



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

Máster Universitario en Ingeniería de Montes

Caracterización físico-mecánica de la
madera de *Paulownia elongata*

Alumno: Cáceres Hidalgo, Emilio

Tutora: Casado Sanz, Milagros
Cotutor: Acuña Rello, Luis

Mayo de 2016

AGRADECIMIENTOS

Agradecer, en primer lugar a mis tutores, Luis y Milagros, por toda la ayuda facilitada y por tantas horas de tutorías prestadas para la realización de este trabajo.

También agradecer a mis padres, Emilio y Paqui, por el esfuerzo realizado a lo largo de mi vida y formarme como persona; a mi hermana María, por estar siempre ahí; y a mis abuelos, Isabel y Emilio, por ayudar en mi educación.

Y, por supuesto, agradecer a mi novia Sandra, todo el apoyo recibido durante estos meses de trabajo, que no ha sido poco.

Por último quería agradecer a la empresa ACOR por la donación de la madera utilizada en el trabajo.

ÍNDICE

1. RESUMEN	1
2. ANTECEDENTES	5
2.1. Introducción	7
2.1.1. Los bosques.....	7
2.1.2. Industrias de la madera.....	11
2.2. La <i>Paulownia</i> y su cultivo.	12
2.2.1. El género <i>Paulownia</i>	12
2.2.2. <i>Paulownia elongata</i>	14
2.3. Particularidades de la madera.....	16
2.4. Características de la madera	20
2.4.1. Propiedades físico-mecánicas.....	20
2.4.2. Propiedades físico-mecánicas de la madera de <i>Paulownia</i>	24
2.5. Ensayos no destructivos en la madera	26
2.5.1. Medición de ultrasonidos.....	26
2.5.2. Medición de vibraciones	28
2.6. Estudios anteriores sobre <i>Paulownia</i>	28
3. OBJETIVOS.....	30
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	33
4.1. Datos generales del ensayo	35
4.2. Metodología empleada.	35
4.3. Mediciones realizadas en laboratorio.....	36
4.3.1. Medición de la densidad, humedad y coeficiente de contracción	36
4.3.2. Medición de ultrasonidos.....	40
4.3.3. Medición de vibraciones	44
4.3.4. Ensayo de resistencia a flexión en máquina universal	50

4.4. Análisis estadístico	53
4.4.1. Análisis descriptivo	53
4.4.2. Comparación de muestras	55
4.4.2.1. Test de Levene	55
4.4.2.2. Análisis de varianza	55
4.4.2.3. Test no paramétrico de Kruskal-Walis	56
4.4.2.4. Prueba de rango múltiple	56
4.4.3. Funciones de predicción	56
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	58
5.1. Análisis descriptivo	60
5.1.1. Propiedades físicas	60
5.1.2. Módulos de elasticidad y módulo de rotura con 41 piezas	62
5.1.3. Módulos de elasticidad y módulos de rotura con 12 piezas	65
5.1.4. Propiedades físicas de <i>Paulownia elongata</i> vs <i>Pinus pinaster</i>	70
5.2. Análisis comparativo	73
5.2.1. Análisis comparativo de los módulos de elasticidad para el grupo de 41 piezas	73
5.2.1.1. MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1 y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2	73
5.2.1.2. MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1 y MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2	74
5.2.1.3. MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1 y MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2	75
5.2.1.4. MOEd ultrasonidos Sylvatest directo y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio	75
5.2.1.5. MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio y MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio	76
5.2.1.6. MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo	76
5.2.1.7. MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio	77
5.2.1.8. MOEd vibraciones longitudinales y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo	78

5.2.1.9. MOEd vibraciones longitudinales y MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio.....	78
5.2.1.10. MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio.....	79
5.2.1.11. MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo.....	79
5.2.1.12. MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd vibraciones longitudinales.....	80
5.2.2. Análisis comparativo de los módulos de elasticidad para el grupo de 12 piezas.....	80
5.3. Funciones de predicción	82
6. CONCLUSIONES.....	88
7. BIBLIOGRAFÍA.....	92
8. ANEXO	99
8.1. Análisis descriptivo	101
8.1.1. Análisis de normalidad para propiedades físicas.....	101
8.1.2. Análisis de normalidad para Módulos de Elasticidad y Módulo de Rotura del grupo de 41 piezas.....	105
8.1.3. Análisis de normalidad para Módulos de Elasticidad y Módulo de Rotura del grupo de 12 piezas.....	113
8.2. Análisis comparativo.....	126
8.2.1. Análisis comparativo de los módulos de elasticidad para el grupo de 41 piezas.....	126
8.3. Funciones de predicción	134
8.3.1. Regresiones simples para el grupo de 41 piezas	134
8.3.2. Regresiones simples para el grupo de 12 piezas	138

Índice de tablas

Tabla 1. Superficies forestal y no forestal, según el tipo de formación, en hectáreas, por comunidades autónomas españolas.....	8
Tabla 2. Principales especies en Castilla y León y su superficie en hectáreas.....	9
Tabla 3. Distribución de la superficie forestal arbolada en el año 2009 según su grupo de especie (en miles de hectáreas).	10
Tabla 4. Existencias de volumen maderable por CC.AA en 2010 ($\times 10^3$ m ³).....	12
Tabla 5. Propiedades del Árbol de <i>Paulownia</i>	14
Tabla 6. Datos obtenidos de estudios anteriores	24
Tabla 7. Propiedades físico-mecánicas de interés de las seis especies de <i>Paulownia</i>	25
Tabla 8. Coeficientes dependiendo del tipo de frecuencia.	49
Tabla 9. Propiedades físicas de <i>Paulownia elongata</i> . n: número de muestras, CV: coeficiente de variación, máx: valor máximo, mín: valor mínimo.	60
Tabla 10. Módulos de elasticidad dinámicos (MPa) de <i>Paulownia elongata</i> . n: número de muestras, CV: coeficiente de variación, máx: valor máximo, mín: valor mínimo.....	62
Tabla 11. Módulo de elasticidad (MPa) y Módulo de rotura (MPa) de <i>Paulownia elongata</i> . n: número de muestras, CV: coeficiente de variación, máx: valor máximo, mín: valor mínimo.	63
Tabla 12. Módulos de elasticidad dinámicos (MPa) de <i>Paulownia elongata</i> . n: número de muestras, CV: coeficiente de variación, máx: valor máximo, mín: valor mínimo.....	66
Tabla 13. Módulo de elasticidad (MPa) y Módulo de Rotura (MPa) de <i>Paulownia elongata</i> . n: número de muestras, CV: coeficiente de variación, máx: valor máximo, mín: valor mínimo.	66
Tabla 14. Propiedades físicas del <i>Pinus pinaster</i>	70
Tabla 15. Resumen estadístico para la población formada por los MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1 y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2 (41).	74
Tabla 16. Resumen estadístico para la población formada por los MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1 y MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2 (41).....	74
Tabla 17. Resumen estadístico para la población formada por los MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1 y MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2 (41).	75
Tabla 18. Resumen estadístico para la población formada por los MOEd ultrasonidos Sylvatest directo y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio (41).	75
Tabla 19. Resumen estadístico para la población formada por los MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio y MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio (41).....	76
Tabla 20. Resumen estadístico para la población formada por los MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).....	77
Tabla 21. Resumen estadístico para la población formada por los MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio (41).....	77

Tabla 22. Resumen estadístico para la población formada por los MOEd vibraciones longitudinales y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).	78
Tabla 23. Resumen estadístico para la población formada por los MOEd vibraciones longitudinales y MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).	78
Tabla 24. Resumen estadístico para la población formada por los MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).	79
Tabla 25. Resumen estadístico para la población formada por los MOEd según UNE-EN 408:2011 y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).	79
Tabla 26. Resumen estadístico para la población formada por los MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd vibraciones longitudinales (41).	80
Tabla 27. Sesgo estandarizado y curtosis estadarizada comparación de varios Módulos de Elasticidad (12).	81
Tabla 28. Verificación de la varianza para comparación de varios Módulos de Elasticidad (12).	81
Tabla 29. Tabla ANOVA para comparación de varios Módulos de Elasticidad (12).	81
Tabla 30. Prueba de rango múltiple de tukey Módulos de Elasticidad (12).	82
Tabla 31. Regresiones simples de MOE según UNE-EN 408:2011 con el resto de MOEd calculados (41).	83
Tabla 32. Sesgo y curtosis de la densidad anhidra.	101
Tabla 33. Pruebas de normalidad para densidad anhidra.	101
Tabla 34. Sesgo y curtosis de la densidad básica.	101
Tabla 35. Pruebas de normalidad para densidad básica.	101
Tabla 36. Sesgo y curtosis de la densidad normal.	102
Tabla 37. Pruebas de normalidad para densidad normal.	102
Tabla 38. Sesgo y curtosis de la contracción longitudinal.	102
Tabla 39. Pruebas de normalidad para contracción longitudinal.	103
Tabla 40. Sesgo y curtosis de la contracción radial.	103
Tabla 41. Pruebas de normalidad para contracción radial.	103
Tabla 42. Sesgo y curtosis de la contracción tangencial.	104
Tabla 43. Pruebas de normalidad para contracción tangencial.	104
Tabla 44. Sesgo y curtosis de la contracción volumétrica.	104
Tabla 45. Pruebas de normalidad para contracción volumétrica.	104
Tabla 46. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1 (41).	105
Tabla 47. Pruebas de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1 (41).	105
Tabla 48. Sesgo y curtosis de MOEd ultraonidos Fakopp directo 2 (41).	106

