



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

Máster en Ingeniería de Montes

Caracterización elasto-mecánica de probetas sin
termotratar y termotrataadas para uso estructural de
madera de *Eucaliptus nitens* H. Deane and Maiden

Alumno: Sergio Carro Llorente

Tutora: María Milagrosa Casado Sanz

Cotutores: Roberto San Martín Fernández

Vanesa Baño Gómez

Junio de 2021

Índice

1. Resumen	1
2. Introducción y antecedentes	3
2.1. Estado actual del mercado de la madera y de la industria forestal en España	3
2.2. Especies de madera para uso estructural	9
2.2.1. Distribución, ecología, características y usos de <i>Eucalyptus</i> <i>nitens</i> H. Deane and Maiden	10
2.3. Durabilidad e impregnabilidad de la madera	14
2.4. Termotratamientos de la madera	15
2.5. Antecedentes	20
3. Objetivos	22
4. Material y métodos	23
4.1. Descripción general de las probetas utilizadas	23
4.2. Clasificación visual según la norma UNE-EN 56.546: 2013	24
4.3. Equipos de trabajo empleados	26
4.3.1. Equipo de vibraciones Mechanical Timber Grader (MTG)...	26
4.3.2. Máquina universal de ensayos	27
4.4. Metodología empleada	28
4.5. Asignación de clase resistente según la norma UNE-EN 338: 2017...	35
4.6. Determinación de las contracciones lineales	37
4.7. Análisis estadístico	40
4.7.1. Estadística descriptiva	40
4.7.2. Estadística comparativa	41
4.7.3. Estadística predictiva	41
5. Resultados y discusión	42
5.1. Resultados de la clasificación visual	42
5.2. Resultados de la asignación de clase resistente	43
5.3. Resultados experimentales	45

Índice de figuras

- Figura 1. Evolución del volumen de madera en rollo en España del 2009 al 2018	4
- Figura 2. Evolución del volumen de madera aserrada en España del 2009 al 2018	5
- Figura 3. Volumen de cortas por provincias en 2018	6
- Figura 4. Distribución del volumen de cortas por especie en España en 2018	6
- Figura 5. Evolución del volumen de las especies forestales que más se cortan en España del 2009 al 2018	7
- Figura 6. Volumen de cortas de <i>Eucalyptus spp.</i> por provincias en 2018	7
- Figura 7. Imagen de un bosque de <i>Eucalyptus nitens</i>	10
- Figura 8. Hojas, frutos y yemas de <i>Eucalyptus nitens</i>	11
- Figura 9. Imagen de la madera de <i>Eucalyptus nitens</i>	11
- Figura 10. Imagen de corte radial del tronco de <i>Eucalyptus nitens</i>	12
- Figura 11. Imagen del gorgojo del eucalipto (<i>Gonipterus scutellatus</i>)	13
- Figura 12. Etapas del proceso Thermowood	17
- Figura 13. Esquema del equipo del proceso Thermowood	17
- Figura 14. Imagen del reactor del proceso de Rectificación	18
- Figura 15. Imagen del recipiente a presión del proceso OHT	19
- Figura 16. Distribución de las masas de <i>Eucalyptus nitens</i> en España y localización de los árboles para las probetas	23
- Figura 17. Imagen del material utilizado para la clasificación visual	25
- Figura 18. Imagen de medición de una probeta con MTG	27
- Figura 19. Imagen de la máquina universal de ensayos a flexión	28
- Figura 20. Imagen de las probetas de <i>Eucalyptus nitens</i> termotratadas ...	29
- Figura 21. Imagen de la medición del contenido de humedad con Xilohigrómetro	29

- Figura 22. Dispositivo de ensayo para la medición del módulo de elasticidad local en flexión	30
- Figura 23. Imagen de detalle de implementación de extensómetros	30
- Figura 24. Imagen del ensayo a tracción de una probeta antes de la Rotura	31
- Figura 25. Imagen del ensayo a tracción de una probeta después de la rotura	31
- Figura 26. Esquema de ensayo para la medición del módulo de elasticidad global en flexión	33
- Figura 27. Imagen de preparación de una probeta a partir de la rodaja ...	38
- Figura 28. Imagen de probetas obtenidas	38
- Figura 29. Imagen de las probetas para que alcancen su estado de equilibrio higroscópico	39
- Figura 30. Gráfica carga-deformación local en ambas caras (extensómetro nº 2 en color verde y extensómetro nº 4 en color azul) y valor medio (color negro) de la probeta sin termotratar nº 5	45
- Figura 31. Gráfica carga-deformación local en ambas caras (extensómetro nº 2 en color verde y extensómetro nº 4 en color azul) y valor medio (color negro) de la probeta sin termotratar nº 7	45
- Figura 32. Gráfica carga-deformación local en ambas caras (extensómetro nº 2 en color verde y extensómetro nº 4 en color azul) y valor medio (color negro) de la probeta termotrada nº 55	46
- Figura 33. Gráfica carga-deformación local en ambas caras (extensómetro nº 2 en color verde y extensómetro nº 4 en color azul) y valor medio (color negro) de la probeta termotrada nº 60	46
- Figura 34. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 5	47
- Figura 35. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 7	47
- Figura 36. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta termotrada nº 52	48
- Figura 37. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta termotrada nº 58	48

- Figura 38. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 5	49
- Figura 39. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 7	49
- Figura 40. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 49	50
- Figura 41. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 50	50
- Figura 42. Gráfica de correlación entre el módulo de elasticidad global de pistón y de extensómetro	51
- Figura 43. Gráfica de caja y bigotes de la densidad de la rodaja	53
- Figura 44. Gráfica de caja y bigotes de la humedad de la rodaja	53
- Figura 45. Gráfica de caja y bigotes de la frecuencia obtenida con MTG	54
- Figura 46. Gráfica de caja y bigotes del MOE dinámico	54
- Figura 47. Gráfica de caja y bigotes del MOR	55
- Figura 48. Gráfica de caja y bigotes del MOEG	55
- Figura 49. Gráfica de caja y bigotes de la contracción longitudinal	57
- Figura 50. Gráfica de caja y bigotes de la contracción radial	57
- Figura 51. Gráfica de caja y bigotes de la contracción tangencial	58
- Figura 52. Gráfica de caja y bigotes del coeficiente de contracción Volumétrica	58
- Figura 53. Gráfica de medias de la densidad de la rodaja	60
- Figura 54. Gráfica de medias de la humedad de la rodaja	62
- Figura 55. Gráfica de medias de la frecuencia obtenida con MTG	64
- Figura 56. Gráfica de medias del MOE dinámico	66
- Figura 57. Gráfica de medias del MOR	68
- Figura 58. Gráfica de medias del MOEG	70
- Figura 59. Gráfica de medias de la contracción longitudinal	72
- Figura 60. Gráfica de medias de la contracción radial	74
- Figura 61. Gráfica de medias de la contracción tangencial	76

- Figura 62. Gráfica de medias del coeficiente de contracción volumétrica ...	78
- Figura 63. Gráfico de regresión simple del MOEG en función del MOE dinámico del conjunto de probetas sin termotratar y termotradas	79
- Figura 64. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 1	92
- Figura 65. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 2	92
- Figura 66. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 3	93
- Figura 67. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 4	93
- Figura 68. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 6	93
- Figura 69. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 8	94
- Figura 70. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 9	94
- Figura 71. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 19	94
- Figura 72. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 23	95
- Figura 73. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 27	95
- Figura 74. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 28	95
- Figura 75. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 29	96
- Figura 76. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 30	96
- Figura 77. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 31	96
- Figura 78. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 34	97

- Figura 79. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 35	97
- Figura 80. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 36	97
- Figura 81. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 37	98
- Figura 82. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 38	98
- Figura 83. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 39	98
- Figura 84. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 40	99
- Figura 85. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 42	99
- Figura 86. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 43	99
- Figura 87. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 44	100
- Figura 88. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 45	100
- Figura 89. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 46	100
- Figura 90. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 48	101
- Figura 91. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 49	101
- Figura 92. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 50	101
- Figura 93. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 54	102
- Figura 94. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 56	102
- Figura 95. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 71	102

- Figura 96. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 72	103
- Figura 97. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 73	103
- Figura 98. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 1	104
- Figura 99. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 2	104
- Figura 100. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 3	105
- Figura 101. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 4	105
- Figura 102. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 6	105
- Figura 103. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 8	106
- Figura 104. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 9	106
- Figura 105. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 10	106
- Figura 106. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 13	107
- Figura 107. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 15	107
- Figura 108. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 16	107
- Figura 109. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 19	108
- Figura 110. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 21	108
- Figura 111. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 22	108
- Figura 112. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 23	109

- Figura 113. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 27	109
- Figura 114. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 28	109
- Figura 115. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 29	110
- Figura 116. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 30	110
- Figura 117. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 31	110
- Figura 118. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 33	111
- Figura 119. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 34	111
- Figura 120. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 36	111
- Figura 121. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 37	112
- Figura 122. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 38	112
- Figura 123. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 39	112
- Figura 124. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 40	113
- Figura 125. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 42	113
- Figura 126. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 43	113
- Figura 127. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 45	114
- Figura 128. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 46	114
- Figura 129. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta termotrada nº 49	115

- Figura 130. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta termotrada nº 54	115
- Figura 131. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta termotrada nº 55	115
- Figura 132. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta termotrada nº 56	116
- Figura 133. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta termotrada nº 64	116
- Figura 134. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta termotrada nº 71	116
- Figura 135. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta termotrada nº 72	117
- Figura 136. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta termotrada nº 73	117
- Figura 137. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotrar nº 1	118
- Figura 138. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotrar nº 2	118
- Figura 139. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotrar nº 3	119
- Figura 140. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotrar nº 4	119
- Figura 141. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotrar nº 6	119
- Figura 142. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotrar nº 8	120
- Figura 143. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotrar nº 9	120
- Figura 144. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotrar nº 10	120
- Figura 145. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotrar nº 11	121
- Figura 146. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotrar nº 12	121

- Figura 147. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 13	121
- Figura 148. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 14	122
- Figura 149. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 15	122
- Figura 150. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 16	122
- Figura 151. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 17	123
- Figura 152. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 18	123
- Figura 153. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 19	123
- Figura 154. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 20	124
- Figura 155. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 21	124
- Figura 156. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 22	124
- Figura 157. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 23	125
- Figura 158. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 24	125
- Figura 159. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 25	125
- Figura 160. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 27	126
- Figura 161. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 28	126
- Figura 162. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 29	126
- Figura 163. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 30	127

- Figura 164. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 31	127
- Figura 165. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 32	127
- Figura 166. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 33	128
- Figura 167. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 34	128
- Figura 168. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 35	128
- Figura 169. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 36	129
- Figura 170. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 37	129
- Figura 171. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 38	129
- Figura 172. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 39	130
- Figura 173. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 40	130
- Figura 174. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 41	130
- Figura 175. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 42	131
- Figura 176. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 43	131
- Figura 177. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 44	131
- Figura 178. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 45	132
- Figura 179. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 46	132
- Figura 180. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotratada nº 52	133

- Figura 181. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 54	133
- Figura 182. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 55	133
- Figura 183. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 56	134
- Figura 184. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 58	134
- Figura 185. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 60	134
- Figura 186. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 62	135
- Figura 187. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 64	135
- Figura 188. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 66	135
- Figura 189. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 68	136
- Figura 190. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 71	136
- Figura 191. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 72	136
- Figura 192. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 73	137

Índice de tablas

- Tabla 1. Existencias en volumen de las principales especies forestales en España en 2018	3
- Tabla 2. Superficie de las principales formaciones arboladas en España en 2018	4
- Tabla 3. Mercado de la madera aserrada en España en 2016 y 2017	5
- Tabla 4. Cortas totales por especie, propiedad y precios unitarios asociados en España en 2018	8
- Tabla 5. Especies que tienen asignadas clase resistente	9
- Tabla 6. Valores de las propiedades físico-mecánicas de la madera de <i>Eucalyptus globulus</i>	12
- Tabla 7. Criterios de calidad para clasificar las probetas de <i>Eucalyptus nitens</i> como MEF	26
- Tabla 8. Clases resistentes para madera de frondosas basadas en ensayos de flexión de canto	37
- Tabla 9. Número de probetas de <i>Eucalyptus nitens</i> admitidas como MEF según UNE-EN 56.546	42
- Tabla 10. Resumen del número de probetas de <i>Eucalyptus nitens</i> en la clasificación visual	43
- Tabla 11. Valores característicos obtenidos de las probetas de <i>Eucalyptus nitens</i>	43
- Tabla 12. Clases resistentes para madera de coníferas basadas en ensayos de flexión de canto	44
- Tabla 13. Valores característicos de las propiedades de la madera estructural de <i>Eucalyptus grandis</i> clasificada visualmente como EF1	44
- Tabla 14. Estadística descriptiva de variables físico-mecánicas de probetas sin termotratar	52
- Tabla 15. Estadística descriptiva de variables físico-mecánicas de probetas termotratadas	52
- Tabla 16. Estadística descriptiva de contracciones de probetas sin termotratar	56

- Tabla 17. Estadística descriptiva de contracciones de probetas Termotradas	56
- Tabla 18. Análisis de varianza de la densidad de la rodaja	59
- Tabla 19. Tabla de medias por mínimos cuadrados de la densidad de la rodaja	59
- Tabla 20. Prueba de múltiples rangos de la densidad de la rodaja	60
- Tabla 21. Análisis de varianza de la humedad de la rodaja	61
- Tabla 22. Tabla de medias por mínimos cuadrados de la humedad de la rodaja	61
- Tabla 23. Prueba de múltiples rangos de la humedad de la rodaja	61
- Tabla 24. Análisis de varianza de la frecuencia obtenida con MTG	63
- Tabla 25. Tabla de medias por mínimos cuadrados de la frecuencia obtenida con MTG	63
- Tabla 26. Prueba de múltiples rangos de la frecuencia obtenida con MTG	63
- Tabla 27. Análisis de varianza del MOE dinámico	65
- Tabla 28. Tabla de medias por mínimos cuadrados del MOE dinámico	65
- Tabla 29. Análisis de varianza del MOR	67
- Tabla 30. Tabla de medias por mínimos cuadrados del MOR	67
- Tabla 31. Prueba de múltiples rangos del MOR	67
- Tabla 32. Análisis de varianza del MOEG	69
- Tabla 33. Tabla de medias por mínimos cuadrados del MOEG	69
- Tabla 34. Prueba de múltiples rangos del MOEG	69
- Tabla 35. Análisis de varianza de la contracción longitudinal	71
- Tabla 36. Tabla de medias por mínimos cuadrados de la contracción Longitudinal	71
- Tabla 37. Prueba de múltiples rangos de la contracción longitudinal	72
- Tabla 38. Análisis de varianza de la contracción radial	73
- Tabla 39. Tabla de medias por mínimos cuadrados de la contracción radial	73
- Tabla 40. Prueba de múltiples rangos de la contracción radial	73
- Tabla 41. Análisis de varianza de la contracción tangencial	75

- Tabla 42. Tabla de medias por mínimos cuadrados de la contracción Tangencial	75
- Tabla 43. Prueba de múltiples rangos de la contracción tangencial	75
- Tabla 44. Análisis de varianza del coeficiente de contracción volumétrica ...	77
- Tabla 45. Tabla de medias por mínimos cuadrados del coeficiente de contracción volumétrica	77
- Tabla 46. Prueba de múltiples rangos del coeficiente de contracción Volumétrica	77
- Tabla 47. Efecto significativo del termotratamiento sobre las variables físico-mecánicas y las contracciones	78
- Tabla 48. Coeficientes de la regresión simple del MOEG en función del MOE dinámico	79
- Tabla 49. Análisis de Varianza de la regresión simple del MOEG en función del MOE dinámico	80
- Tabla 50. Estadísticos de la regresión simple del MOEG en función del MOE dinámico	80
- Tabla 51. Valores de las probetas sin termotratar	85
- Tabla 52. Valores de las probetas antes del termotratado	86
- Tabla 53. Valores de las probetas después del termotratado	87
- Tabla 54. Valores de los ensayos no destructivos realizados con MTG de las probetas sin termotratar	88
- Tabla 55. Valores de los ensayos no destructivos realizados con MTG de las probetas termotratadas	89
- Tabla 56. Valores de los ensayos destructivos de las probetas sin termotratar	90
- Tabla 57. Valores de los ensayos destructivos de las probetas termotratadas	91
- Tabla 58. Valores de las probetas	138
- Tabla 59. Valores de las contracciones de las probetas	139

1. Resumen

En los últimos años las plantaciones de *Eucalyptus* se han extendido por el noroeste de España (principalmente en Galicia y en montes privados) debido entre otras razones a su rápido crecimiento y al reducido turno de corta, siendo en concreto *Eucalyptus globulus* la especie más empleada, presentando el inconveniente de su baja resistencia a las heladas, lo cual puede ser solucionado empleando *Eucalyptus nitens*.

El destino actual de la madera de eucalipto es principalmente para la producción de pasta de celulosa y en menor medida para producción energética, presentando para ello *Eucalyptus nitens* peores rendimientos que *Eucalyptus globulus*. Con la finalidad de obtener productos de madera de esta especie de un mayor valor añadido se plantean las posibilidades de uso a nivel estructural.

Además, si se quiere emplear esta madera en el exterior y para evitar su deterioro es necesario que tenga un tratamiento protector, siendo uno de ellos el denominado tratamiento térmico o termotratado, teniendo como principal ventaja la no utilización de productos químicos en su tratamiento, pero teniendo como gran inconveniente la disminución de algunas propiedades mecánicas de la madera.

Para ello en el presente Trabajo Fin de Máster se caracterizan elasto-mecánicamente probetas de madera de *Eucalyptus nitens*, sin termotratar y termotratadas, mediante ensayos a flexión destructivos, obteniendo el Módulo de elasticidad global (MOEG) en la máquina universal de ensayos, para posteriormente realizar un análisis estadístico con los resultados obtenidos y así determinar sus posibilidades de uso a nivel estructural.

El termotratamiento de la madera de *Eucalyptus nitens* implicó una reducción del 13,42 % en el módulo de elasticidad global, del 47,43 % en la resistencia a flexión, del 12,69 % en la densidad, del 62,16 % en la contracción longitudinal, del 49,04 % en la contracción radial, del 50,05 % en la contracción tangencial y del 52,20 % en el coeficiente de contracción volumétrica. Estos resultados hay que tomarlos con prudencia dado el reducido número de piezas ensayadas.

Palabras clave: *Eucalyptus nitens*, madera termotratada, uso estructural, ensayos destructivos

Abstract:

In recent years, *Eucalyptus* plantations have spread throughout northwestern Spain (mainly in Galicia and in private forests) due, among other reasons, to their rapid growth and the short felling shift, specifically *Eucalyptus globulus* being the most widely used species, presenting the disadvantage of its low resistance to frost, which can be solved by using *Eucalyptus nitens*.

The current destination of eucalyptus wood is mainly for the production of cellulose pulp and to a lesser extent for energy production, presenting *Eucalyptus nitens* worse yields than *Eucalyptus globulus*. In order to obtain wood products of this species with greater added value, the possibilities of use are considered at a structural level.

In addition, if you want to use this wood outdoors and to avoid its deterioration it is necessary that it has a protective treatment, one of them being the so-called heat treatment or heat treatment, having the main advantage of not using chemical products in its treatment, but having as great disadvantage the decrease of some mechanical properties of the wood.

For this, in this Master's Final Project, *Eucalyptus nitens* wood specimens will be characterized elasto-mechanically, without heat-treated and heat-treated, through destructive bending tests, obtaining the Global Modulus of Elasticity (MOEG) in the universal testing machine, for later carry out a statistical analysis with the results obtained and thus determine its possibilities of use at a structural level.

The heat treatment of *Eucalyptus nitens* wood implied a reduction of 13,42 % in the global modulus of elasticity, 47,43 % in flexural strength and 12,69 % in density, 62,16 % in longitudinal contraction, 49,04 % in radial contraction, 50,05 % in tangential contraction and 52,20 % in the volumetric contraction coefficient. These results must be taken with caution given the small number of pieces tested.

Keywords: *Eucalyptus nitens*, heat-treated timber, structural use, destructive testing

2. Introducción y antecedentes

2.1. Estado actual del mercado de la madera y de la industria forestal en España

En España, las especies forestales con mayor volumen de existencias aparecen en la siguiente tabla. Las existencias de *Eucalyptus nitens* no son las que poseen un mayor volumen, cifrándose en algo más de 1 millón de m³ c.c.

Tabla 1. Existencias en volumen de las principales especies forestales en España en 2018

(Fuente: Elaboración propia a partir del Anuario de estadística forestal de 2018)

Especie forestal	Existencias (m ³ c.c.)
<i>Pinus pinaster</i>	153.627.034
<i>Pinus sylvestris</i>	153.269.839
<i>Pinus halepensis</i>	82.913.213
<i>Eucalyptus globulus</i>	79.645.351
<i>Fagus sylvatica</i>	78.798.913
<i>Pinus nigra</i>	77.051.844
<i>Quercus ilex</i>	76.378.992
<i>Pinus radiata</i>	↓ 52.787.055
<i>Quercus robur</i> y <i>Quercus petraea</i>	48.539.370
<i>Quercus pyrenaica</i>	45.736.340
<i>Castanea sativa</i>	29.286.068
<i>Pinus pinea</i>	25.014.479
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	≈ 5.600.000
<i>Eucalyptus nitens</i>	> 1.000.000

Las cifras proceden del 4º Inventario Forestal Nacional (IFN 4) en Galicia, Comunidad Foral de Navarra, Cantabria, Principado de Asturias, Región de Murcia, Islas Baleares, País Vasco, La Rioja, Comunidad de Madrid, Cataluña, Extremadura y Canarias, y del IFN 3 en el resto de comunidades autónomas.

Las superficies de estas existencias aparecen en la siguiente tabla.

Tabla 2. Superficie de las principales formaciones arboladas en España en 2018
(Fuente: Anuario de estadística forestal de 2018)

	Formación arbolada	Superficie (ha)
Coníferas	Pinar de pino carrasco (<i>P. halepensis</i>)	2.064.801
	Pinar de pino albar (<i>P. sylvestris</i>)	1.030.916
	Pinar de pino pinaster región mediterránea	816.943
	Pinar de pino salgareño (<i>P. nigra</i>)	709.277
	Mezclas de coníferas autóctonas	649.718
	Pinar de pino piñonero (<i>P. pinea</i>)	406.919
	Enebrales y sabinares	372.983
	Otros pinares y abetales	189.209
Mixtas	Mezclas coníferas y frondosas autóctonas	1.139.129
Fronosas	Dehesas	2.765.233
	Encinares (<i>Q. ilex</i>)	2.606.622
	Mezclas de frondosas autóctonas	1.194.979
	Melojares (<i>Q. pyrenaica</i>)	833.128
	Otras frondosas dominantes	506.327
	Hayedos (<i>Fagus sylvatica</i>)	395.413
	Quejigares (<i>Q. faginea</i>)	321.437
	Alcornocales (<i>Q. suber</i>)	269.377
	Bosque ribereño	250.180
Robledales de <i>Q. robur</i> y/o <i>Q. petraea</i>	244.470	
Otras	Reobligaciones productoras, que incluye: Eucaliptales (<i>Eucalyptus spp.</i>)	1.452.754 619.918
	Pinares de <i>Pinus radiata</i>	263.534
	Pinares de <i>Pinus pinaster</i> en la región biogeográfica atlántica	242.062
	Especies de producción en mezcla	191.725
	Otras repoblaciones productoras	135.515
	Otras alóctonas y mezcla de autóctonas con alóctonas	121.483

En el caso de la madera en rollo, como se muestra en la Figura 1, las extracciones en España han ido aumentando en los últimos seis años, superando al consumo, y las importaciones y exportaciones han ido descendido desde 2013. Las importaciones de los últimos tres años son las más bajas de toda la serie presentada.

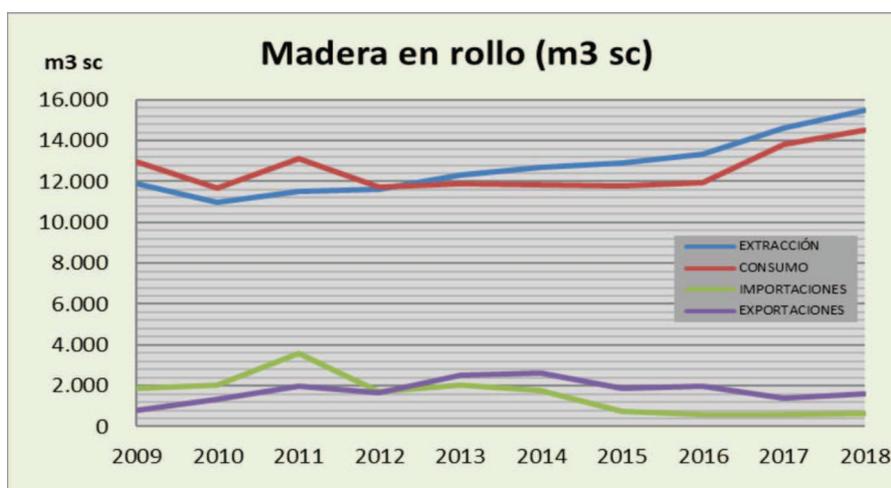


Figura 1. Evolución del volumen de madera en rollo en España del 2009 al 2018
(Fuente: Anuario de estadística forestal de 2018)

En lo que respecta a la madera aserrada, como se muestra en la Figura 2, se observa un importante descenso del consumo y la producción con el paso de los años, salvo en 2017 y 2018 que aumentaron. Además, hay que señalar que España es claramente deficitaria de este producto y al menos la tercera parte del consumo procede de las importaciones. El comercio exterior en este caso ha ido aumentando en los últimos cinco años.

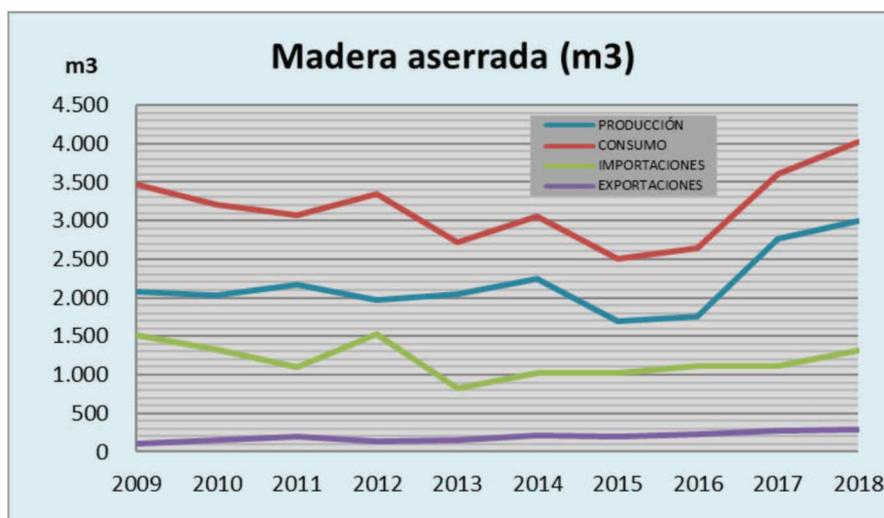


Figura 2. Evolución del volumen de madera aserrada en España del 2009 al 2018
 (Fuente: Anuario de estadística forestal de 2018)

Las importaciones son sobre todo de coníferas, como se muestra en la Tabla 3, y proceden principalmente de Suecia y de Finlandia, aunque en la última década también los países de Europa central han desempeñado un papel relevante.

Tabla 3. Mercado de la madera aserrada en España en 2016 y 2017
 (Fuente: MAPAMA)

MADERA ASERRADA (1000 m3)		2016	2017
Producción		1.737	1.920
	Coníferas	1.425	1.600
	Frdosasas	313	320
Importaciones		1.157	1.180
	Coníferas	918	930
	Frdosasas	164	181
	de las cuales tropicales	74	69
Exportaciones		219	244
	Coníferas	180	192
	Frdosasas	34	44
	de las cuales tropicales	6	8

En cuanto a la distribución de las cortas en las distintas comunidades autónomas, como se muestra en la Figura 3, hay que recalcar que la mayor parte del volumen de cortas se concentra en unas pocas provincias. En 2018 hubo 6 provincias que superaron el millón de m³ con corteza y fueron las siguientes: A Coruña, Lugo, Bizkaia, Asturias, Pontevedra y Gipuzkoa. Además, en las dos primeras, A Coruña y Lugo, las cortas sobrepasaron los 4 millones de m³ c.c., siendo la primera vez que una sola provincia supera esta cifra.



Figura 3. Volumen de cortas por provincias en 2018 (Fuente: Anuario de estadística forestal de 2018)

En cuanto a las especies forestales que mayor volumen de corta generan, y que se muestran en la Figura 4, sobresalen las especies de crecimiento rápido: *Pinus radiata* entre las coníferas y *Eucalyptus spp.* entre las frondosas.

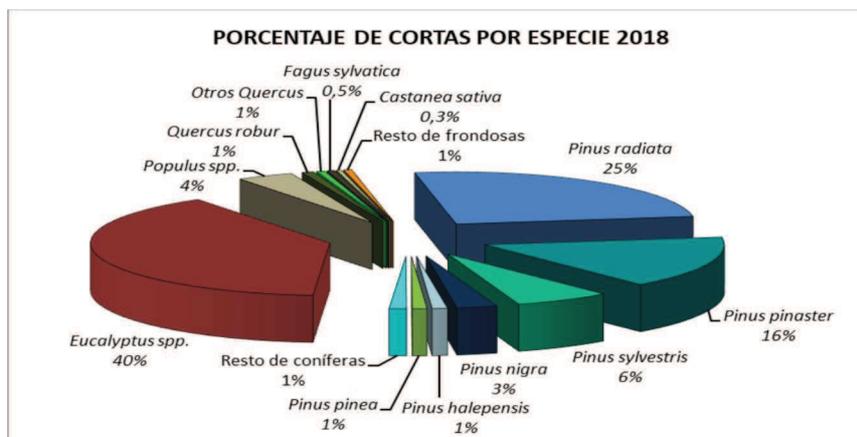


Figura 4. Distribución del volumen de cortas por especie en España en 2018 (Fuente: Anuario de estadística forestal de 2018)

Lo más destacable de las cortas de 2018 es que las cifras de eucalipto sobrepasaron los 7,8 millones de m³ c.c., como se muestra en la Figura 5, siendo las más elevadas de todas las recogidas a través de las estadísticas forestales españolas.

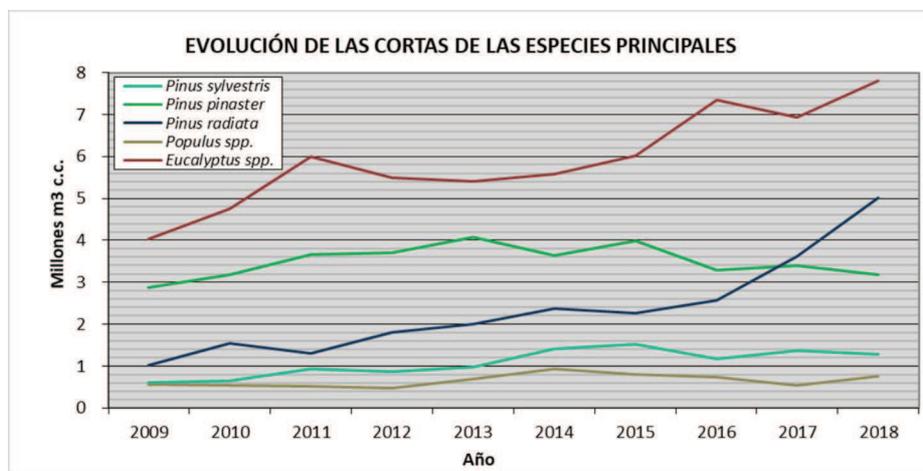


Figura 5. Evolución del volumen de las especies forestales que más se cortan en España del 2009 al 2018 (Fuente: Anuario de estadística forestal de 2018)

Las cortas de eucalipto se han duplicado en los últimos diez años, pasando de 4 millones de m³ c.c. en 2009 a casi 8 millones en 2018.

Las provincias con mayor volumen de cortas de *Eucalyptus spp.* se muestran en la Figura 6 y son A Coruña (en torno a 4 millones de m³ c.c.) y Lugo (en torno a 2 millones de m³ c.c.).



Figura 6. Volumen de cortas de *Eucalyptus spp.* por provincias en 2018 (Fuente: Anuario de estadística forestal de 2018)

En cuanto al tipo de propiedad, las especies del género *Eucalyptus* son las que encabezan las superficies dentro de la propiedad privada. En la siguiente tabla se muestran unos precios orientativos.

Tabla 4. Cortas totales por especie, propiedad y precios unitarios asociados en España en 2018
(Fuente: Anuario de estadística forestal de 2018)

Especie	Propiedad		Total m ³ cc	Precio CC.AA. €/m ³ cc		Precios percibidos (en pie) €/m ³ cc		Precios licitación MADEREA €/m ³
	Pública	Privada		En pie	En cargadero	Sierra	Trituración	
<i>Pinus radiata</i>	240.191	4.780.268	5.020.460	27,0	53,3	23,8	17,9	24,19
<i>Pinus pinaster</i>	806.050	2.378.391	3.184.441	15,7	36,9	26,2	17,2	15,39
<i>Pinus sylvestris</i>	840.985	434.076	1.275.061	20,6	39,4	26,6		19,06
<i>Pinus nigra</i>	356.777	178.113	534.890	24,5	43,0	19,2		18,51
<i>Pinus halepensis</i>	37.943	165.980	203.922	14,8	32,9	10,2		10,57
<i>Pinus pinea</i>	80.751	113.335	194.086	13,0	30,0	15,0		11,04
<i>Pinus spp.</i> y otros pinos	87.647	18.818	106.465	14,7	28,8	13,3		19,37
Otras coníferas alóctonas	21.804	40.279	62.083	23,4	45,0			19,54
Otras coníferas	20.205	42.206	62.411	22,2	42,9			
TOTAL CONÍFERAS	2.492.352	8.151.466	10.643.818	22,1	45,0			
<i>Eucalyptus spp.</i>	172.112	7.641.430	7.813.543	19,4	39,0	24,4	16,2	25,65
<i>Populus spp.</i>	35.103	718.733	753.837	31,1	57,0	30,4		47,17
<i>Quercus robur</i>	2.668	151.423	154.091	24,9	49,0			9,74
Otros <i>Quercus</i>	4.851	105.012	109.863	18,8	48,1			17,01
<i>Fagus sylvatica</i>	89.973	5.974	95.947	32,3	55,4	26,6		14,16
<i>Castanea sativa</i>	492	67.620	68.111	23,6	47,4	24,1		27,40
Otras frondosas alóctonas	7.205	22.820	30.025	25,7	51,5			22,62
Otras frondosas	4.281	73.826	78.107	12,2	36,0			32,90
TOTAL FRONDOSAS	316.686	8.786.838	9.103.523	20,6	41,0			

2.2. Especies de madera para uso estructural

La madera aserrada estructural son piezas de madera aserrada de sección rectangular que han sido clasificadas estructuralmente por alguno de los procedimientos reconocidos en la normativa (clasificación visual o mecánica) y de las que se conocen sus propiedades mecánicas.

