2	5873,67	148,21	39,63	
	2	I	1	5376,6	153,3	35,07	35,66
			2	5620,6	155,06	36,25	
		II	1	5270,3	154,27	34,16	34,40
			2	5304,59	153,18	34,63	
		III	1	5009,92	150,57	33,27	33,77
			2	5312,08	155,02	34,27	
		IV	1	5348,22	155,63	34,36	35,09
			2	5689,14	158,89	35,81	
		V	1	5811,43	152,93	38,00	36,09
			2	5201,06	152,13	34,19	
		VI	1	5443,97	146,11	37,26	37,34
			2	5439,02	145,37	37,42	
3	I	1	4895,75	135,95	36,01	36,83	
		2	5837,77	155,05	37,65		
	II	1	5221,92	147,93	35,30	36,40	
		2	5646,55	150,56	37,50		
	III	1	5554,96	148,98	37,29	37,93	
		2	5801,16	150,37	38,58		
	IV	1	5505,98	148,18	37,16	37,11	
		2	5546	149,6	37,07		
	V	1	5306,53	149,9	35,40	36,53	
		2	5674,73	150,72	37,65		
	VI	1	5054,89	145,11	34,83	35,04	
		2	5167,41	146,63	35,24		

Probeta	Muestra	Mini muestra	Cara	Área [mm ²]	Base [mm]	Ancho [mm]	Ancho promedio [mm]
10	1	I	1	5199,83	148,68	34,97	36,22
			2	5440,34	145,21	37,47	
		II	1	5233,68	150,85	34,69	34,45
			2	5127,7	149,91	34,21	
		III	1	5274,5	150,7	35,00	34,26
			2	4975,05	148,44	33,52	
		IV	1	5120,06	147,57	34,70	34,36
			2	5033,85	147,91	34,03	
		V	1	5075,73	149,48	33,96	33,82
			2	4939,91	146,65	33,69	
		VI	1	4890,82	145,17	33,69	33,91
			2	4929,55	144,41	34,14	
	2	I	1	4652,3	146,74	31,70	33,69
			2	5262,58	147,53	35,67	
		II	1	4777,77	148,14	32,25	32,18
			2	4838,21	150,72	32,10	
		III	1	4832,37	150,19	32,18	31,80
			2	4670,63	148,64	31,42	
IV	1	4663,56	146,28	31,88	31,22		
	2	4441,69	145,31	30,57			
V	1	4827,06	148,86	32,43	31,80		

	VI	2	4570,55	146,59	31,18	32,08	
		1	4697,25	147,15	31,92		
		2	4730,11	146,69	32,25		
	3	I	1	5031,42	152,27	33,04	32,92
			2	5061,61	154,35	32,79	
		II	1	5216,79	153,41	34,01	33,83
			2	5296,72	157,34	33,66	
		III	1	5148,94	152,22	33,83	33,96
			2	5148,22	151,04	34,09	
	IV	1	5448,67	152,1	35,82	34,87	
		2	5182,95	152,82	33,92		
	V	1	5542,99	148	37,45	37,08	
2		5698,86	155,22	36,71			
VI	1	4974,86	146,53	33,95	35,45		
	2	5450,14	147,51	36,95			