Tabla 49. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2 (41).	106
Tabla 50. Sesgo y curtosis de MOEd ultraonidos Fakopp directo medio (41).....	106
Tabla 51. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).	106
Tabla 52. Sesgo y curtosis de MOEd ultraonidos Fakopp indirecto 1 (41).	107
Tabla 53. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1 (41)..	107
Tabla 54. Sesgo y curtosis de MOEd ultraonidos Fakopp indirecto 2 (41).	107
Tabla 55. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2 (41)..	108
Tabla 56. Sesgo y curtosis de MOEd ultraonidos Fakopp indirecto medio (41).....	108
Tabla 57. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio (41).	108
Tabla 58. Sesgo y curtosis de MOEd ultraonidos <i>Sylvatest directo</i> (41).....	109
Tabla 59. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos <i>Sylvatest directo</i> (41).....	109
Tabla 60. Sesgo y curtosis de MOEd ultraonidos <i>Sylvatest</i> indirecto 1 (41).	109
Tabla 61. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos <i>Sylvatest</i> indirecto 1 (41).	109
Tabla 62. Sesgo y curtosis de MOEd ultraonidos <i>Sylvatest</i> indirecto 2 (41).	110
Tabla 63. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos <i>Sylvatest</i> indirecto 2 (41).	110
Tabla 64. Sesgo y curtosis de MOEd ultraonidos <i>Sylvatest</i> indirecto medio (41).	110
Tabla 65. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos <i>Sylvatest</i> indirecto medio (41).....	111
Tabla 66. Sesgo y curtosis de MOEd vibraciones longitudinales (41).	111
Tabla 67. Prueba de normalidad para MOEd vibraciones longitudinales (41).	111
Tabla 68. Sesgo y curtosis de MOE según UNE EN 408:2011 (41).	112
Tabla 69. Prueba de normalidad para MOE según UNE EN 408:2011 (41).	112
Tabla 70. Sesgo y curtosis de MOR según UNE EN 408:2011 (41).....	112
Tabla 71. Prueba de normalidad para MOR según UNE EN 408:2011 (41).	112
Tabla 72. Sesgo y curtosis de MOEd ultraonidos Fakopp directo 1 (12).	113
Tabla 73. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1 (12).	113
Tabla 74. Sesgo y curtosis de MOEd ultraonidos Fakopp directo 2 (12).	114
Tabla 75. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2 (12).	114
Tabla 76. Sesgo y curtosis de MOEd ultraonidos Fakopp directo medio (12).....	114
Tabla 77. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (12).	114
Tabla 78. Sesgo y curtosis de MOEd ultraonidos Fakopp indirecto 1 (12).	115

Tabla 79. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1 (12)...	115
Tabla 80. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2 (12).	115
Tabla 81. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2 (12)...	116
Tabla 82. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio (12).....	116
Tabla 83. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio (12).	116
Tabla 84. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (12).....	117
Tabla 85. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (12).....	117
Tabla 86. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1 (12).	117
Tabla 87. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1 (12).	117
Tabla 88. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2 (12).	118
Tabla 89. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2 (12).	118
Tabla 90. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio (12).	119
Tabla 91. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio (12).	119
Tabla 92. Sesgo y curtosis de MOEd vibraciones longitudinales (12).	119
Tabla 93. Prueba de normalidad para MOEd vibraciones longitudinales (12).	119
Tabla 94. Sesgo y curtosis de MOEd empotrada-libre horizontal (12).....	120
Tabla 95. Prueba de normalidad para MOEd empotrada-libre horizontal (12).....	120
Tabla 96. Sesgo y curtosis de MOEd empotrada-libre vertical (12).....	121
Tabla 97. Prueba de normalidad para MOEd empotrada-libre vertical (12).....	121
Tabla 98. Sesgo y curtosis de MOEd empotrada-libre medio (12).	121
Tabla 99. Prueba de normalidad para MOEd empotrada-libre medio (12).	121
Tabla 100. Sesgo y curtosis de MOEd biapoyada horizontal (12).	122
Tabla 101. Prueba de normalidad para MOEd biapoyada horizontal (12).	122
Tabla 102. Sesgo y curtosis de MOEd biapoyada vertical (12).	123
Tabla 103. Prueba de normalidad para MOEd biapoyada vertical (12).	123
Tabla 104. Sesgo y curtosis de MOEd biapoyada medio (12).	123
Tabla 105. Prueba de normalidad para MOEd biapoyada medio (12).....	123
Tabla 106. Sesgo y curtosis de MOEd “Ibertest” un punto de carga (12).	124
Tabla 107. Prueba de normalidad para MOEd “Ibertest” un punto de carga (12).	124
Tabla 108. Sesgo y curtosis de MOE según UNE-EN 408:2011 (12).....	125
Tabla 109. Prueba de normalidad para MOE según UNE-EN 408:2011 (12).....	125

Tabla 110. Sesgo y curtosis de MOR según UNE-EN 408:2011 (12).....	125
Tabla 111. Prueba de normalidad para MOR según UNE-EN 408:2011 (12).....	125
Tabla 112. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1 y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2 (41).	126
Tabla 113. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1 y MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2 (41).....	127
Tabla 114. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1 y MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2 (41).	127
Tabla 115. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Sylvatest directo y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio (41).	128
Tabla 116. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio y MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio (41).	129
Tabla 117. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).....	129
Tabla 118. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio (41).....	130
Tabla 119. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOEd vibraciones longitudinales y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).	131
Tabla 120. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOEd vibraciones longitudinales y MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).....	131
Tabla 121. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).....	132
Tabla 122. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).....	133
Tabla 123. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd vibraciones longitudinales (41).	133
Tabla 124. Coeficientes MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).....	134
Tabla 125. Análisis de varianza MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).	134
Tabla 126. Sesgo y curtosis estandarizados de residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).	135
Tabla 127. Prueba de normalidad para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).	135
Tabla 128. Coeficientes MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).	136
Tabla 129. Análisis de varianza MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).	136

Tabla 130. Sesgo y curtosis estandarizados de residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).	136
Tabla 131. Prueba de normalidad para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).	136
Tabla 132. Coeficientes MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (41).	137
Tabla 133. Análisis de varianza MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (41).	137
Tabla 134. Sesgo y curtosis estandarizados de residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (41).	138
Tabla 135. Prueba de normalidad para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (41).	138
Tabla 136. Coeficientes MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (12).	138
Tabla 137. Análisis de varianza MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (12).	138
Tabla 138. Sesgo y curtosis estandarizados de residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (12).	139
Tabla 139. Prueba de normalidad para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (12).	139
Tabla 140. Coeficientes MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (12).	140
Tabla 141. Análisis de varianza MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (12).	140
Tabla 142. Sesgo y curtosis estandarizados de residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (12).	140
Tabla 143. Prueba de normalidad para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (12).	140
Tabla 144. Coeficientes MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (12).	141
Tabla 145. Análisis de varianza MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (12).	141
Tabla 146. Sesgo y curtosis estandarizados de residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (12).	142
Tabla 147. Prueba de normalidad para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (12).	142
Tabla 148. Coeficientes MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd empotrada-libre medio (12).	142
Tabla 149. Análisis de varianza MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd empotrada-libre medio (12).	142

Tabla 150. Sesgo y curtosis estandarizados de residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd empotrada-libre medio (12).....	143
Tabla 151. Prueba de normalidad para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd empotrada-libre medio (12).....	143
Tabla 152. Coeficientes MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd biapoyada medio (12).....	144
Tabla 153. Análisis de varianza MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd biapoyada medio (12).	144
Tabla 154. Sesgo y curtosis estandarizados de residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd biapoyada medio (12).	144
Tabla 155. Prueba de normalidad para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd biapoyada medio (12).	144
Tabla 156. Coeficientes MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd “Ibertest” con un punto de carga (12).....	145
Tabla 157. Análisis de varianza MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd “Ibertest” con un punto de carga (12).....	145
Tabla 158. Sesgo y curtosis estandarizados de residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd “Ibertest” con un punto de carga (12).....	146
Tabla 159. Prueba de normalidad para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd “Ibertest” con un punto de carga (12).....	146

Índice de figuras

Figura 1. Volumen maderable: variación desde el IFN1 al IFN3 (GIL & TORRE, 2007).	9
Figura 2. Flor, fruto y hoja de <i>Paulownia</i> (ROJAS, 2008).	14
Figura 3. Tamaño hojas de <i>Paulownia elongata</i> (Fuente: http://paulownia-newerafarms.blogspot.com.es/).	15
Figura 4. Ejes de una pieza de madera.	22
Figura 5. Esquema de la técnica de ultrasonidos: método transmisión.	27
Figura 6. Localización de Castrillo de Duero.	35
Figura 7. Direcciones en la medición. Figura 8. Calibre de precisión 0,1 mm.	37
Figura 9. Balanza analítica de precisión 0,1 mg.	37
Figura 10. Estufa para el secado de probetas.	38
Figura 11. Equipo "Fakopp" y "Sylvatest".	41
Figura 12. Medición en ensayo de ultrasonidos con el equipo "Fakopp".	42
Figura 13. Medición en ensayo de ultrasonidos con equipo "Sylvatest".	43
Figura 14. Esquema del equipo PLG. Fuente: ÍÑIGUEZ et al. (2007).	44
Figura 15. Materiales para ensayo de vibraciones transversales con viga empotrada libre: FFT Analyser, martillo y micrófono.	45
Figura 16. Pieza empotrada-libre vibrando.	46
Figura 17. Diferentes movimientos de cualquier punto de la parte libre en viga empotrada-libre.	46
Figura 18. Pieza biapoyada.	47
Figura 19. Tipos de movimiento de la vibración en el ensayo de pieza biapoyada.	47
Figura 20. Datos a conocer en los ensayos.	47
Figura 21. Máquina universal "Ibertest", ordenador, extensómetro y travesañó.	50
Figura 22. Colocación de tablas para realizar el ensayo de flexión en la máquina universal "Ibertest" con dos puntos de carga.	51
Figura 23. Densidad anhidra (g/cm^3).	61
Figura 24. Densidad básica (g/cm^3).	61
Figura 25. Densidad normal (g/cm^3).	61
Figura 26. Contracción longitudinal (%).	61
Figura 27. Contracción radial (%).	62
Figura 28. Contracción tangencial (%).	62
Figura 29. Contracción volumétrica (%).	62

Figura 30. MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1 en MPa (41).	64
Figura 31. MOEd Ultrasonidos Fakopp directo 2 en MPa (41).	64
Figura 32. MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio en MPa (41).	64
Figura 33. MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1 en MPa (41).	64
Figura 34. MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2 en MPa (41).	64
Figura 35. MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio en MPa (41).	64
Figura 36. MOEd ultrasonidos Sylvatest directo en MPa (41).	64
Figura 37. MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1 en MPa (41).	64
Figura 38. MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2 en MPa (41).	65
Figura 39. MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio en MPa (41).	65
Figura 40. MOEd vibraciones longitudinales en MPa (41).	65
Figura 41. MOE según UNE-EN 408:2011 en MPa (41).	65
Figura 42. MOR según UNE-EN 408:2011 en MPa(41).	65
Figura 43. MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1 en MPa (12).	67
Figura 44. MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2 en MPa (12).	67
Figura 45. MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio en MPa (12).	68
Figura 46. MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1 en MPa (12).	68
Figura 47. MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2 en MPa (12).	68
Figura 48. MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio en MPa (12).	68
Figura 49. MOEd ultrasonidos Sylvatest directo en MPa (12).	68
Figura 50. MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1 en MPa (12).	68
Figura 51. MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2 en MPa (12).	68
Figura 52. MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio en MPa (12).	68
Figura 53. MOEd vibraciones longitudinales en MPa (12).	69
Figura 54. MOEd empotrada-libre horizontal en MPa (12).	69
Figura 55. MOEd empotrada-libre vertical en MPa (12).	69
Figura 56. MOEd empotrada-libre medio en MPa (12).	69
Figura 57. MOEd biapoyada horizontal en MPa (12).	69
Figura 58. MOEd biapoyada vertical en MPa (12).	69
Figura 59. MOEd biapoyada medio en MPa (12).	69
Figura 60. MOE "Ibertest" con un punto de carga centro en MPa (12).	69
Figura 61. MOE según UNE-EN 408:2011 en MPa (12).	70