Según la norma UNE-EN 1.912: 2012 (AENOR 2012) *Madera estructural. Clases resistentes. Asignación de calidades visuales y especies*, las especies que actualmente tienen asignadas clases resistentes se muestran en la siguiente Tabla. Entre dichas especies no se encuentra *Eucalyptus nitens*.

Tabla 5. Especies que tienen asignadas clase resistente (Fuente: Elaboración propia a partir de AENOR 2012)

Coníferas y chopo	Frondosas
<i>Abies alba</i>	<i>Acer pseudoplatanus</i>
<i>Abies amabilis</i>	<i>Castanea sativa</i>
<i>Abies balsamea</i>	<i>Cylicodiscus gabunensis</i> Harms
<i>Abies concolor</i>	<i>Dinizia excelsa</i> Ducke
<i>Abies grandis</i>	<i>Dipteryx odorata</i> Willd
<i>Abies lasiocarpa</i>	<i>Dicorynia guianensis</i> Amsh
<i>Abies magnifica</i>	<i>Dipterocarpus</i> spp.
<i>Abies procera</i> (<i>A. nobilis</i>)	<i>Dryobalanops</i> spp.
<i>Araucaria angustifolia</i>	<i>Erismia uncinatum</i> Warm
<i>Larix decidua</i> (<i>L. europea</i>)	<i>Erythrophleum ivorense</i> A.Chev
<i>Larix eurolepsis</i>	<i>Erythrophleum suaveolens</i> Brenan
<i>Larix kaempferi</i> (<i>L. leptolepsis</i>)	<i>Entandrophragma cylindricum</i>
<i>Larix occidentalis</i>	<i>Eucalyptus diversicolor</i>
<i>Picea abies</i>	<i>Eucalyptus marginata</i>
<i>Picea engelmannii</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>
<i>Picea glauca</i>	<i>Fagus sylvatica</i>
<i>Picea mariana</i>	<i>Fraxinus americana</i>
<i>Picea rubens</i>	<i>Fraxinus excelsior</i>
<i>Picea sitchensis</i>	<i>Intsia bijuga</i>
<i>Pinus banksiana</i>	<i>Intsia palembanica</i>
<i>Pinus caribaea</i>	<i>Koompassia malaccensis</i>
<i>Pinus contorta</i>	<i>Lophira alata</i>
<i>Pinus echinata</i>	<i>Manikara bidentata</i>
<i>Pinus elliotii</i>	<i>Milicia excelsa</i>
<i>Pinus lambertiana</i>	<i>Milicia regia</i>
<i>Pinus monticola</i>	<i>Nauclea diderrichii</i>
<i>Pinus nigra</i>	<i>Newtonia suaveolens</i> Brenan
<i>Pinus oocarpa</i>	<i>Ocotea rodiaei</i>
<i>Pinus palustris</i>	<i>Quercus petraea</i>
<i>Pinus pinaster</i>	<i>Quercus robur</i>
<i>Pinus ponderosa</i>	<i>Quercus alba</i>
<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Quercus rubra</i>
<i>Pinus taeda</i>	<i>Qualea</i> spp. (<i>Ruizterania</i> spp.)
<i>Pinus radiata</i>	<i>Shorea glauca</i>
<i>Populus</i> (algunos clones)	<i>Shorea maxwelliana</i>
<i>Populus nigra</i>	<i>Tectona grandis</i>
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	<i>Tabebuia</i> spp.
<i>Thuja plicata</i>	
<i>Tsuga heterophylla</i>	
<i>Tsuga mertensiana</i>	

2.2.1. Distribución, ecología, características y usos de *Eucalyptus nitens* H. Deane and Maiden

El género *Eucalyptus* abarca más de 600 especies, procedentes en su mayoría de Australia y Nueva Guinea, ocupando actualmente sus plantaciones unos 14 millones de ha, distribuidas en países situados en zonas tropicales y templadas, como Brasil, India, Sudáfrica, Australia, España, Portugal, Argentina, Uruguay, Chile, Vietnam, Nueva Zelanda, etc.

La especie *Eucalyptus nitens* es un árbol nativo de Victoria y del este de Nueva Gales del Sur (Australia), que alcanza entre 40 y 70 metros de altura, ocasionalmente hasta 90 m, y diámetro de más de 6 m, aunque lo normal es entre 1 y 2 m y que se muestra en la Figura 7. Aparece de forma fragmentada en cerros y valles de las zonas montañosas entre 600 - 1.600 m, unas veces como rodales puros de baja densidad o como masas abiertas y otras formando parte de un bosque mixto de especies de eucaliptos. En su hábitat natural el clima es desde fresco a cálido, con temperaturas mínimas medias en el invierno de -5 a 2 °C, con heladas de 50 a 150 días al año y con temperaturas máximas medias en el verano de 21 a 26 °C, por lo que raramente soporta temperaturas elevadas. La pluviometría va desde subhúmedo hasta húmedo (750 - 1.750 mm). De las especies comerciales de eucaliptos es una de las más tolerantes a la helada, y es moderadamente resistente a la sequía. Los mejores crecimientos los proporcionan sobre suelos bien drenados, profundos, ricos, francos frente a arcillosos, pero crece satisfactoriamente en un gran espectro de suelos moderadamente fértiles (Boland et al (1984); Orwa et al (2009); Costermans (2009)).



Figura 7. Imagen de un bosque de *Eucalyptus nitens*
(Fuente: <https://ence.es>)

La corteza de su fuste es persistente en la parte baja, fibro-escamosa, lisa en la parte exterior, desprendiéndola con el tiempo en largas tiras. Las hojas juveniles son opuestas, de ovadas a elípticas, cordadas y glaucas, y las hojas adultas son estrechas o lanceoladas,

El valor medio de algunas propiedades de eucalipto, en concreto de *Eucalyptus globulus* entre 23 y 35 años de seis parcelas de Galicia, se muestra en la Tabla 6:

Tabla 6. Valores de las propiedades físico-mecánicas de la madera de *Eucalyptus globulus* (Fuente: Touza (2001))

Propiedad	Valor medio
Densidad (kg/m ³)	760
Dureza Monnin	6
Contracción radial (%)	7,5
Contracción tangencial (%)	13,8
Módulo de elasticidad (Mpa)	20.580
Resistencia a la compresión (Mpa)	71
Resistencia a la flexión (Mpa)	130

Al igual que otras especies del género *Eucalyptus*, *E. nitens* se ve afectado por las tensiones de crecimiento en el interior del tronco. Éstas se producen por fuerzas generadas entre capas sucesivas de madera, por efecto del crecimiento y la necesidad de mantener la copa en una posición lo más vertical posible. Estas tensiones se liberan al momento de la corta y aserrado del árbol, provocando la proliferación de rajaduras en los extremos de los troncos y posteriormente en las piezas aserradas, lo cual ocasiona una tasa de conversión más baja. Este problema constituye una de las principales limitantes del procesamiento industrial por ser especialmente susceptible a rajarse y deformarse. En algunas ocasiones aparecen fendas de secado, con multitud de pequeñas fendas en sentido radial como se muestra en la Figura 10.



Figura 10. Imagen de corte radial del tronco de *Eucalyptus nitens* (Fuente: <https://www.infor.cl>)

Las principales aplicaciones son el suministro de madera con fines energéticos y de fibra para la industria de la celulosa (aunque su rendimiento celulósico es en torno a un 25 % inferior a *Eucalyptus globulus*), empleándose en menor medida para la elaboración de tableros.

La presencia en España de *Eucalyptus nitens* se conoce mediante el estudio de los primeros arboretos de eucaliptos que se plantaron en España. Burger, un ingeniero holandés de la Sociedad Forestal Villarejo describe que, en 1930, se inició un ensayo que incluía 177 especies en Almonte (Huelva), entre las que figura *Eucalyptus nitens* como plantada en 1933. Actualmente en España se le puede considerar una especie naturalizada, en fase de expansión.

En los últimos años (10 – 15 años) las plantaciones a turno corto de *Eucalyptus nitens* se han extendido por el noroeste de España debido a su creciente interés para la producción energética. Las elevadas tasas de crecimiento que estas plantaciones presentan (de hasta 30-40 metros cúbicos por hectárea y año), así como sus altas densidades (2.000 - 5.600 pies/ha), muy superiores a las de las plantaciones tradicionales de eucalipto, permiten obtener elevadas producciones de biomasa en cortos períodos de tiempo (González et al (2013)). Si se usa para sierra, los turnos rondan los 25 años.

Sus características biológicas y fisiológicas son muy similares a las de *Eucalyptus globulus*, siendo ésta la especie de *Eucalyptus* más repoblada en España, sin embargo, *Eucalyptus nitens*, pese a que tiene menor capacidad para brotar de cepa, presenta mayor resistencia a las bajas temperaturas y a la plaga de gorgojo (*Gonipterus scutellatus*), cuya imagen se muestra en la Figura 11, lo que hace que la copa sea más densa y se puede concluir que es una especie con gran potencial de implantación. No soporta la competencia con otras especies, sobretudo gramíneas y es muy sensible al consumo de sus brotes por ganado y animales silvestres.



Figura 11. Imagen del gorgojo del eucalipto (*Gonipterus scutellatus*)
(Fuente: <https://cienciaybiologia.com>)

2.4. Termotratamientos de la madera

Según la norma UNE-CEN/TS 15.679: 2009 (AENOR 2009) EX *Madera modificada térmicamente. Definiciones y características*:

- La madera modificada térmicamente (MMT) es la madera en la cual la composición de las paredes celulares y las propiedades físicas se modifican por exposición a una temperatura mayor de 160 °C y a condiciones de disponibilidad reducida de oxígeno. La madera se modifica de tal forma que como mínimo algunas propiedades quedan alteradas de forma permanente y en toda la sección de la pieza.

- La estabilidad dimensional es la capacidad para resistir la variación de las dimensiones de un producto relacionada con las variaciones del contenido de humedad (CH) de la madera o de la humedad relativa del aire.

- Los principales efectos buscados por la modificación térmica (respecto a la madera no tratada) son la mejora de la estabilidad dimensional y el aumento de la duración frente a los hongos xilófagos y en determinados casos frente a la alteración del color.

Los denominados tratamientos térmicos, termotratamientos o tratamientos hidro-térmicos (TH) que se aplican a la madera producen cambios físicos, reduciendo el contenido y las características de los grupos funcionales de las hemicelulosas, volatilizan los extraíbles y pueden generar reducciones en el contenido de celulosa y lignina. Son usados para cambiar y homogeneizar el color, reducir el contenido de humedad de equilibrio (CHE), mejorar las propiedades higroscópicas, aumentar la estabilidad dimensional de la madera o aumentar la resistencia frente a determinados insectos (no se ha demostrado un incremento de la resistencia frente a las termitas). Su aplicación disminuye la densidad y las propiedades mecánicas y aumenta la fragilidad de la madera.

Según la norma UNE-CEN/TS 15.679: 2009 EX (AENOR 2009) *Madera modificada térmicamente. Definiciones y características*, las tecnologías de fabricación de la madera modificada térmicamente se caracterizan principalmente por la forma de reducir la concentración de oxígeno durante el tratamiento. Los procedimientos actualmente utilizados a escala industrial están utilizando atmósferas de aire caliente, vapor, nitrógeno caliente o inmersión en aceite caliente.

Existen diferentes metodologías o procesos para realizar termotratamientos, los cuales pueden variar según el medio, la temperatura, la presión y el tiempo de tratamiento. El medio tiene la finalidad de evitar la combustión de la madera y puede ser gas nitrógeno, vapor de agua y aceite. Y según la presión pueden ser a presión atmosférica, con presión positiva o con presión negativa o vacío. Todos los métodos tienen en común tres etapas:

- Precalentamiento de la madera: la madera es llevada hasta temperaturas cercanas a la temperatura de inicio de la pirólisis (180 - 230 °C) en ambientes inertes con ausencia o baja presencia de oxígeno para evitar la combustión.

- Tratamiento térmico: consiste en mantener la madera a una temperatura y durante un tiempo determinado.

- Acondicionamiento: es un enfriamiento controlado y consiste en llevar la madera a temperaturas por debajo de los 100 °C para evitar el choque térmico al contacto con la atmósfera y prevenir la combustión.

Las propiedades de la madera modificada térmicamente y el alcance de la modificación de sus propiedades dependen de la especie de madera, del tipo de tecnología y de los parámetros del tratamiento, en particular de la temperatura del tratamiento.

Los métodos de termotratamiento que existen son los siguientes:

- Thermowood

El proceso Thermowood fue desarrollado y patentado por el Centro de Investigación Tecnológica de Finlandia (VTT), siendo la patente actualmente propiedad de Finnish ThermoWood Association. Se realiza en una celda a presión atmosférica con calentamiento por vapor de agua. Precalentamiento y tratamiento térmico se llevan a cabo con vapor sobrecalentado previniendo la combustión al presentar un ambiente inerte ocasionado por el vapor. Posteriormente se interrumpe la entrada de vapor y se realiza un enfriamiento atomizando agua desmineralizada con pulverizadores, lo cual permite que las partículas se evaporen y el calor sea extraído de la celda (540 kcal por litro de agua evaporada).

Las tres etapas de este se muestran en la Figura 12, dependiendo el tiempo del tratamiento de la especie a tratar y de la sección de la madera y son:

- Etapa 1. Secado: Esta fase también es llamada secado a alta temperatura y dura la mayor parte del tratamiento. Durante esta fase el contenido de humedad de la madera baja a niveles cercanos a cero, antes de que se inicie el tratamiento térmico.

- Etapa 2. Tratamiento térmico: Esta fase es llevada a cabo en una cámara cerrada en la cual la temperatura se incrementa entre 185 y 215 °C dependiendo del programa de tratamiento y se inicia esta fase inmediatamente después de la fase de secado a alta temperatura. El vapor es usado durante el secado y el tratamiento térmico actúa como vapor protector, previniendo la combustión. Esta fase dura de 2 a 3 horas.

- Etapa 3. Acondicionamiento: Esta fase es llevada a cabo después del tratamiento térmico. La madera es enfriada de manera controlada evitando contacto con el medio exterior para evitar explosiones. Además, la madera debe ser rehidratada hasta niveles del 5 al 7 %. Esta fase dura de 5 a 15 horas.



Figura 12. Etapas del proceso Thermowood
(Fuente: Vignote (2014))

El equipo se muestra en la Figura 13 y está fabricado en acero inoxidable, usándose ventiladores y radiadores especiales. Para generar el calor requerido en el proceso se pueden usar combustibles tales como biocombustibles, gasóleo, gasolina o resistencias eléctricas. Los gases del proceso son recuperados y quemados para prevenir contaminación al medio ambiente.

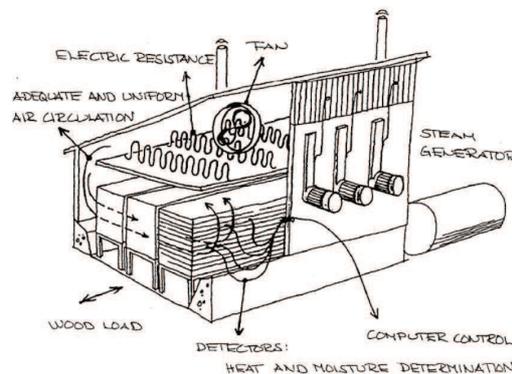


Figura 13. Esquema del equipo del proceso Thermowood
(Fuente: Acosta et al (2017))

- Plato

El proceso Plato fue creado en Holanda y lo ejecuta hoy en día la empresa Plato International BV. En este proceso se usa vapor de agua como medio de transferencia de calor.

Las tres etapas de este proceso son:

- Etapa 1. Hidrotermólisis: la madera verde o previamente secada al aire libre es tratada con temperaturas entre 160 y 190 °C con incremento ligero de la presión (presurizado). Este proceso se realiza con baja presencia de oxígeno y dura de 4 a 5 horas.
- Etapa 2. Secado y curado: la madera es llevada hasta una humedad cercana al 10 %, realizándose a presión atmosférica con temperaturas entre 170 y 190 °C, durando de 3 a 5 días el secado y de 14 a 16 horas el curado.
- Etapa 3. Acondicionamiento: consiste en enfriar la madera y llevarla a condiciones ambientales, durando de 2 a 3 días.

- Rectificación

El proceso Retification fue creado en Francia y se comercializa con la marca Retiwood.

Este proceso es similar al proceso Thermowood, excepto que la celda o reactor, mostrado en la Figura 14, es saturado de un gas inerte (nitrógeno por lo general), lo cual impide la activación de la combustión de la madera.

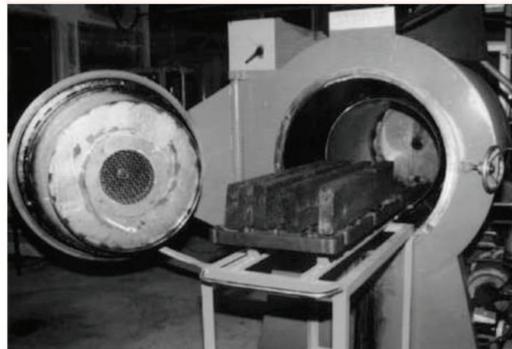


Figura 14. Imagen del reactor del proceso de Rectificación
(Fuente: Acosta et al (2017))

- Bois Perdure

El proceso Bois Perdure fue creado en Francia por la empresa BCI-MBS y adquirido posteriormente por la empresa canadiense PCI. En la fase de calentamiento se utiliza vapor de agua.

- OHT

El proceso Oil Heat Treatment (OHT) fue creado en Alemania, siendo actualmente la patente propiedad de Menz Holz GmbH.

Este proceso es realizado en un recipiente a presión, como se muestra en la Figura 15, el cual aloja la madera ya seca y posteriormente se introduce aceite vegetal caliente con el fin de realizar una transferencia de calor rápida y homogénea a la madera (el aceite proporciona un buen calentamiento y limita el oxígeno, pero la madera absorbe parte de ese aceite, aumentando su masa). Finalmente, el aceite caliente es enviado a un depósito.

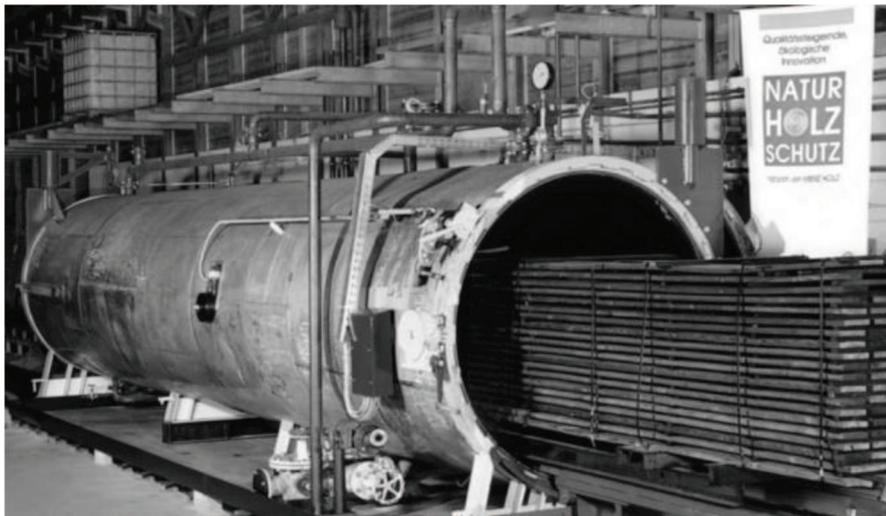


Figura 15. Imagen del recipiente a presión del proceso OHT
(Fuente: Acosta et al (2017))

- Thermoholz

El proceso fue creado en Austria. Consiste en activar las reacciones en una atmósfera de gas a altas temperaturas.

- Westwood

Es una metodología estadounidense similar a la Thermowood y su nombre proviene de la frase (Water Extruding Stabilized Wood). Esta metodología consiste en controlar el proceso de tratamiento térmico, mediante acciones de control correspondientes a los parámetros de información actual, introducida en forma de señal de control en un sistema computarizado, para determinar los valores óptimos de los parámetros del proceso.

2.5. Antecedentes

Se enumeran los principales documentos que han servido como base para la elaboración de este TFM:

- Majano Majano, M. A. (2014). Madera termo-tratada de frondosas para uso estructural. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Estudia la viabilidad de la madera termotrata-da de frondosas, particularmente de haya y fresno, de procedencias europeas, para uso estructural en edificación. Se llega a la conclusión de que para obtener suficientes prestaciones de durabilidad es necesario realizar tratamientos térmicos intensos, lo cual no aconseja su aplicación en elementos estructurales primarios debido a su gran fragilidad y baja resistencia a tracción perpendicular a las fibras, por lo que es preferible restringir su uso en elementos estructurales secundarios con bajos niveles de carga o donde se limite considerablemente la aparición de tracciones perpendiculares.
- Hermoso Prieto, E. (2001). Caracterización mecánica de la madera estructural de *Pinus sylvestris* L. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Estudia la caracterización mecánica para madera aserrada de *Pinus sylvestris* de varias procedencias españolas, realizando clasificación visual y clasificación mecánica, asignando clase resistente, comparando entre procedencias. Una de las conclusiones es la necesidad de emplear el módulo de elasticidad global en vez del local en los procesos de caracterización de madera estructural.
- Hernández Ruiz, M. P. (2017). Caracterización elasto-mecánica de probetas a escala estructural de madera de *Pinus radiata* D. Don y *Pinus sylvestris* L. Trabajo fin de máster. Universidad de Valladolid. Estudia la caracterización elasto-mecánica de dos especies cada vez más usadas en España, realizando clasificación visual y clasificación mecánica, asignando clase resistente y comparando entre especies.
- Wentzel et al (2018). Relaciones entre la deformación por crecimiento longitudinal y algunas propiedades de la madera en *Eucalyptus nitens*. Artículo de Wood Material Science and Engineering. Analiza el efecto de los cambios en la composición química de las propiedades mecánicas de madera de *Eucalyptus nitens* de Chile modificada térmicamente por varios métodos (sistema abierto (WTT) y sistema cerrado (similar a Thermowood) y a varias temperaturas y sin modificar.
- Fernández-Golfín et al (2007). Caracterización de la madera de *Eucalyptus globulus* para uso estructural. Artículo del boletín informativo CIDEU. Estudia la caracterización mecánica para madera aserrada de *Eucalyptus globulus* de varias procedencias españolas, realizando clasificación visual y clasificación mecánica, asignando clase resistente.

- Hermoso et al (2013). Tratamientos térmicos versus propiedades mecánicas en madera de pino radiata. Acta del 6º Congreso Forestal Español. Estudia las propiedades mecánicas de la madera de *Pinus radiata* tratada térmicamente a 190 °C y 210 °C y sin tratar.
- Hermoso et al (2015). Caracterización de la madera aserrada de *Pinus radiata* modificada térmicamente. Artículo de la revista de investigación de Maderas: ciencia y tecnología. Estudia la madera de *Pinus radiata* termotrata por el método Thermowood a 190°C y 210°C y se compara con piezas testigo sin termotratar.
- Bermúdez et al (2002). Manual de la madera de eucalipto blanco. Fundación para o Fomento da Calidade Industrial e Desenvolvemento Tecnolóxico de Galicia. Se trata de un manual en el cual se recogen las propiedades de la madera de *Eucalytus globulus*, así como las principales tecnologías que se le aplican.

3. Objetivos

Los objetivos principales del presente Trabajo Fin de Máster son:

- Caracterizar elasto-mecánicamente probetas de madera termotrada y sin termotratar de *Eucalyptus nitens* según la norma UNE-EN 408: 2011.
- Cuantificar las variaciones de las propiedades elasto-mecánicas al termotratar la madera.
- Determinar las posibilidades de uso a nivel estructural de la madera termotrada de *Eucalyptus nitens*.
- Clasificar visualmente la madera de *Eucalyptus nitens* según la norma UNE-EN 56.546: 2013.
- Asignar una clase resistente al lote de madera estructural de *Eucalyptus nitens* según la norma UNE-EN 338: 2017.

4. Material y métodos

4.1. Descripción general de las probetas utilizadas

Se utilizaron dos lotes de probetas de *Eucalyptus nitens* de la empresa *Ence energía y celulosa S.A.*, cuya localización se muestra en la Figura 16:

- 46 probetas sin termotratar, de procedencia Outeiro de Rei (Lugo), de dimensiones aproximadas 75 x 25 x 2.500 mm (ancho x espesor x longitud).
- 27 probetas termotrata-
das (por la empresa *Maderas Torresar S.A. (Termogenik)*: Orozko (Bizkaia)) a 170 °C, de procedencia Outeiro de Rei (Lugo), de dimensiones aproximadas 75 x 25 x 2.500 mm (ancho x espesor x longitud).

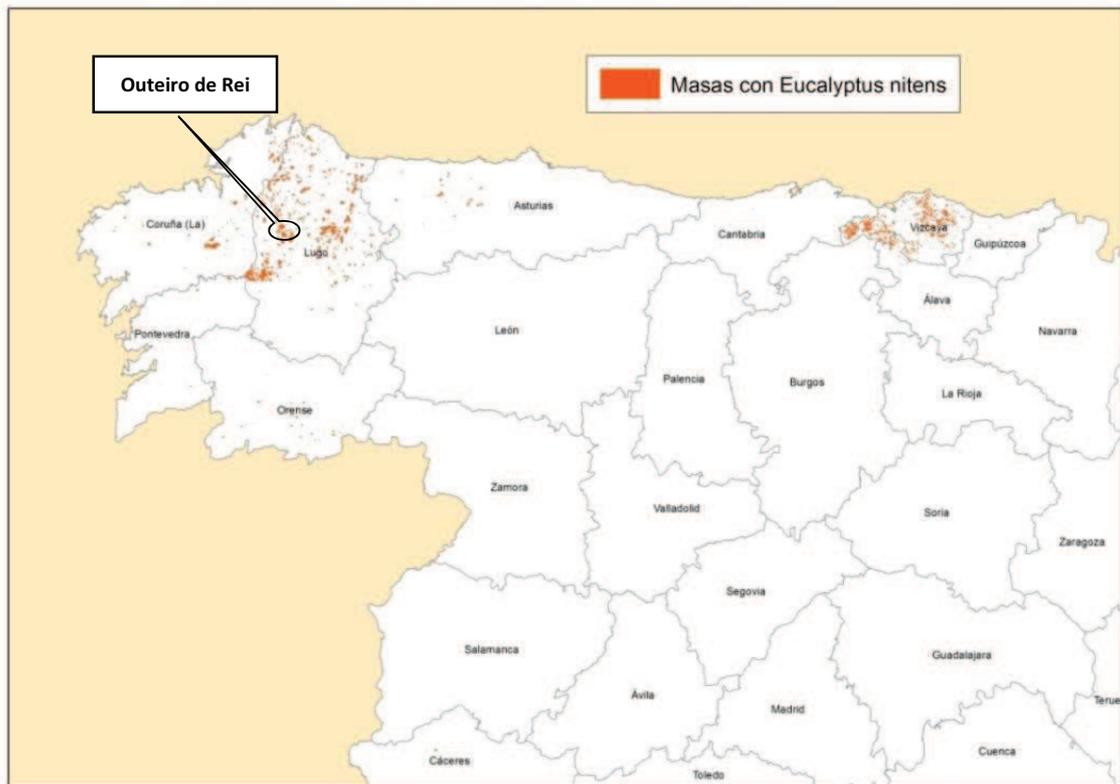


Figura 16. Distribución de las masas de *Eucalyptus nitens* en España
y localización de los árboles para las probetas
(Fuente: Elaboración propia a partir del Mapa Forestal Español 4)

Con el fin de conocer las dimensiones exactas de las piezas se midió su longitud (l), anchura (a) y altura (h) utilizando el flexómetro y el calibre con precisión de $\pm 0,05$ mm. También se pesaron para poder determinar su densidad. Las mediciones aparecen en el Anexo 1.

4.2. Clasificación visual según la norma UNE-EN 56.546: 2013

La norma UNE-EN 56.546: 2013 (AENOR 2013). *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de frondosas* establece un sistema de clasificación visual aplicable a la madera aserrada para uso estructural de las principales especies de frondosas españolas, pero de momento sólo se ha desarrollado para dos de ellas: eucalipto (*Eucalyptus globulus*) y castaño (*Castanea sativa*).

Para la clasificación visual de *Eucalyptus nitens* se procedió de manera similar a *Eucalyptus globulus*, para lo cual se evaluaron las siguientes características y singularidades:

- Características generales
 - Contenido de humedad
 - Densidad
 - Dimensiones
- Singularidades ligadas a la anatomía de la madera
 - Nudos
 - Fendas
 - Acebolladuras
 - Desviación de la fibra
 - Madera de reacción y juvenil
 - Anillos de crecimiento
- Singularidades ligadas al crecimiento de la madera
 - Gemas
 - Médula
- Alteraciones de tipo biológico
 - Alteraciones por hongos
 - Alteraciones por insectos xilófagos
- Deformaciones de las piezas
 - Curvatura de cara
 - Curvatura de canto

- Abarquillado
- Alabeo

Para ello se empleó material como: flexómetro, calibre, regla de 2 m, xilohigrómetro y balanza. La Figura 17 muestra una imagen del material utilizado para la clasificación visual.



Figura 17. Imagen del material utilizado para la clasificación visual
(Fuente: Elaboración propia)

De una manera similar a la realizada en la norma UNE-EN 56.546: 2013 (AENOR 2013) para *Eucalyptus globulus*, se ha establecido una calidad para la madera de *Eucalyptus nitens*, denominada MEF (Madera Estructural de Frondosas) y unos criterios de calidad que se muestran en la Tabla 7: aquellas piezas que no cumplan con los parámetros de calidad establecidos para MEF se consideran como rechazo.

Tabla 7. Criterios de calidad para clasificar las probetas de *Eucalyptus nitens* como MEF
(Fuente: AENOR 2013)

Criterios de calidad			MEF
Diámetro de los nudos sobre la cara (d/h)			$d \leq 1/3$ de "h"
Diámetro de los nudos sobre el canto (d/b)			$d \leq 1/2$ de "b"
Fendas	De secado	Fendas pasantes de testa	L (longitud) \leq "h"
		Resto	f (profundidad) $\leq 1/2$ de "b"
Rayo Heladura Abatimiento			No permitidas
Acebolladuras			No permitidas
Madera de tracción			Admisible en $1/3$ de la sección o en $1/5$ de la superficie externa
Desviación de la fibra			$\leq 10\%$
Gemas - Longitud - Dimensión relativa			- $\leq 1/4$ de "L" - $g \leq 1/4$
Médula			No permitida
Alteraciones biológicas - Pudrición - Insectos xilófagos			- No se admite - No se admiten ataques activos. En caso de ataques inactivos se admiten orificios aislados de hasta 2 mm de diámetro
Deformaciones máximas - Curvatura de cara - Curvatura de canto - Alabeo - Abarquillado			- 10 mm (para una longitud de 2 m) - 8 mm (para una longitud de 2 m) - 1 mm (por cada 25 mm de "h") (para una longitud de 2 m) - Sin limitación

4.3. Equipos de trabajo empleados

4.3.1 Equipo de vibraciones Mechanical Timber Grader (MTG)

Los ensayos de vibraciones son ensayos no destructivos, diferenciándose varios tipos: ultrasonidos, partículas magnéticas, radiografías, etc. Un tipo de estos ensayos se realiza mediante vibraciones, existiendo actualmente varios equipos disponibles. Uno de ellos es el medidor portátil de la resistencia de la madera MTG, al cual se le introducen previamente los valores de humedad de la pieza y temperatura ambiente y mide la

frecuencia natural de vibración de la pieza de madera en la dirección longitudinal, proporcionada por una excitación externa a través de un golpe de martillo y que se muestra en la Figura 18. Este valor de frecuencia es el utilizado posteriormente para estimar el MOE dinámico o módulo de elasticidad dinámico (E_{dyn}), en N/mm^2 , de la calidad estructural de la madera, el cual se calcula mediante la ecuación 1:

$$E_{dyn} = (2 * f * l)^2 * \rho \quad (\text{ecuación 1})$$

donde:

f es la frecuencia en hercios

l es la longitud en milímetros

ρ es la densidad en gramos dividido milímetro cúbico



Figura 18. Imagen de medición de una probeta con MTG
(Fuente: CESEFOR)

4.3.2 Máquina universal de ensayos

Los ensayos se realizaron en octubre de 2020 para 45 probetas sin termotratar (46 probetas originales menos 1 probeta que no fue apta para su ensayo) y en febrero de 2021 para 24 probetas termotratadas (27 probetas originales menos 3 probetas que no fueron aptas para su ensayo), en una máquina universal de ensayos a flexión (es un prototipo de máquina, sin nombre comercial), la cual se muestra en la Figura 19.

La máquina está situada en el laboratorio de ensayos del área de industria y construcción con madera de la Fundación centro de servicios y promoción forestal y de su industria de Castilla y León (CESEFOR) en Soria.



Figura 19. Imagen de la máquina universal de ensayos a flexión
(Fuente: Elaboración propia)

4.4. Metodología empleada

A continuación se describe el proceso seguido tomando como referencia las siguientes normas vigentes:

- UNE-EN 408: 2011 (AENOR 2011). *Estructuras de madera: Madera aserrada y madera laminada para uso estructural; Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas.*

- UNE-EN 384: 2016 (AENOR 2016). *Madera estructural: Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y densidad.*

- UNE-EN 13.183-2/AC: 2004 (AENOR 2004). *Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 2: Estimación por el método de la resistencia eléctrica.*

▪ Las probetas son acondicionadas en una atmósfera normalizada de 20 ± 2 °C y 65 ± 5 % de humedad relativa, mediante el uso del termómetro y xilohigrómetro (AENOR 2004) respectivamente. Se considera que una probeta está acondicionada cuando llega a masa constante, se considera que se ha alcanzado masa constante cuando dos pesadas sucesivas realizadas en un intervalo de 6 horas no difieren en más de 0,1 % de la masa

de la probeta. La Figura 20 muestra una imagen de las probetas de *Eucalyptus nitens* termotratadas y la Figura 21 muestra un detalle del momento de medición del contenido de humedad con el xilohigrómetro.



Figura 20. Imagen de las probetas de *Eucalyptus nitens* termotratadas (Fuente: Elaboración propia)



Figura 21. Imagen de la medición del contenido de humedad con xilohigrómetro (Fuente: CESEFOR)

- Las probetas se miden en longitud, anchura y grosor mediante el uso del flexómetro. Como la anchura y grosor varían dentro de cada probeta, estas dimensiones se estiman mediante la media de tres comprobaciones efectuadas una en torno a la mitad de la longitud de la probeta y las otra dos cercanas a cada uno de los extremos y no a menos

de 150 mm de las testas. A partir de estas mediciones y del peso se determina la densidad de las probetas.