Probeta	Muestra	Mini muestra	Cara	Área [mm ²]	Base [mm]	Ancho [mm]	Ancho promedio [mm]
11	1	I	1	4492,37	143,63	31,28	31,32
			2	4610,7	146,98	31,37	
		II	1	4541,38	146,2	31,06	31,40
			2	4791,46	151,01	31,73	
		III	1	4353,04	138,37	31,46	30,91
			2	3977,69	131	30,36	
		IV	1	4726,66	145,83	32,41	31,48
			2	4130,86	135,2	30,55	
		V	1	5010,48	150,98	33,19	32,44
			2	4619,13	145,76	31,69	
		VI	1	4623,69	149,63	30,90	31,97
			2	4890,79	148,01	33,04	
	2	I	1	4313,59	148,4	29,07	27,37
			2	3642,32	141,83	25,68	
		II	1	5278,7	164,19	32,15	30,73
			2	4180,45	142,62	29,31	
		III	1	4212,33	145,89	28,87	27,72
			2	3676,66	138,35	26,58	
		IV	1	4398,88	148,74	29,57	28,98
			2	4311,82	151,91	28,38	
		V	1	3536,6	136,34	25,94	25,85
			2	3388,59	131,54	25,76	
		VI	1	3542,32	135,02	26,24	26,77
			2	3969,8	145,42	27,30	
3	I	1	3474,09	146,03	23,79	24,47	
		2	3713,27	147,65	25,15		
	II	1	3672,49	144,89	25,35	24,04	
		2	3152,16	138,66	22,73		
	III	1	3349,8	137,7	24,33	24,72	
		2	3660,91	145,77	25,11		
	IV	1	3837,6	144,33	26,59	25,82	
		2	3598,11	143,59	25,06		
	V	1	3682,5	145,18	25,37	24,80	
		2	3217,4	132,79	24,23		
	VI	1	3419,29	140,71	24,30	23,66	
		2	3090,82	134,31	23,01		

Probeta	Muestra	Mini muestra	Cara	Área [mm ²]	Base [mm]	Ancho [mm]	Ancho promedio [mm]
12	1	I	1	4429,61	152,52	29,04	27,79
			2	3725,36	140,41	26,53	
		II	1	3674,71	139,1	26,42	27,76
			2	4157,36	142,86	29,10	
		III	1	3936,88	137,89	28,55	29,73
			2	4624,82	149,61	30,91	
		IV	1	4101,13	140,68	29,15	30,07
			2	4916,79	158,66	30,99	
		V	1	4757,62	156	30,50	30,23
			2	4538,3	151,43	29,97	
		VI	1	4415	149,24	29,58	28,25
			2	3928,97	145,98	26,91	
	2	I	1	3475	144,5	24,05	26,23
			2	4275,76	150,54	28,40	
		II	1	3369,09	141,92	23,74	23,29
			2	3304,47	144,66	22,84	
		III	1	3655,86	144,81	25,25	25,38
			2	3836,71	150,4	25,51	
		IV	1	3646,37	141,92	25,69	24,88
			2	3450,9	143,4	24,06	
		V	1	3901,72	146,97	26,55	26,22
			2	3720,83	143,72	25,89	
		VI	1	4506,77	153,97	29,27	27,67
			2	3718,32	142,67	26,06	
3	I	1	4097	139,77	29,31	29,09	
		2	4144,54	143,55	28,87		
	II	1	4292,41	146,5	29,30	28,60	
		2	3921,69	140,56	27,90		
	III	1	4221,61	146,76	28,77	28,45	
		2	4120,46	146,5	28,13		
	IV	1	3954,3	143,15	27,62	28,18	
		2	4290,94	149,27	28,75		
	V	1	4292,91	148,33	28,94	28,06	
		2	3889,7	143,12	27,18		
	VI	1	3773,78	145,12	26,00	26,96	
		2	4098,44	146,8	27,92		

ANEXO H

- Ensayos Preliminares

Se realizan 7 ensayos preliminares para comprobar el comportamiento del horno de dimensiones reducidas y el de las probetas frente a la acción del fuego. Estos ensayos tuvieron como propósito validar el uso simultáneo de dos ventanas del horno y comprobar el adecuado control del desarrollo de la curva tiempo respetando las tolerancias permitidas.

En primera instancia, se realizan ensayos sin material combustible (sin probetas susceptibles a combustión) para comprobar el adecuado funcionamiento del horno y del controlador al momento de seguir la curva tiempo-temperatura.

Asegurado el adecuado seguimiento de la curva tiempo-temperatura, se realizaron 5 ensayos quemando una probeta por vez (se utiliza una ventana). Estos ensayos preliminares tienen como fin estudiar el comportamiento del horno cuando se instalan probetas de material combustible y como esto afecta el seguimiento de la curva.

Finalmente, para simular los ensayos finales, se ejecutan 2 ensayos utilizando las ventanas 1 y 2, permitiendo estudiar el comportamiento del horno y asimilar el uso de la tarjeta de adquisición y su software.