Figura 62. MOR según UNE-EN 408:2011 en MPa (12).	70
Figura 63. Densidad anhidra paulownia vs pino (g/cm ³).	71
Figura 64. Densidad básica paulownia vs pino (g/cm ³).	71
Figura 65. Densidad normal paulownia vs pino (g/cm ³).	71
Figura 66. Contracción longitudinal paulownia vs pino (%).	72
Figura 67. Contracción radial paulownia vs pino (%).	72
Figura 68. Contracción tangencial paulownia vs pino (%).	72
Figura 69. Contracción volumétrica paulownia vs pino (%).	73
Figura 70. Gráfica de medias de Tukey para Módulos de Elasticidad (12).	82
Figura 71. Regresión simple. MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).	84
Figura 72. Regresión simple. MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).	84
Figura 73. Regresión simple. MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (41).	85
Figura 74. Regresión simple. MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (12).	85
Figura 75. Regresión simple. MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (12).	85
Figura 76. Regresión simple. MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (12).	86
Figura 77. Regresión simple. MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd empotrada-libre medio (12).	86
Figura 78. Regresión simple. MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd biapoyada medio (12).	86
Figura 79. Regresión simple. MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd "Ibertest" con un punto de carga (12).	87
Figura 80. Gráfico de probabilidad normal para densidad anhidra.	101
Figura 81. Gráfico de probabilidad normal para densidad básica.	102
Figura 82. Gráfico de probabilidad normal para densidad normal.	102
Figura 83. Gráfico de probabilidad normal para contracción longitudinal.	103
Figura 84. Gráfico de probabilidad normal para contracción radial.	103
Figura 85. Gráfico de probabilidad normal para contracción tangencial.	104
Figura 86. Gráfico de probabilidad normal para contracción volumétrica.	105
Figura 87. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1 (41).	105

Figura 88. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2 (41).....	106
Figura 89. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).	107
Figura 90. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1 (41).....	107
Figura 91. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2 (41).....	108
Figura 92. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio (41).	108
Figura 93. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos <i>Sylvatest directo</i> (41).....	109
Figura 94. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos <i>Sylvatest indirecto</i> 1 (41).	110
Figura 95. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos <i>Sylvatest indirecto</i> 2 (41).	110
Figura 96. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos <i>Sylvatest indirecto</i> medio (41).	111
Figura 97. Gráfico de probabilidad normal para MOEd vibraciones longitudinales (41).	111
Figura 98. Gráfico de probabilidad normal para MOE según UNE EN 408:2011 (41).	112
Figura 99. Gráfico de probabilidad normal para MOR según UNE EN 408:2011 (41).	113
Figura 100. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1 (12).....	113
Figura 101. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2 (12).....	114
Figura 102. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (12).	115
Figura 103. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1 (12).....	115
Figura 104. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2 (12).....	116
Figura 105. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio (12).	116
Figura 106. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos <i>Sylvatest directo</i> (12).....	117
Figura 107. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos <i>Sylvatest indirecto</i> 1 (12).	118

Figura 108. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2 (12).	118
Figura 109. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio (12).	119
Figura 110. Gráfico de probabilidad normal para MOEd vibraciones longitudinales (12).	120
Figura 111. Gráfico de probabilidad normal para MOEd empotrada-libre horizontal (12).	120
Figura 112. Gráfico de probabilidad normal para MOEd empotrada-libre vertical (12).	121
Figura 113. Gráfico de probabilidad normal para MOEd empotrada-libre medio (12).	122
Figura 114. Gráfico de probabilidad normal para MOEd biapoyada horizontal (12)... ..	122
Figura 115. Gráfico de probabilidad normal para MOEd biapoyada vertical (12).....	123
Figura 116. Gráfico de probabilidad normal para MOEd biapoyada medio (12).	124
Figura 117. Gráfico de probabilidad normal para MOEd "Ibertest" un punto de carga (12).....	124
Figura 118. Gráfico de probabilidad normal para MOE según UNE-EN 408:2011 (12).	125
Figura 119. Gráfico de probabilidad normal para MOR según UNE-EN 408:2011 (12).	126
Figura 120. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1 y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2 (41).	126
Figura 121. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1 y MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2 (41).....	127
Figura 122. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1 y MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2 (41).	128
Figura 123. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Sylvatest directo y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio (41).	128
Figura 124. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio y MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio (41).....	129
Figura 125. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).....	130
Figura 126. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio (41).....	130
Figura 127. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOEd vibraciones longitudinales y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).	131
Figura 128. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOEd vibraciones longitudinales y MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).	132

Figura 129. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).....	132
Figura 130. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).....	133
Figura 131. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd vibraciones longitudinales (41).	134
Figura 132. Gráfico de observado y predicho MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).	135
Figura 133. Gráfico de probabilidad normal para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).	135
Figura 134. Gráfico de observado y predicho MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).	136
Figura 135. Gráfico de probabilidad normal para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).	137
Figura 136. Gráfico de observado y predicho MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (41).....	137
Figura 137. Gráfico de probabilidad normal para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (41).....	138
Figura 138. Gráfico de observado y predicho MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (12).	139
Figura 139. Gráfico de probabilidad normal para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (12).	139
Figura 140. Gráfico de observado y predicho MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (12).	140
Figura 141. Gráfico de probabilidad normal para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (12).	141
Figura 142. Gráfico de observado y predicho MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (12).....	141
Figura 143. Gráfico de probabilidad normal para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (12).....	142
Figura 144. Gráfico de observado y predicho MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd empotrada-libre medio (12).....	143
Figura 145. Gráfico de probabilidad normal para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs empotrada-libre medio (12).....	143
Figura 146. Gráfico de observado y predicho MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd biapoyada medio (12).	144
Figura 147. Gráfico de probabilidad normal para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd biapoyada medio (12).	145
Figura 148. Gráfico de observado y predicho MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd “Ibertest” con un punto de carga (12).	145

Figura 149. Gráfico de probabilidad normal para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd “Ibertest” con un punto de carga (12)..... 146

Acrónimos y abreviaturas

AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
ANOVA	Análisis de la varianza
Corr.	Correlación
C.H.	Contenido de humedad
EN	Norma Europea
ETSIIAA	Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias
HSD	Método de la Diferencia Significativa Honesta
IFN	Inventario Forestal Nacional
MOE	Módulo de Elasticidad
MOE _d	Módulo de Elasticidad Dinámico
MOEGTO	Módulo de Elasticidad Global de Canto a Flexión
MOR	Módulo de Rotura
PLG	Portable Lumber Grader
UNE	Una Norma Española

1. RESUMEN

1. RESUMEN

En el presente estudio se ha trabajado con madera de *Paulownia elongata* procedente de una plantación con siete años de edad de Castrillo de Duero (Valladolid), que entro en el Laboratorio de Maderas de la ETSIIAA en trozas, y se aserraron en tablas para realizar los posteriores ensayos.

Se ha realizado una caracterización físico-mecánica de la madera de *Paulownia elongata*, mediante la utilización de ensayos no destructivos (ultrasonidos y vibraciones inducidas) y destructivos (ensayos de rotura).

En primer lugar, se determinaron las propiedades físicas de la madera, utilizando normas UNE. Con estas probetas ha sido caracterizada la madera de *Paulownia elongata* según la norma de interpretación de resultados UNE 56.529.77.

Seguidamente se calcularon las propiedades elasto-mecánicas de 41 probetas de 6 x 4 x 120 cm, utilizando equipos de ultrasonidos (“Sylvatest” y “Fakopp”), ensayos de vibraciones inducidas (“PLG”) y ensayos de flexión según la norma UNE-EN 408:2011 con la máquina “Ibertest”. Con 12 probetas, que presentaban pocos defectos, se realizaron tres tipos de ensayos más; dos de vibraciones transversales inducidas (viga empotrada-libre y biapoyada) y otro ensayo de flexión con un solo punto de carga sin romper la pieza.

De cada uno de los ensayos citados se obtuvieron los Módulos de Elasticidad Dinámicos (MOEd), y el Módulo de Elasticidad estático (MOE) y el Módulo de Rotura (MOR) según norma UNE-EN 408:2011 en todas las probetas.

Las características físicas de la madera de *Paulownia elongata* serán comparadas con las características del *Pinus pinaster*, con el fin de ver como son dichas propiedades respecto a una especie más conocida.

Los valores medios obtenidos al determinar las propiedades físicas fueron 0,227 g/cm³ para la densidad anhidra, 0,248 g/cm³ para la densidad normal, 0,209 g/cm³ para la densidad básica, 0,43 % para la contracción longitudinal, 3,81 % para la contracción radial, 7,33 % para la contracción tangencial y 8,73 % para la contracción volumétrica.

En cuanto a los valores medios de las propiedades elasto-mecánicas, se han obtenido para el grupo de 41 probetas un valor medio de MOE de 3100,1 MPa y de MOR 28,492 MPa según la norma UNE-EN 408:2011; en el grupo de 12 probetas el

valor medio obtenido de MOE y MOR según la norma UNE-EN 408:2011, fue de 3089,26 MPa y 28,425 MPa respectivamente.

Los MOEd y MOE han sido sometidos a un análisis comparativo determinando las diferencias estadísticamente significativas. Finalmente se han determinado varias funciones de predicción para el MOE según la norma UNE-EN 408:2011, entre ellas han destacado las predicciones realizadas para el MOE con los valores de MOEd ultrasonidos “Fakopp” directo, que obtiene un R^2 de 44,46 %, en el grupo de 41 probetas; y con los valores de MOEd vibraciones transversales con la viga empotrada-libre, que obtiene un R^2 de 41,21 %, en el grupo de 12 probetas.

2. ANTECEDENTES

2. ANTECEDENTES

2.1. Introducción

2.1.1. Los bosques

Los bosques son considerados actualmente como un importante recurso ambiental, económico y social.