▪ Se determina el MOE o módulo de elasticidad local en flexión ($E_{m,l}$) a partir de ensayos experimentales realizados según la norma UNE-EN 408 (AENOR 2011), tal y como se muestra en las Figuras 22, 23, 24 y 25:

- Para ello el requisito previo es que la longitud de la probeta a ensayar sea como mínimo igual a 19 veces la altura de la sección.

- La probeta se debe cargar en flexión en la máquina de ensayos con los apoyos y puntos de carga según la posición marcada en la norma UNE-EN 408 (Figura 22), la probeta va ser apoyada en dos puntos separados una distancia de 18 veces la altura nominal considerada, correspondiendo para estos ensayos la altura con la anchura.

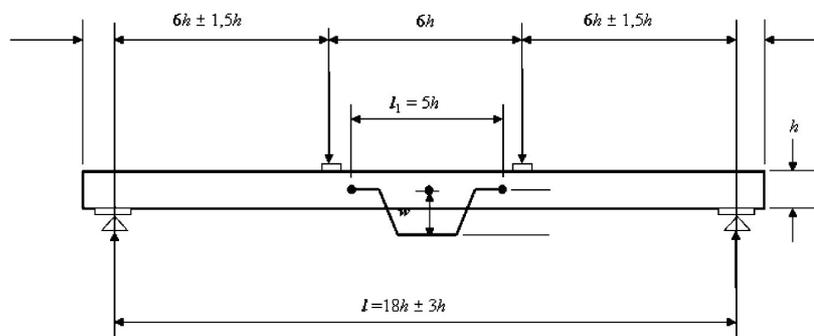


Figura 22. Dispositivo de ensayo para la medición del módulo de elasticidad local en flexión (Fuente: AENOR 2011)



Figura 23. Imagen de detalle de implementación de extensómetros (Fuente: CESEFOR)

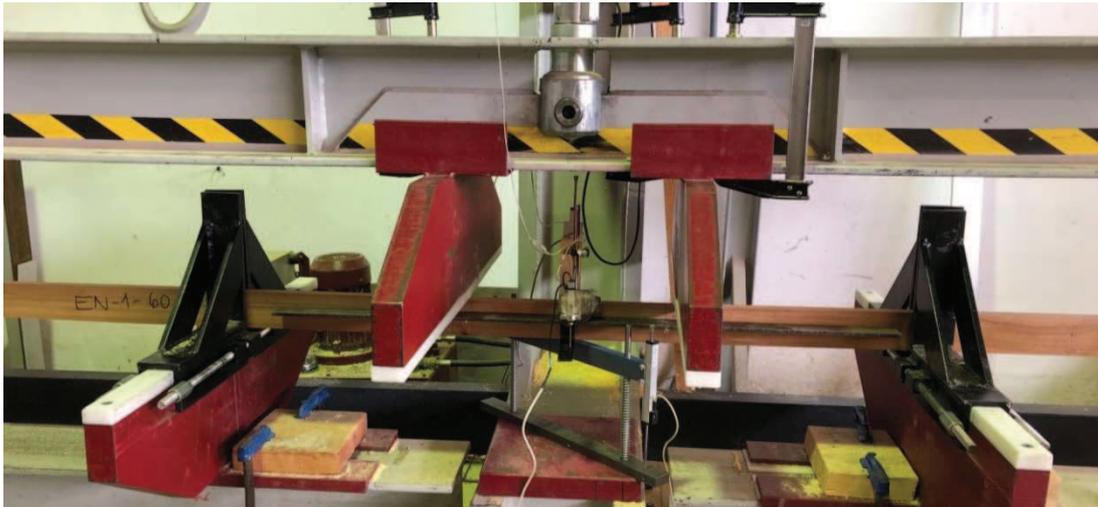


Figura 24. Imagen del ensayo a tracción de una probeta antes de la rotura
(Fuente: CESEFOR)

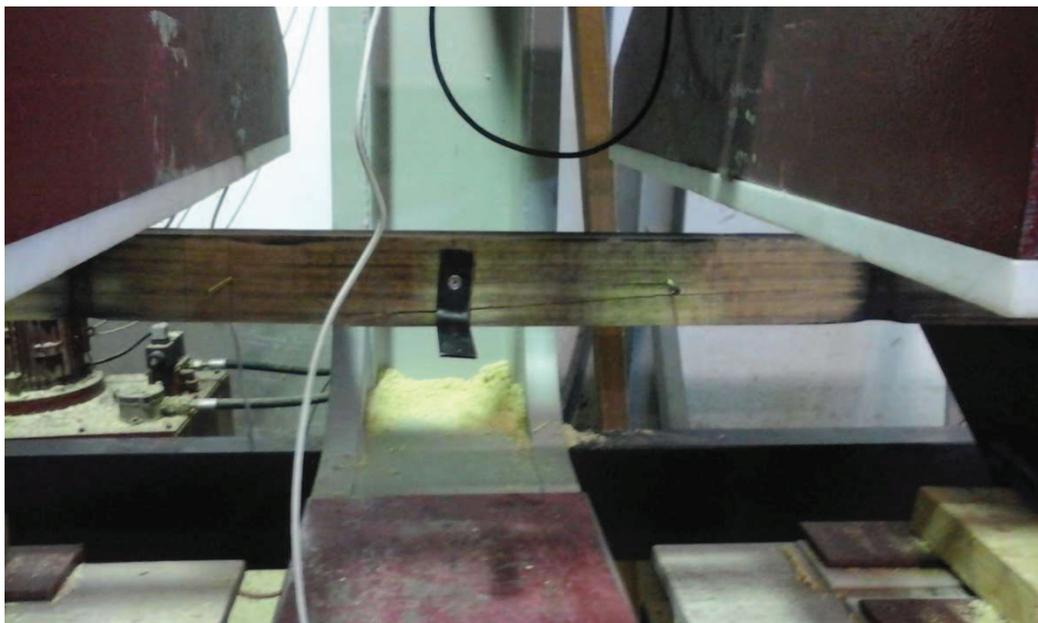


Figura 25. Imagen del ensayo a tracción de una probeta después de la rotura
(Fuente: Elaboración propia)

- Se colocan los extensómetros y se inicia la carga, la cual se debe de aplicar con una velocidad constante sobre dos puntos de carga separados entre sí 6 veces la altura, no debiendo superar esta velocidad de avance de la cabeza de la carga los $0,003 h \text{ mm/s}$, siendo h la altura en mm. Además, con el fin de evitar la rotura de los extensómetros, la carga máxima aplicada no debe supera 0,4 veces la carga máxima estimada ($F_{m\acute{a}x,est}$), obteniéndose ésta con los resultados de 10 probetas como mínimo o partiendo de datos de ensayo preexistentes adecuados, con el

fin de asegurar que se está midiendo en el tramo de comportamiento elástico del material.

- También se deben de tener en cuenta otros requisitos como que el dispositivo de carga utilizado deba permitir la medición de la fuerza con una precisión del 1 % de la carga aplicada a la probeta, o para cargas inferiores al 10 % de la carga máxima, con una precisión del 0,1 % de la carga máxima aplicada.
- La deformación local en flexión de la viga (w) debe tomarse como la media de las mediciones de los extensómetros en ambas caras en el eje neutro, y debe medirse en el punto medio de un segmento de longitud igual a 5 veces la altura de la probeta, tal y como se muestra en la Figura a. El dispositivo de medición (extensómetro) debe ser capaz de medir las deformaciones con una precisión de 1 %, o para flechas inferiores a 2 mm, con precisión de 0,02 mm.
- Se traza el gráfico de carga/deformación y para un análisis de regresión se utiliza el tramo de él comprendido entre 0,1 y 0,4 veces la carga máxima estimada.
- Se busca el tramo más largo de esta sección que dé un coeficiente de correlación (R^2) de 0,99 o mejor, incluyéndose al menos el tramo del gráfico comprendido entre 0,2 y 0,3 veces la carga máxima estimada.
- Se calcula el MOE o módulo de elasticidad local ($E_{m,l}$), en N/mm², con la ecuación 2, debiéndose calcular con una precisión del 1 %:

$$E_{m,l} = \frac{al^2(F_2 - F_1)}{16I(w_2 - w_1)} \quad (\text{ecuación 2})$$

donde:

a es la distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo en milímetros

l es la luz en milímetros

$F_2 - F_1$ es el incremento de carga en newtons en la recta de regresión con un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor

I es el momento de inercia en milímetros elevados a la cuarta potencia, calculándose con la ecuación 3:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (\text{ecuación 3})$$

donde:

b es la anchura en milímetros

h es la altura en milímetros

$w_2 - w_1$ es el incremento de deformación en milímetros correspondiente a $F_2 - F_1$

▪ Después se determina el MOEG o módulo de elasticidad global en flexión ($E_{m,g}$), tal y como se muestra en la Figura 26:

- Para ello el requisito previo es que la longitud de la probeta a ensayar sea como mínimo igual a 19 veces la altura nominal de la sección.

- A continuación, la probeta se debe cargar en flexión en la máquina de ensayos sobre dos puntos simétricos, para lo cual la luz de ensayo será igual a 18 veces la altura, es decir, la probeta va ser apoyada en dos puntos separados una distancia de 18 veces la altura nominal considerada, correspondiendo para estos ensayos la altura con la anchura.

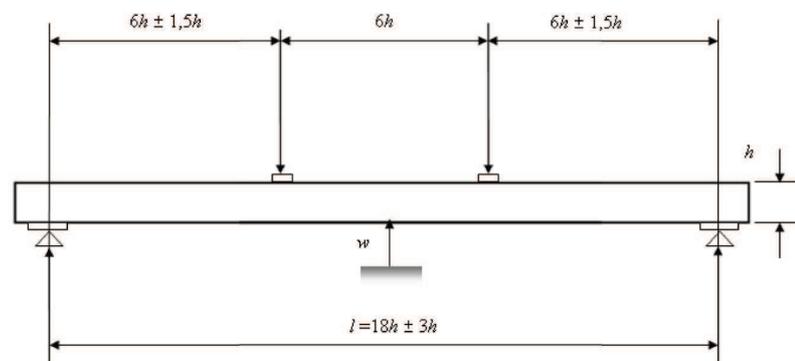


Figura 26. Esquema de ensayo para la medición del módulo de elasticidad global en flexión (Fuente: AENOR 2011)

- La carga y el dispositivo de carga se realiza de la misma manera que lo explicado para el módulo de elasticidad local.

- Además la deformación (w) debe medirse en el centro de la luz.

- Lo relativo a las deformaciones, gráfico y su tramo se realiza de la misma manera que lo explicado para el módulo de elasticidad local.

- Se calcula el MOEG o módulo de elasticidad global ($E_{m,g}$), en N/mm², con la ecuación 4, debiéndose calcular con una precisión del 1 %:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left(2 \frac{w_2 - w_1}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gb} \right)} \quad (\text{ecuación 4})$$

donde:

a es la distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo en milímetros

l es la luz en milímetros

b es la anchura en milímetros

$w_2 - w_1$ es el incremento de deformación en milímetros correspondiente
a $F_2 - F_1$

$F_2 - F_1$ es el incremento de carga en newtons en la recta de regresión con
un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor

I es el momento de inercia en milímetros elevados a la cuarta potencia

G es el módulo de elasticidad transversal en newtons por milímetro
cuadrado. Para el cálculo del módulo global se ha tomado el valor de G
como infinito

h es la altura en milímetros

- Y finalmente se determina el MOR, módulo de ruptura o resistencia a la flexión axial (f_m): una vez retirados los extensómetros de medición de la flecha de la viga, se continúa el ensayo de flexión hasta que se produzca la rotura de la probeta:

- Se realiza de la forma similar a lo explicado con anterioridad.
- Se calcula la resistencia a flexión (f_m), en N/mm^2 , con la ecuación 5, debiéndose calcular con una precisión del 1 %:

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2} \quad (\text{ecuación 5})$$

donde:

F es la carga en newtons

a es la distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo en
milímetros

b es la anchura en milímetros

h es la altura en milímetros

- Además se debe anotar la forma de rotura y las características de crecimiento en la sección de rotura de cada probeta.
- Las clases resistentes de la madera aserrada están referidas a cantos (h) de referencia de 150 mm, por lo que los resultados deben ajustarse a las condiciones de referencia de 150 mm según la ecuación 6 en el caso de cantos menores de 150 mm. Para ello, la resistencia debe dividirse por el factor de corrección k_h :

$$k_h = \text{Min} \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{150}{h}\right)^{0,2} \\ 1,3 \end{array} \right. \quad (\text{ecuación 6})$$

donde:

h es la altura en milímetros

4.5. Asignación de clase resistente según la norma UNE-EN 338: 2017

Según la norma UNE-EN 14.358: 2016 (AENOR 2016). *Estructuras de madera. Determinación y verificación de los valores característicos*, el valor característico es una estimación de la propiedad de la población de referencia y puede basarse en el valor correspondiente del percentil del 5 % para la resistencia o la densidad y en el valor medio para la rigidez.

• Para ello, la resistencia se ha estimado considerando una distribución log-normal según la ecuación 7:

$$m_k = \exp(\bar{y} - k_s(n) * s_y) \quad (\text{ecuación 7})$$

donde:

m_k es el valor correspondiente al percentil del 5 % de la variable m

\bar{y} es el valor medio de la muestra, calculándose con la ecuación 8:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln m_i \quad (\text{ecuación 8})$$

donde:

n es el número de valores

m_i es el valor i de la variable m

$k_s(n)$ es un coeficiente, calculándose con la ecuación 9:

$$k_s(n) = \frac{6,5n + 6}{3,7n - 3} \quad (\text{ecuación 9})$$

s_y es la desviación típica, calculándose con la ecuación 10:

$$s_y = \max. \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln m_i - \bar{y})^2} \\ 0,05 \end{cases} \quad \text{(ecuación 10)}$$

- La densidad se ha estimado considerando una distribución normal según la ecuación 11:

$$m_k = \bar{y} - k_s(n) * s_y \quad \text{(ecuación 11)}$$

donde:

\bar{y} se ha calculado con la ecuación 12:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \quad \text{(ecuación 12)}$$

$k_s(n)$ se ha calculado con la ecuación 9

s_y se ha calculado con la ecuación 13:

$$s_y = \max. \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{y})^2} \\ 0,05\bar{y} \end{cases} \quad \text{(ecuación 13)}$$

- La rigidez se ha calculado con la ecuación 14:

$$m_{\text{medio}} = \bar{y} - k_s(n) * s_y \quad \text{(ecuación 14)}$$

donde:

m_{medio} es el valor medio de la variable m

\bar{y} se ha calculado con la ecuación 12

$k_s(n)$ se ha calculado con la ecuación 15:

$$k_s(n) = \frac{0,78}{n^{0,53}} \quad \text{(ecuación 15)}$$

s_y se ha calculado con la ecuación 13

Una vez calculados estos valores se acude a la tabla de clases resistentes para frondosas de la norma UNE-EN 338: 2017 (AENOR 2017). *Madera estructural. Clases resistentes* que se muestra en la Tabla 8 y se determina su clase resistente en función del menor valor de una de las tres siguientes propiedades: resistencia característica a flexión ($f_{m,k}$), módulo de elasticidad medio en flexión paralelo a la fibra ($E_{m,0}$) y densidad característica (ρ_k).

Tabla 8. Clases resistentes para madera de frondosas
basadas en ensayos de flexión de canto
(Fuente: AENOR 2017)

	Clase	D18	D24	D27	D30	D35	D40	D45	D50	D55	D60	D65	D70	D75	D80
Propiedades de resistencia en N/mm²															
Flexión	$f_{m,k}$	18	24	27	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Tracción paralela a la fibra	$f_{t,0,k}$	11	14	16	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
Tracción perpendicular a la fibra	$f_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compresión paralela a la fibra	$f_{c,0,k}$	18	21	22	24	25	27	29	30	32	33	35	36	37	38
Compresión perpendicular a la fibra	$f_{c,90,k}$	4,8	4,9	5,1	5,3	5,4	5,5	5,8	6,2	6,6	10,5	11,3	12,0	12,8	13,5
Cortante	$f_{v,k}$	3,5	3,7	3,8	3,9	4,1	4,2	4,4	4,5	4,7	4,8	5,0	5,0	5,0	5,0
Propiedades de rigidez en kN/mm²															
Módulo de elasticidad medio en flexión paralela a la fibra	$E_{m,0,mean}$	9,5	10,0	10,5	11,0	12,0	13,0	13,5	14,0	15,5	17,0	18,5	20,0	22,0	24,0
Módulo de elasticidad característico en flexión paralela a la fibra (5% percentil)	$E_{m,0,k}$	8,0	8,4	8,8	9,2	10,1	10,9	11,3	11,8	13,0	14,3	15,5	16,8	18,5	20,2
Módulo de elasticidad medio perpendicular a la fibra	$E_{m,90,mean}$	0,63	0,67	0,70	0,73	0,80	0,87	0,90	0,93	1,03	1,13	1,23	1,33	1,47	1,60
Módulo de cortante medio	G_{mean}	0,59	0,63	0,66	0,69	0,75	0,81	0,84	0,88	0,97	1,06	1,16	1,25	1,38	1,50
Densidad en kg/m³															
Densidad característica (5% percentil)	ρ_k	475	485	510	530	540	550	580	620	660	700	750	800	850	900
Densidad media	ρ_{mean}	570	580	610	640	650	660	700	740	790	840	900	960	1020	1080

4.6. Determinación de las contracciones lineales

Para la determinación de las contracciones lineales se sigue la norma UNE 56.533: 1977. *Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de las contracciones lineal y volumétrica.*

▪ De las probetas ensayadas hasta rotura en los ensayos a flexión (45 probetas sin termotratar y 24 probetas termotratadas) se obtuvo una rodaja de cada probeta. A partir de esa rodaja se tendría que preparar una probeta en forma de prisma cuadrangular de 20 x 20 mm, paralela a la dirección radial, y de 40 mm en la dirección longitudinal. Como en algunas rodajas no fue posible preparar probetas de 20 mm de lado, se optó por preparar, en aquellas en las que fue posible, probetas de 18 x 18 mm de lado, como se muestra en las Figuras 27 y 28. Se obtuvieron 15 probetas sin termotratar y 15 probetas termotratadas.



Figura 27. Imagen de preparación de una probeta a partir de la rodaja
(Fuente: Elaboración propia)

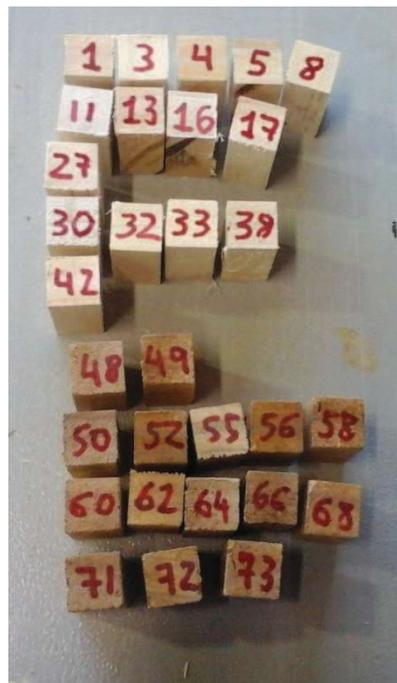


Figura 28. Imagen de probetas obtenidas
(Fuente: Elaboración propia)

- Las probetas se sumergieron en agua a la temperatura ambiente, manteniéndolas así hasta sobrepasar la humedad de saturación, hecho que para una madera dura como es *Eucalyptus nitens* podía ocurrir antes de 48 horas. Se sacaron del agua y se les midió: su longitud saturada (l_s), anchura saturada (h_s) y espesor saturado (b_s) con pie de rey o calibre con precisión de 0,1 mm.

- Se dejaron las probetas en atmósfera ambiente hasta que alcanzaron el estado de equilibrio higroscópico, como se muestra en la Figura 29, lo que se comprobó realizando pesadas sucesivas, en balanza con precisión de 0,1 g, con intervalos de 24 horas hasta que dos pesadas consecutivas difirieron en menos de 1/200 de la primera de ellas. Sobre cada probeta se midió: su longitud a humedad de equilibrio (l_H), anchura a humedad de equilibrio (h_H) y espesor a humedad de equilibrio (b_H).



Figura 29. Imagen de las probetas para que alcancen su estado de equilibrio higroscópico (Fuente: Elaboración propia)

- Se secaron las probetas en estufa con circulación de aire a temperatura de 103 ± 2 °C durante 48 horas. Se les midió: su longitud anhidra (l_0), anchura anhidra (h_0) y espesor anhidro (b_0).
- Finalmente se calcula la contracción lineal, en %, en cada dirección, y el coeficiente de contracción volumétrica, en %, con las ecuaciones 16, 17, 18 y 19:

- Contracción lineal longitudinal

$$C_l = \frac{l_s - l_0}{l_0} * 100 \quad (\text{ecuación 16})$$

donde:

l_s es la longitud saturada en milímetros

l_0 es la longitud anhidra en milímetros

- Contracción lineal tangencial

$$C_h = \frac{h_s - h_0}{h_0} * 100 \quad (\text{ecuación 17})$$

donde:

h_s es la anchura saturada en milímetros

h_0 es la anchura anhidra en milímetros

- Contracción lineal radial

$$C_b = \frac{b_s - b_0}{b_0} * 100 \quad (\text{ecuación 18})$$

donde:

b_s es el espesor saturado en milímetros

b_0 es el espesor anhidro en milímetros

- Coeficiente de contracción volumétrica

$$v = \frac{V_h - V_0}{V_0 * H} * 100 \quad (\text{ecuación 19})$$

donde:

V_h es el volumen a la humedad de equilibrio higroscópico en centímetros cúbicos

V_0 es el volumen anhidro en centímetros cúbicos

H es la humedad de equilibrio higroscópico en porcentaje

4.7. Análisis estadístico

El análisis estadístico se ha realizado mediante el programa informático STATGRAPHICS Centurion 18.

4.7.1. Estadística descriptiva

Para cada una de las variables consideradas se obtuvieron las siguientes estadísticas:

- *Número de valores (N)*: es el total de mediciones para cada variable.
- *Media aritmética o promedio*: es la suma de todos los valores dividida entre el número total de valores.
- *Mínimo*: es el valor con un número más bajo del total de valores.
- *Máximo*: es el valor con un número más alto del total de valores.

5. Resultados y discusión

5.1. Resultados de la clasificación visual

Asumiendo que la norma UNE-EN 56.546: 2013 (AENOR 2013). *Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de frondosas de Eucalyptus globulus* fuera de aplicación para *Eucalyptus nitens*, en las Tablas 9 y 10 se muestra el número total de probetas estructurales clasificadas como MEF y el porcentaje que suponen respectivamente.

Tabla 9. Número de probetas de *Eucalyptus nitens* admitidas como MEF según UNE-EN 56.546

Criterios de calidad			MEF	
<i>Termotratamiento</i>			<i>Sin termotratar</i>	<i>Termotratado</i>
Diámetro de los nudos sobre la cara (d/h)			44 de 45	23 de 24
Diámetro de los nudos sobre el canto (d/b)			45 de 45	24 de 24
Fendas	De secado	Fendas pasantes de testa	45 de 45	24 de 24
		Resto	45 de 45	24 de 24
		Rayo Heladura Abatimiento	45 de 45	24 de 24
Acebolladuras			45 de 45	24 de 24
Madera de tracción			45 de 45	24 de 24
Desviación de la fibra			45 de 45	24 de 24
Gemas				
- Longitud			45 de 45	24 de 24
- Dimensión relativa			45 de 45	24 de 24
Médula			45 de 45	24 de 24
Alteraciones biológicas				
- Pudrición			45 de 45	24 de 24
- Insectos xilófagos			45 de 45	24 de 24
Deformaciones máximas				
- Curvatura de cara			45 de 45	24 de 24
- Curvatura de canto			45 de 45	23 de 24
- Alabeo			32 de 45	18 de 24
- Abarquillado			45 de 45	24 de 24

Tabla 10. Resumen del número de probetas de *Eucalyptus nitens* en la clasificación visual

	MEF	Rechazo	Total
Sin termotratar	31 (68,89%)	14 (31,11%)	45 (100%)
Termotratar	16 (66,67%)	8 (33,33%)	24 (100%)

Como se puede comprobar en las tablas, la mayoría de los rechazos fueron debidos al alabeo (se considera rechazo cuando el alabeo es superior a 1 mm (por cada 25 mm de "h", tomando "h" el valor de 77,37 mm para probetas sin termotratar y 78,31 mm para probetas termotradas)) y en menor medida los rechazos fueron debidos al diámetro de los nudos sobre la cara y a la curvatura de canto. Los resultados de MEF y rechazos entre probetas sin termotratar y termotradas son muy parecidos y suponen aproximadamente que a una de cada tres probetas no se la puede clasificar como madera estructural.

5.2. Resultados de la asignación de clase resistente

Como los valores de la flecha local obtenidos experimentalmente no han sido válidos, el módulo de elasticidad se ha determinado a partir de los valores de la flecha global, resultando en un valor de módulo de elasticidad global medio de 18.112 N/mm² en la madera sin termotratar y de 15.682 N/mm² en la madera termotrada.

Asumiendo que la ecuación 11, indicada en la norma UNE-EN 384: 2016 (AENOR 2016). *Madera estructural: Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y densidad*, para la determinación del módulo de elasticidad local a partir del global fuese de aplicación a la madera de *Eucalyptus nitens*, los valores de módulo de elasticidad local obtenidos serían los mostrados en la Tabla 11:

$$E_0 = E_{m,global} * 1,3 - 2.690 \quad (\text{ecuación 20})$$

Tabla 11. Valores característicos obtenidos de las probetas de *Eucalyptus nitens*

Propiedad	Valor característico	
	Sin termotratar	Termotratar
Resistencia característica a flexión (N/mm ²)	51	26
Módulo de elasticidad medio paralelo a la fibra (N/mm ²)	20.856	17.697
Módulo de elasticidad paralelo a la fibra (5 ^o percentil) (N/mm ²)	15.743	14.523
Densidad media (kg/m ³)	614	536
Densidad característica (5 ^o percentil) (kg/m ³)	432	414
Asignación de clase resistente	C27	C24

Por lo que, según UNE-EN 338, tanto las probetas sin termotratar como las termotratadas no alcanzarían el mínimo para ser consideradas como clase resistente D18 debido al bajo valor de densidad obtenido en comparación con los mínimos exigidos en las clases resistentes D. Por lo tanto, lo más adecuado para esta especie sería la asignación de clases resistentes C, correspondientes a la madera de coníferas. Según la Tabla 12 (UNE-EN 338: 2017), la madera de *E. nitens* sin termotratar se podría asignar a una clase resistente C27, limitada también por el valor de densidad. En el caso de la madera termotratada, la clase resistente descendería a una C24, limitada en este caso por el valor de la resistencia a flexión.

Tabla 12. Clases resistentes para madera de coníferas
basadas en ensayos de flexión de canto
(Fuente: AENOR 2017)

	Clase	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Propiedades de resistencia en N/mm²													
Flexión	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Tracción paralela a la fibra	$f_{t0,k}$	7,2	8,5	10	11,5	13	14,5	16,5	19	22,5	26	30	33,5
Tracción perpendicular a la fibra	$f_{t90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compresión paralela a la fibra	$f_{c0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	24	25	27	29	30
Compresión perpendicular a la fibra	$f_{c90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,7	2,7	2,8	2,9	3,0
Cortante	f_{vk}	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Propiedades de rigidez en kN/mm²													
Módulo de elasticidad medio en flexión paralela a la fibra	$E_{m0,mean}$	7,0	8,0	9,0	9,5	10,0	11,0	11,5	12,0	13,0	14,0	15,0	16,0
Módulo de elasticidad característico en flexión paralela a la fibra (5% percentil)	$E_{m0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,1	10,7
Módulo de elasticidad medio perpendicular a la fibra	$E_{m90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Módulo de cortante medio	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Densidad en kg/m³													
Densidad característica (5% percentil)	ρ_k	290	310	320	330	340	350	360	380	390	400	410	430
Densidad media	ρ_{mean}	350	370	380	400	410	420	430	460	470	480	490	520

Algo similar ocurre con otras frondosas españolas, como es el caso del chopo (*Populus spp.*), que la propia norma UNE-EN 338 incluye directamente en las clases resistentes de coníferas, o como el caso de la madera de *Eucalyptus grandis* de Uruguay, donde las propiedades físico-mecánicas correspondientes a la calidad visual EF1 (UNIT 1.262: 2018) mostradas en la Tabla 13 serían las correspondientes a una clase C20, no pudiendo ser asignada a una clase D debido al bajo valor de densidad de esta especie estudiada.

Tabla 13. Valores característicos de las propiedades de la madera estructural de
Eucalyptus grandis clasificada visualmente como EF1
(Fuente: UNIT 2018)

Propiedad	Valor característico EF1
Resistencia característica a flexión (N/mm ²)	21,4
Módulo de elasticidad medio paralelo a la fibra (N/mm ²)	11.960
Densidad media (kg/m ³)	519
Densidad característica (5 ⁰ percentil) (kg/m ³)	386
Asignación de clase resistente	C20

5.3. Resultados experimentales

5.3.1. Diagramas carga-deformación de las probetas ensayadas a flexión

A. Gráficas carga-deformación local con dos extensómetros

Como se puede observar en las dos gráficas de las Figuras 30 y 31 para probetas sin termotratar, el extensómetro nº 4, colocado en la cara B de la probeta, no midió correctamente en ninguna probeta, por lo que el valor medio de la pendiente de ambos extensómetros no pudo ser tomado para el cálculo del módulo de elasticidad local. Para su cálculo se tomó la pendiente obtenida con la medición en la cara A (extensómetro nº 2). El resto de gráficas se muestran en el Anexo 4.

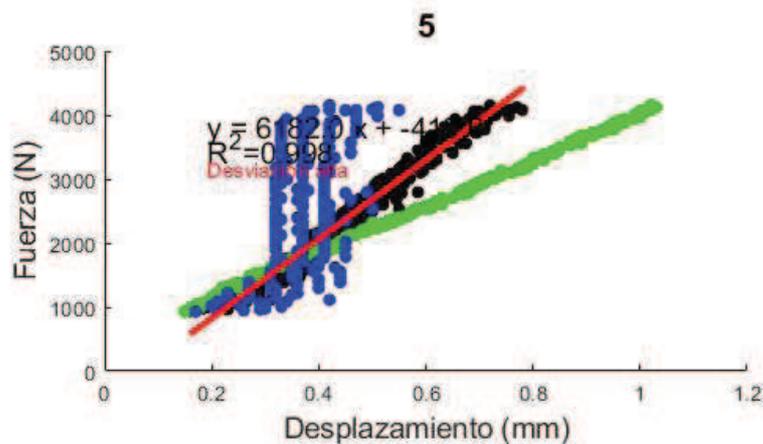


Figura 30. Gráfica carga-deformación local en ambas caras (extensómetro nº 2 en color verde y extensómetro nº 4 en color azul) y valor medio (color negro) de la probeta sin termotratar nº 5

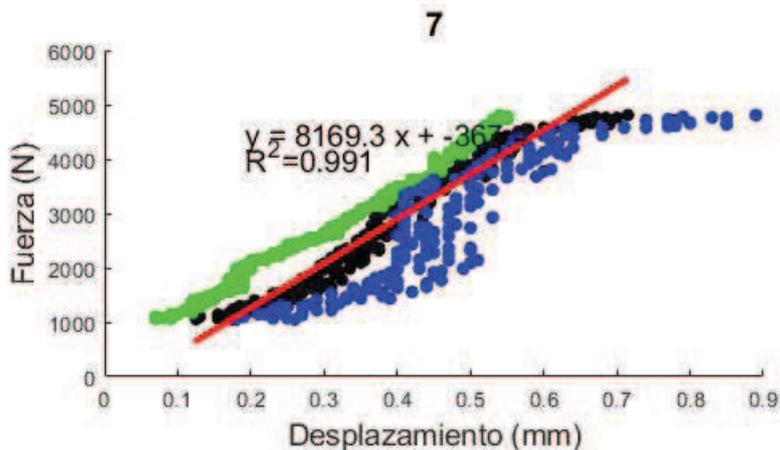


Figura 31. Gráfica carga-deformación local en ambas caras (extensómetro nº 2 en color verde y extensómetro nº 4 en color azul) y valor medio (color negro) de la probeta sin termotratar nº 7

De forma parecida se puede observar en las dos gráficas de las Figuras 32 y 33 para probetas termotrataadas, en las cuales existen desviaciones grandes entre las medidas de los dos extensómetros colocados en las caras de la probetas. Además, en general el extensómetro nº 4 (cara B de la probeta) mostró una tendencia no lineal en la medición, lo que demuestra un error de medida. Por este motivo, para la determinación del módulo de elasticidad local se han utilizado únicamente las medidas del extensómetro nº 2 (cara A), al igual que ocurrió en las probetas sin termotratar. El resto de gráficas se muestran en el Anexo 4.

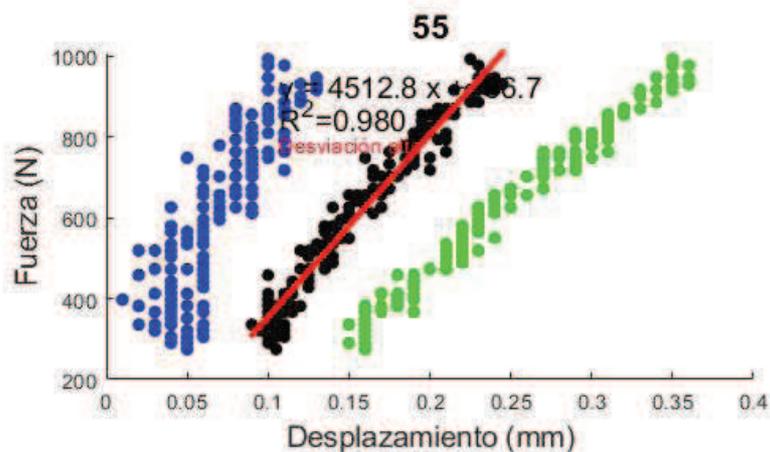


Figura 32. Gráfica carga-deformación local en ambas caras (extensómetro nº 2 en color verde y extensómetro nº 4 en color azul) y valor medio (color negro) de la probeta termotrataada nº 55

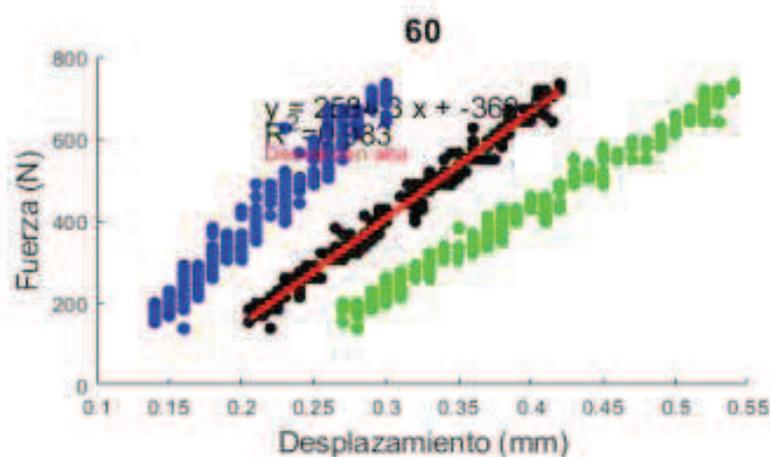


Figura 33. Gráfica carga-deformación local en ambas caras (extensómetro nº 2 en color verde y extensómetro nº 4 en color azul) y valor medio (color negro) de la probeta termotrataada nº 60

B. Gráficas carga-deformación local en la cara A

Las siguientes figuras muestran dos gráficas carga-deformación local en la cara A para las probetas sin termotratar y otras dos para las probetas termotradas, cuya pendiente fue tomada para el cálculo del módulo de elasticidad local. El resto de gráficas válidas se muestran en el Anexo 4.