Para llevar a cabo los 7 ensayos de puesta en marcha y considerando las cantidades descritas se requirió de 9 probetas de madera aserrada.

No se ensayaron probetas de madera laminada encolada ya que no estuvieron disponibles dentro de los plazos correspondientes al comienzo de los ensayos preliminares.

- Calculo de Madera Aserrada

La estimación de la cantidad de madera se hace con vigas de largo 3200 mm la cual es la medida comercial estándar.

El número de piezas de 600 mm que se pueden obtener de una viga de madera comercial son:

$$n^{\circ} \text{ tablas } 600 \text{ mm por viga} = \frac{3200}{600} = 5.33$$

Se obtienen 5 piezas por cada viga, para cada probeta se necesitan 6 piezas de esta medida. El total de piezas de 600 mm requeridas son:

$$n^{\circ} \text{ de tablas } 600 \text{ mm totales} = 6 * 9 = 54$$

El cálculo de vigas totales requeridas es:

$$Vigas = \frac{54}{5} = 10.8$$

Se requieren 11 vigas de Pino Radiata de 4" cepilladas de espesor.

- Ensayos de Resistencia al Fuego
 - Madera Aserrada

Tabla 39. Resumen probetas madera aserrada

Especie maderera	Nº Probetas	Nº Ensayos
Pino Radiata	9	5
Pino Oregón	10	5
Roble	8	4

El cálculo de la cantidad de madera se hace con vigas de largo 3200 mm, correspondiendo a la medida comercial estándar para el pino.

- Cálculo de Pino Radiata

A diferencia de las probetas para los ensayos preliminares este estudio requiere la determinación de la densidad y el contenido de humedad de las muestras. Para estos efectos se dejan sobrantes de 100 mm en cada muestra.

La estimación consideró las muestras de 600 mm de largo más los sobrantes.

De cada pieza de 3200 mm de largo se pueden obtener:

$$(600 + 100) * 2 + 600 * 3 = 3200 \text{ mm}$$

$$(600 + 100) * 4 = 2800 \text{ mm}$$

Se pueden obtener 2 muestras con su respectivo sobrante y 2 soportes. La cantidad de muestras que se requieren para todos los ensayos son

$$n^{\circ} \text{ muestras totales} = 4 * 9 = 36$$

$$n^{\circ} \text{ soportes totales} = 2 * 9 = 18$$

Se necesitan 6 vigas para cumplir con la cantidad de soportes, con esta configuración se obtienen a su vez 12 muestras, por lo que aún faltan 24 de estas para completar lo requerido. Obteniendo 4 muestras de una viga de 3200 mm son necesarias 6 vigas más. En total son 12 vigas de Pino Radiata.

- Cálculo de Pino Oregón y Roble

El cálculo se hace de la misma forma que en el caso del pino Radiata solo que se necesita una probeta menos

$$n^{\circ} \text{ muestras totales} = 4 * 8 = 32$$

$$n^{\circ} \text{ soportes totales} = 2 * 8 = 16$$

La cantidad de soportes se satisface con 6 vigas, para obtener las 20 muestras faltantes se necesitan 5 vigas, sumando un total de 11 vigas.

- Adhesivo

Para la estimación del adhesivo, se trabaja con razón gramaje/esparcido entregado por la empresa Oxiquim de $0.350 \frac{kg}{m^2}$.

- Madera aserrada

El área de unión en las probetas

$$\text{Area de union} = 600 * 90 = 54000 \text{ mm}^2 = 0.054 \text{ m}^2$$

Por probeta se tienen 5 uniones.

$$\text{Area de union probeta} = 0.054 \text{ m}^2 * 5 = 0.27 \text{ m}^2$$

- Ensayos preliminares

En los ensayos de calibración se requieren 9 probetas.

$$\text{Area de union Total} = 0.27 \text{ m}^2 * 9 = 2.43 \text{ m}^2$$

$$\text{Cantidad de adhesivo} = 0.35 \frac{kg}{m^2} * 2.43 \text{ m}^2 = 0.851 \text{ kg}$$