Estos ecosistemas son un importante recurso ambiental gracias a su alta capacidad de autogeneración y reciclado de nutrientes, mantener la biodiversidad animal y vegetal, su papel protector sobre el suelo frente a la erosión, su función de filtrado de aire y agua, y su contribución a la regulación de microclimas. También tienen una contribución importante dentro del ciclo del carbono debido a la capacidad de los bosques para actuar como sumideros de carbono y de esta manera ayudan a retrasar el cambio climático.

En cuanto al recurso económico, de los bosques se pueden obtener recursos maderables (carbón, leña, madera, etc) y recursos no maderables (alimentos, medicinas, material genético, etc).

Desde el punto de vista socioeconómico, se estima que los bosques son un recurso del que miles de millones de personas utilizan para satisfacer sus necesidades de alimentos, energía y vivienda (FAO, 2014). La sociedad también se puede beneficiar de los mismos mediante el uso recreativo del mismo, su hábitat o su paisaje.

A nivel mundial el sector forestal emplea a unos 13,2 millones de personas en el mundo, es decir, en torno a un 0,4% de la mano de obra mundial (FAO, 2014).

Los ecosistemas forestales cubren en la actualidad grandes superficies y tienen una importante contribución en los flujos de masa y energía. En Europa, los bosques representan un 46% de la superficie terrestre que abarca; incrementándose alrededor de 0,1% cada año (FAO, 2001). La situación de los recursos forestales en Europa ha permanecido prácticamente estable durante los últimos 20 años (FAO, 2010).

Según el Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3), contamos con un total de 27 millones de hectáreas aproximadamente de uso forestal y 23 millones de hectáreas aproximadamente de uso no forestal en España. En la tabla 1 se puede observar la distribución de la superficie forestal por comunidades autónomas.

Tabla 1. Superficies forestal y no forestal, según el tipo de formación, en hectáreas, por comunidades autónomas españolas.

Provincia	Bosque no adheresado	Bosque adheresado	Monte arbolado ralo y disperso	Total monte arbolado	Monte desarbolado	Total de uso forestal	Total de uso no forestal	Total provincial
Galicia	1,396,106	0	27,988	1,424,094	606,587	1,579,681	926,766	2,957,447
Islas Baleares	170,967	0	15,410	186,377	37,224	223,601	275,565	499,166
Murcia	289,435	0	26,857	316,292	169,727	486,019	645,241	1,131,260
Asturias	434,903	0	16,213	451,116	313,481	764,597	295,760	1,060,357
Cantabria	209,611	0	4,646	214,257	145,202	359,459	172,680	532,139
Navarra	423,308	0	13,771	437,079	157,277	594,356	444,713	1,039,069
La Rioja	163,206	0	6,346	169,552	131,924	301,476	203,051	504,527
Madrid	225,402	19,466	25,217	270,086	150,007	420,093	382,676	802,769
Extremadura	783,838	1,035,976	101,436	1,921,250	805,982	2,727,233	1,436,221	4,163,453
Cataluña	1,541,244	0	84,968	1,626,212	304,270	1,930,482	1,280,886	3,211,368
Canarias	122,102	0	11,989	134,091	429,554	563,645	181,050	744,695
Castilla y León	2,435,329	396,881	150,106	2,982,317	1,825,414	4,807,731	4,614,812	9,422,543
Castilla -La Mancha	2,238,000	266,803	234,794	2,739,598	825,182	3,564,779	4,378,493	7,943,272
Aragón	1,458,277	0	119,714	1,577,991	1,030,321	2,608,312	2,163,683	4,771,996
País Vasco	395,268	0	2,563	397,831	97,224	495,055	228,409	723,464
Comunidad Valenciana	680,069	0	74,390	754,459	500,879	1,255,338	1,070,114	2,325,452
Andalucía	2,046,437	665,245	257,397	2,969,079	1,422,720	4,391,800	4,367,791	8,759,590
Total	14,939,380	2,384,372	1,254,871	18,578,624	8,947,084	27,525,708	23,066,859	50,592,567

Fuente: Tercer Inventario Forestal Nacional.

En la Comunidad Autónoma de Castilla y León los bosques ocupan un 52% del territorio regional, siendo la superficie cubierta por árboles del 31,6% de la superficie total, con un 25,8% de la superficie total provincial cubierta por bosque arbolado no adheresado.

En esta Comunidad las frondosas representan aproximadamente el 54% de las masas arboladas (encina, roble, haya, chopo, etc.), en el caso de las coníferas representan el 38% (Pinos y sabinas). El 8% restante está ocupado por mezclas de ambos grupos de especies (GIL & TORRE, 2007). Se puede observar en la tabla 2 la superficie ocupada por cada una de las principales especies, según el IFN3.

Tabla 2. Principales especies en Castilla y León y su superficie en hectáreas.

Especie		Superficie (ha)
Nombre común	Nombre científico	
Pino silvestre	<i>Pinus sylvestris</i>	336.742
Pino negral	<i>Pinus pinaster</i>	412.713
Pino piñonero	<i>Pinus pinea</i>	87.793
Pino laricio	<i>Pinus nigra</i>	79.666
Chopo	<i>Populus spp.</i>	61.519
Rebollo	<i>Quercus pyrenaica</i>	722.773
Quejigo	<i>Quercus faginea</i>	160.977
Encina	<i>Quercus ilex</i>	724.001
Castaño	<i>Castaña sativa</i>	37.079
Haya	<i>Fagus sylvatica</i>	66.257
Sabina	<i>Juniperus thurifera</i>	103.288
Resto de especies		189.509

Fuente: Tercer Inventario Forestal Nacional.

El cultivo de *Paulownia elongata*, que es la especie estudiada, se encuentra en Castilla y León en un número muy reducido, siendo escasas las plantaciones de esta especie en la comunidad.

En la figura 1 se puede observar cómo ha aumentado el volumen de madera con corteza en la comunidad de Castilla y León, a lo largo de los Inventarios Forestales Nacionales.

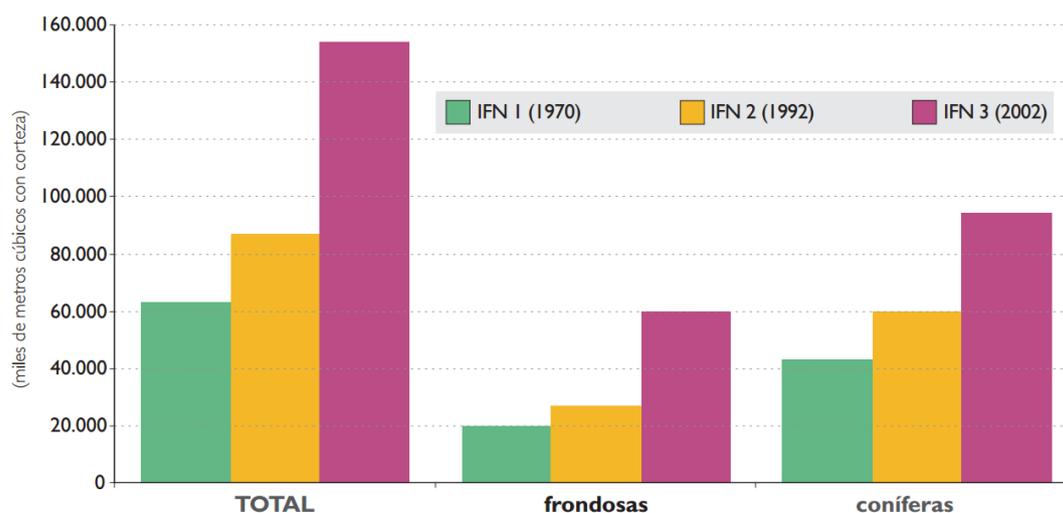


Figura 1. Volumen maderable: variación desde el IFN1 al IFN3 (GIL & TORRE, 2007).

Por otro lado en la tabla 3 se puede observar la distribución de la superficie forestal arbolada en España, en el año 2009, según el tipo de bosque (SECF, 2010 en MONTERO Y SERRADA, 2013).

Tabla 3. Distribución de la superficie forestal arbolada en el año 2009 según su grupo de especie (en miles de hectáreas).

Tipo de bosque	Superficie(x10 ³ ha)	% Total
Bosques abiertos y/o de uso agrosilvopastoral	3521	19,3%
Dehesas de encina, roble, rebollo o alcornoque	2117	11,6%
Arbolado ralo y disperso	1404	7,7%
Bosques de masas mixtas	823	4,5%
Mezcla de coníferas y frondosas	823	4,5%
Bosques donde domina una conífera	6515	35,7%
Pinares de pino carrasco	1926	10,5%
Pinares de pino negral	1373	7,5%
Pinares de pino albar	1184	6,5%
Pinares de pino laricio	625	3,4%
Mezclas de pinos	432	2,4%
Sabinares	391	2,1%
Pinares de pino piñonero	390	2,1%
Pinares de pino negro de montaña	97	0,5%
Pinares de pino canario	78	0,4%
Abetales	20	0,1%
Bosques donde domina una frondosa	6369	34,9%
Encinares	2792	15,3%
Rebollares	1034	5,7%
Hayedos	486	2,7%
Robledales	459	2,5%
Quejigares	334	1,8%
Alcornocales	301	1,6%
Bosque de ribera	252	1,4%
Castañedas	228	1,2%
Mezcla de frondosas mediterráneas	219	1,2%
Mezcla de frondosas atlánticas	176	1,0%
Otras frondosas mediterráneas	55	0,3%
Laurisilva	32	0,2%
Plantaciones de Selvicultura Intensiva	1037	5,7%
Plantaciones de eucalipto	633	3,5%
Plantaciones de coníferas de crecimiento rápido	295	1,6%
Plantaciones de chopo	97	0,5%
Plantaciones de frondosas de crecimiento rápido	12	0,1%
Total	18265	100,0%

Fuente: SECF (2010).

Como se puede observar en la tabla anterior (ver Tabla 3) la especie objeto de estudio se enmarca dentro de un grupo que ocupan un mínima parte de superficie (0,1%), como es el de plantaciones de frondosas de crecimiento rápido.

2.1.2. Industrias de la madera

Actualmente el desarrollo industrial forestal en la Comunidad Autónoma de Castilla y León está muy ligado a las industria de primera transformación (según la FAO, empresas que partiendo de la madera en rollo elaboran un producto con valor comercial, pero que para su uso necesita una nueva transformación al no ser directamente consumible), aunque cabe destacar que en la actualidad son varias las empresas que están implementando nuevas líneas de producción, para ser industrias de primera y segunda transformación (parte de su propia materia prima y desarrolla productos listos para su uso).