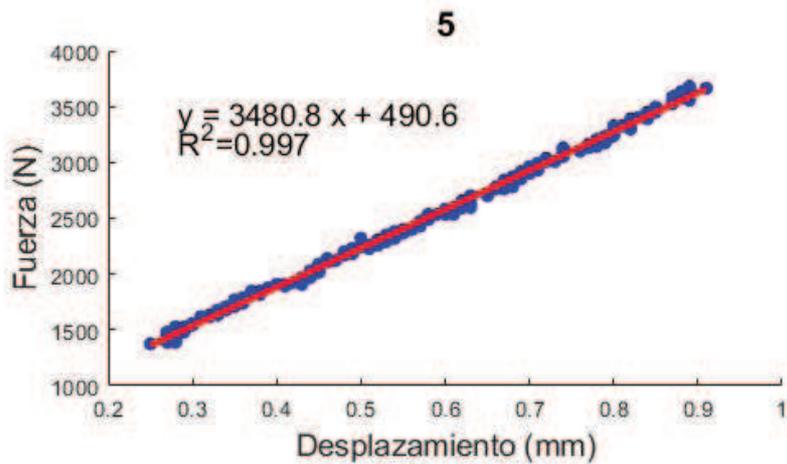


Figura 34. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 5

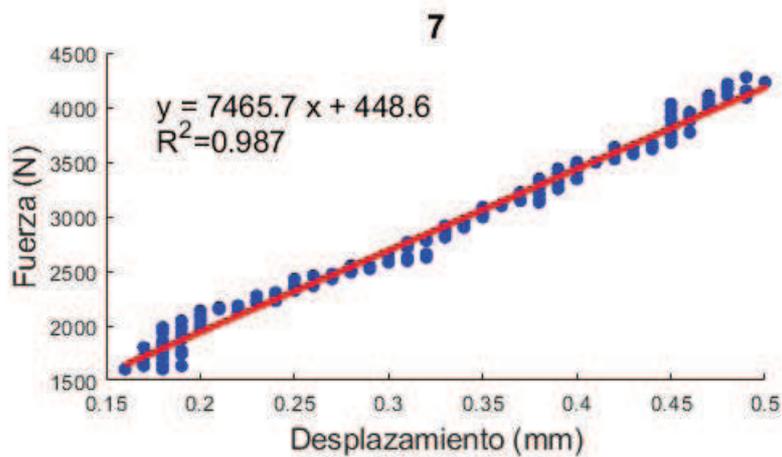


Figura 35. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 7

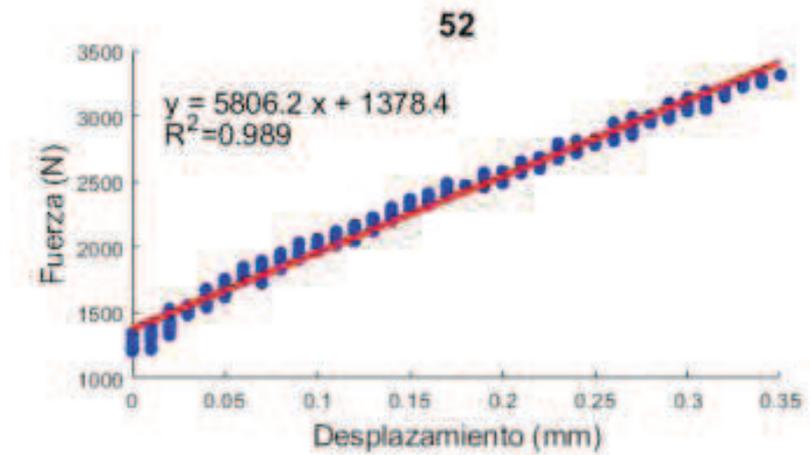


Figura 36. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta termotrada nº 52

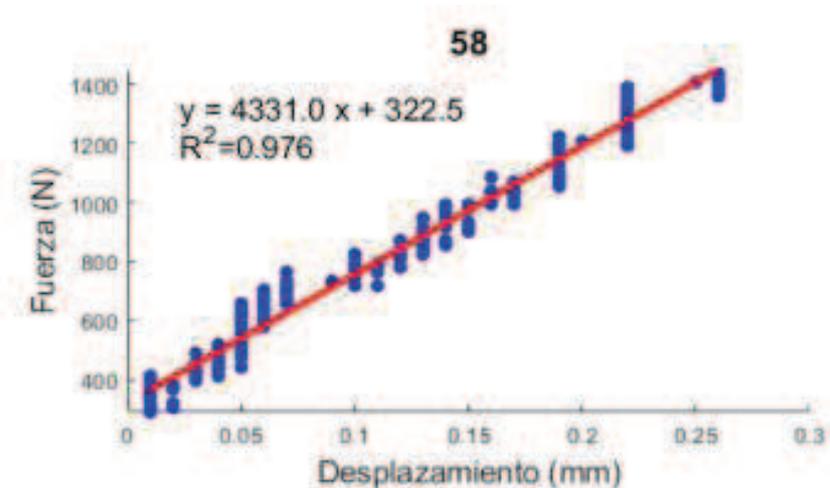


Figura 37. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta termotrada nº 58

C. Gráficas carga-deformación global con recorrido de pistón

Las siguientes figuras muestran dos gráficas carga-deformación global para probetas sin termotratar obtenidas a partir de las mediciones de desplazamiento del pistón de carga, debido a que no se tomaron datos del desplazamiento global a partir de extensómetro. En color negro se representa el diagrama carga-desplazamiento hasta la rotura y en color verde el tramo elástico sobre el que se tomó la pendiente para la determinación del módulo de elasticidad global. El resto de gráficas válidas se muestran en el Anexo 4.

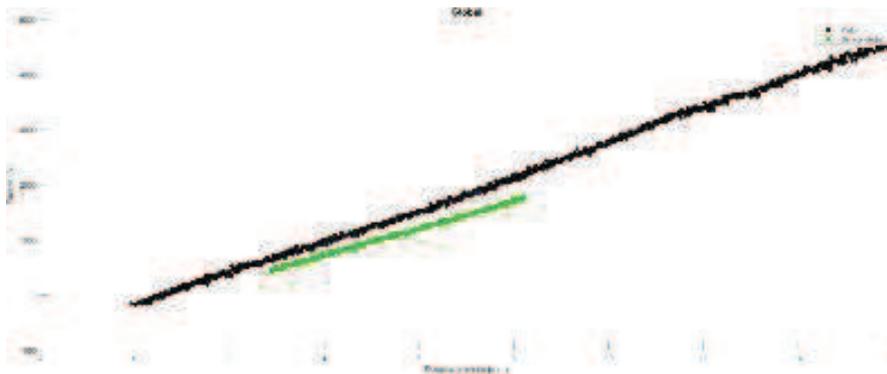


Figura 40. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 49

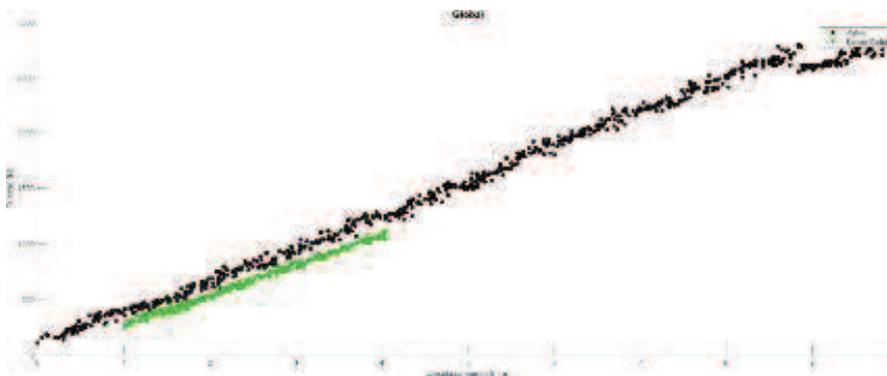


Figura 41. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 50

5.3.2. Base de datos para el análisis de los resultados

Debido a los problemas detectados en las medidas experimentales, se ha tenido que renunciar a la determinación del módulo de elasticidad local, tanto en la madera sin termotratar como en la termotrada. Por este motivo, el módulo de elasticidad determinado ha sido el global. Además, de las 24 probetas termotradas iniciales se han eliminado 8 probetas que no han cumplido otros parámetros de ensayo, por lo que las probetas termotradas seleccionadas han sido 16, y de las 45 probetas sin termotratar iniciales se ha eliminado 1 que no ha cumplido otro parámetro de ensayo, por lo que las probetas sin termotratar seleccionadas han sido 44.

La Figura 42 muestra la correlación entre el módulo de elasticidad global determinado a partir de pistón y de extensómetro de las probetas termotradas. Como se puede observar, la correlación entre ambos valores es alta ($R^2 = 0,78$).

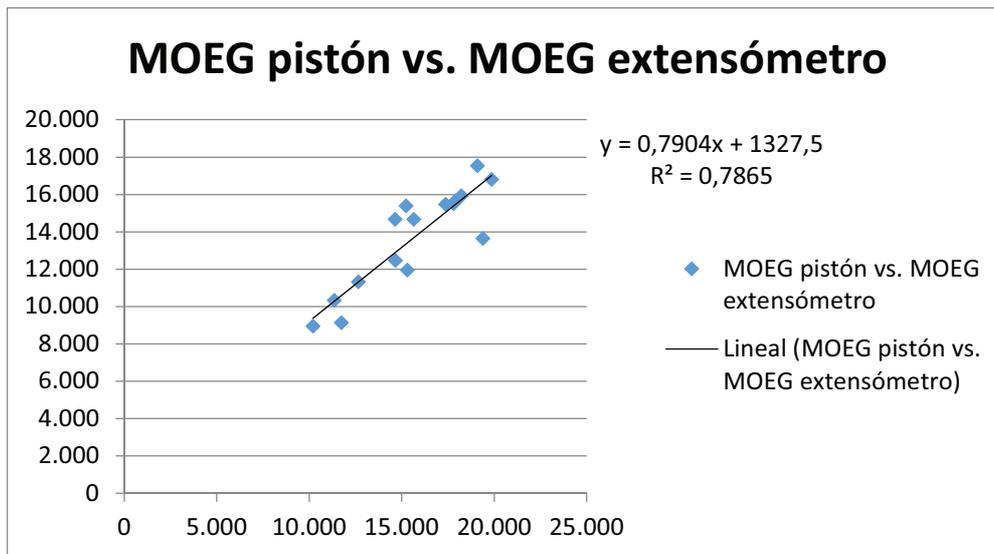


Figura 42. Gráfica de correlación entre el módulo de elasticidad global de pistón y de extensómetro

Los valores de los ensayos destructivos de las probetas sin termotratar y termotratadas se muestran en el Anexo 3.

5.4. Resultados de las propiedades elasto-mecánicas

Las variables físico-mecánicas utilizadas en los ensayos destructivos y no destructivos son:

- Densidad: es la densidad, al 12 % de humedad, de la rodaja obtenida de la probeta una vez realizado el ensayo destructivo a flexión.
- Humedad: es la humedad de la rodaja obtenida de la probeta una vez realizado el ensayo destructivo a flexión.
- Frecuencia MTG: es la frecuencia obtenida con MTG.
- MOE dinámico: es el módulo de elasticidad dinámico calculado con el ensayo no destructivo obtenido con MTG.
- MOR: es el módulo de ruptura corregido calculado con el ensayo destructivo a flexión.
- MOEG: es el módulo de elasticidad global corregido calculado con el ensayo destructivo a flexión.

En las Tablas 14 y 15 se muestra la estadística descriptiva de las variables físico-mecánicas de las probetas sin termotratar y termotratadas respectivamente.

Tabla 14. Estadística descriptiva de variables físico-mecánicas de probetas sin termotratar

	N	Media	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar	Coef. de variación	5º percentil	Test de normalidad
Densidad (Kg/m ³)	45	614,18	463,57	862,47	99,71	16,24	488,04	0,74
Humedad (%)	45	10,86	5,25	13,37	2,01	18,51	7,26	0,56
Frecuencia MTG (Hz)	44	1.021	898	1.176	64	6	919,25	0,99
MOE dinámico (N/mm ²)	44	16.602,91	9.552,98	25.977,20	3.921,19	23,62	11.194,14	0,94
MOR (N/mm ²)	44	74,30	46,65	96,58	13,50	18,17	50,44	0,59
MOEG (N/mm ²)	44	18.112,19	12.105,98	24.741,17	3.638,64	20,09	12.396,94	0,70

Tabla 15. Estadística descriptiva de variables físico-mecánicas de probetas termotratadas

	N	Media	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar	Coef. de variación	5º percentil	Test de normalidad
Densidad (Kg/m ³)	24	536,25	412,36	679,18	64,58	12,04	442,19	1,00
Humedad (%)	24	4,57	3,73	5,39	0,49	10,78	3,79	0,88
Frecuencia MTG (Hz)	24	1.103	874	1.275	95	9	911,70	0,36
MOE dinámico (N/mm ²)	16	15.237,79	8.420,13	19.305,65	3.159,31	20,73	9.560,66	0,47
MOR (N/mm ²)	16	39,06	15,98	72,98	15,73	40,28	19,12	0,58
MOEG (N/mm ²)	16	15.682,30	10.193,42	19.849,51	3.028,60	19,31	11.054,89	0,88

En las Figuras 43 a 48 se muestran las gráficas de caja y bigotes o box plot de las variables físico-mecánicas utilizadas.

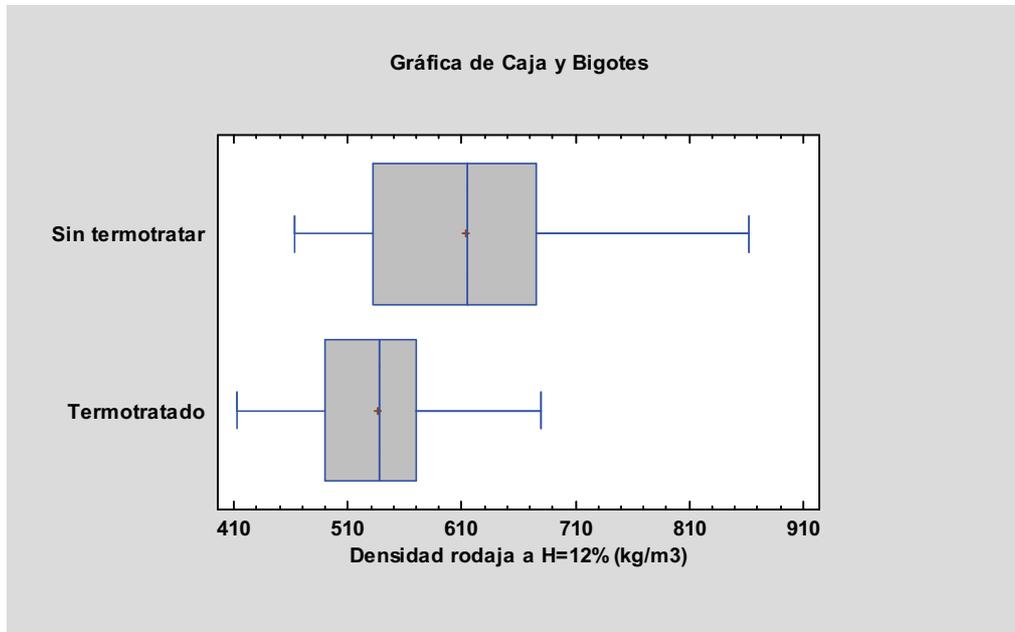


Figura 43. Gráfica de caja y bigotes de la densidad de la rodaja

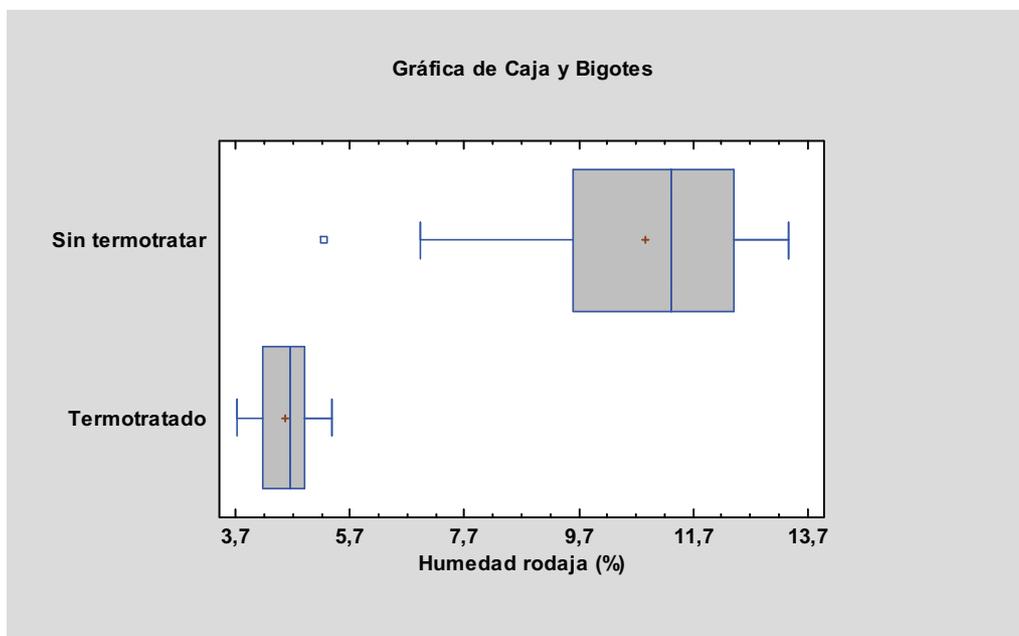


Figura 44. Gráfica de caja y bigotes de la humedad de la rodaja

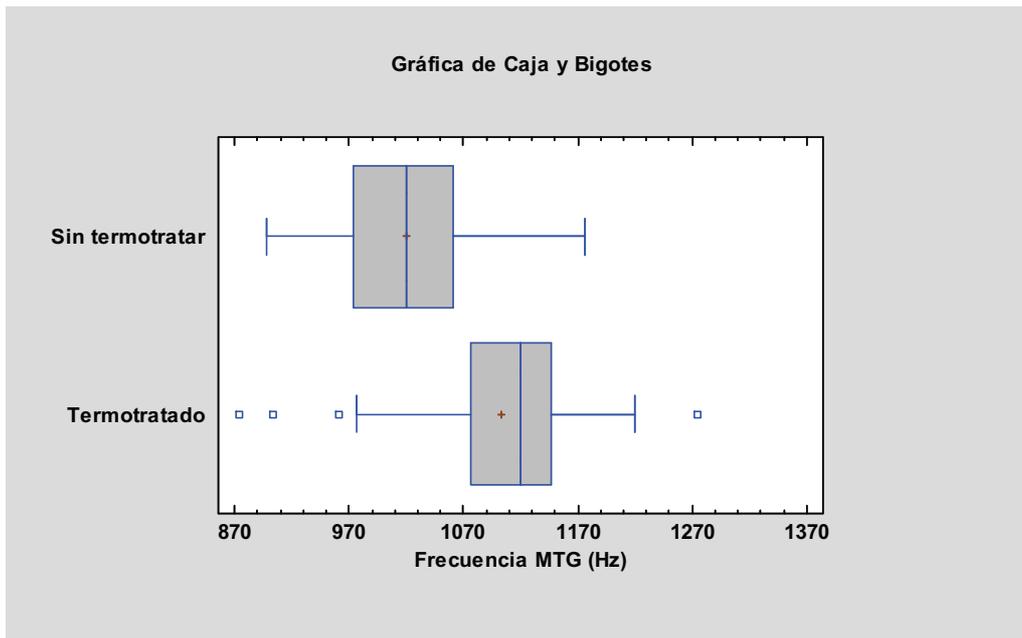


Figura 45. Gráfica de caja y bigotes de la frecuencia obtenida con MTG

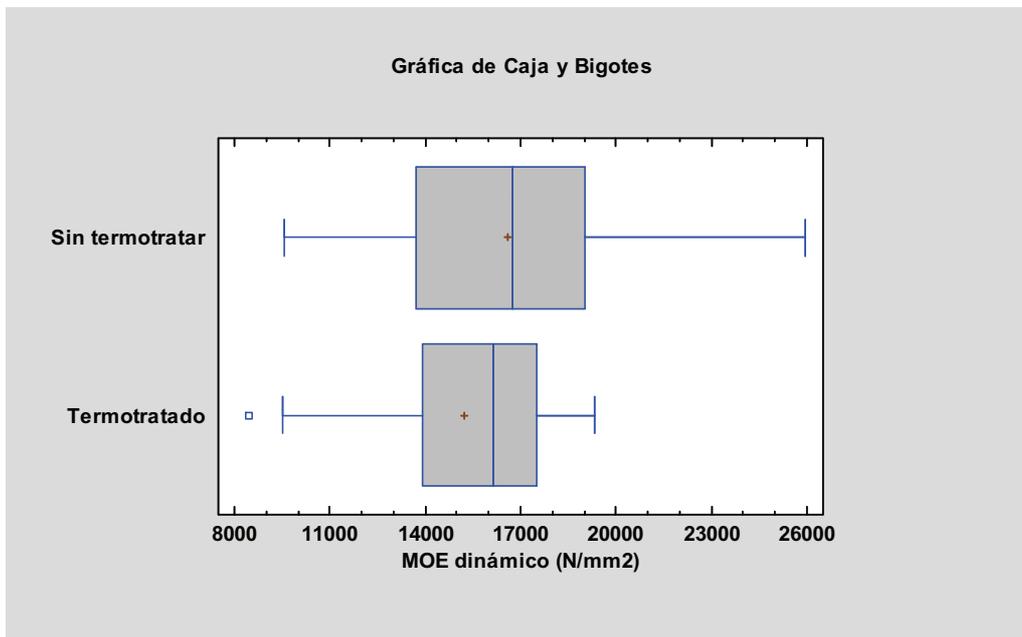


Figura 46. Gráfica de caja y bigotes del MOE dinámico

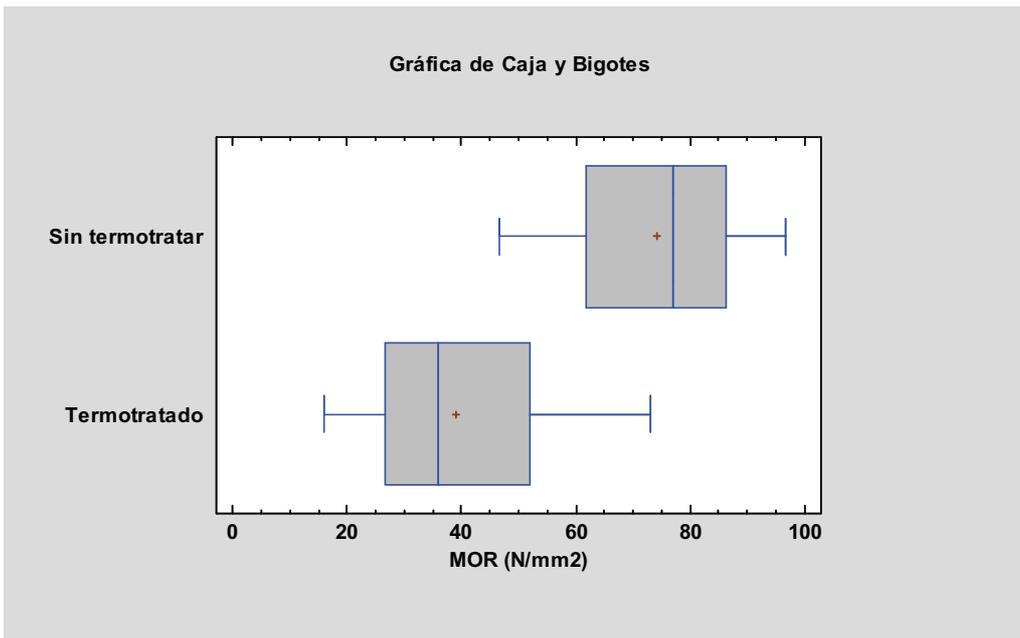


Figura 47. Gráfica de caja y bigotes del MOR

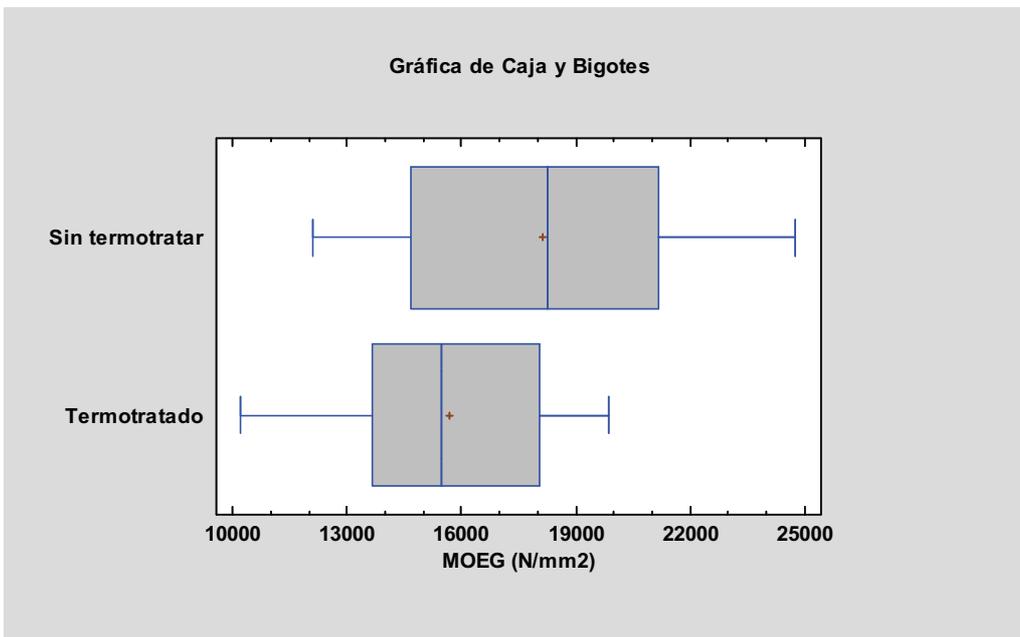


Figura 48. Gráfica de caja y bigotes del MOEG

Las variables físicas utilizadas en la determinación de las contracciones lineales son:

- Contracción longitudinal
- Contracción radial
- Contracción tangencial
- Coeficiente de contracción volumétrica

En las Tablas 16 y 17 se muestra la estadística descriptiva de las contracciones de las probetas sin termotratar y termotratadas respectivamente.

Tabla 16. Estadística descriptiva de contracciones de probetas sin termotratar

	N	Media	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar	Coef. de variación	5º percentil	Test de normalidad
Contracción longitudinal (%)	14	0,37	0,00	0,98	0,29	77,38	0,00	0,68
Contracción radial (%)	15	7,28	3,87	14,61	2,99	41,09	4,25	0,77
Contracción tangencial (%)	15	9,83	3,95	13,41	3,04	30,90	4,73	0,77
Coeficiente de contracción volumétrica (%)	15	18,18	10,92	25,92	3,80	20,91	13,37	0,94

Tabla 17. Estadística descriptiva de contracciones de probetas termotratadas

	N	Media	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar	Coef. de variación	5º percentil	Test de normalidad
Contracción longitudinal (%)	9	0,14	0,00	0,50	0,22	158,80	0,00	0,11
Contracción radial (%)	15	3,71	1,10	8,15	1,96	52,74	1,48	0,83
Contracción tangencial (%)	15	4,92	3,37	7,14	1,08	21,90	3,37	0,89
Coeficiente de contracción volumétrica (%)	15	8,69	5,51	15,22	2,59	29,81	5,55	0,75

En las Figura 49 a 52 se muestran las gráficas de caja y bigotes o box plot de las variables físicas utilizadas en la determinación de las contracciones lineales.

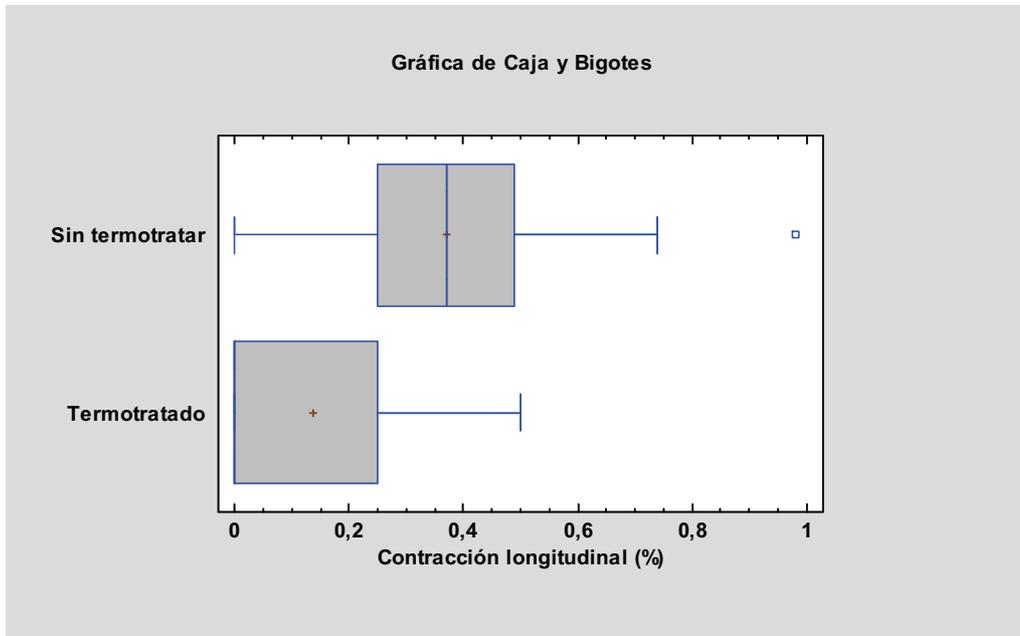


Figura 49. Gráfica de caja y bigotes de la contracción longitudinal

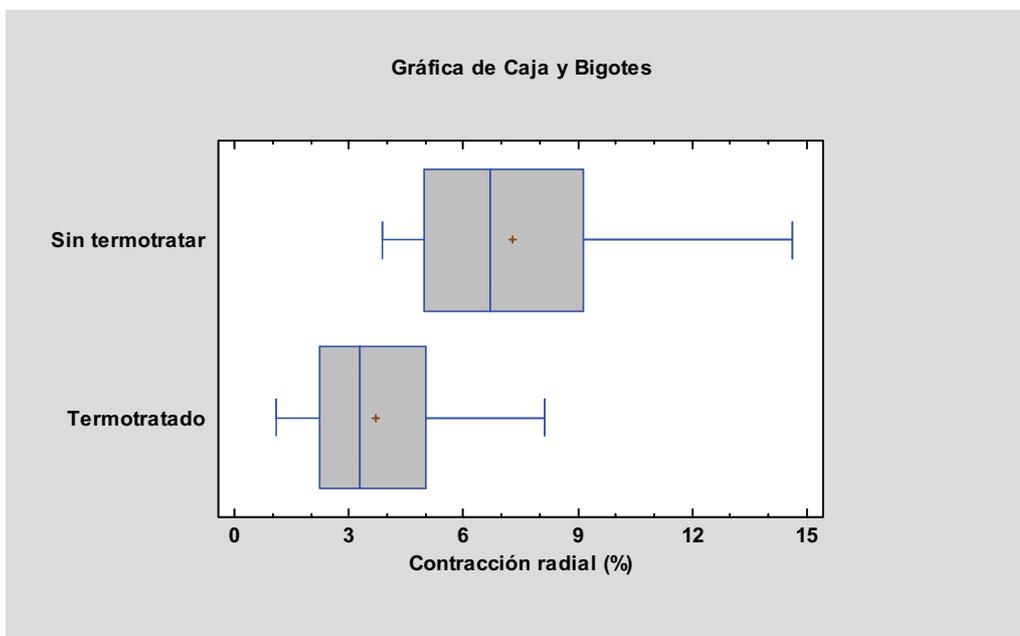


Figura 50. Gráfica de caja y bigotes de la contracción radial

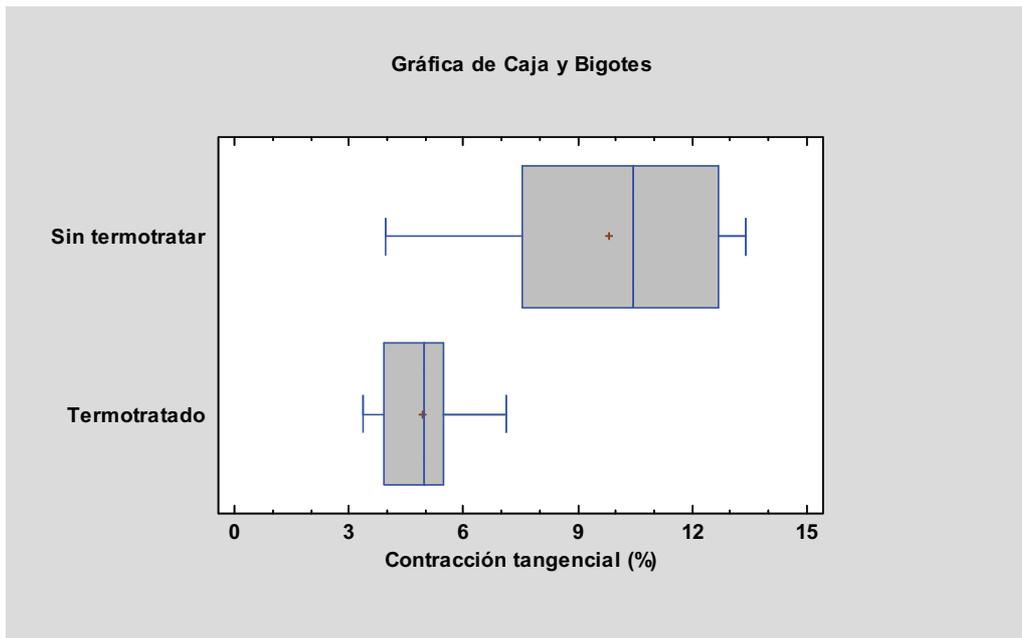


Figura 51. Gráfica de caja y bigotes de la contracción tangencial

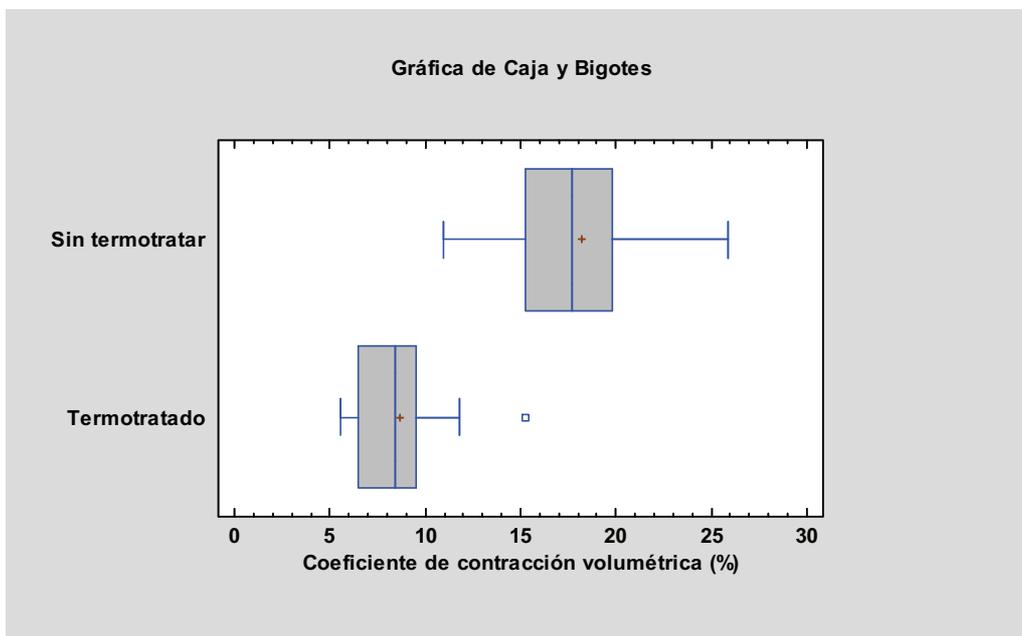


Figura 52. Gráfica de caja y bigotes del coeficiente de contracción volumétrica

5.5. Estadística comparativa de las propiedades elasto-mecánicas de la madera sin termotratar y termotrataada

5.5.1. Variables físico-mecánicas

5.5.1.1. Densidad de la rodaja

En las Tablas 14 y 15 y en la Figura 43 se mostraron las estadísticas y la gráfica comparativa de la densidad de las rodajas sin termotratar y termotrataadas. Se puede observar que el termotrataado tiende a producir valores de densidad inferiores en media.