- Ensayos de Resistencia al Fuego

- Pino Radiata

Para los ensayos de pino Radiata se utilizan 9 probetas

$$\text{Area de union Total} = 0.27 \text{ m}^2 * 9 = 2.43 \text{ m}^2$$

$$\text{Cantidad de adhesivo} = 0.35 \frac{kg}{m^2} * 2.43 \text{ m}^2 = 0.851 \text{ kg}$$

- Pino Oregón

Para los ensayos de pino Oregón se utilizan 8 probetas

$$\text{Area de union Total} = 0.27 \text{ m}^2 * 8 = 2.16 \text{ m}^2$$

$$\text{Cantidad de adhesivo} = 0.35 \frac{kg}{m^2} * 2.16 \text{ m}^2 = 0.756 \text{ kg}$$

- Roble

Para los ensayos de Roble se utilizan 8 probetas

$$\text{Area de union Total} = 0.27 \text{ m}^2 * 8 = 2.16 \text{ m}^2$$

$$\text{Cantidad de adhesivo} = 0.35 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} * 2.16 \text{ m}^2 = 0.756 \text{ kg}$$

En total se necesitan 3.214 kg de adhesivo.

ANEXO I

- Pino Radiata

Muestra	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Humedad (%)
1	885,85	791,12	12,0
3	954,92	868,09	10,0
4	779,49	685,54	13,7
6	916,82	820	11,8
7	706,09	632,97	11,6
8	1150	1032	11,4
9	998,89	891,49	12,0
10	818,63	719,43	13,8
12	811,73	730,58	11,1
13	708,64	624,09	13,5
14	701,5	615,99	13,9
15	733,93	643,5	14,1
16	795,23	700,02	13,6
17	822,3	719,57	14,3
18	832,57	746,8	11,5
19	835	738	13,1
20	943,55	851,18	10,9
23	768,36	680,22	13,0
24	684,28	623,95	9,7
25	664,88	597,26	11,3
26	623,94	551,19	13,2
27	669,36	592,22	13,0
29	724,54	651,06	11,3
32	617,52	538,23	14,7
33	672,44	591,03	13,8
34	713,26	629,51	13,3
36	646,38	567,9	13,8
38	898,13	808,2	11,1
39	707,11	618,09	14,4
41	617,34	538,86	14,6
42	647,59	566,94	14,2
43	1015	915,75	10,8
44	791,34	693,71	14,1
48	604,26	533,344	13,3
49	723,84	637,09	13,6
50	623,61	546,15	14,2

Tabla 40. Contenido de humedad muestras Pino Radiata

Muestra	Densidad (kg/m ³)		
	Nominal	Anhidra	referencia
1	411	427,2	460,3
3	464	477,9	510,5
4	475	501,2	539,6
6	583	613,0	652,0
7	434	451,3	484,5

8	536	564,6	597,4
9	488	506,9	546,6
10	502	531,5	571,5
12	389	378,2	432,0
13	445	469,7	505,6
14	429	524,9	488,8
15	462	489,7	526,8
16	478	506,1	543,3
17	494	522,0	564,8
18	530	558,6	590,5
19	513	544,6	580,3
20	451	465,9	499,5
23	475	508,0	536,3
24	444	456,9	486,7
25	422	438,4	469,9
26	390	405,8	441,0
27	418	434,9	472,9
29	465	484,1	517,1
32	376	393,9	431,8
33	426	449,5	484,7
34	447	466,1	506,4
36	399	417,6	453,9
38	438	451,2	486,4
39	439	458,4	501,8
41	373	392,6	427,4
42	395	411,0	451,1
43	480	498,0	532,0
44	499	530,6	569,4
48	379	390,4	428,9
49	431	447,1	489,3
50	372	388,7	425,0

Tabla 41. Densidad muestra de Pino Radiata

- Pino Oregón

Muestras	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Humedad (%)
1	498,84	448,65	11,2
5	450,68	396,8	13,6
6	496,73	437,38	13,6
7	472,19	414,85	13,8
9	564,57	493,8	14,3
10	539,27	472,7	14,1
11	522,38	459,77	13,6
12	446,16	393,31	13,4
13	473,63	421,28	12,4
14	399,54	354,18	12,8
15	434,76	384,55	13,1
16	478,45	418,5	14,3
17	438,72	386,1	13,6
18	480,39	423,25	13,5