Las industrias de primera transformación agrupan a Aserraderos, Industrias de Tableros (Contrachapados y chapa a la plana, Fibras y Partículas), Pastas celulósicas, Colofonia y aguarrás, Industria Corchera; y las industrias de segunda transformación engloban a Carpintería y Ebanistería, Muebles, Embalajes de madera, Traviesas, postes y apeas, Papel, Derivados del corcho y Madera laminada.

En la tabla 4 se observa las existencias de volumen nacional de madera por comunidades autónomas en el año 2010 (MAGRAMA, 2011 en MONTERO Y SERRADA, 2013).

Tabla 4. Existencias de volumen maderable por CC.AA en 2010 ($\times 10^3 \text{ m}^3$)

Comunidad autónoma	Coníferas ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	Fronosas ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	Total ($\times 10^3 \text{ m}^3$)
Andalucía	43854	31117	74971
Aragón	62094	12245	74338
Canarias	10670	2873	13544
Cantabria	2913	22294	25207
Castilla La Mancha	67328	16406	83734
Castilla y León	93908	59864	153772
Cataluña	78797	39360	118157
Madrid	7540	3356	10895
Comunidad Foral de Navarra	18485	36166	54651
Comunidad Valenciana	17968	2097	20065
Galicia	61237	71856	133093
Islas Baleares	5699	1827	7525
La Rioja	6022	9486	15517
País Vasco	34445	20372	54817
Principado de Asturias	5466	41834	47301
Región de Murcia	6702	217	6920
Extremadura	8416	24840	33256
Total Nacional	531544	396217	927761

Fuente: MAGRAMA (2011).

Castilla y León es la comunidad autónoma que posee la mayor cantidad de existencias de volumen maderable del país, por detrás se encuentra Galicia; dicha cantidad de madera supone un 16,57% del total nacional.

En España las plantaciones de la *Paulownia elongata* son utilizadas en su mayoría para la producción de biomasa y son escasas, siendo estas plantaciones más abundantes en Corea y Japón donde tiene un amplio uso para la fabricación de instrumentos y biomasa.

2.2. La *Paulownia* y su cultivo.

2.2.1. El género *Paulownia*.

Según Rojas (2008) la *Paulownia* es un género forestal de crecimiento rápido originario de China, regenerador de suelos, se adapta a cualquier clima, productor de madera de altísima calidad para ciertas aplicaciones y exhibe un gran follaje. Su cultivo sencillo y altamente rentable hace que en la actualidad se cultive con fines industriales en varios países.

Este género está compuesto por 17 especies pertenecientes a la familia *Paulowniaceae*, y presenta una amplia distribución alrededor del mundo. Los países con las principales extensiones de plantaciones de *Paulownia* son los citados en el capítulo anterior, Corea y Japón; aunque son otros muchos los países por los que se extienden estas plantaciones como Australia, Indonesia, España, Estados Unidos, La India, Italia, Turquía, Canadá, Israel, México, Brasil y Guyana en América.

Las Variedades más utilizadas para la realización de proyectos forestales son *elongata* (Variedad objeto de estudio), *fortuneii* y *kawakamii*.

Es un género que se cultiva desde hace más de 2600 años, pero empezó a ser estudiado a partir de 1972 por el investigador de origen chino Zhu Zhao-hua, plantado inicialmente por los agricultores chinos para proteger los cultivos de tormentas de arena e inundaciones y de esta manera asegurar las buenas cosechas. Conocidas todas sus virtudes el llamado “árbol de la emperatriz” fue desarrollado genéticamente para que se adaptara a distintos tipos de clima, y de esta manera promover su cultivo por el mundo.

El género tiene un valor industrial y comercial grande debido a su vertiginoso crecimiento, este hecho lo hace muy rentable. También cabe destacar que el género ha demostrado excelentes resultados en varios usos como son la fabricación de chapilla y pulpa de papel, y la producción de biomasa; aunque también es utilizado en Carpintería en General, construcción de muebles, armarios, puertas, ventanas, paneles, instrumentos musicales, juguetes, artesanía, construcción ligera, vigas decorativas, postes, cabañas de troncos, molduras, etc.

Los árboles del género *Paulownia* tienen un gran porte, entre 20 y 30 metros en edades maduras; troncos entre 1 y 2,25 metros de diámetro, fuste recto, cilíndrico. De color grisáceo, con suaves estrías longitudinales y no suelen presentar nudos. Soporta temperaturas entre -17°C y 45°C, crecen en todo tipo de suelos, incluyendo los pobres y degradados con buena profundidad y buen drenaje, exceptuando los suelos con más del 30% de componente arcillosos y demasiado rocosos. Al tener las raíces verticales de gran longitud, lo hacen ser un buen amortiguador de crecientes, recuperador de tierras, controlador de la erosión y estabilizador de suelos agroforestales. A la vez puede resistir a la sequía gracias a la captación de agua atmosférica y a sus largas raíces. Algunas de las propiedades citadas anteriormente se pueden observar en la tabla 5.

Tabla 5. Propiedades del Árbol de *Paulownia*.

Altura a los 4-5 años	20-30 m
Tipo de suelo	Buen drenaje y no muy arcilloso, con nivel freático a más de 2-2,5 metros.
pH del suelo	5,5 a 8
Pluviometría media	500 mm (mínimo)
Densidad (10% H)	290 kg/m ³
Humedad apeo árbol	40-55%
Humedad 40 días (secado natural)	12%
Densidad de plantación	1600 árboles /ha
Marco de plantación	3mx2m - 2,5mx4m
Sistema de cosecha (Rotación)	Cada 2-3 años
Rendimientos observados	35-45 t/ha/año (30%H)

Fuente: ROJAS, 2008.

Presentan una copa ancha y las hojas de gran tamaño de color verde oscuro con forma acorazonada de 20 a 40 centímetros de ancho. El árbol pierde sus hojas en invierno, tiene la floración una vez al año, con flores hermafroditas en panículas terminales de 30 a 40 centímetros de longitud con forma piramidal; estas flores se forman en otoño y permanecen cerradas hasta primavera. Su fruto es una cápsula leñosa dehiscente de forma ovoide, puntiaguda, de 3 a 5 centímetros con numerosas y pequeñas semillas, de color verde claro.



Figura 2. Flor, fruto y hoja de *Paulownia* (ROJAS, 2008).

2.2.2. *Paulownia elongata*

La *Paulownia elongata* es una especie de fanerógama (poseen Flores visibles para la reproducción sexual) perteneciente a la familia Paulowniaceae. Tiene un acelerado crecimiento, con 4 o más metros en el primer año. Fue descrita por Shiu Ying Hu.

Esta planta se usa como árbol forestal en EE.UU. y en China. Las plantaciones comerciales normalmente se establecen a partir de clones selectos, resultantes de micro-propagación. Alcanza el tamaño maderable cuando posee una edad

comprendida entre 5 y 7 años, pero la madurez es alcanzada a los 25 años, con 1 metro de diámetro, hasta 30 metros de altura en la copa y 12 metros de diámetro de copa. Crece en casi todo tipo de ambientes, exceptuando grandes altitudes. Sus hojas son muy grandes y pubescentes, y alcanzan un gran tamaño, de hasta 6 decímetros, como se puede observar en la siguiente figura.



Figura 3. Tamaño hojas de *Paulownia elongata* (Fuente: <http://paulownia-newerafarms.blogspot.com.es/>).

Los usos principales de la planta son:

- Para uso ornamental, en jardines y parques, por sus flores purpúreas, su tolerancia a la sombra y su rápido crecimiento.
- Para uso energético, ya que genera una enorme cantidad de biomasa anualmente.
- Para uso forestal, produce gran cantidad de madera, aunque su madera es algo liviana, ya que tiene muy baja densidad (el m³ pesa solo en torno a 250 kg).

Las características más importantes del árbol de *Paulownia elongata* y su hábitat son:

- Altura en su madurez 23 metros aproximadamente.
- Florecimiento (segundo o tercer año): 6 semanas en primavera. Flores de color lavanda por fuera y el centro amarillo.
- Rango de temperatura: de -15 a 40°C (ZHAO-HUA et al., 1986).
- Las condiciones del suelo: mejor que sean suelos bien drenados y no muy cargados de arcilla.
- El pH del suelo ha de estar preferiblemente entre 5,5 y 8,8; siendo 6,5 su nivel óptimo.
- Alguna de las limitaciones que se encuentran al plantar esta planta son los suelos excesivamente húmedos y el aire del mar salado.
- El sistema radicular está compuesto de múltiples raíces, y estas alcanzan una profundidad de hasta 6 metros.
- Si se va a fertilizar, es bueno que tenga un alto contenido en nitrógeno.
- En cuanto al agua, es conveniente regar una o dos veces a la semana durante los 2 primeros años. Cuando las raíces alcanzan su madurez el requisito de agua es muy bajo.
- En cuanto a la plantación si es para biomasa se plantarán 1600 pies/ha. Esto no ocurrirá si la plantación es para madera de calidad que se plantarán menos de 650 pies/ha.

2.3. Particularidades de la madera

Las particularidades de la madera que se analizan a continuación, desde el punto de vista fisiológico, no corresponden al concepto de defecto, dado que son particularidades de la estructura de la madera como consecuencia de la necesaria existencia del árbol. El concepto de defecto se debe a los problemas que, desde el punto de vista del usuario, llevan consigo estas particularidades, algunas de las cuales, como por ejemplo los nudos, son un defecto muy importante, hasta el punto de

ser el elemento más utilizado para la clasificación de la madera según calidades (VIGNOTE & MARTÍNEZ, 2006).

Estas particularidades son elementos utilizados en la clasificación de la madera según su calidad.

Se expone a continuación el origen y la importancia de las particularidades de la madera más destacables a la hora de realizar la clasificación visual, teniendo en cuenta la normativa específica que es la UNE-EN 56544:2011.

Los nudos:

Un nudo es una inclusión de la porción basal de una rama dentro del tallo del árbol. El origen de los nudos son, pues, las ramas: ahora bien, su influencia como defecto es muy variables, según sea el proceso seguido por esa rama en el contexto del árbol, y según sea el tipo de transformación industrial de ese árbol.

Los nudos tienen su importancia fundamental en la calidad de la madera, hasta tal punto que, suele ser el factor que más influye en la calidad de la madera. Esto es debido a que los nudos presentan inconvenientes como causar deformaciones en las piezas, dificultar la trabajabilidad de la madera, disminuir considerablemente la resistencia de la madera y rompen la uniformidad de los dibujos y del color de la madera (VIGNOTE & MARTÍNEZ, 2006).