Para comprobar si estas diferencias observadas son significativas, en las Tablas 18, 19 y 20 se muestra el análisis de la varianza de la densidad de la rodaja.

Tabla 18. Análisis de varianza de la densidad de la rodaja

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Termotrataamiento	95.053,9	1	95.053,9	11,94	0,0010
Residuos	533.400,0	67	7.961,19		
Total (corregido)	628.453,0	68			

Puesto que el valor-P es menor que 0,05, el termotrataamiento tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la densidad de la rodaja con un 95,0 % de nivel de confianza.

Tabla 19. Tabla de medias por mínimos cuadrados de la densidad de la rodaja

Nivel	Casos	Media	Error Estándar	Límite inferior	Límite superior
Media global	69	575,215			
Termotrataamiento:					
Sin termotratar	45	614,18	13,30	587,63	640,73
Termotrataado	24	536,25	18,21	499,90	572,60

Tabla 20. Prueba de múltiples rangos de la densidad de la rodaja

Termotratamiento	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Sin termotratar	45	614,18	13,30	X
Termotratado	24	536,25	18,21	X

Contraste	Diferencia significativa	Diferencia	+/- Límites
Sin termotratar - Termotratado	Si	77,93	45,02

La densidad de la madera termotrada es significativamente inferior a la densidad de la madera natural. En media, la densidad de la madera termotrada es un 12,69 % inferior a la densidad de la madera natural. Esto es debido a que el termotratamiento supone una destrucción de compuestos de la pared celular y, por tanto, pérdida de densidad en la madera. Estos resultados son diferentes a los obtenidos por Hermoso et al (2013) para *Pinus radiata*, en los que la densidad para madera termotrada a 190 °C (550 kg/m³) y 210 °C (543 kg/m³) fue similar (muy ligeramente superior: 1,66 % y 0,37 % respectivamente) al obtenido para la madera natural (541 kg/m³).

En la Figura 53 se muestra la gráfica de medias comparativa de la densidad de la rodaja sin termotratar y termotrada.

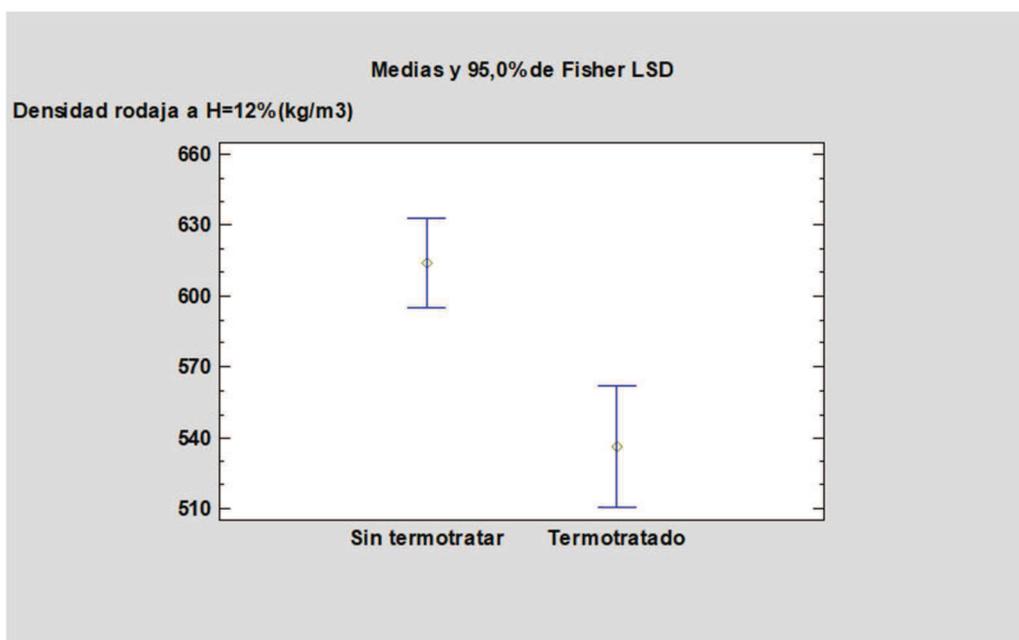


Figura 53. Gráfica de medias de la densidad de la rodaja

5.5.1.2. Humedad de la rodaja

En las Tablas 14 y 15 y en la Figura 44 se mostraron las estadísticas y la gráfica comparativa de la humedad de la rodaja sin termotratar y termotrada. Se puede observar que el termotrado tiende a producir valores de humedad inferiores en media.

Para comprobar si estas diferencias observadas son significativas, en las Tablas 21, 22 y 23 se muestra el análisis de la varianza de la humedad de la rodaja.

Tabla 21. Análisis de la varianza de la humedad de la rodaja

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Termotratamiento	620,10	1	620,10	226,65	0,0000
Residuos	183,31	67	2,74		
Total (corregido)	803,41	68			

Puesto que el valor-P es menor que 0,05, el termotrato tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la humedad de la rodaja con un 95,0 % de nivel de confianza.

Tabla 22. Tabla de medias por mínimos cuadrados de la humedad de la rodaja

Nivel	Casos	Media	Error Estándar	Límite inferior	Límite superior
Media global	69	7,71			
Termotratamiento:					
Sin termotratar	45	10,86	0,25	10,37	11,35
Termotrado	24	4,57	0,34	3,89	5,24

Tabla 23. Prueba de múltiples rangos de la humedad de la rodaja

Termotratamiento	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Sin termotratar	45	10,86	0,25	X
Termotrado	24	4,57	0,34	X

Contraste	Diferencia significativa	Diferencia	+/- Límites
Sin termotratar - Termotrado	Si	6,29	0,83

La humedad de la madera termotrata-da es significativamente inferior a la humedad de la madera natural. Esto es debido a que una de las etapas del termotratamiento es el secado de la madera, lo cual supone una pérdida de humedad en la madera.

En la Figura 54 se muestra la gráfica de medias comparativa de la humedad de la rodaja sin termotratar y termotrata-da.

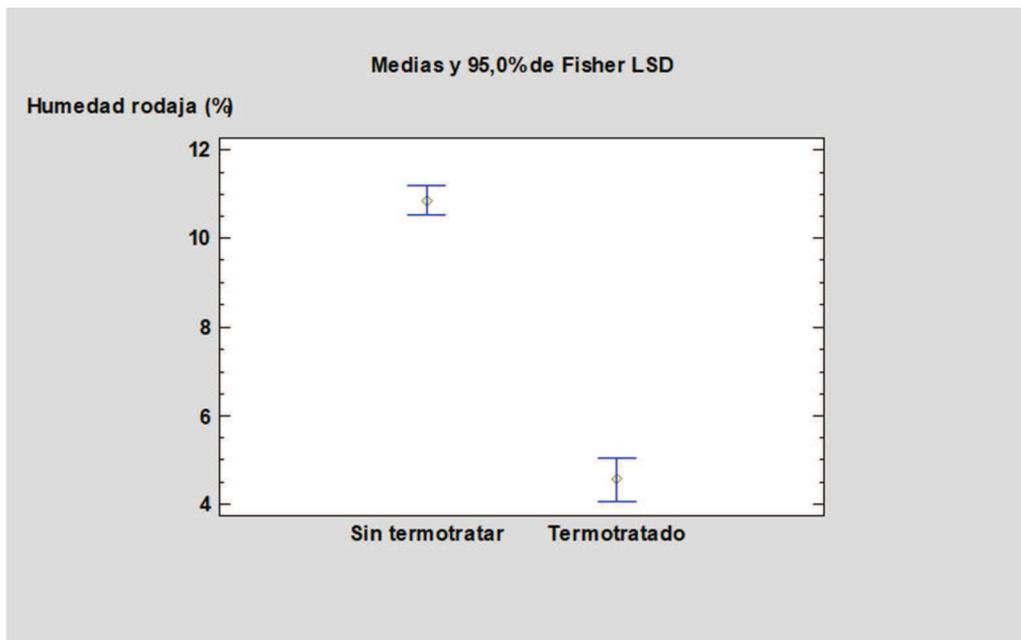


Figura 54. Gráfica de medias de la humedad de la rodaja

5.5.1.3. Frecuencia obtenida con MTG

En las Tablas 14 y 15 y en la Figura 45 se mostraron las estadísticas y la gráfica comparativa de la frecuencia de las probetas sin termotratar y termotrataadas. Se puede observar que el termotratado tiende a producir valores de frecuencia superiores en media.

Para comprobar si estas diferencias observadas son significativas, en las Tablas 24, 25 y 26 se muestra el análisis de la varianza de la frecuencia obtenida con MTG.

Tabla 24. Análisis de la varianza de la frecuencia obtenida con MTG

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Termotratamiento	10.4526	1	10.4526	17,88	0,0001
Residuos	385.733	66	5.844,44		
Total (corregido)	490.259	67			

Puesto que el valor-P es menor que 0,05, el termotratamiento tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la frecuencia obtenida con MTG con un 95,0 % de nivel de confianza.

Tabla 25. Tabla de medias por mínimos cuadrados de la frecuencia obtenida con MTG

Nivel	Casos	Media	Error Estándar	Límite inferior	Límite superior
Media global	68	1.061,52			
Termotratamiento:					
Sin termotratar	44	1.020,50	11,53	997,49	1.043,51
Termotratado	24	1.102,54	15,61	1.071,39	1.133,70

Tabla 26. Prueba de múltiples rangos de la frecuencia obtenida con MTG

Termotratamiento	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Sin termotratar	44	1.020,50	11,53	X
Termotratado	24	1.102,54	15,61	X

Contraste	Diferencia significativa	Diferencia	+/- Límites
Sin termotratar - Termotratado	Si	-82,04	38,73

La frecuencia obtenida con MTG de la madera termotrata-
da es superior a la frecuencia de la madera natural. En media, la frecuencia de la madera termotrata-
da es un 8,04 % superior a la frecuencia de la madera natural. Esto podría ser debido al menor contenido
de humedad y a la menor densidad de la madera termotrata-
da.

En la Figura 55 se muestra la gráfica de medias comparativa de la frecuencia obtenida
con MTG de las probetas sin termotratar y termotrata-
das.

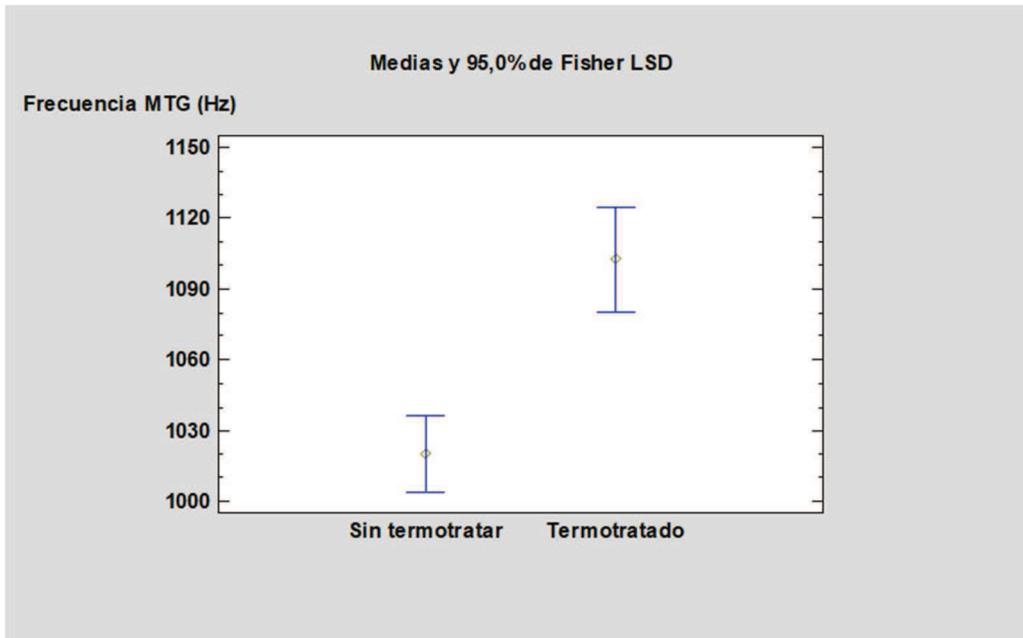


Figura 55. Gráfica de medias de la frecuencia obtenida con MTG

5.5.1.4. MOE dinámico

En las Tablas 14 y 15 y en la Figura 46 se mostraron las estadísticas y la gráfica comparativa del MOE dinámico de las probetas sin termotratar y termotradas. Se puede observar que el termotratado tiende a producir valores de MOE dinámico ligeramente inferiores en media.

Para comprobar si estas diferencias observadas son significativas, en las Tablas 27 y 28 se muestra el análisis de la varianza del MOE dinámico.

Tabla 27. Análisis de la varianza del MOE dinámico

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Termotratamiento	2,89397E7	1	2,89397E7	2,14	0,1478
Residuos	8,90725E8	66	1,34958E7		
Total (corregido)	9,19665E8	67			

Puesto que el valor-P es mayor que 0,05, el termotratamiento no tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el MOE dinámico con un 95,0 % de nivel de confianza.

Tabla 28. Tabla de medias por mínimos cuadrados del MOE dinámico

Nivel	Casos	Media	Error Estándar	Límite inferior	Límite superior
Media global	68	15.920,4			
Termotratamiento:					
Sin termotratar	44	16.602,9	553,83	15.497,2	17.708,7
Termotratado	24	15.237,8	749,88	13.740,6	16.735,0

El MOE dinámico de la madera termotrada es inferior al MOE dinámico de la madera natural. En media, el MOE dinámico de la madera termotrada es un 8,22 % inferior al MOE dinámico de la madera natural. Estos resultados son diferentes a los obtenidos por Hermoso et al (2013) para *Pinus radiata*, en los que el MOE dinámico obtenido por ultrasonidos con el equipo Fakopp para madera termotrada a 210 °C (14.550 N/mm²) fue similar al obtenido para la madera natural (14.594 N/mm²), pero en el que el obtenido para madera termotrada a 190 °C (16.004 N/mm²) fue ligeramente superior a los dos anteriores (9,99 % y 9,66 % respectivamente).

En la Figura 56 se muestra la gráfica de medias comparativa del MOE dinámico de las probetas sin termotratar y termotradas.

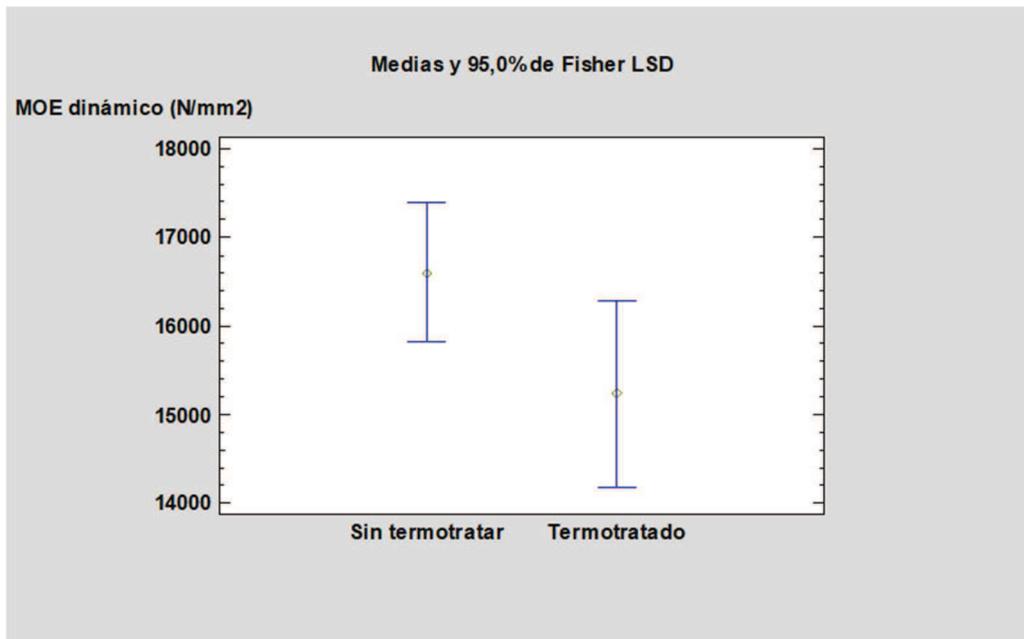


Figura 56. Gráfica de medias del MOE dinámico

5.5.1.5. MOR

En las Tablas 14 y 15 y en la Figura 47 se mostraron las estadísticas y la gráfica comparativa del MOR de las probetas sin termotratar y termotradas. Se puede observar que el termotratado tiende a producir valores de MOR inferiores en media.

Para comprobar si estas diferencias observadas son significativas, en las Tablas 29, 30 y 31 se muestra el análisis de la varianza del MOR.

Tabla 29. Análisis de la varianza del MOR

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Termotratamiento	14.574,8	1	14.574,9	73,17	0,0000
Residuos	11.552,7	58	199,19		
Total (corregido)	26.127,6	59			

Puesto que el valor-P es menor que 0,05, el termotratamiento tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el MOR con un 95,0 % de nivel de confianza.

Tabla 30. Tabla de medias por mínimos cuadrados del MOR

Nivel	Casos	Media	Error Estándar	Límite inferior	Límite superior
Media global	60	56,68			
Termotratamiento:					
Sin termotratar	44	74,30	2,13	70,04	798,56
Termotratado	16	39,05	3,53	31,99	46,12

Tabla 31. Prueba de múltiples rangos del MOR

Termotratamiento	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Sin termotratar	44	74,30	2,13	X
Termotratado	16	39,06	3,53	X

Contraste	Diferencia significativa	Diferencia	+/- Límites
Sin termotratar - Termotratado	Si	35,24	8,25

El MOR de la madera termotrada es significativamente inferior al MOR de la madera natural. En media, el MOR de la madera termotrada es un 47,44 % inferior al MOR de la madera natural. Estos resultados son diferentes a los obtenidos por Wentzel et al (2018) para *Eucalyptus nitens* de Chile, en los que el MOR para madera termotrada a 160 °C (132 N/mm²) y 180 °C (134 N/mm²) fue moderadamente superior (10,92 % y 12,61 % respectivamente) al obtenido para la madera natural (119 N/mm²). El resultado del MOR para madera sin termotrar es moderadamente inferior al obtenido por Fernández-Golfín et al (2007) para *Eucalyptus globulus*, en el cual se obtuvo una media de 91,97 N/mm². Los resultados son diferentes a los obtenidos por Hermoso et al (2013) para *Pinus radiata*, en los que el MOR para madera termotrada a 190 °C (69,7 N/mm²) y 210 °C (40,1 N/mm²) fue inferior (18,48 % y 53,10 % respectivamente) al obtenido para la madera natural (85,5 N/mm²).

En la Figura 57 se muestra la gráfica de medias comparativa del MOR de las probetas sin termotrarar y termotradas.

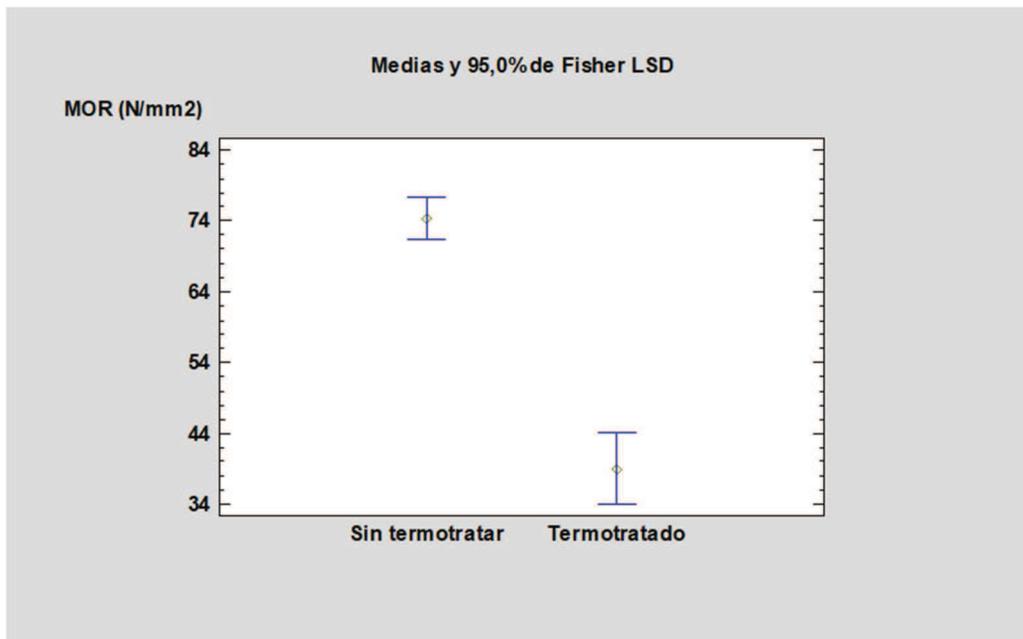


Figura 57. Gráfica de medias del MOR

5.5.1.6. MOEG

En las Tablas 14 y 15 y en la Figura 48 se mostraron las estadísticas y la gráfica comparativa del MOEG de las probetas sin termotratar y termotrata. Se puede observar que el termotrata tiende a producir valores de MOEG inferiores en media.

Para comprobar si estas diferencias observadas son significativas, en las Tablas 32, 33 y 34 se muestra el análisis de la varianza del MOEG.

Tabla 32. Análisis de la varianza del MOEG

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Termotrata	6,92785E7	1	6,92785E7	5,68	0,0204
Residuos	7,06893E8	58	1,21878E7		
Total (corregido)	7,76171E8	59			

Puesto que el valor-P es menor que 0,05, el termotrata tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el MOR con un 95,0 % de nivel de confianza.

Tabla 33. Tabla de medias por mínimos cuadrados del MOEG

Nivel	Casos	Media	Error Estándar	Límite inferior	Límite superior
Media global	60	16.897,2			
Termotrata:					
Sin termotratar	44	18.112,2	526,30	17.058,7	19.165,7
Termotrata	16	15.682,3	872,78	13.935,2	17.429,3

Tabla 34. Prueba de múltiples rangos del MOEG

Termotrata	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Sin termotratar	44	15.682,3	2872,78	X
Termotrata	16	18.112,2	526,30	X

Contraste	Diferencia significativa	Diferencia	+/- Límites
Sin termotratar - Termotrata	Si	2.429,9	2.040,12

El MOEG de la madera termotrada es significativamente inferior al MOEG de la madera natural. En media, el MOEG de la madera termotrada es un 13,42 % inferior al MOEG de la madera natural. Estos resultados son diferentes a los obtenidos por Wentzel et al (2018) para *Eucalyptus nitens* de Chile, en los que el MOE para madera termotrada a 160 °C (19.084 N/mm²) y 180 °C (19.403 N/mm²) fue moderadamente superior (3,45 % y 5,18 % respectivamente) al obtenido para la madera natural (18.448 N/mm²). El resultado del MOEG para madera sin termotrar es ligeramente inferior al MOE obtenido por Fernández-Golfín et al (2007) para *Eucalyptus globulus*, en el cual se obtuvo una media de 18.430 N/mm². Los resultados son diferentes a los obtenidos por Hermoso et al (2013) para *Pinus radiata*, en los que el MOE para madera termotrada a 190 °C (11.900 N/mm²) y 210 °C (10.635 N/mm²) fue distinto (10,90 % superior y 0,88 % inferior respectivamente) al obtenido para la madera natural (10.730 N/mm²).

En la Figura 58 se muestra la gráfica de medias comparativa del MOEG de las probetas sin termotrar y termotradas.

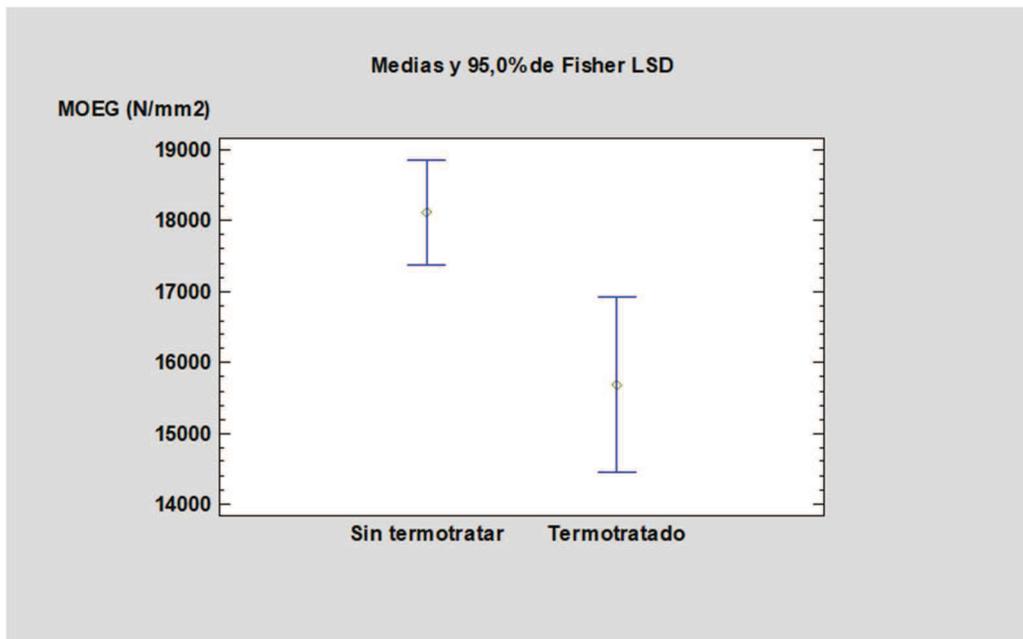


Figura 58. Gráfica de medias del MOEG

5.5.2. Contracciones lineales

5.5.2.1. Contracción longitudinal

En las Tablas 16 y 17 y en la Figura 49 se mostraron las estadísticas y la gráfica comparativa de la contracción longitudinal de las probetas sin termotratar y termotratadas. Se puede observar que el termotratado tiende a producir valores de contracción longitudinal inferiores en media.

Para comprobar si estas diferencias observadas son significativas, en las Tablas 35, 36 y 37 se muestra el análisis de la varianza de la contracción longitudinal.

Tabla 35. Análisis de la varianza de la contracción longitudinal

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Termotratamiento	0,29	1	0,29	4,31	0,0504
Residuos	1,43	21	0,07		
Total (corregido)	1,72	22			

Puesto que el valor-P es mayor que 0,05, el termotratamiento no tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la contracción longitudinal con un 95,0 % de nivel de confianza. No obstante, el termotratamiento tiene un efecto estadístico moderadamente significativo sobre la contracción longitudinal con un 90,0 % de nivel de confianza.

Tabla 36. Tabla de medias por mínimos cuadrados de la contracción longitudinal

Nivel	Casos	Media	Error Estándar	Límite inferior	Límite superior
Media global	23	0,25			
Termotratamiento:					
Sin termotratar	14	0,37	0,07	0,25	0,49
Termotratado	9	0,14	0,09	-0,01	0,29

Tabla 37. Prueba de múltiples rangos de la contracción longitudinal

Termotratamiento	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Sin termotratar	14	0,37	0,07	X
Termotratado	9	0,14	0,09	X

Contraste	Diferencia significativa	Diferencia	+/- Límites
Sin termotratar - Termotratado	Si	0,23	0,19

La contracción longitudinal en la madera termotrada es significativamente inferior (62,16 %) a la contracción longitudinal en la madera natural, esto es debido a que el termotratamiento disminuye el carácter higroscópico de la madera y por tanto se consigue una mayor estabilidad de la madera en todas las direcciones (longitudinal, radial y tangencial) frente a cambios de humedad.

En la Figura 59 se muestra la gráfica de medias comparativa de la contracción longitudinal de las probetas sin termotratar y termotradas.

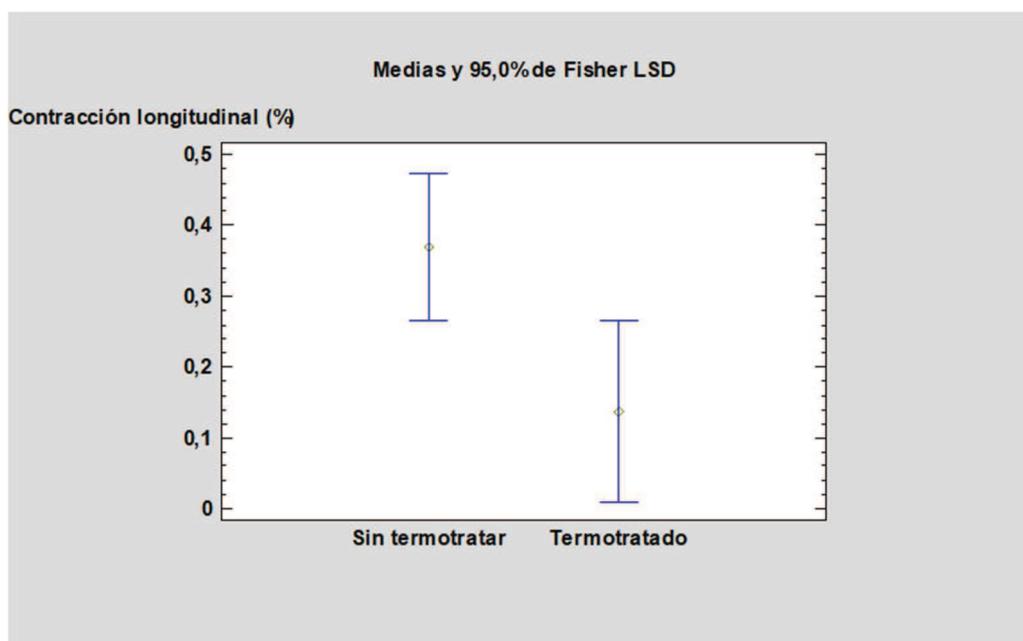


Figura 59. Gráfica de medias de la contracción longitudinal

5.5.2.2. Contracción radial

En las Tablas 16 y 17 y en la Figura 50 se mostraron las estadísticas y la gráfica comparativa de la contracción radial de las probetas sin termotratar y termotratadas. Se puede observar que el termotratado tiende a producir valores de contracción radial bastante inferiores en media.

Para comprobar si estas diferencias observadas son significativas, en las Tablas 38, 39 y 40 se muestra el análisis de la varianza de la contracción radial.

Tabla 38. Análisis de la varianza de la contracción radial

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Termotratamiento	95,44	1	95,44	14,94	0,0006
Residuos	178,92	28	6,39		
Total (corregido)	274,36	29			

Puesto que el valor-P es menor que 0,05, el termotratamiento tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la contracción radial con un 95,0 % de nivel de confianza.

Tabla 39. Tabla de medias por mínimos cuadrados de la contracción radial

Nivel	Casos	Media	Error Estándar	Límite inferior	Límite superior
Media global	30	5,50			
Termotratamiento:					
Sin termotratar	15	7,28	0,65	5,94	8,62
Termotratado	15	3,71	0,65	2,37	5,05

Tabla 40. Prueba de múltiples rangos de la contracción radial

Termotratamiento	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Sin termotratar	15	7,28	0,65	X
Termotratado	15	3,71	0,65	X

Contraste	Diferencia significativa	Diferencia	+/- Límites
Sin termotratar - Termotratado	Si	3,57	1,89

La contracción radial en la madera termotrata-da es significativamente inferior (49,04 %) a la contracción radial en la madera natural, como se ha indicado antes esto es debido a que el termotratamiento mejora la estabilidad de la madera frente a cambios de humedad y se disminuye la contracción en dirección radial. El resultado de la contracción radial para madera sin termotratar es similar al obtenido por Bermúdez et al (2002) para *Eucalyptus globulus*, en el cual obtuvo una media de 7,5 %.

En la Figura 60 se muestra la gráfica de medias comparativa de la contracción radial de las probetas sin termotratar y termotrata-das.