19	462,83	410,17	12,8
20	445,19	391,14	13,8
21	435,86	381,99	14,1
22	480,26	422,55	13,7
23	526,88	462,55	13,9
24	426,72	384,55	11,0
25	527,42	468,84	12,5
26	430,25	382,61	12,5
27	478,83	421,9	13,5
28	502,71	438,38	14,7
29	449,14	392,75	14,4
30	460,9	404,52	13,9
31	407,86	364,05	12,0
32	419,67	370,11	13,4
33	444,92	392,6	13,3
34	380,58	337,45	12,8
35	464,98	412,04	12,8
36	531,19	467,21	13,7
37	444,2	389,29	14,1
38	436,4	382,99	13,9
39	408,29	359,44	13,6
40	451,42	400,11	12,8
41	469,88	417,13	12,6
42	580,63	519,9	11,7
43	538,06	480,13	12,1
44	486,51	426,35	14,1

Tabla 42. Contenido de humedad muestras Pino Oregón

Muestra	Densidad (kg/m ³)		
	Nominal	Anhidra	referencia
1	449,3	465,4	499,6
5	401,7	421,4	456,3
6	443,5	464,0	503,7
7	423,2	447,6	481,7
9	466,0	492,2	532,8
10	459,0	486,5	523,7
11	487,4	512,7	553,8
12	384,9	402,7	436,6
13	450,3	470,0	506,2
14	364,2	382,4	410,8
15	414,1	430,0	468,1
16	429,8	460,0	491,3
17	389,3	408,0	442,4
18	427,8	450,7	485,6
19	418,1	436,4	471,8
20	414,8	436,2	472,1
21	396,4	419,0	452,3

22	434,0	457,3	493,3
23	458,4	482,8	522,1
24	395,5	412,0	438,9
25	476,7	497,3	536,2
26	388,7	405,1	437,1
27	425,2	442,8	482,6
28	467,3	492,3	535,9
29	406,3	421,2	464,6
30	393,7	409,3	448,6
31	381,1	396,0	427,0
32	371,2	389,2	420,9
33	394,1	411,1	446,6
34	352,0	364,2	397,0
35	400,6	414,2	452,1
36	475,1	498,5	540,2
37	402,3	423,7	459,0
38	380,2	405,7	433,3
39	371,8	384,7	422,4
40	396,8	411,7	447,7
41	428,6	449,6	482,8
42	511,1	531,1	570,8
43	526,1	549,7	589,6
44	418,4	454,3	477,4

Tabla 43. Densidad muestra de Pino Oregón

Roble

Muestras	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Humedad (%)
1	793,34	585,82	35,4
2	784,96	566,57	38,5
3	802,30	623,51	28,7
4	753,26	620,46	21,4
7	768,83	592,12	29,8
8	771,12	596,20	29,3
10	822,15	646,30	27,2
11	577,41	480,30	20,2
12	647,25	562,95	15,0
13	651,87	528,91	23,2
14	791,33	654,13	21,0
16	811,85	661,16	22,8
18	708,51	594,10	19,3
22	639,88	540,13	18,5
23	693,15	556,83	24,5
24	879,07	740,08	18,8
25	854,82	721,59	18,5
26	798,42	679,77	17,5

27	770,14	676,78	13,8
30	665,91	552,69	20,5
34	626,70	519,87	20,5
35	651,88	534,24	22,0
36	743,30	581,76	27,8
37	841,76	609,43	38,1
39	747,99	629,95	18,7
40	645,04	568,15	13,5
41	672,77	545,93	23,2
42	671,73	555,46	20,9
43	677,63	558,68	21,3
50	990,21	703,27	40,8
51	830,60	561,53	47,9
52	833,95	535,38	55,8