Las fendas:

Separación de las fibras en el sentido longitudinal, que producen roturas; generalmente debida a las pérdidas de humedad de la madera, pero en ocasiones originadas por otras causas como heladas, el apeo de los árboles o al aserrar la madera. Normalmente se originan por esfuerzos que son más grandes que los valores de resistencia de la madera. Los principales inconvenientes que tienen las fendas son la pérdida de resistencia de la madera (principalmente en esfuerzos de tracción y flexión perpendicular a la fibra).

Madera de reacción:

La madera de reacción se produce cuando el árbol está expuesto a un esfuerzo predominante en una cierta dirección, ya sea viento, pendiente, gravedad, etc.

En las frondosas la densidad puede ser algo superior a la de la madera normal, aumenta la resistencia a tracción y a la hienda, pero aumenta la tendencia de alabeo de las piezas (VIGNOTE & MARTÍNEZ, 2006).

Acebolladuras:

Las acebolladuras son roturas locales de la madera, que se producen entre anillos de crecimiento y a lo largo del eje del árbol, se originan por esfuerzos que inciden sobre la madera. La aparición de acebolladuras aumenta con la edad del árbol, y dentro de este grupo los que tienen menor diámetro.

Los inconvenientes que tienen son los mismos que las fendas, con la de ser indicativos de que existen otros tipos de alteraciones de la madera, por tanto son objeto de un mayor rechazo por parte de los industriales (VIGNOTE & MARTÍNEZ, 2006).

Gemas:

Es un defecto que aparece en piezas aserradas y canteadas, por el cual estas presentan restos de corteza en alguna de sus aristas y dejan ver de manera clara la sección circular del fuste. Este defecto no permite trabajar bien con la pieza aserrada ya que falta parte de ella.

Madera juvenil:

La madera juvenil se corresponde con los primeros anillos, que tienen el mismo color que el resto de la madera pero distintas características de comportamiento mecánico y físico. Esta madera es más ligera, posee menor resistencia y una proporción más alta de madera de compresión que la madera de los pies ya maduros (VIGNOTE & MARTÍNEZ, 2006).

Entrecasco:

El entrecasco tiene como característica que en una tabla de madera aserrada aparezca la corteza en ella. Aparecen como consecuencia de la unión de las ramas con el tronco aserrado. El principal inconveniente de su aparición es que reduce considerablemente la resistencia mecánica.

La médula:

Es la zona que se encuentra situada dentro en el centro del tronco (interior al primer anillo), su constitución anatómica es totalmente diferente al de la madera, y presenta más características de blandura, escasa resistencia y color. Esto hace desprecia las piezas que lo contienen (VIGNOTE & MARTÍNEZ, 2006).

Desviación de la fibra:

Es el ángulo que forma la fibra de la madera con la dirección de las aristas de las piezas obtenidas tras el aserrado (VIGNOTE & MARTÍNEZ, 2006). Esta particularidad dificulta el trabajo con la pieza y supone una pérdida de resistencia.

Anchura de los anillos de crecimiento:

Esta peculiaridad se origina por la actividad fisiológica del árbol. Si los anillos de crecimiento son anormalmente anchos son asociados a la presencia de madera juvenil. Es una peculiaridad que aparece como consecuencia de las condiciones ambientales y del estado de la masa.

Deformaciones:

Las deformaciones más frecuentes que aparecen en la madera aserrada tras un secado no controlado son; el curvado de cara, el curvado de canto, el alabeo y el abarquillamiento.

Irregularidad de los anillos de crecimiento:

Esta peculiaridad se refiere a las variaciones en anchura de las capas sucesivas anuales de crecimiento; que tiene como principales inconvenientes causar alabeos en las piezas, dar origen a planos de rotura entre anillos, si la peculiaridad es notable; y son generalmente los que causan depreciación de la madera para uso estructural.

2.4. Características de la madera**2.4.1. Propiedades físico-mecánicas**

La madera es un material anisótropo y heterogéneo, que posee unas propiedades físico-mecánicas que se han de tener en cuenta a la hora de trabajar con ella. Las propiedades físico-mecánicas más importantes son:

Humedad:

La humedad, más que una característica, es un estado variable en el que se encuentra la madera como consecuencia de las condiciones higrotérmicas del medio que la rodea, con este último tiende a ponerse en equilibrio.

La humedad es muy importante ya que influye mucho en el resto de características físico-mecánicas que posee la madera, a estas últimas las hace variar cuando los valores de humedad son inferiores al punto de saturación de las fibras (LÓPEZ et al., 1991).

El término contenido de humedad (C.H.) se define como la cantidad de agua que una pieza de madera contiene, expresada como porcentaje respecto al peso anhidro, o seco al horno, de la pieza de madera. La fórmula para calcular el contenido de humedad es:

$$H = \frac{(P_h - P_0) \cdot 100}{P_0}$$

Donde:

H es la humedad de la madera en %,

P_h es el peso húmedo de la madera (g),

P_0 es el peso de la madera anhidra (g).

Densidad:

Esta característica es la que más información aporta sobre el comportamiento de cualquier madera. El resto de las características físico-mecánicas están íntegramente relacionadas con la densidad.

Como para cualquier otro material, la densidad se define como la relación masa por volumen. La madera varía su peso según su contenido de humedad, así como su volumen para humedades inferiores al punto de saturación de la fibra (LÓPEZ et al., 1991).

La fórmula matemática para calcular la densidad de la madera es:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde:

ρ es la densidad de la madera (g/cm^3),

m el peso de la madera (g),

V es el volumen de la madera (cm^3).

Cuando se habla de densidad, hay que hablar de densidad de la madera a un determinado contenido de humedad.

La densidad básica se obtiene a partir de la masa medida en estado anhidro y el volumen en estado saturado.

$$D_b = M_0 / V_s$$

Donde:

D_b es la densidad básica (g/cm^3),

M_0 es la masa en estado anhidro (g),

V_s es el volumen con un grado de humedad superior al punto de saturación de las fibras (cm^3).

Cuando la masa y el volumen se miden en las mismas condiciones de humedad se pueden considerar tres casos: los valores de la densidad en estado anhidro, D_0 , al 12% de humedad, D_{12} , y en estado verde, D_v , el último caso corresponde a la madera recién apeada (LÓPEZ et al., 1991).

Contracción:

La madera posee la propiedad de variar sus dimensiones y, con motivo de tal, su volumen si su humedad varía por debajo del punto de saturación de las fibras. Cuando se aumenta la humedad de la madera se produce el aumento de sus dimensiones, este fenómeno recibe el nombre de “hinchazón”, en el caso contrario se producirá una “contracción” o “merma” de la madera.

El aumento de dimensión se produce cuando las humedades están comprendidas entre 0% y el punto de saturación de las fibras. La máxima dimensión se da cuando se alcanza el punto de saturación de las fibras, y la mínima cuando la madera está en estado anhidro. Por encima del punto de saturación de las fibras la madera permanece prácticamente con una dimensión constante.

La madera es anisótropa, por este motivo en función de la dirección en la que midamos las características de la misma, estas van a ser diferentes. Igualmente ocurre con la variación de la dimensión con la humedad, es diferente según la dirección en la que se considere (LÓPEZ et al., 1991).

Las tres direcciones más importantes son: tangencial, radial y longitudinal.



Figura 4. Ejes de una pieza de madera.

Flexión estática:

La madera si se compara con su densidad presenta una notable resistencia a flexión. Al flexionar una pieza de madera se generan tensiones de tracción y compresión paralelas a la fibra, que tienen sus valores máximos en las fibras externas de la pieza de madera y nulos en la fibra neutra.

El Módulo de rotura (MOR) indica la máxima capacidad de carga en flexión de un elemento y es proporcional al momento máximo soportado. El MOR es un criterio aceptado de resistencia, pero no es una medida real de la tensión, ya que la fórmula empleada para su cálculo solo es válida para el límite elástico.

En la madera aserrada la rotura se produce por compresión (por aplastamiento de las fibras en la zona comprimida). La resistencia a flexión viene afectada por el tamaño de los nudos y por su frecuencia, influyen más los nudos de mayor tamaño y poco repetidos que los nudos de pequeño tamaño con muchas repeticiones (FERNÁNDEZ-GOLFÍN et al., 2000).

Elasticidad:

La madera cuando se somete a cargas posee un comportamiento que se denomina visco-elástico. Con una cierta carga inferior al límite elástico, se deforma, perdiendo la deformación cuando cesa la carga, pero si se mantiene un período de tiempo mayor la deformación inicial se va incrementando tomando valores que pueden llegar a ser superiores al doble del valor inicial.

Cuando la madera se somete a un esfuerzo creciente, se deforma; esta deformación al principio es proporcional a la fuerza que lo produce, lo que hace que exista una relación lineal entre las tensiones y las deformaciones (VIGNOTE & MARTÍNEZ, 2006).

A partir del llamado límite elástico o límite de proporcionalidad, las deformaciones aumentan en proporción mayor que las tensiones, la madera deja su comportamiento elástico y al cesar el esfuerzo queda una deformación residual. Si las tensiones continúan tiene lugar la rotura (JIMÉNEZ, 1999).

Dentro del intervalo elástico, la variable más importante para el análisis de dicho comportamiento es el módulo de elasticidad. Este último se caracteriza por ser directamente proporcional a la fuerza unitaria autora de una deformación elástica unitaria, e inversamente proporcional a la sección en la que se aplica dicha fuerza.

$$E = F/A$$

Donde:

E: es el módulo de elasticidad (kg/cm^2),

F: es la fuerza (Kg),

A: es la sección en la que se aplica F (cm).

2.4.2. Propiedades físico-mecánicas de la madera de *Paulownia*

Para una posible comparación de los resultados obtenidos en el presente estudio se hizo una recopilación de datos de interés, obtenidos en otros estudios con diferentes tipos de *Paulownia* y varios con *Paulownia elongata* en diferentes lugares. En la tabla 6 se observan dichos valores, referidos a la Densidad al 12%, la Resistencia a la Flexión Estática y el Módulo de Elasticidad.

Tabla 6. Datos obtenidos de estudios anteriores

Especie	D_{12} (g/cm^3)	Resistencia a la Flexión Estática (N/mm^2)	MOE (N/mm^2)	Literatura
<i>P. elongata</i> (Izmir)	0,281	35,79	3883,14	Kaymakci et al., 2013
<i>P. elongata</i> (Mersin)	0.266	35,76	3523,42	Kaymakci, 2010 en Kaymakci et al., 2013
<i>P. elongata</i> (Sakarya)	0.271	23,98	2651,53	Kaymakci, 2010 en Kaymakci et al., 2013
<i>P. tomentosa</i>	0,317	43,56	4356	Akyildiz and Kol, 2010

Fuente: KAYMAKCI et al., 2013.