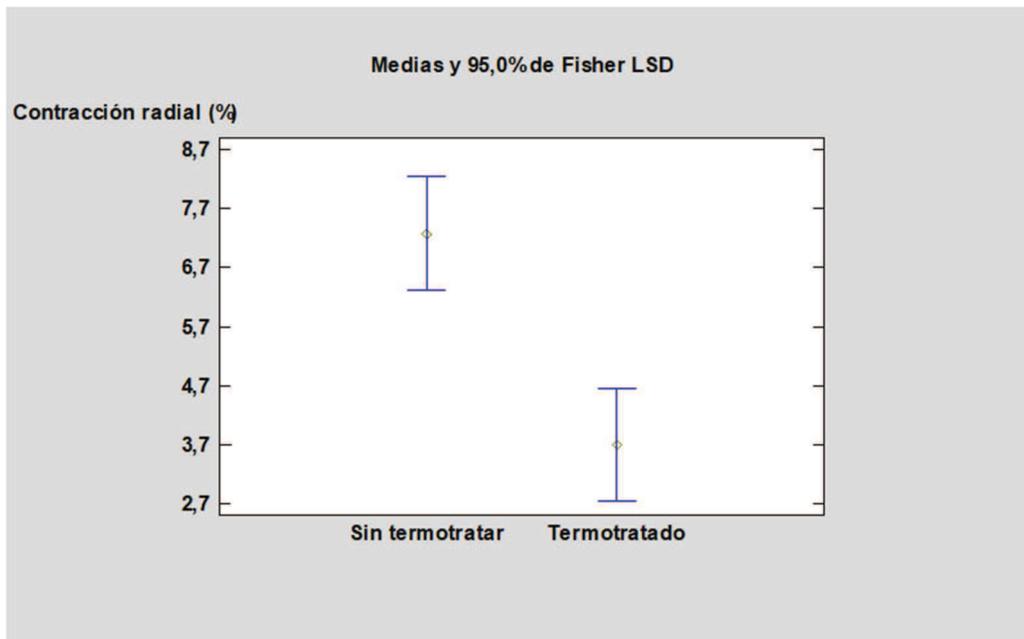


Figura 60. Gráfica de medias de la contracción radial

5.5.2.3. Contracción tangencial

En las Tablas 16 y 17 y en la Figura 52 se mostraron las estadísticas y la gráfica comparativa de la contracción tangencial de las probetas sin termotratar y termotradas. Se puede observar que el termotrado tiende a producir valores de contracción tangencial bastante inferiores en media.

Para comprobar si estas diferencias observadas son significativas, en las Tablas 41, 42 y 43 se muestra el análisis de la varianza de la contracción tangencial.

Tabla 41. Análisis de la varianza de la contracción tangencial

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Termotratamiento	181,16	1	181,16	34,88	0,0000
Residuos	145,43	28	5,19		
Total (corregido)	326,58	29			

Puesto que el valor-P es menor que 0,05, el termotratamiento tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la contracción tangencial con un 95,0 % de nivel de confianza.

Tabla 42. Tabla de medias por mínimos cuadrados de la contracción tangencial

Nivel	Casos	Media	Error Estándar	Límite inferior	Límite superior
Media global	30	7,37			
Termotratamiento:					
Sin termotratar	15	9,83	0,59	8,62	11,03
Termotrado	15	4,91	0,59	3,71	6,12

Tabla 43. Prueba de múltiples rangos de la contracción tangencial

Termotratamiento	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Sin termotratar	15	9,83	0,59	X
Termotrado	15	4,91	0,59	X

Contraste	Diferencia significativa	Diferencia	+/- Límites
Sin termotratar - Termotrado	Si	4,91	1,70

La contracción tangencial en la madera termotrata-da es significativamente inferior (50,05 %) a la contracción tangencial en la madera natural, como se ha indicado antes esto es debido a que el termotratamiento mejora la estabilidad de la madera frente a cambios de humedad y se disminuye la contracción en dirección tangencial. El resultado de la contracción tangencial para madera sin termotrar es moderadamente inferior al obtenido por Bermúdez et al (2002) para *Eucalyptus globulus*, en el cual se obtuvo una media de 13,8 %.

En la Figura 61 se muestra la gráfica de medias comparativa de la contracción tangencial de las probetas sin termotrar y termotrata-das.

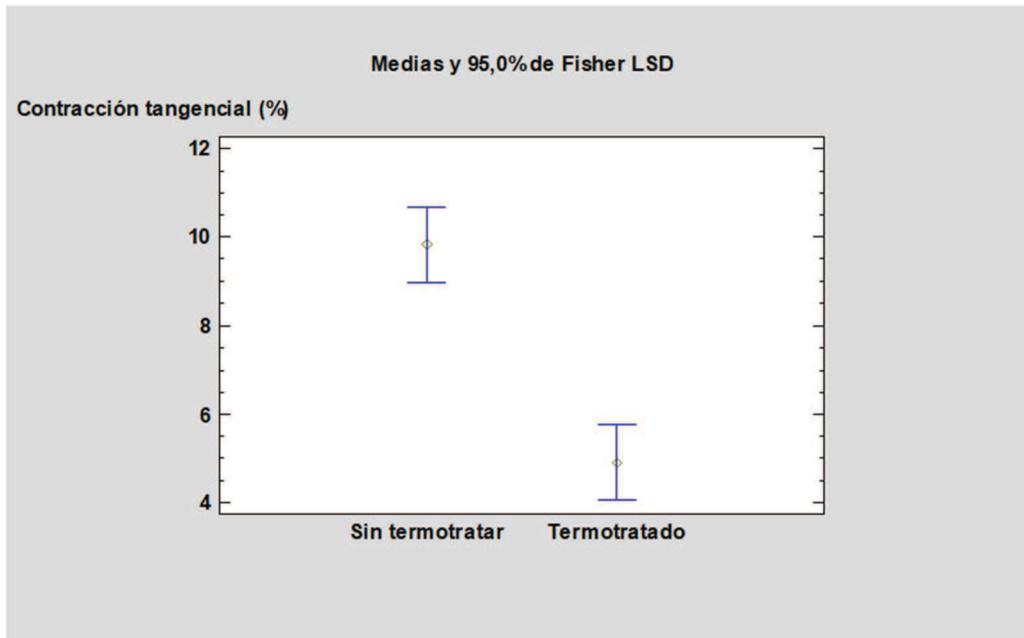


Figura 61. Gráfica de medias de la contracción tangencial

El coeficiente de contracción volumétrica en la madera termotrada es significativamente inferior (52,20 %) al coeficiente de contracción volumétrica en la madera natural, esto es debido a que el termotratamiento reduce el comportamiento higroscópico de la madera y por tanto disminuye el coeficiente de contracción volumétrica.

En la Figura 62 se muestra la gráfica de medias comparativa del coeficiente de contracción volumétrica de las probetas sin termotratar y termotradas.

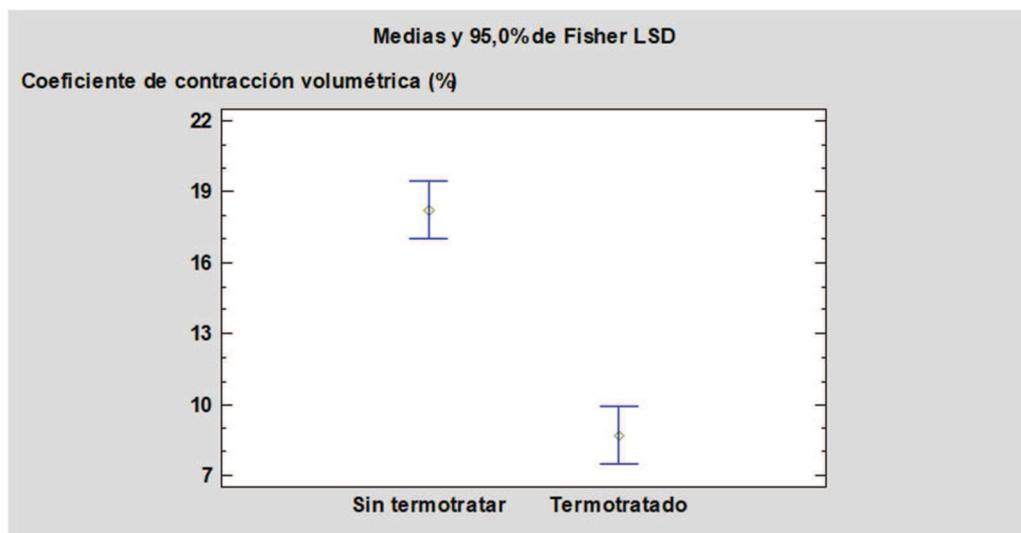


Figura 62. Gráfica de medias del coeficiente de contracción volumétrica

5.5.3. Resumen de la estadística comparativa

En la Tabla 47 se muestra un cuadro resumen del efecto significativo del termotratamiento sobre las variables.

Tabla 47. Efecto significativo del termotratamiento sobre las variables físico-mecánicas y las contracciones

Variables	Efecto significativo
Densidad de la rodaja	Si
Humedad de la rodaja	Si
Frecuencia obtenida con MTG	Si
MOE dinámico	No
MOR	Si
MOEG	Si
Contracción longitudinal	Si
Contracción radial	Si
Contracción tangencial	Si
Coeficiente de contracción volumétrica	Si

5.6. Análisis de predicción de las propiedades mecánicas a partir de ensayos no destructivos

5.6.1. Regresión del conjunto de probetas sin termotratar y termotrata- das

En las Tablas 48, 49 y 50 y en la Figura 62 se muestra la regresión simple del MOEG a partir del MOE dinámico del conjunto de todas las probetas sin termotratar y termotrata-
das.

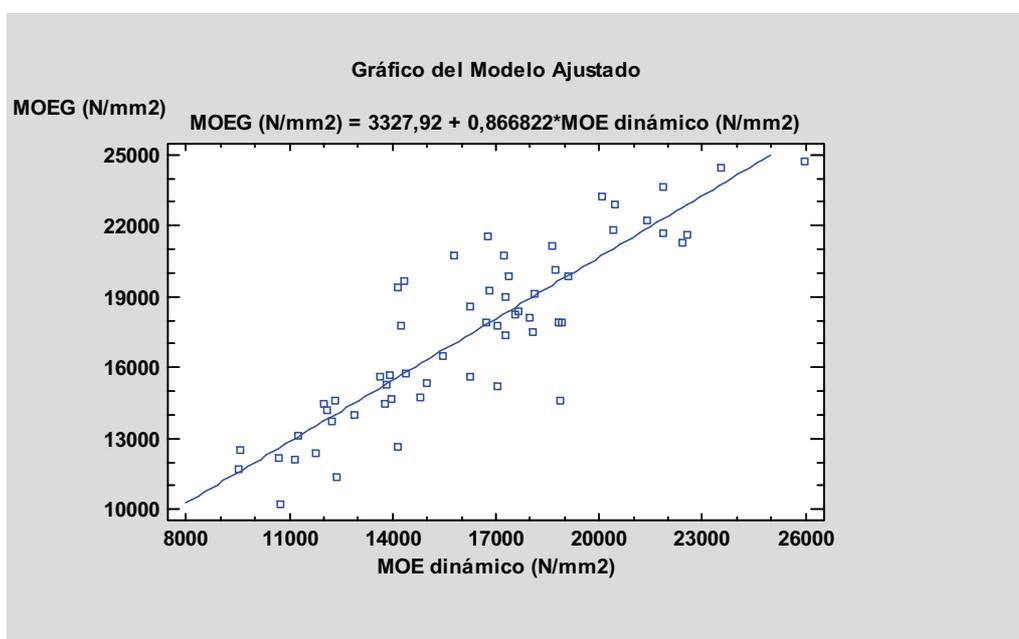


Figura 63. Gráfico de regresión simple del MOEG en función del MOE dinámico del conjunto de probetas sin termotratar y termotrata-
das

Tabla 48. Coeficientes de la regresión simple del MOEG en función del MOE dinámico

Parámetro	Mínimos cuadrados estimado	Error estándar	Estadístico T	Valor-P
Intercepto	3.327,92	1028,73	3,23497	0,0020
Pendiente	0,866822	0,061713	14,046	0,0000

Tabla 49. Análisis de Varianza de la regresión simple del MOEG en función del MOE dinámico

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	5,97467E8	1	5,9746E8	197,29	0,0000
Residuo	1,72617E8	57	3,02836E6		
Total (Corregido)	7,70084E8	58			

Tabla 50. Estadísticos de la regresión simple del MOEG en función del MOE dinámico

Estadístico	Valor
Coefficiente de Correlación	0,88
R-cuadrada	77,58 %
R-cuadrado (ajustado para g.l.)	77,19 %
Error estándar del est.	1.740,22
Error absoluto medio	1.272,43
Estadístico Durbin-Watson	2,04825 (P=0,5766)
Autocorrelación de residuos en retraso 1	-0,0247677

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{MOEG (N/mm}^2\text{)} = 3327,92 + 0,866822 * \text{MOE dinámico (N/mm}^2\text{)}$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre MOEG y MOE dinámico con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-cuadrada indica que el modelo ajustado explica 77,58 % de la variabilidad en MOEG.

El coeficiente de correlación es igual a 0,88, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

Como conclusión se puede indicar que, ya que el valor de R-cuadrada es alto, existe buena relación y es adecuado relacionar el MOEG con el MOE dinámico.

6. Conclusiones

A continuación se exponen las conclusiones a las que se ha llegado en este TFM:

- Los resultados de las propiedades mecánicas del lote de madera de *Eucalyptus nitens* sin termotratamiento son: densidad de 614 Kg/m³, MOEG de 18.112 N/mm² y MOR de 74 N/mm². El lote se clasificaría como clase resistente C27.

- Los resultados de las propiedades mecánicas del lote de madera de *Eucalyptus nitens* con termotratamiento son: densidad de 536 Kg/m³, MOEG de 15.682 N/mm² y MOR de 39 N/mm². El lote se clasificaría como clase resistente C24.

- El termotratamiento supone una reducción de la calidad estructural de la madera de *Eucalyptus nitens*, así implicó una reducción del 13,42 % en el módulo de elasticidad global, del 47,43 % en la resistencia a flexión, por lo que no sería recomendable su utilización en elementos con altos niveles de carga, y del 12,69 % en la densidad. Sin embargo se debe insistir en el reducido número de piezas que se ensayaron (44 sin termotratamiento y tan sólo 16 termotratadas), por lo que estos resultados hay que tomarlos con precaución.

- El termotratamiento supone una mejora significativa de la estabilidad dimensional de la madera, pues la madera termotratada es más estable frente a los cambios de humedad. La contracción tangencial en la madera termotratada es significativamente inferior (50,05 %) a la de la madera sin termotratar y la contracción radial también es significativamente inferior (49,04 %) a la de la madera sin termotratar. El coeficiente de contracción volumétrica en la madera termotratada es significativamente inferior (52,20 %) al de la madera sin termotratar. Esto indica que la madera termotratada de *Eucalyptus nitens* puede ser empleada en exterior para tarimas, celosías, pérgolas o recubrimiento de fachadas con mejor comportamiento frente a los cambios higrométricos del medio exterior que la madera sin dicho tratamiento.

- Serían necesarios realizar más ensayos y con un número superior de probetas para así poder obtener la clase resistente y determinar con mayor precisión su uso a nivel estructural.

- Se puede predecir el módulo de elasticidad global sin realizar ensayos destructivos, a partir del módulo de elasticidad dinámico obtenido en ensayos no destructivos.

7. Bibliografía

Bibliografía de textos:

- Acosta, R., Montoya, J. A. and Prieto, A. (2017). A review of thermal treatments applied to Wood. 13º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica
- Bermúdez, J.D., Touza, M. C. and Sanz, F. (2002). White eucalyptus wood handbook. Fundación para o Fomento da Calidade Industrial e Desenvolvemento Tecnológico de Galicia
- Boland, D. J., Brooker, M. I. H., Chippendale, G. M., Hall, N., Hyland, B. P. M., Johnston, R. D., Kleinig, D. A. and Jurner, J. D. (1984). Forest trees of Australia. CSIRO. Melbourne, Australia
- Costermans, L. (2009). Native Trees and Shrubs of South-Eastern Australia Covering Areas of New South Wales, Victoria and South Australia. Reed New Holland, Sydney. Australia
- Fernández-Golfín, J. I., Díez, R., Hermoso, E., Baso, C., Casas, J.M. and González, O. (2007). Characterization of *Eucalyptus globulus* wood for structural use. Article from newsletter CIDEU
- González, M., Hevia, A. and Barrio, M. (2013). Dynamic model of growth and biomass production for energy crops of *Eucalyptus nitens* (Maiden) in northwestern Spain. Minutes of 6º Congreso Forestal Español
- Hermoso, E. (2001). Mechanical characterization of the structural wood of *Pinus sylvestris* L.. Doctoral thesis. Universidad Politécnica de Madrid
- Hermoso, E., Mateo, R., Cabrero, J.C. and Fernández-Golfín, J.I. (2013). Heat treatments versus mechanical properties in radiata pine wood. Minutes of 6º Congreso Forestal Español
- Hermoso, E., Fernández-Golfín, J.I., Conde, M., Troya, M.T., Mateo, R., Cabrero, J. and Conde, M. (2015). Characterization of thermally modified *Pinus radiata* timber. Article from the research journal of Maderas
- Hernández, M. P. (2017). Elasto-mechanical characterization of specimens at a structural scale of *Pinus radiata* D. Don and *Pinus sylvestris* L. wood. Final master's work. Universidad de Valladolid
- Majano, M. A. (2014). Heat-treated hardwood for structural use. Doctoral thesis. Universidad Politécnica de Madrid

- Orwa, C., Mutua, A., Kindt, R., Jamnadass, R. and Anthony, S. (2009). Agroforestry Database: a tree reference and selection guide version 4.0 (<http://www.worldagroforestry.org/sites/treedbs/treedatabases.asp>)
- Romero Buján, M.I. (2007). Exotic flora of Galicia (Iberian northwest). Bot. Complut. 31: 113-125.
- Touza, M. (2001). FAIR CT 98- Project 9579: Research project on sawing systems suitable for process *Eucalyptus globulus* with growth stresses. Magazine of Centro de Innovación y Servicios Tecnológicos de la Madera, 6
- Vignote, S. (2014). Products derived from wood. Universidad Politécnica de Madrid
- Wentzel, M., Fleckenstein, M., Hofmann, T. and Militz, H. (2018). Relationships between longitudinal growth deformation and some properties of wood in *Eucalyptus nitens*. Article from Wood Material Science and Engineering

Bibliografía de páginas web:

- <https://basoa.org/>
- <https://cienciaybiologia.com/>
- <https://ence.es/>
- <https://www.infor.cl>
- <https://www.maderas-torresar.com/termogenik/>
- <https://www.maderea.es/>
- <https://www.mapa.gob.es/>
- <https://www.miteco.gob.es/>
- <https://lunawood.com/>

Anexos

Anexo 1. Datos de las probetas

Tabla 51. Valores de las probetas sin termotratar

Nº de probeta	Longitud (mm)	Anchura* (mm)	Espesor* (mm)	Peso (kg)
1	2.544	77,00	23,67	3,72
2	2.595	77,00	24,00	3,40
3	2.556	77,33	23,00	3,04
4	2.549	77,33	24,00	2,60
5	2.551	76,67	24,00	2,78
6	2.545	77,67	24,00	3,06
7	2.546	77,00	24,00	3,60
8	2.566	75,67	24,00	3,16
9	2.566	77,00	24,00	3,70
10	2.545	77,00	24,00	2,78
11	2.534	76,67	23,00	3,36
12	2.553	77,00	24,00	2,30
13	2.581	77,67	24,00	2,74
14	2.582	77,00	23,67	2,98
15	2.544	77,67	24,00	2,50
16	2.556	76,33	24,00	3,18
17	2.564	77,00	24,00	3,36
18	2.555	78,00	24,00	2,52
19	2.569	78,00	24,00	3,10
20	2.576	77,67	24,00	3,30
21	2.578	77,00	23,00	2,78
22	2.556	77,67	24,33	2,46
23	2.548	77,67	23,33	2,78
24	2.583	76,33	24,00	3,30
25	2.556	78,67	24,00	2,52
26	Probeta mala			
27	2.573	77,33	23,33	3,28
28	2.570	77,67	24,00	2,70
29	2.551	77,67	23,67	2,78
30	2.552	78,33	24,00	2,42
31	2.555	77,67	24,00	3,24
32	2.583	78,67	24,00	2,32
33	2.562	78,00	24,00	3,20
34	2.545	78,00	25,00	2,48
35	2.581	77,00	23,67	2,32

Caracterización elasto-mecánica de probetas sin termotratar y termotradas para uso estructural de madera de *Eucalyptus nitens* H. Deane and Maiden

36	2.556	76,67	24,00	2,96
37	2.560	77,67	24,00	3,40
38	2.543	78,00	24,00	2,76
39	2.566	78,33	24,00	2,52
40	2.557	78,00	24,00	2,88
41	2.559	77,67	24,33	3,34
42	2.552	78,67	25,00	2,74
43	2.558	77,00	23,67	2,86
44	2.548	76,33	24,00	3,06
45	2.542	75,67	24,33	3,16
46	2.550	77,33	24,00	3,08

(* = es la media de las mediciones en el centro y en la parte cercana a los extremos)

Tabla 52. Valores de las probetas antes del termotratado

Nº de probeta	Longitud (mm)	Anchura (mm)	Espesor (mm)	Peso (kg)
47	2.545	23	77	2,64
48	2.580	24	75	2,84
49	2.584	24	76	2,74
50	2.556	23	77	2,78
51	2.567	24	78	2,62
52	2.545	24	77	2,76
53	2.562	24	77	2,34
54	2.556	24	78	2,96
55	2.586	24	76	2,96
56	2.546	24	77	3,38
57	2.546	24	77	3,08
58	2.560	24	76	2,40
59	2.585	23	77	2,66
60	2.559	24	77	2,38
61	2.553	24	76	3,14
62	2.555	25	76	2,46
63	2.546	23	76	3,48
64	2.552	24	77	2,44
65	2.550	24	76	2,76
66	2.555	24	77	2,46
67	2.562	24	77	2,80
68	2.569	24	78	2,72
69	2.556	24	76	2,80
70	Probeta mala			
71	2.589	23	77	2,82
72	2.547	23	76	3,00
73	2.563	23	77	2,48

Tabla 53. Valores de las probetas después del termotratado

Nº de probeta	Longitud (mm)	Anchura* (mm)	Espesor* (mm)	Peso (kg)
47	Probeta rota después del termotratado			
48	2.581	79,00	25,33	2,60
49	2.584	79,67	25,00	2,50
50	2.556	77,00	23,67	2,54
51	2.567	78,33	24,00	2,40
52	2.545	76,67	24,33	2,48
53	2.562	78,67	23,33	2,12
54	2.556	79,00	25,00	2,72
55	2.586	77,67	24,67	2,70
56	2.548	78,33	25,33	2,98
57	Probeta rota después del termotratado			
58	2.560	79,33	25,33	2,18
59	2.585	79,67	24,67	2,42
60	2.559	78,00	24,00	2,22
61	2.553	81,00	24,33	2,86
62	2.555	76,67	24,00	2,30
63	2.550	80,33	27,67	3,24
64	2.552	77,00	24,67	2,24
65	2.550	78,33	24,33	2,50
66	2.555	78,67	24,00	2,20
67	2.562	78,00	25,67	2,52
68	2.569	78,00	24,00	2,50
69	2.556	78,67	24,67	2,56
70	Probeta mala			
71	2.569	76,33	24,00	2,64
72	2.547	78,67	25,33	2,76
73	2.563	76,33	24,00	2,30

(* = es la media de las mediciones en el centro y en la parte cercana a los extremos)

Anexo 2. Datos de los ensayos no destructivos

Tabla 54. Valores de los ensayos no destructivos realizados con MTG de las probetas sin termotratar

Nº de probeta	Frecuencia (Hz)	MOE dinámico (N/mm ²)
1	976	18.343,40
2	1.054	21.413,41
3	1.064	15.797,19
4	956	12.247,42
5	966	13.657,46
6	942	14.991,65
7	1.039	20.462,34
8	991	16.260,74
9	1.015	22.420,62
10	991	14.228,50
11	1.064	18.647,51
12	932	10.681,62
13	1.010	13.937,47
14	1.025	16.725,17
15	1.025	14.363,47
16	1.069	20.104,71
17	971	17.271,48
18	898	9.552,98
19	1.030	17.248,25
20	1.157	25.977,20
21	976	12.888,12
22	917	11.180,76
23	1.088	17.652,64
24	1.044	20.408,78
25	996	12.337,79
26	Probeta mala	
27	1.059	16.749,41
28	9.08	11.269,93
29	1.176	21.863,64
30	986	11.783,71
31	1.083	19.106,15
32	1.015	21.864,62
33	1.113	13.757,01
34	1.035	14.790,54
35	956	12.088,74
36	1.025	17.977,68
37	986	16.813,26

38	1.103	18.743,76
39	956	11.992,82
40	1.059	18.913,65
41	1.118	23.553,36
42	1.049	18.084,30
43	1.005	14.350,37
44	971	15.464,84
45	Error	
46	1.103	22.559,62

Tabla 55. Valores de los ensayos no destructivos realizados con MTG de las probetas termotrata-
das

Nº de probeta	Frecuencia (Hz)	MOE dinámico (N/mm ²)
47	Probeta rota	
48	1.054	13.838,83
49	1.088	14.156,26
50	1.200	18.852,99
51	903	9.869,95
52	1.181	17.395,69
53	874	8.420,13
54	1.196	18.808,86
55	1.127	17.291,31
56	1.098	17.048,32
57	Probeta rota	
58	961	9.506,07
59	1.108	14.339,90
60	976	10.742,30
61	1.147	18.116,87
62	1.093	14.170,90
63	1.122	17.383,36
64	1.118	13.957,07
65	1.103	15.051,15
66	1.064	12.376,89
67	1.275	19.305,65
68	1.132	16.268,10
69	1.132	16.043,93
70	Probeta mala	
71	1.147	18.133,69
72	1.142	17.044,83
73	1.220	17.584,01

Anexo 3. Datos de los ensayos destructivos

Tabla 56. Valores de los ensayos destructivos de las probetas sin termotratar

Nº de probeta	Densidad rodaja a H=12% (kg/m ³)	Humedad rodaja (%)	MOR (N/mm ²)	MOEG (N/mm ²)
1	824,66	5,25	No válido	No válido
2	772,93	6,93	91,66	22.192,61
3	571,14	7,57	86,76	20.732,37
4	542,60	8,63	55,09	13.722,32
5	592,17	8,58	76,65	15.606,57
6	694,50	7,85	76,01	15.345,11
7	786,49	7,19	88,49	22.878,99
8	665,42	8,25	82,15	18.599,15
9	862,47	9,17	77,58	21.263,67
10	573,79	10,29	75,94	17.762,63
11	662,07	9,89	81,19	21.116,35
12	489,00	9,61	46,65	12.149,93
13	531,95	9,56	61,04	15.680,31
14	632,51	8,18	82,53	17.896,78
15	533,63	11,31	57,16	15.743,33
16	670,18	12,30	96,58	23.238,24
17	698,30	11,84	85,69	18.982,27
18	463,64	10,56	56,85	12.491,21
19	619,07	11,65	81,38	20.756,06
20	735,10	11,64	90,36	24.741,17
21	508,85	12,01	48,28	14.013,70
22	506,80	12,26	55,15	12.105,98
23	580,73	11,25	87,30	18.366,60
24	720,43	10,25	89,49	21.831,22
25	487,80	10,36	60,38	14.614,19
26	Probeta mala			
27	572,06	11,06	89,79	21.575,21
28	508,48	13,16	74,39	13.133,56
29	602,40	12,54	87,59	21.654,33
30	463,57	12,25	68,34	12.380,31
31	615,26	12,93	91,49	19.880,62
32	490,82	13,29	80,63	23.603,95
33	664,50	12,78	62,45	14.494,42
34	526,83	12,77	56,59	14.727,17
35	496,04	12,05	49,62	14.176,84
36	666,05	10,87	81,38	18.137,22
37	675,76	10,41	81,25	19.222,55

Caracterización elasto-mecánica de probetas sin termotratar y termotrata-
das para uso estructural de madera de *Eucalyptus nitens* H. Deane and Maiden

38	603,18	11,16	77,16	20.129,65
39	495,11	12,42	60,60	14.478,70
40	632,79	13,26	77,29	17.884,58
41	712,81	12,61	89,13	24.430,33
42	627,75	12,33	69,20	17.531,16
43	531,86	13,37	73,27	19.686,44
44	627,17	12,47	65,03	16.471,41
45	681,38	13,15	73,54	19.910,92
46	718,03	11,50	70,19	21.596,43

Tabla 57. Valores de los ensayos destructivos de las probetas termotrata-
das

Nº de probeta	Densidad rodaja a H=12% (kg/m ³)	Humedad rodaja (%)	MOR (N/mm ²)	MOEG (N/mm ²)
47	Probeta rota después del termotrata- do			
48	519,01	4,88	36,08	15.292,44
49	485,40	4,18	36,01	12.649,69
50	565,63	3,87	25,09	14.631,18
51	478,64	4,34	No válido	No válido
52	580,42	4,16	72,98	19.849,51
53	441,76	5,13	No válido	No válido
54	551,42	5,39	51,31	17.902,81
55	573,00	5,39	24,22	17.354,10
56	679,18	4,39	33,17	17.788,14
57	Probeta rota después del termotrata- do			
58	412,36	4,67	28,28	11.717,87
59	543,59	3,73	No válido	No válido
60	444,61	4,90	15,98	10.193,42
61	562,20	4,93	No válido	No válido
62	532,72	4,85	57,51	19.376,75
63	625,09	4,87	No válido	No válido
64	497,29	4,75	36,31	14.649,70
65	521,44	4,47	No válido	No válido
66	477,95	3,80	20,16	11.342,05
67	519,45	4,07	No válido	No válido
68	555,16	4,51	55,62	15.645,34
69	626,61	4,83	No válido	No válido
70	Probeta mala			
71	621,04	5,08	47,52	19.090,21
72	562,11	4,63	31,80	15.224,51
73	493,94	3,79	52,88	18.208,99