Tabla 44. Contenido de humedad muestras Pino Radiata

Muestra	Densidad (kg/m3)		
	Nominal	Anhidra	referencia
1	602	629,8	815,0
2	581	611,7	805,1
3	634	668,4	816,3
4	617	646,6	748,7
7	609	646,9	790,2
8	610	644,7	788,7
10	655	701,6	833,3
11	493	522,0	592,3
12	583	613,8	669,9
13	553	583,7	681,7
14	666	718,1	806,1
16	664	711,9	815,0
18	603	644,1	719,5
22	560	589,9	663,5
23	555	587,9	690,3
24	735	770,3	873,2
25	735	767,5	871,1
26	687	811,9	807,0
27	680	713,6	774,0
30	592	635,6	713,7
34	544	578,4	656,0
35	553	584,4	675,1
36	575	602,5	734,2
37	615	649,7	849,6
39	622	653,5	738,2
40	621	656,4	705,3
41	574	614,8	708,0

42	592	626,7	716,4
43	583	612,5	706,8
50	721	762,3	1015,5
51	595	637,6	879,4
52	561	601,0	873,1

Tabla 45. Densidad muestra de Roble.

- Madera Laminada Encolada

Muestras	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Humedad (%)
1,01	538,7	473,52	13,8
1,02	571,09	503,03	13,5
1,03	542,42	488,12	11,1
2,01	585,55	527,03	11,1
2,02	530,38	468,35	13,2
2,03	539,98	474,5	13,8
3,01	625,73	560,59	11,6
3,02	545,27	483,08	12,9
3,03	555,36	488,17	13,8
4,01	554,81	497,76	11,5
4,02	515,98	454,97	13,4
4,03	533,18	467,97	13,9
5,01	506,06	449,07	12,7
5,02	523,42	464,37	12,7
5,03	596,32	539,51	10,5
6,01	499,79	442,59	12,9
6,02	539,01	478,83	12,6
6,03	585,96	527,96	11,0
7,01	519,93	460,28	13,0
7,02	518,35	455,83	13,7
7,03	462,99	407,3	13,7
8,01	526,63	464,91	13,3
8,02	523,23	461,52	13,4
8,03	536,2	472,17	13,6
9,01	556,45	495,37	12,3
9,02	514,43	455,31	13,0
9,03	525,67	465,07	13,0
10,01	542,57	478,89	13,3
10,02	503,38	444,66	13,2
10,03	529,01	467	13,3
11,01	569,05	504,48	12,8
11,02	511,39	451,78	13,2
11,03	514,08	455,23	12,9
12,01	536,82	473,52	13,4
12,02	537,37	475,13	13,1

12,03	516,88	457,93	12,9
-------	--------	--------	------

Tabla 46. Contenido de humedad muestras de MLE

Muestra	Densidad (kg/m3)		
	Nominal	Anhidra	Referencia
1,01	386	405,3	438,7
1,02	408	427,4	463,7
1,03	400	416,6	444,3
2,01	431	448,8	479,3
2,02	396	414,7	448,8
2,03	394	413,0	448,2
3,01	456	478,2	509,1
3,02	399	414,1	450,2
3,03	400	420,1	454,9
4,01	410	426,5	457,2
4,02	381	399,3	432,5
4,03	390	406,5	444,0
5,01	380	396,3	427,8
5,02	392	411,1	441,4
5,03	440	457,4	486,5
6,01	369	385,5	416,9
6,02	396	413,3	446,3
6,03	437	454,7	485,1
7,01	378	394,9	427,5
7,02	383	402,0	436,0
7,03	383	399,7	435,0
8,01	390	406,7	441,4
8,02	383	401,6	434,7
8,03	399	418,1	452,9
9,01	414	430,5	464,7
9,02	387	404,5	437,0
9,03	388	406,0	438,3
10,01	391	409,8	442,7
10,02	373	386,5	421,9
10,03	392	410,7	443,8
11,01	415	433,1	468,4
11,02	372	389,8	421,6
11,03	387	393,1	436,7
12,01	396	416,0	449,4
12,02	386	405,7	436,2
12,03	387	405,2	436,8

Tabla 47. Densidad muestra de MLE