A parte de los datos de la tabla anterior según Zhao-Hua et al. (1986), existen otros datos de interés, referidos a las principales propiedades físico-mecánicas de la madera de las seis especies de *Paulownia*, que se expresan en la tabla 7:

Tabla 7. Propiedades físico-mecánicas de interés de las seis especies de *Paulownia*.

Especie	Localización (Lat.)	Densidad(g/cm ³)		Coeficiente de contracción			Resistencia a flexión (Kg/cm ²)	Módulo de elasticidad a flexión (1000 Kg/cm ²)
		Secado al horno	Secado al aire	Radial	Tangencial	Volumen		
<i>P. catalpifolia</i>	Sueng Country, Henan Province (34°52')	0.233	0.29	0.093	0.216	0.344	329	54
<i>p. elongata</i>	Fugou Country, Henan province	0.209	0.264	0.076	0.187	0.292	289	42
	Lankau Country, Henan Province (34°20')	0.243	0.283	0.147	0.269	0.453	356	44
<i>P. farbessi</i>	Muchuan Country, Szechuan Province (29°00')	0.219	0.269	0.107	0.216	0.334	363	52
<i>P. fortunei</i>	Gulin Country, Szechuan Province (28°10')	0.258	0.309	0.11	0.21	0.32	405	63
<i>P. tomentosa</i>	Fugou Country, Henan province	0.236	0.315	0.105	0.203	0.327	406	48
	Shu Country, Anhei Province (34°20')	0.231	0.278	0.079	0.164	0.261	381	50
<i>P. tomentosa</i> var. <i>tsinlingensis</i>	Fugou Country, Henan province (34°20')	0.279	0.347	0.107	0.208	0.333	415	58

Fuente: ZHAO-HUA et al., 1986.

2.5. Ensayos no destructivos en la madera

Los ensayos no destructivos más conocidos que se han utilizado en el presente estudio son: ultrasonidos y vibraciones.

2.5.1. Medición de ultrasonidos

Los métodos con ultrasonidos son, después de la clasificación visual, los métodos más antiguos que existen de clasificación no destructiva. En 1929, Solokov sugirió por primera vez la utilización de ondas ultrasónicas para detectar singularidades o defectos en elementos metálicos, si bien ya se conocía la existencia de ultrasonidos desde el año 1883 gracias a los trabajos realizados por Galton con los límites de audición humana (RECUERO, 1999).

Aunque los métodos acústicos se apliquen en la clasificación y evaluación de las propiedades de la madera desde hace más de 50 años, no cuentan con el mismo nivel de desarrollo tecnológico que poseen otros materiales, como el hormigón.

Estos métodos poseen fácil aplicación y son el método de ensayo más rápido y objetivo, consiguiéndose buenos resultados, y cuentan con una amplia gama de equipos.

El método de ultrasonidos se basa en que a partir de la velocidad de la onda de sonido se puede determinar la capacidad resistente de la madera, ya que si existen nudos, degradaciones internas, etc, la velocidad de transmisión de la onda de sonido es diferente a la que se presente en el material sin defectos.

El tiempo que tarda la onda generada en recorrer la distancia entre dos sensores (palpador remoto y palpador receptor) se utiliza para calcular la velocidad que posee la onda generada; un mayor tiempo en la transmisión de la onda entre los dos sensores puede indicar defectos. Conociendo la densidad de la madera se puede calcular el Módulo de Elasticidad Dinámico (MOE_d), el cual está muy ligado con el Módulo de Elasticidad Estático (MOE).

La frecuencia de la onda que se utiliza es baja debido a la gran atenuación de la onda en la madera, entre 20 kHz y 500 kHz. Una variación de la velocidad permite detectar defectos que implica cambios en la dirección de la fibra, por ejemplo los nudos.

En el método de transmisión se colocan dos sensores, uno a cada lado de la pieza a inspeccionar. Se manda una señal a través del sensor transmisor y si hay algún defecto en el camino de la onda ultrasónica enviada parte de la misma es reflejada. El sensor receptor recibirá la señal reducida y el sensor transmisor recibirá parte de la onda reflejada.

La velocidad de propagación de la onda será mayor cuando el número de defectos que contenga la madera sea menor (ver Figura 5), esto se debe que estos defectos hacen que la transición de la onda de sonido se interrumpida y por este motivo se retarde su llegada al receptor (GOIA et al., 2002).

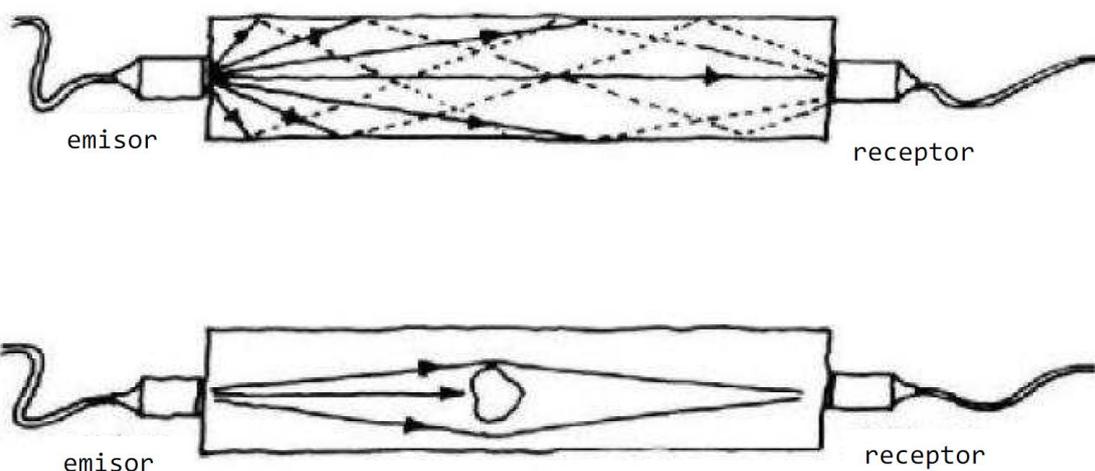


Figura 5. Esquema de la técnica de ultrasonidos: método transmisión (MARTÍN, 2009).

La onda ultrasónica se encuentra afectada por varias características de la madera. Estos factores son:

- Especie: cada especie posee un rango de velocidades de propagación ultrasónica característica debido a la estructura interna de cada tipo de madera.
- Humedad: el contenido en humedad que posea la madera influye en las velocidades de propagación. Se estima que por cada incremento de un 1% en humedad disminuye la velocidad de propagación en un 0,8% (SANDOZ, 1989). La velocidad de propagación disminuye con el aumento de la humedad hasta que la madera alcanza el punto de saturación de la fibra, posteriormente no hay influencia alguna de la humedad sobre la velocidad.
- Deterioro: cuando la madera está dañada se produce una mayor discontinuidad en el sentido transversal de la fibra que en el longitudinal; por este motivo la velocidad normal se presenta más sensible a las pérdidas de densidad, de modo que, si se produce una pérdida de densidad en la madera

con motivo del deterioro de la misma, los valores de la velocidad normal disminuyen. Las pudriciones, las galerías, etc., ocasionan que la velocidad longitudinal de la onda de sonido resulte ineficaz a la hora de detectar el deterioro.

- Defectos y singularidades: los defectos y singularidades de la madera como las fendas, los nudos, las acebolladuras, etc., hacen que los valores de la velocidad de propagación de la onda ultrasónica descendan puntualmente.
- Posición de la fibra: dependiendo de la dirección de su estructura de crecimiento(longitudinal, radial y tangencial), las propiedades mecánicas de la madera varían; de la misma forma las velocidad de propagación de la onda ultrasónica también presenta variaciones.

2.5.2. Medición de vibraciones

Este método, que aprovecha el conocido fundamento del diapasón, se basa en el estudio y análisis de las vibraciones que se producen en el material y la frecuencia propia del mismo. La mecánica de este método consiste en impactar con un martillo sobre la pieza estudiada para producir las ya mencionadas vibraciones (CARBALLO et al., 2009).

2.6. Estudios anteriores sobre *Paulownia*

Existen numerosos artículos sobre la *Paulownia*, pero muy pocos estudian la caracterización físico-mecánica. La gran mayoría de estudios analizan la capacidad de producción de dicha especie para biomasa (Ayrilmis y Kaymakci, 2013; Yorgun y Yildiz, 2015; López et al., 2012), otros la restauración de suelos contaminados (Doumet et al., 2008; Madejón et al., 2014; Madejón et al., 2016;), la obtención de celulosa (Caparrós et al., 2008; López et al., 2012), y el uso como material aislante (Sobhani, 2011); este último tiene más de relación ya que estudia algunas propiedades físicas y mecánicas de paneles sándwich fabricados con núcleo de madera de *Paulownia*.

Por el contrario no existen apenas estudios relacionados con la caracterización físico-mecánica de la madera de *Paulownia elongata*. Los artículos más relevantes para el presente trabajo, aunque en otras zonas geográficas, son:

AKYILDIZ and KOL (2010) estudian la determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Paulownia tomentosa* cultivada en Turquía. Los árboles tenían 6 años de edad y un diámetro de 30-40 cm. Utilizaron probetas aserradas con medidas diferentes en función de la propiedad que se quería obtener. Utilizan 30 muestras para cada prueba. Determinaron las propiedades físicas, incluyendo la densidad de secado al aire, la densidad secada al horno, densidad básica, hinchazón, contracción y coeficientes de conductividad térmica del secado al horno y del secado al aire; y las propiedades mecánicas, incluyendo la resistencia a la flexión, módulo de elasticidad en flexión, resistencia a la compresión paralela a la fibra, dureza y resistencia a la unión.

KIAEI (2012) analizó las características físicas y mecánicas de la madera de *Paulownia* cultivada en Irán. Utilizó 6 árboles de *Paulownia fortunei* L. de 5 años de edad y 41 cm de diámetro. Para evaluar las propiedades físicas utilizó 45 muestras con dimensiones 20 x 20 x 20mm. A la hora de determinar las propiedades mecánicas utilizó 30 muestras con dimensiones diferentes en función de las normas ISO estándar para la realización de cada ensayo. Determinó las propiedades físicas, incluyendo la densidad secada al horno, la densidad básica, la densidad secada al aire, la contracción volumétricas, el porcentaje de pared celular, la porosidad, el punto de saturación de las fibras y el contenido máximo de humedad; y las propiedades mecánicas, incluyendo el módulo de rotura, el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión paralela al grano. Los valores obtenidos los comparó con los de otras especies.