Anexo 4. Gráficas carga-deformación

A. Gráficas carga-deformación local con dos extensómetros

- Probetas sin termotratar

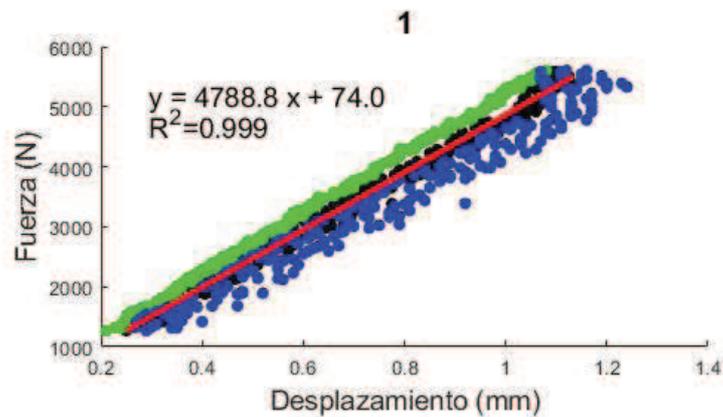


Figura 64. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 1

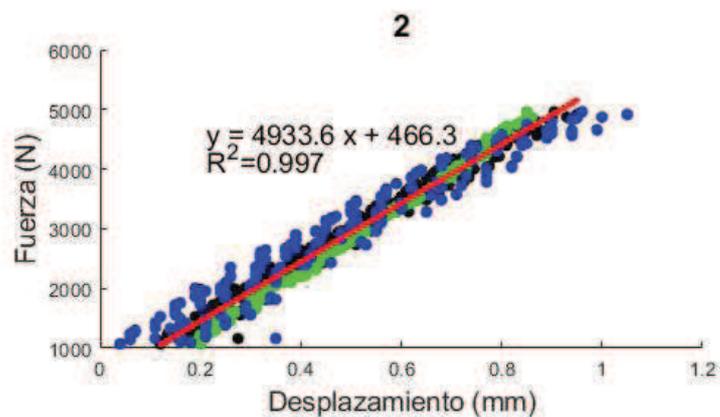


Figura 65. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 2

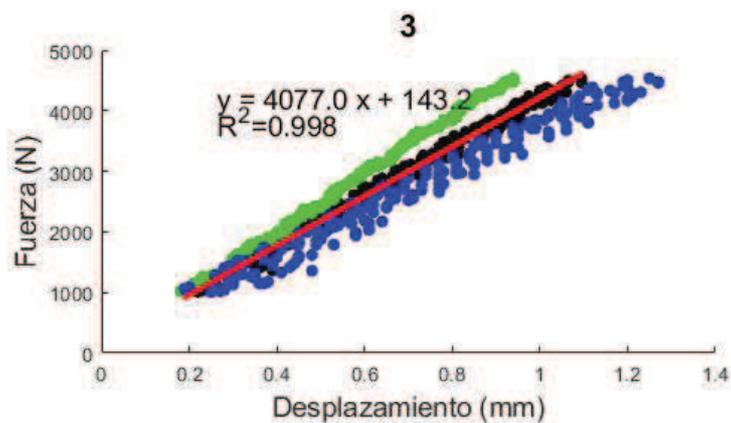


Figura 66. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 3

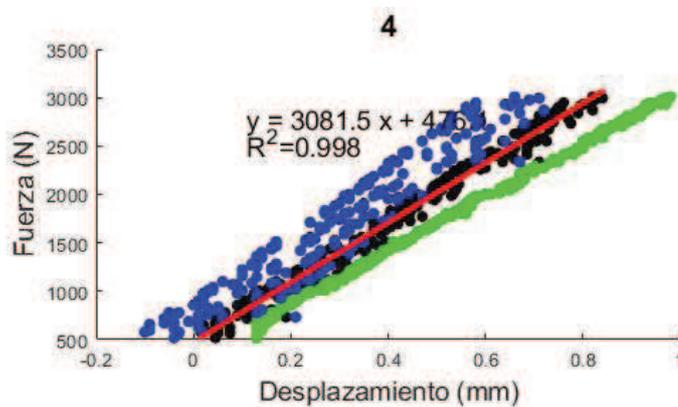


Figura 67. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 4

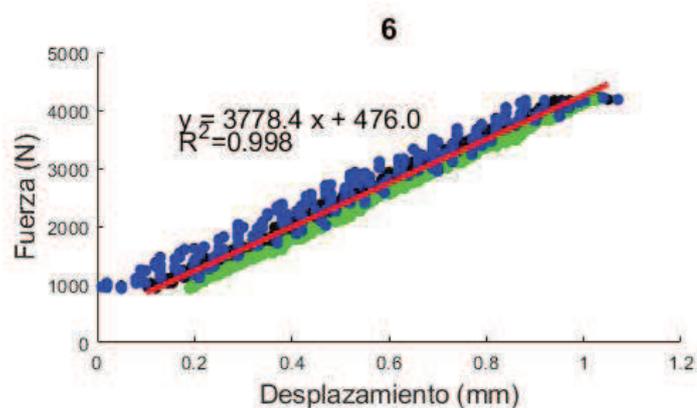


Figura 68. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 6

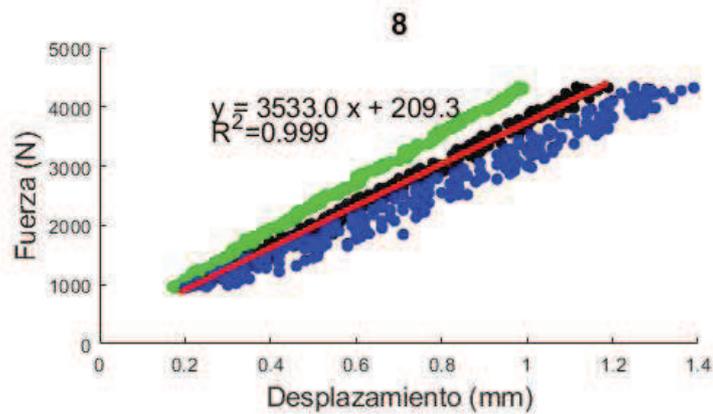


Figura 69. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 8

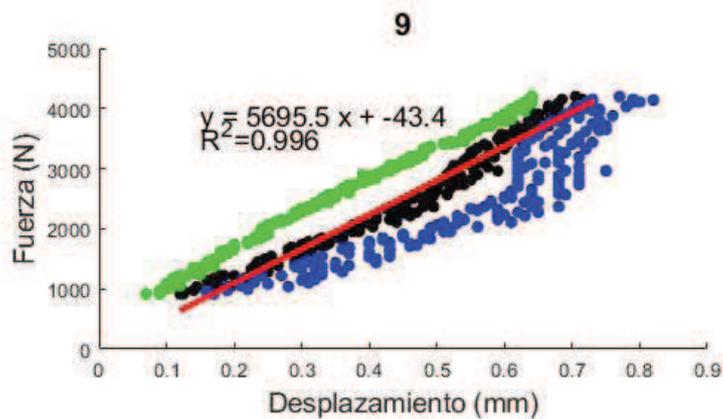


Figura 70. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 9

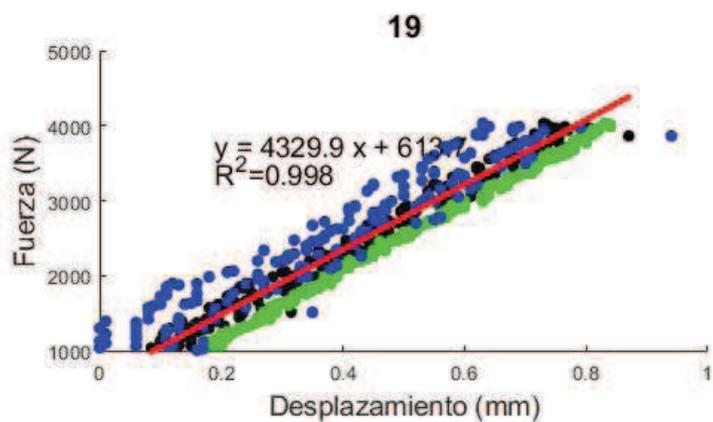


Figura 71. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 19

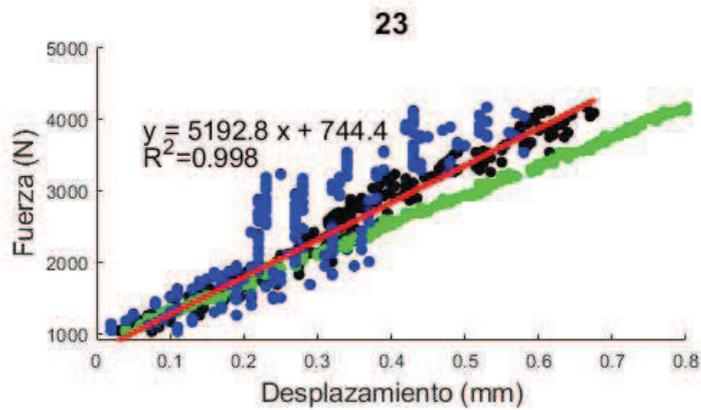


Figura 72. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 23

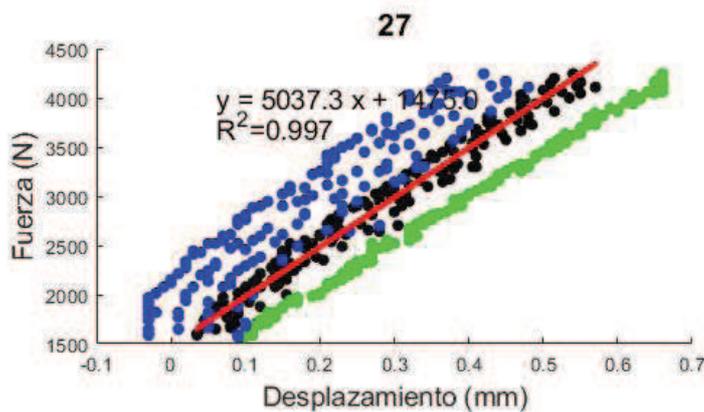


Figura 73. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 27

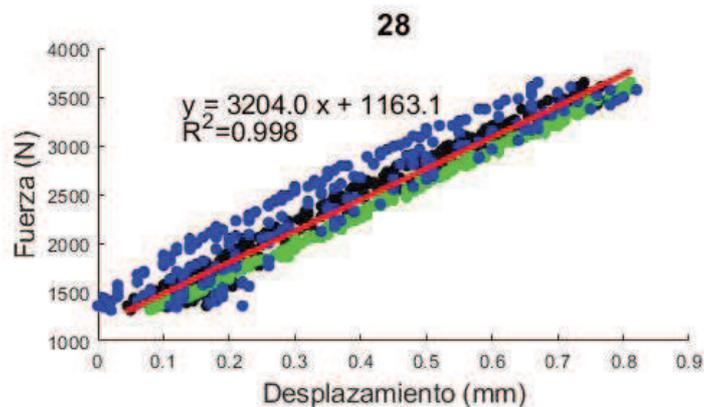


Figura 74. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 28

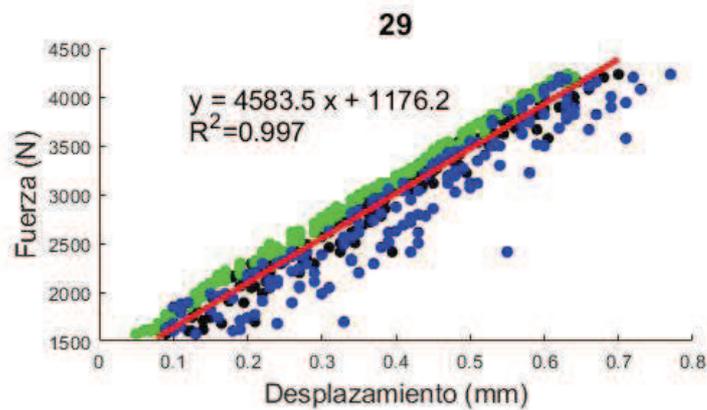


Figura 75. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 29

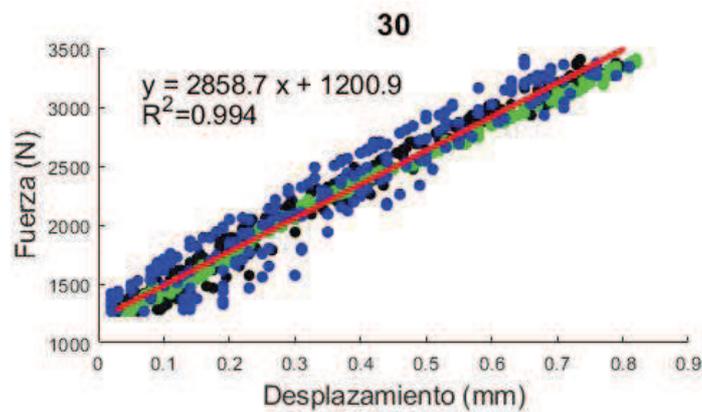


Figura 76. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 30

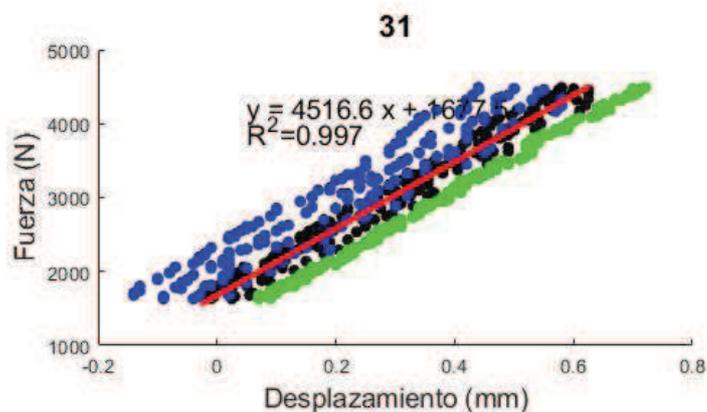


Figura 77. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 31

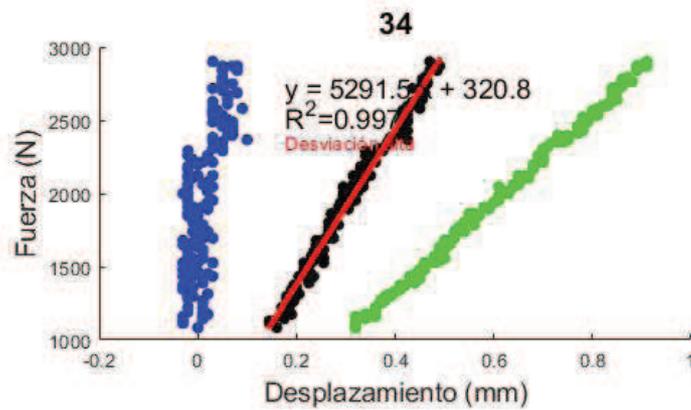


Figura 78. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 34

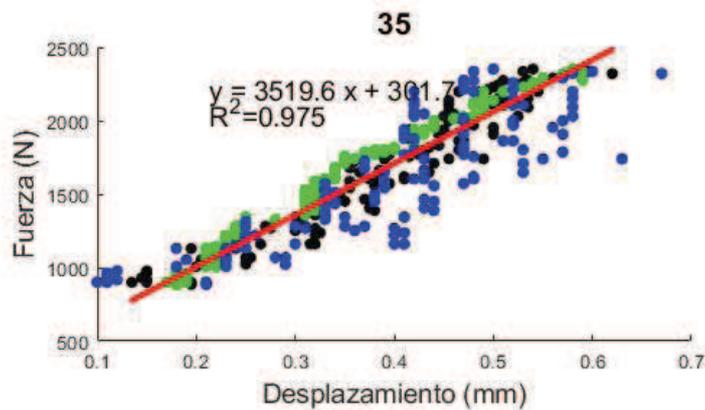


Figura 79. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 35

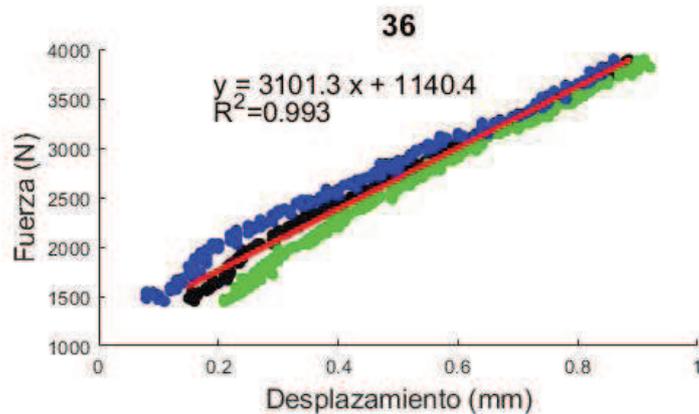


Figura 80. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 36

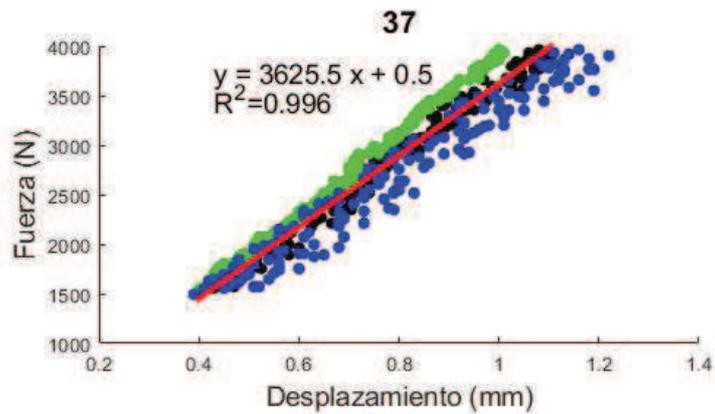


Figura 81. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 37

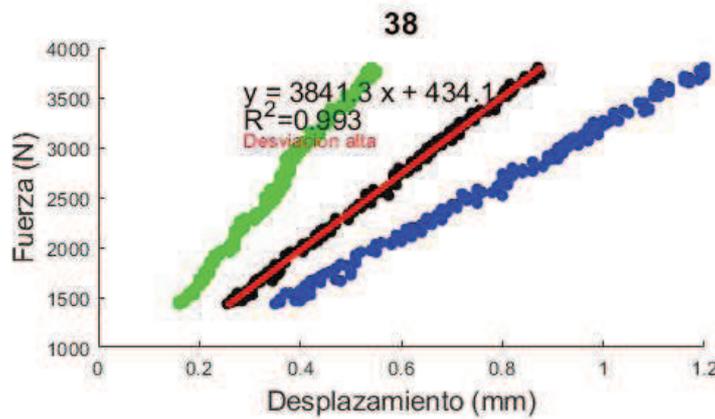


Figura 82. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 38

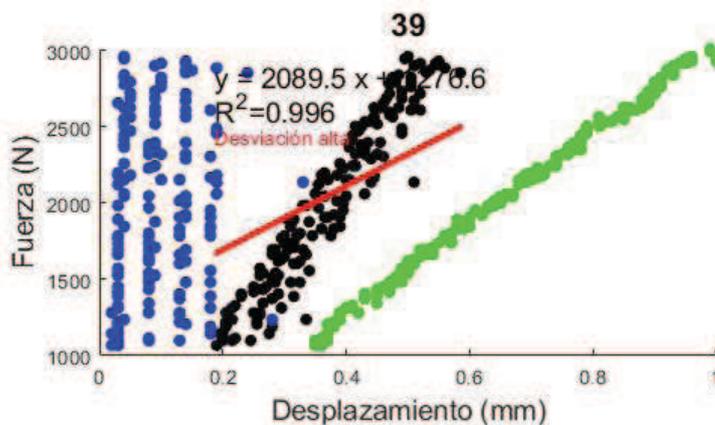


Figura 83. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 39

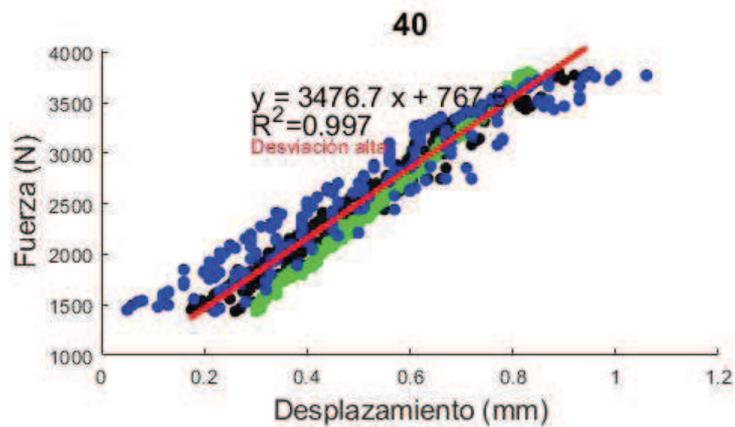


Figura 84. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 40

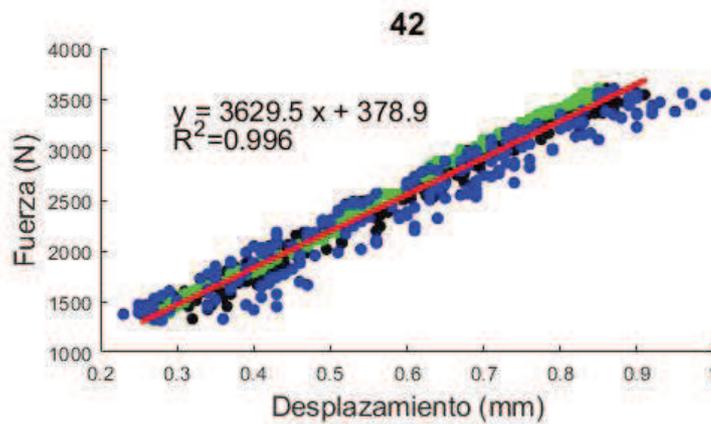


Figura 85. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 42

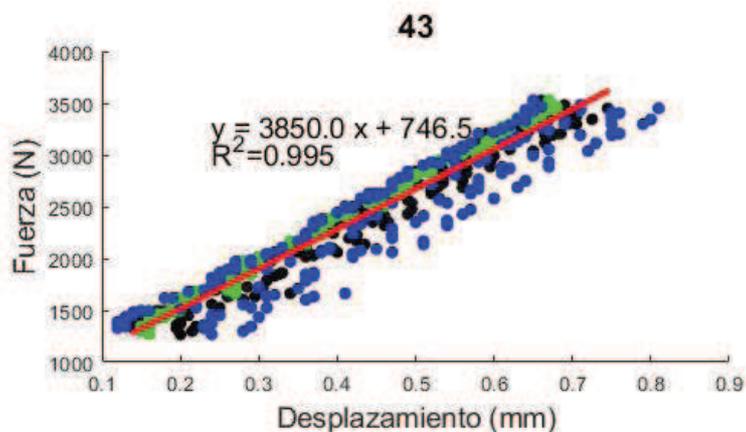


Figura 86. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 43

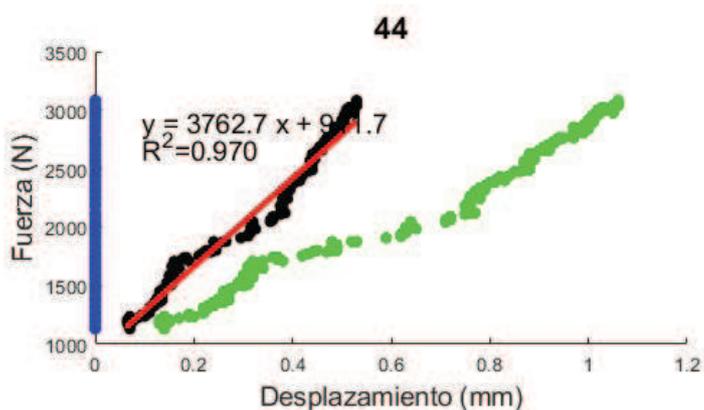


Figura 87. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 44

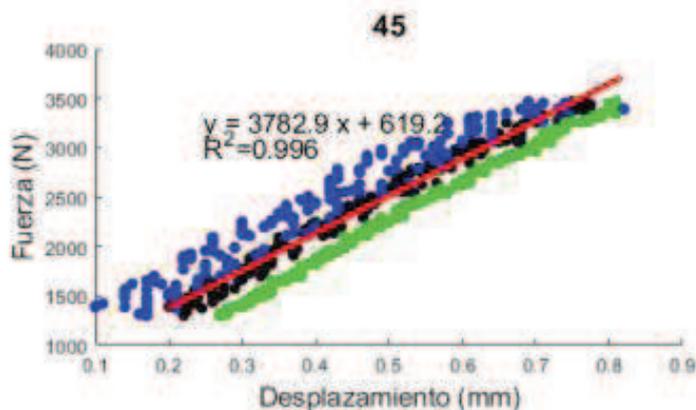


Figura 88. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 45

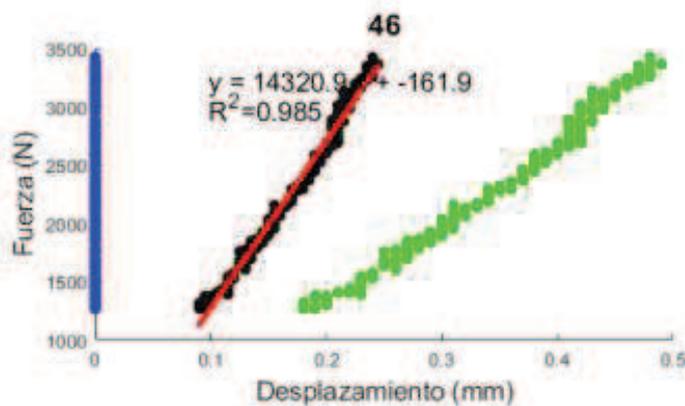


Figura 89. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta sin termotratar nº 46

- Probetas termotradas

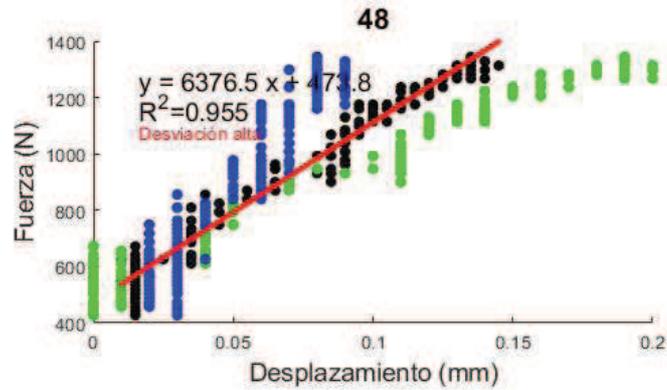


Figura 90. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta termotrada nº 48

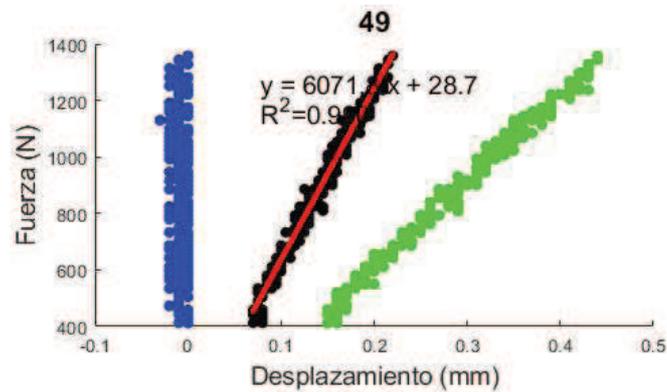


Figura 91. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta termotrada nº 49

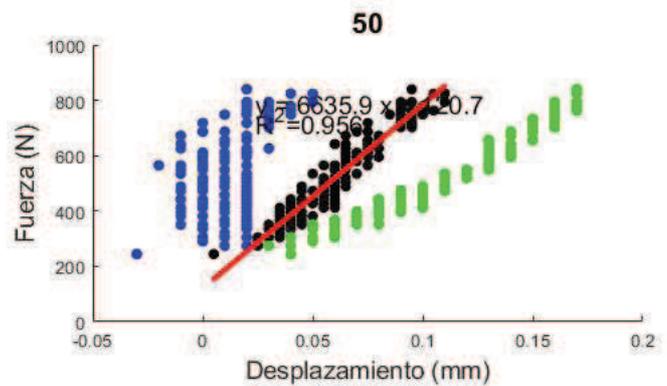


Figura 92. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta termotrada nº 50

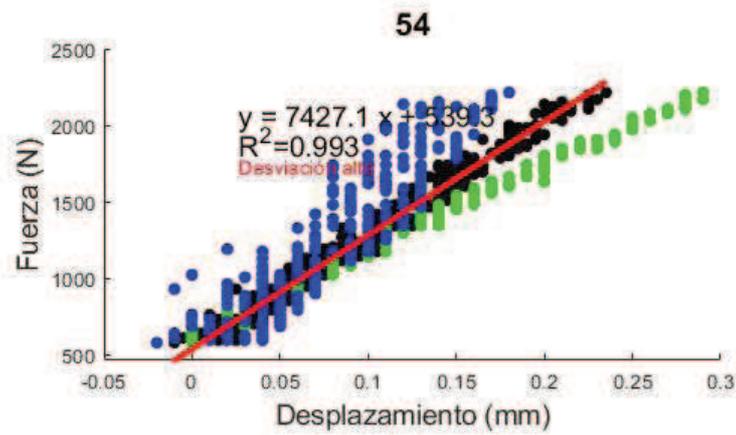


Figura 93. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta termotratada nº 54

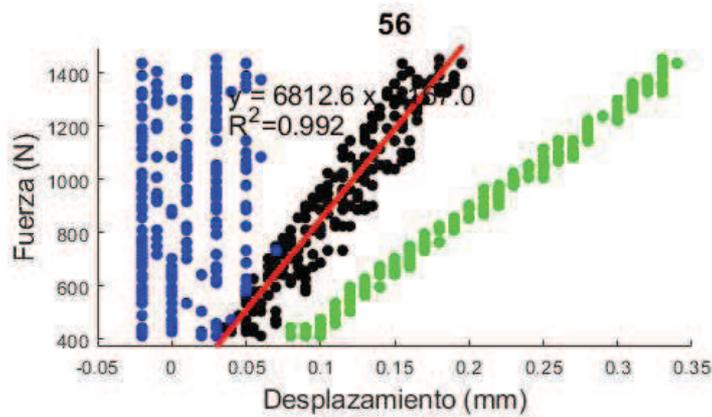


Figura 94. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta termotratada nº 56

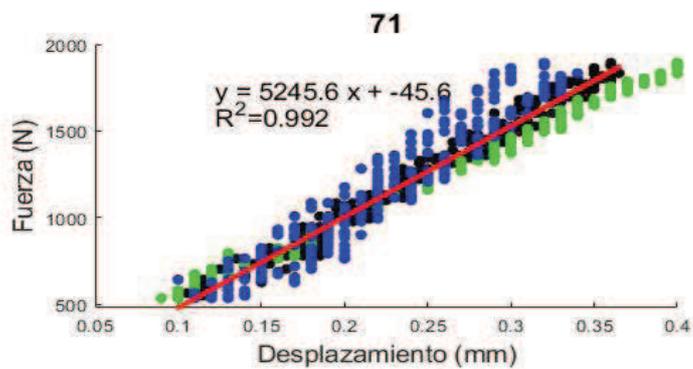


Figura 95. Gráfica carga-deformación local en ambas caras y valor medio de la probeta termotratada nº 71

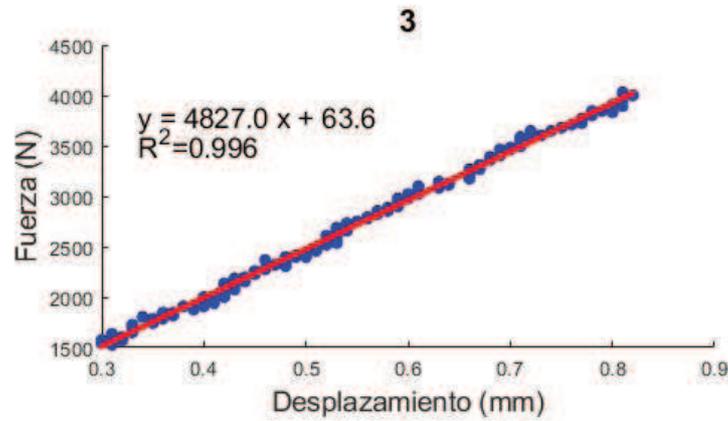


Figura 100. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 3

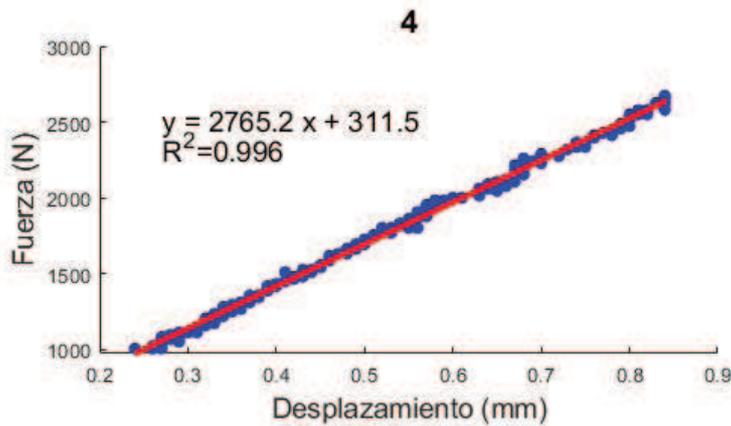


Figura 101. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 4

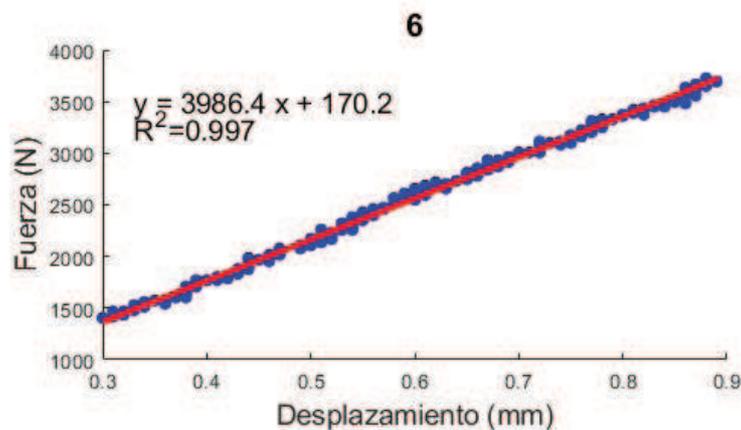


Figura 102. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 6

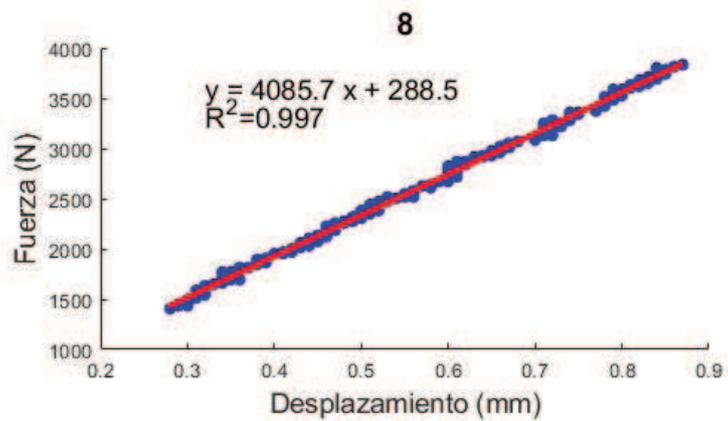


Figura 103. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 8

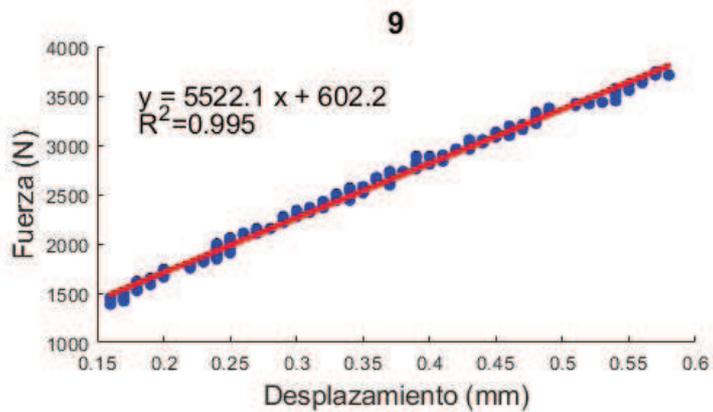


Figura 104. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 9

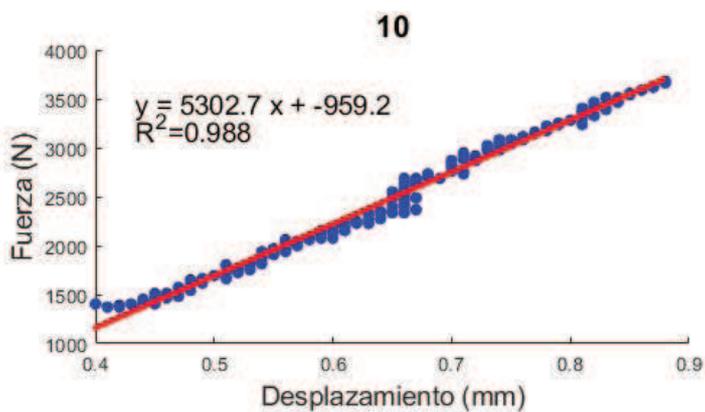


Figura 105. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 10

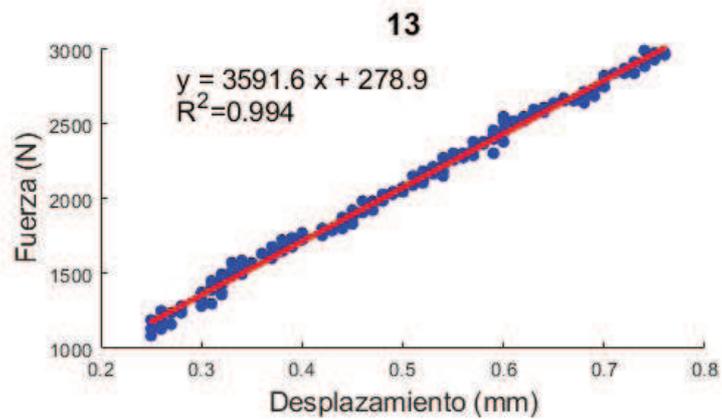


Figura 106. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 13

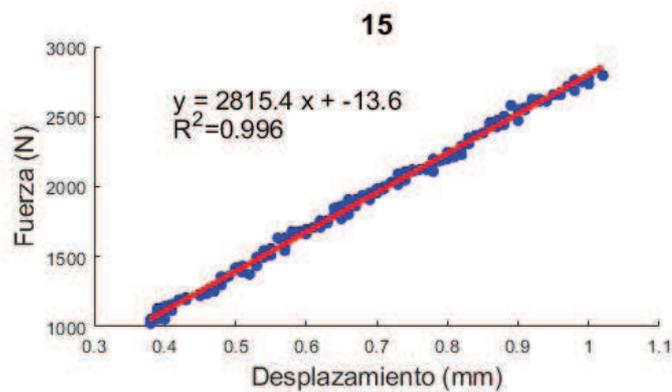


Figura 107. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 15

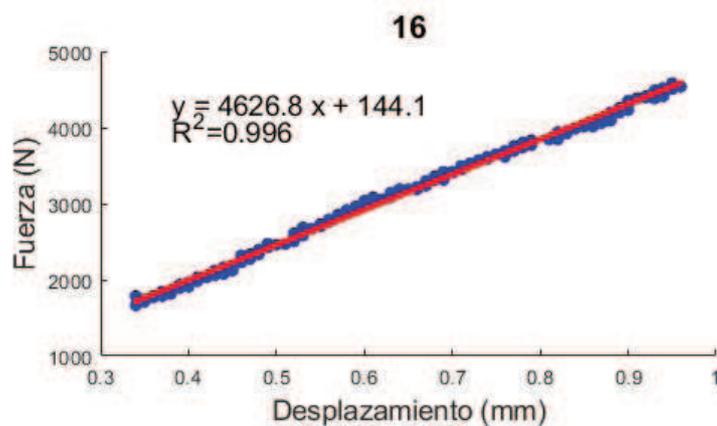


Figura 108. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 16

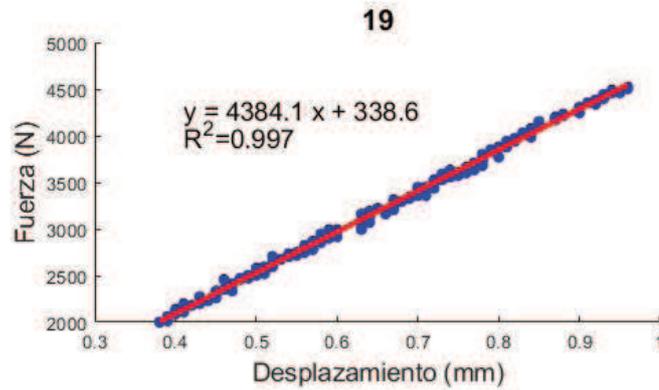


Figura 109. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 19

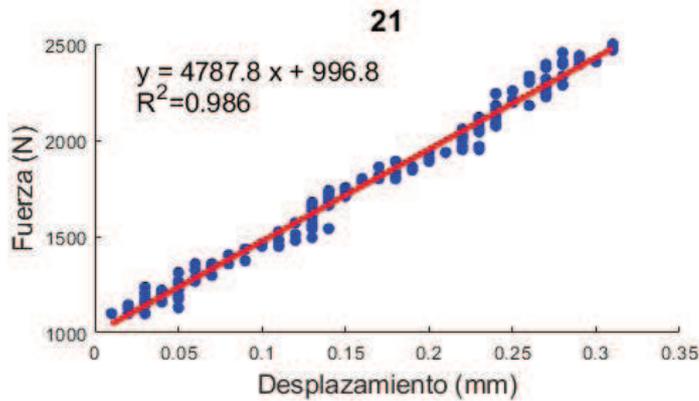


Figura 110. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 21

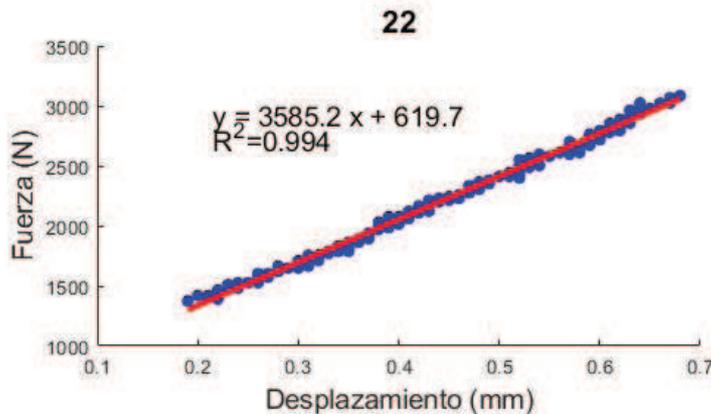


Figura 111. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 22

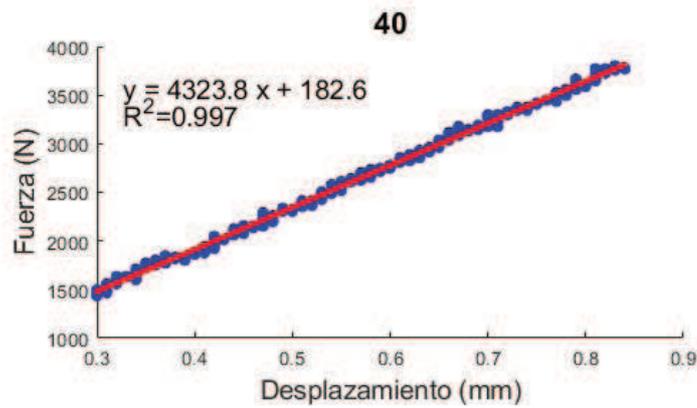


Figura 124. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 40

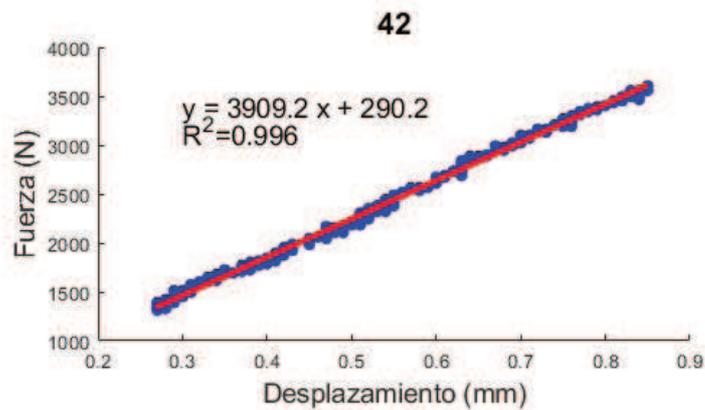


Figura 125. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 42

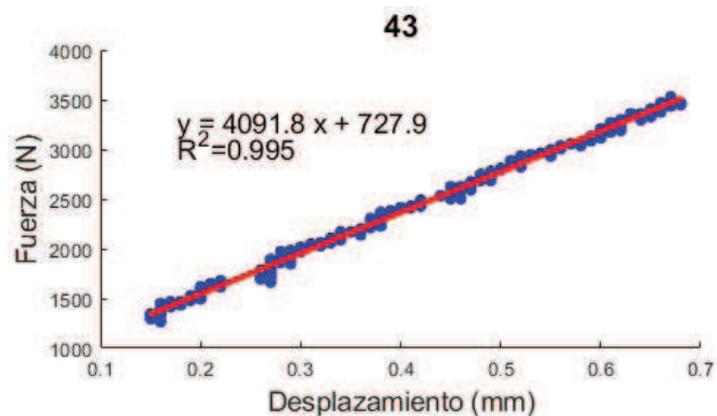


Figura 126. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta sin termotratar nº 43

- Probetas termotradas

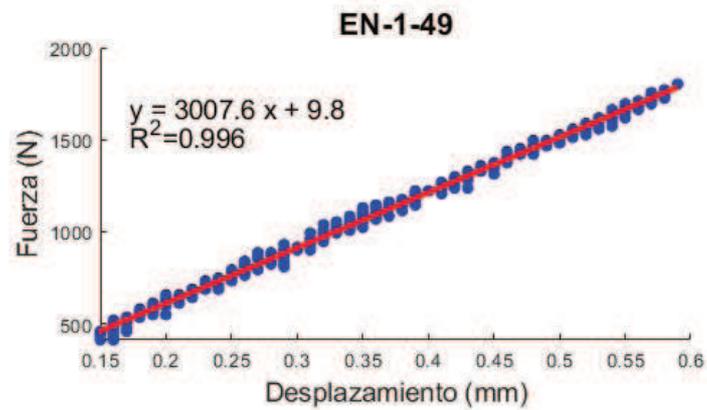


Figura 129. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta termotrada n° 49

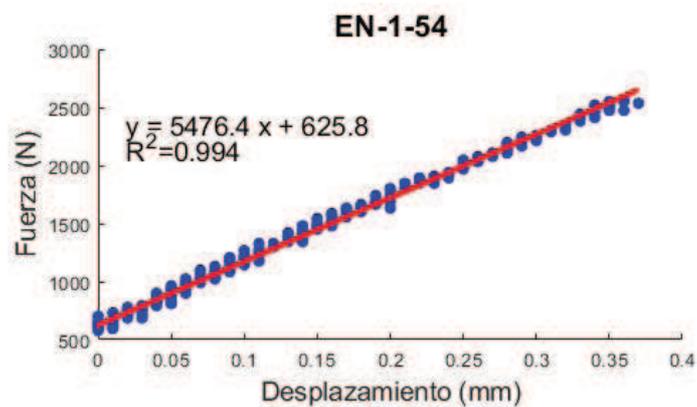


Figura 130. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta termotrada n° 54

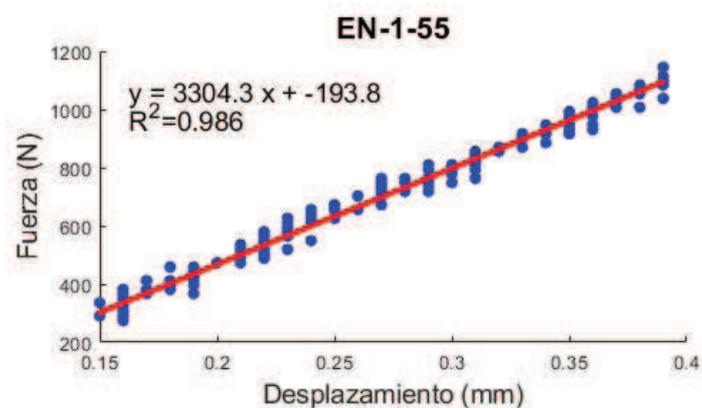


Figura 131. Gráfica carga-deformación local en la cara A de la probeta termotrada n° 55

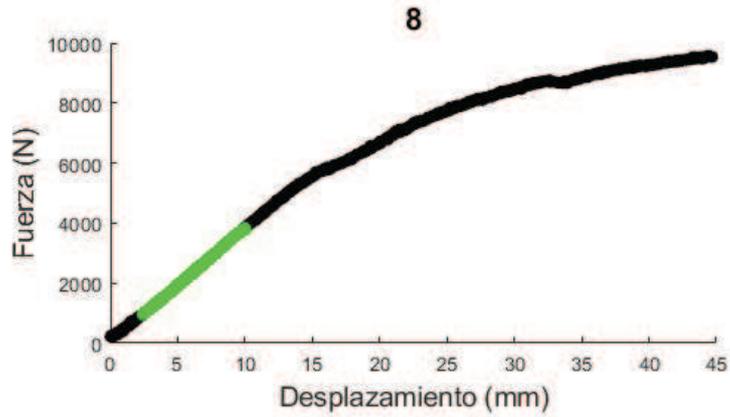


Figura 142. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 8

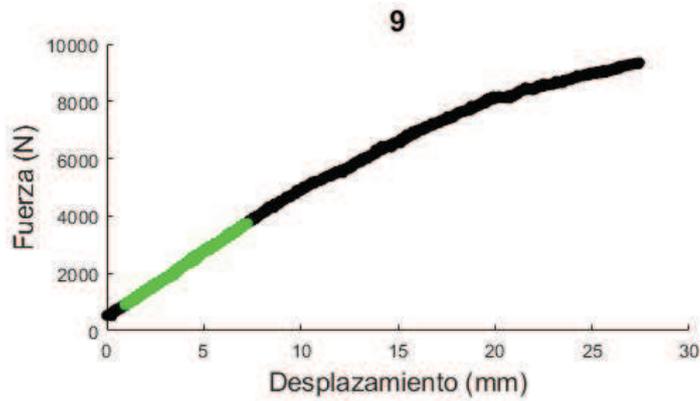


Figura 143. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 9

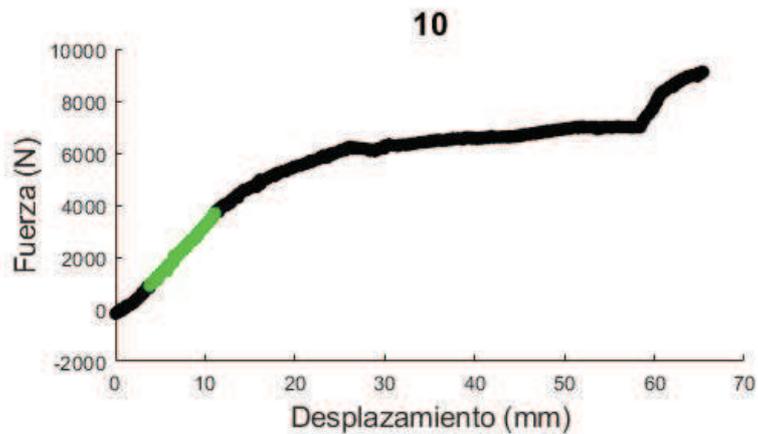


Figura 144. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 10

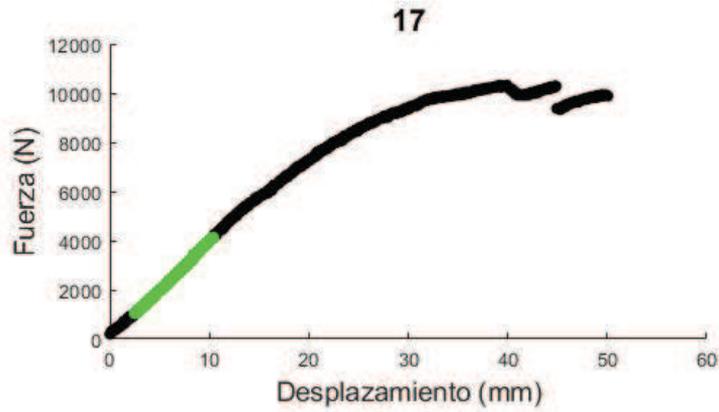


Figura 151. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 17

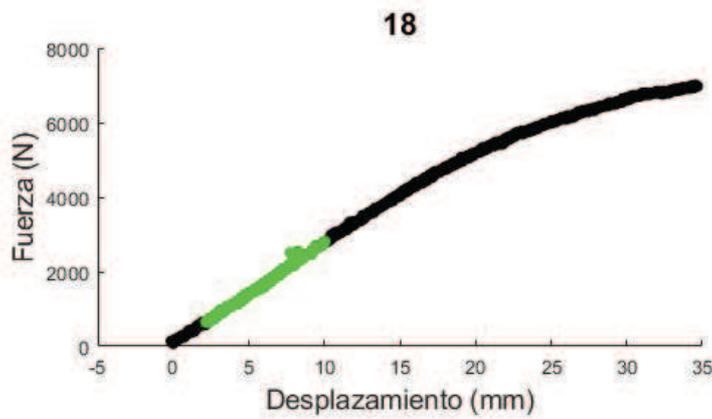


Figura 152. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 18

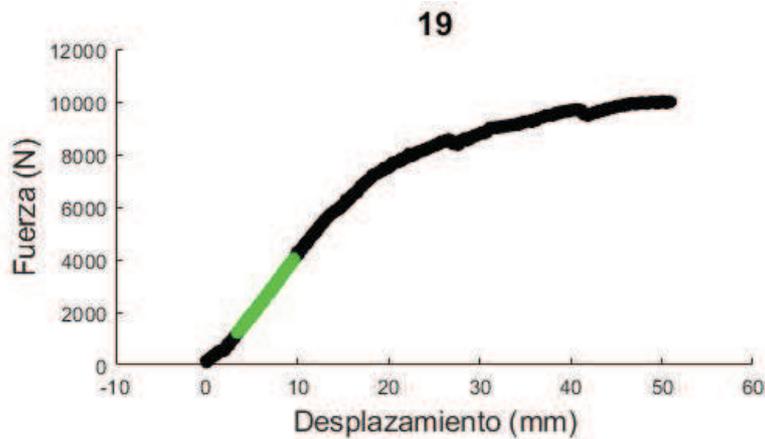


Figura 153. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 19

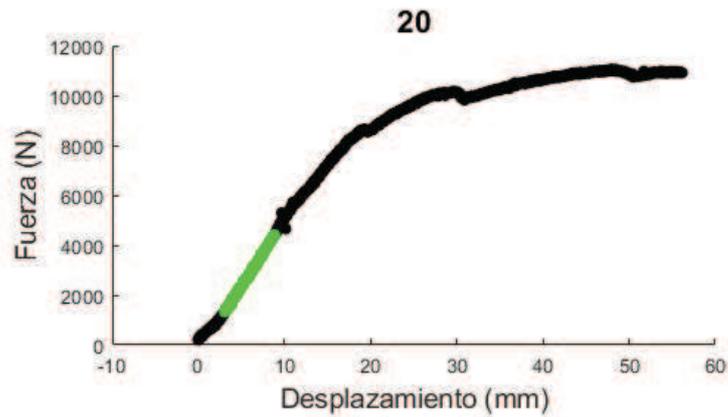


Figura 154. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 20

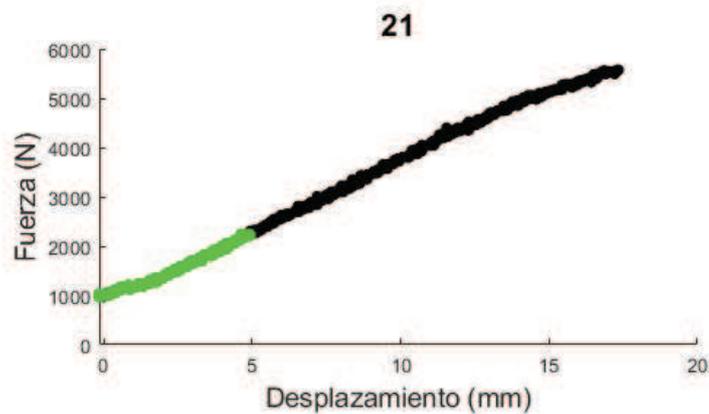


Figura 155. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 21

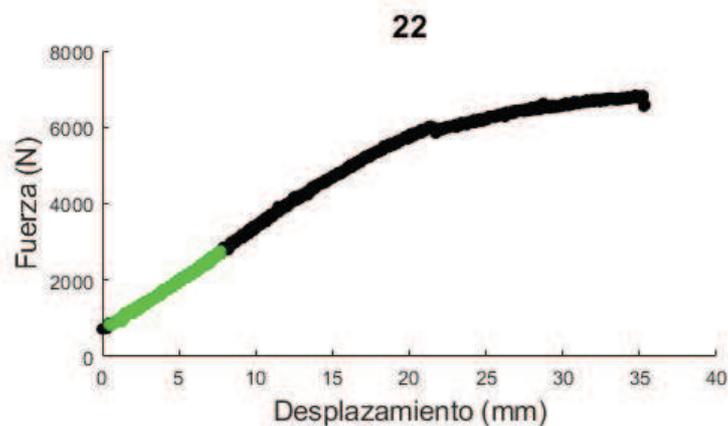


Figura 156. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 22

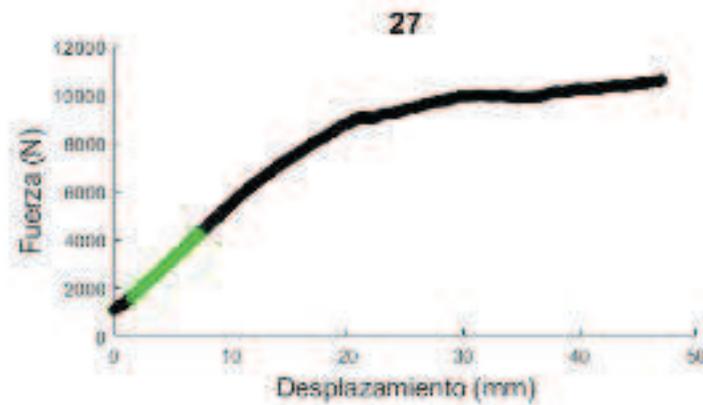


Figura 160. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 27

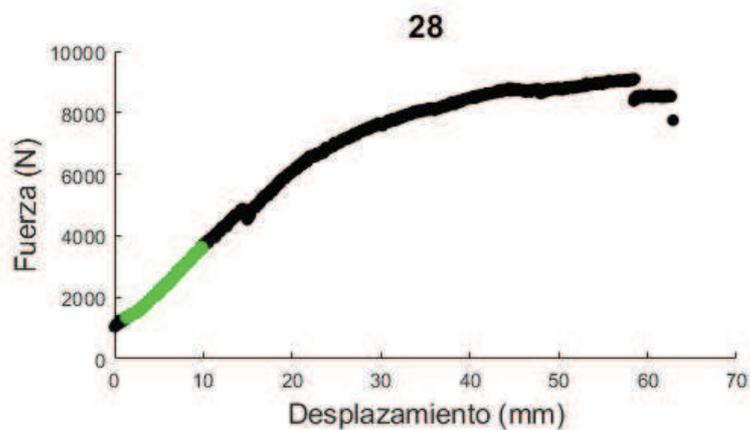


Figura 161. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 28

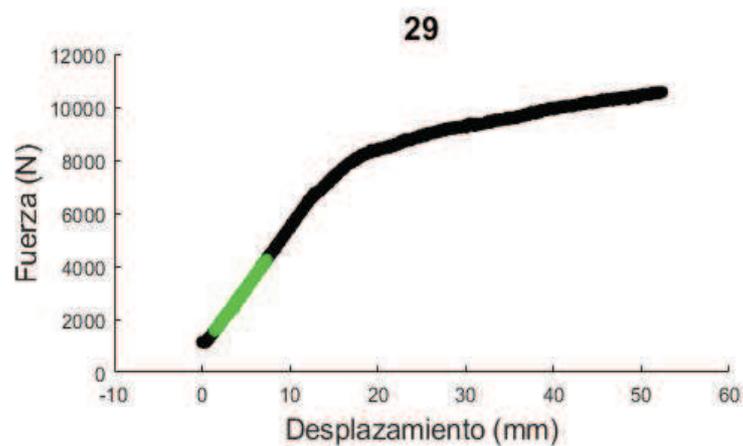


Figura 162. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 29

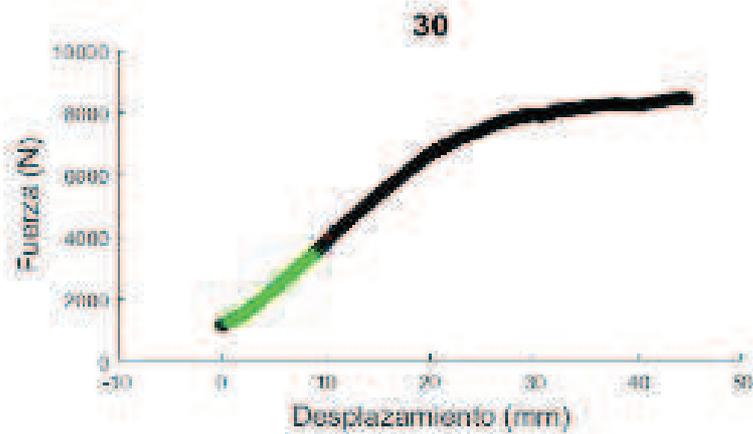


Figura 163. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 30

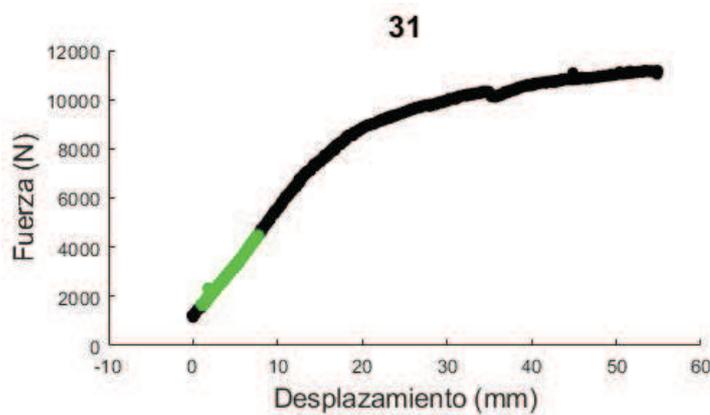


Figura 164. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 31

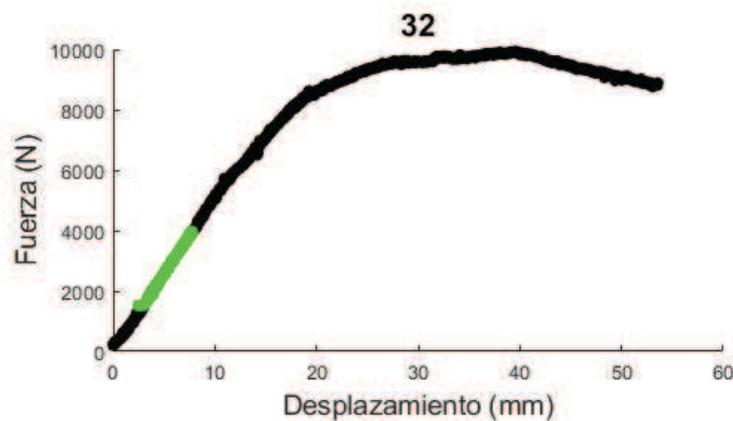


Figura 165. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta sin termotratar nº 32

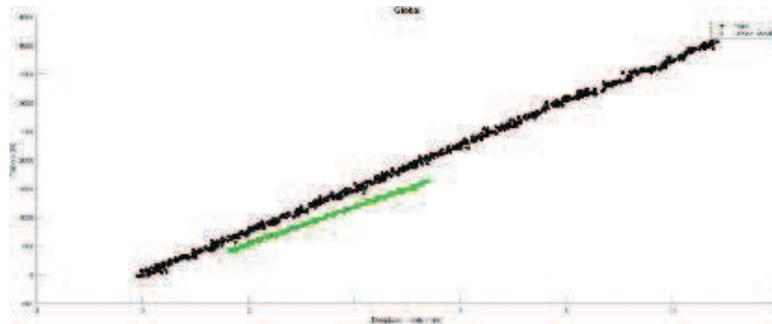


Figura 183. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 56

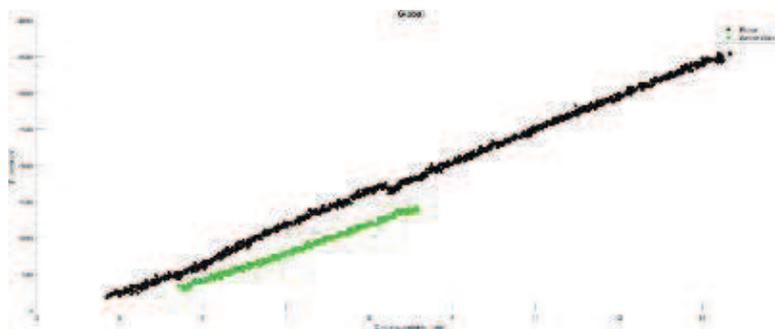


Figura 184. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 58

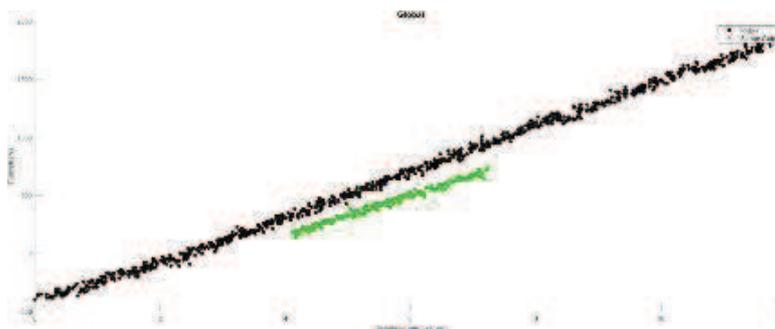


Figura 185. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 60

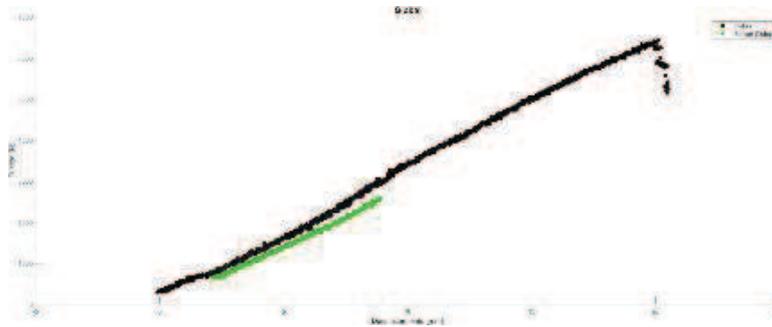


Figura 189. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 68

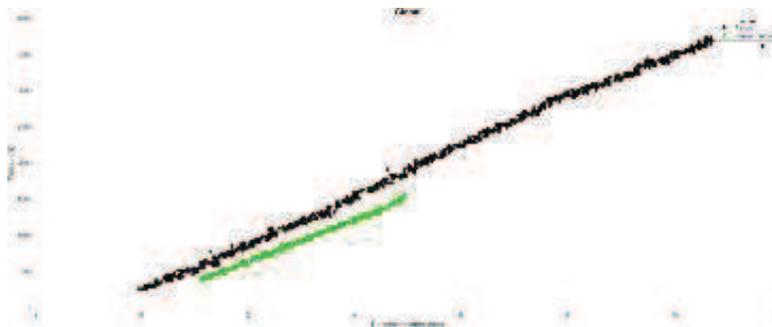


Figura 190. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 71

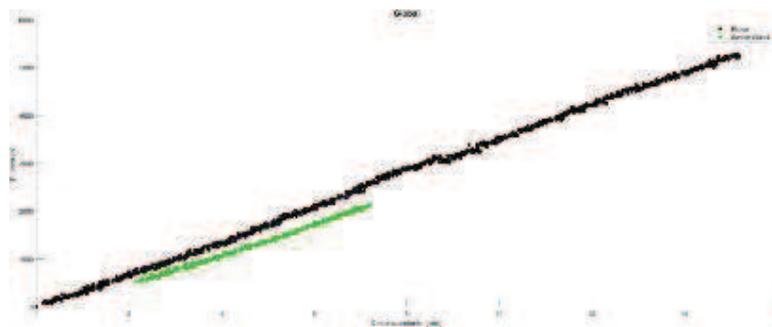


Figura 191. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 72

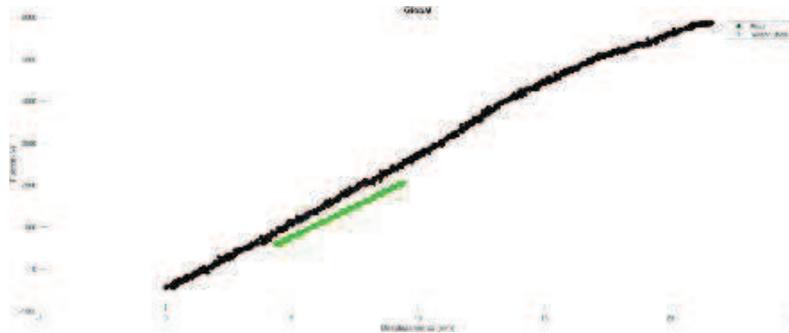


Figura 192. Gráfica carga-deformación global con recorrido de pistón de la probeta termotrada nº 73

Anexo 4. Datos de las contracciones

Tabla 58. Valores de las probetas

Nº de probeta	l _s (mm)	l ₀ (mm)	h _s (mm)	h ₀ (mm)	b _s (mm)	b ₀ (mm)	V _H (cm ³)	V ₀ (cm ³)	H (%)
1	40,7	40,6	19,4	17,7	17,2	16,1	12,82	11,57	16,85
3	40,8	40,6	20,4	18,1	19,9	17,9	14,46	13,15	18,52
4	40,8	40,6	20,4	18,2	19,3	18,3	14,69	13,52	15,71
5	40,8	40,7	19,1	18	19,8	18,3	14,73	13,41	18,46
8	40,4	40,5	19	17,2	18,1	17,3	13,27	12,05	16,92
11	40,9	40,7	18,7	17,8	20,4	17,8	14,49	12,90	17,44
13	41	40,8	18,6	16,5	18,8	18,1	14,46	12,18	15,94
16	40,7	40,4	19,3	17,4	18,5	17,6	13,96	12,37	18,82
17	40,7	40,6	18,5	17,2	19,1	17,6	13,56	12,29	18,29
27	40,8	40,7	20,3	18	18,7	17,7	14,49	12,97	17,98
30	40,9	40,7	19,3	17,7	18,9	18,1	14,15	13,04	15,52
32	41,1	40,7	18,7	17,2	19,1	17,5	13,70	12,25	17,11
33	40,4	40,4	18,4	17,7	19,1	17,9	13,60	12,80	16,36
38	40,4	40,4	20,3	17,9	19,9	18,1	14,43	13,09	17,14
42	40,7	40,7	20,1	17,9	19,1	18,2	14,53	13,26	16,87
48	40,6	40,4	19,4	18,3	19,9	18,4	14,58	13,60	11,43
49	40,4	40,6	18,4	17,8	18,9	18	13,79	13,01	8,06
50	40,8	40,8	18,8	18	19,3	18,1	15,15	13,29	10,81
52	40,6	40,9	18,6	17,8	18,9	17,9	14,08	13,03	9,72
55	41	40,8	18,6	17,9	18,4	18,2	13,80	13,29	8,57
56	40,4	40,5	18,9	18,1	18,4	18	13,82	13,19	10,29
58	40,4	40,4	19,1	18,4	18,6	18,3	14,09	13,60	6,12
60	40,7	40,9	19,3	18,2	18,3	18	14,30	13,40	13,56
62	40,8	40,7	19,4	18,4	18,9	18,3	14,65	13,70	12,50
64	40,6	40,8	19,3	18,3	18,2	17,6	14,06	13,14	10,45
66	40,8	40,8	18,4	17,8	18,5	18	13,85	13,07	11,54
68	40,8	40,8	19,4	18,4	18,8	18,3	14,45	13,74	10,77
71	40,8	40,8	19,5	18,2	19,2	18,4	14,81	13,66	12,22
72	40,6	40,6	19,3	18,3	18,8	18,2	14,23	13,52	9,09
73	40,4	40,6	19,1	18,2	19	18,3	14,46	13,52	12,50

Tabla 59. Valores de las contracciones de las probetas

Nº de probeta	Contracción longitudinal (%)	Contracción radial (%)	Contracción tangencial (%)	Coef. contracción volumétrica (%)
1	0,25	6,83	9,60	17,38
3	0,49	11,17	12,71	25,92
4	0,49	5,46	12,09	18,80
5	0,25	8,20	6,11	15,09
8	No válido	4,62	10,47	15,29
11	0,49	14,61	5,06	20,99
13	0,49	3,87	12,73	17,66
16	0,74	5,11	10,92	17,46
17	0,25	8,52	7,56	17,01
27	0,25	5,65	12,78	19,44
30	0,49	4,42	9,04	14,42
32	0,98	9,14	8,72	19,83
33	0,00	6,70	3,95	10,92
38	0,00	9,94	13,41	24,69
42	0,00	4,95	12,29	17,84
48	0,50	8,15	6,01	15,22
49	No válido	5,00	3,37	8,00
50	0,00	6,63	4,44	11,37
52	No válido	5,59	4,49	9,52
55	0,49	1,10	3,91	5,57
56	No válido	2,22	4,42	6,48
58	0,00	1,64	3,80	5,51
60	No válido	1,67	6,04	7,28
62	0,25	3,28	5,43	9,16
64	No válido	3,41	5,46	8,53
66	0,00	2,78	3,37	6,24
68	0,00	2,73	5,43	8,32
71	0,00	4,35	7,14	11,80
72	0,00	3,30	5,46	8,94
73	No válido	3,83	4,95	8,42