KAYMAKCI et al. (2013) estudiaron algunas de las propiedades mecánicas de la madera de *Paulownia elongata* en Turquía. La determinación de las propiedades mecánicas la realizaron a partir de estándares turcos, posteriormente las compararon con otros estudios diferentes. De los cuales algunos de ellos ya han sido mencionados.

ZHAO-HUA et al. (1986) abordó todo lo referido al cultivo y al uso de la *Paulownia* en china, dentro de este estudio también aparecen las distintas propiedades físicas y mecánicas de varios tipos de *Paulownia* en China.

3. OBJETIVOS

3. OBJETIVOS

El objetivo principal es la caracterización físico-mecánica de la madera de *Paulownia elongata*. Los objetivos secundarios que se plantean son alcanzar con el presente trabajo son los siguientes:

1. Estudiar el estado del arte sobre el uso y características de la madera de *Paulownia* en el ámbito internacional.
2. Determinar de las propiedades elasto-mecánicas de la madera de *Paulownia elongata* según normas UNE-EN 408:2011.
3. Analizar las propiedades físicas de la madera de *Paulownia elongata*.
4. Estimar el módulo de elasticidad de la madera a partir de ensayos no destructivos con ultrasonidos y mediante vibraciones inducidas.
5. Comparar métodos de ensayo comúnmente utilizados para determinar la clase resistente de madera estructural, métodos destructivos (ensayos de rotura) y métodos no destructivos (ultrasonidos y vibraciones inducidas).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Datos generales del ensayo

La madera utilizada en el presente estudio fue obtenida de una plantación experimental de *Paulownia elongata* propiedad de ACOR, localizada en el término municipal de Castrillo de Duero, en la provincia de Valladolid. El destino de dicha plantación era la producción de biomasa.

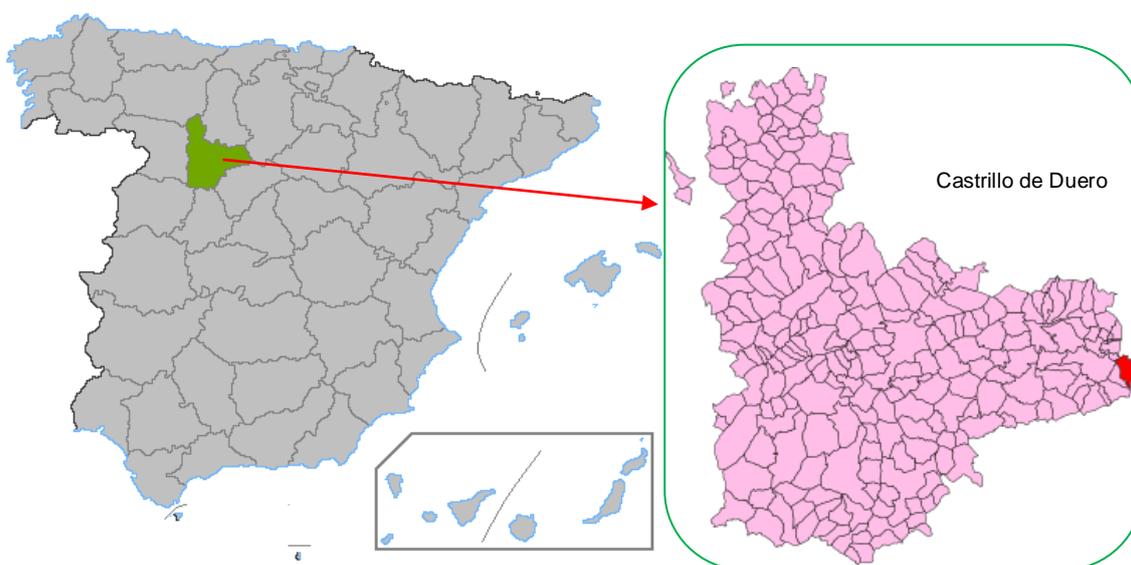


Figura 6. Localización de Castrillo de Duero.

Los árboles que fueron apeados tenían 7 años de edad. Una vez apeados se transportaron al laboratorio de maderas del campus “La Yutera” de la Universidad de Valladolid, donde se dejaron secándose a temperatura ambiente.

4.2. Metodología empleada.

Una vez que las trozas se secaron fueron aserradas en la carpintería del propio laboratorio, se obtuvieron piezas de dos dimensiones diferentes; las primeras piezas tenían una dimensión de 6 x 4 x 120 cm y la dimensión de las segundas era de 2 x 2 x 6 cm.

Tras el secado y el aserrado las piezas de madera tenían una humedad del 8% aproximadamente, calculado según la norma UNE 56-529-77; como se expone en apartados posteriores.

Con 29 de las piezas de dimensión 2 x 2 x 6 cm se realizaron ensayos para determinar las propiedades físicas de la madera de *Paulownia elongata*.

Con un grupo 41 piezas de dimensión 6 x 4 x 120 cm a escala de piezas estructurales se llevaron a cabo los ensayos no destructivos de ultrasonidos (“Sylvatest Trio” y “Fakopp Microsecond Timer”) por el método directo e indirecto, ensayos de vibraciones inducidas con el FFT y los ensayos de flexión según norma UNE-EN 408:2011 con la maquina universal “Ibertest”.

Seguidamente con otro grupo de 12 piezas de madera que presentaban pocos defectos, de dimensiones 6 x 4 x 120 cm a escala de piezas estructurales, se realizaron los mismos ensayos que para el grupo de 41 piezas, sumándose otros ensayos de vibraciones transversales inducidas (viga empotrada libre y con doble apoyo) y el ensayo de flexión con la maquina universal “Ibertest” de un apoyo sin llegar a la rotura de la pieza.

Todas las piezas de dimensiones 6 x 4 x 120 cm han sido sometidas a rotura según la norma UNE-EN 408:2011.

Con los resultados de todos los ensayos se realizó un análisis estadístico con el programa Statgraphics Centurion XVI.

4.3. Mediciones realizadas en laboratorio.

4.3.1. Medición de la densidad, humedad y coeficiente de contracción

En primer lugar para determinar la densidad y el coeficiente de contracción de la *Paulownia elongata* se han seguido las normas UNE 56-531-77 y UNE 56-533-77 respectivamente. Para la determinación de ambas características se utilizaron 25 probetas de 2 x 2 x 6 cm, las cuales fueron pesadas y medidas en tres estados: a temperatura ambiente, en estado anhidro y una vez alcanzado el punto de saturación de las fibras.

Las probetas fueron medidas en las tres direcciones radial, tangencial y longitudinal. Para realizar las mediciones se utilizó un calibre de 0,1 mm de precisión.

Las direcciones de las mediciones realizadas y el aparato que se utilizó se pueden observar en las figuras 7 y 8.

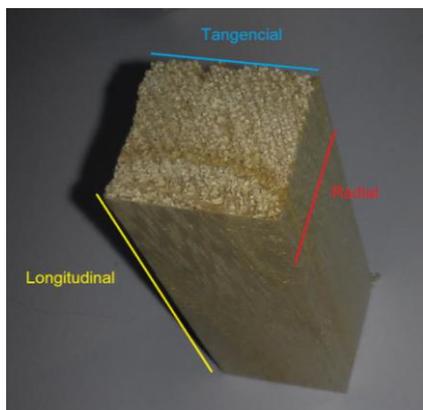


Figura 7. Direcciones en la medición.



Figura 8. Calibre de precisión 0,1 mm.

El peso de las probetas en cada uno de los tres estados se determinó con una balanza analítica de precisión 0,1 mg, la cual se puede observar en la figura 9.

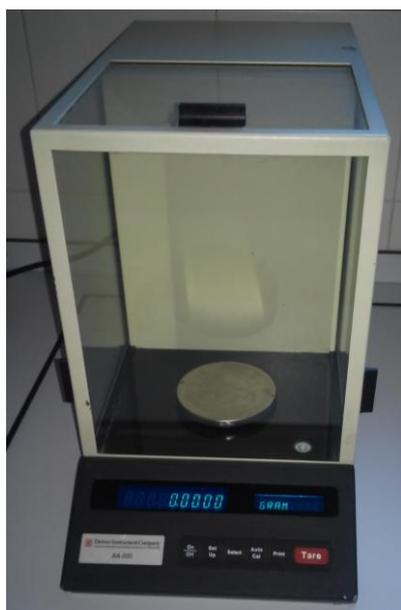


Figura 9. Balanza analítica de precisión 0,1 mg.

Con el fin de conseguir que las probetas llegaran al estado anhidro, se introdujeron en una estufa a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ según indica la norma UNE 56-529-77 (ver Figura 10).

Por el contrario para que las probetas llegaran al punto de saturación de las fibras se tuvieron que sumergir en agua durante más de 24 horas (tiempo estimado hasta alcanzar la humedad de saturación).



Figura 10. Estufa para el secado de probetas.

Con los datos obtenidos las densidades calculadas fueron: densidad al 0% de humedad, densidad a temperatura ambiente, densidad al 12 % de humedad y la densidad básica. Con respecto a las contracciones fueron calculadas la radial, la tangencial, la longitudinal, y la contracción volumétrica. Las ecuaciones utilizadas en el cálculo de todos los parámetros citados, se exponen a continuación.

Para calcular la densidad al 0% y a temperatura ambiente se utilizó la misma ecuación, utilizando sus respectivos datos en función de la humedad de cada una, dicha ecuación se expone a continuación:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde:

ρ : densidad (g/cm^3),

m : peso de la probeta (g),

V : volumen de la probeta (cm^3).

La densidad al 12% se determinó mediante la fórmula de Kollman, según la siguiente ecuación:

$$\rho_{12} = \frac{\rho_0 * (1 + 0,12)}{1 + (0,84 * \rho_0 * 0,12)}$$

Donde:

ρ_{12} : densidad al 12% de humedad (g/cm^3),

ρ_0 : densidad al 0% de humedad (g/cm^3).

La densidad básica se calculó según la siguiente ecuación:

$$\rho_b = \frac{m_0}{V_v}$$

Donde:

m_0 : peso en estado anhidro (g),

V_v : volumen en estado saturado (cm^3).

La contracción volumétrica total de las probetas se calculó según la siguiente ecuación:

$$C_v = \frac{V_s - V_0}{V_0} \times 100$$

Donde:

C_v : contracción volumétrica total (%),

V_s : volumen saturado (cm^3),

V_0 : volumen anhidro (cm^3).

Las contracciones lineales fueron calculadas en las tres dimensiones (radial, tangencial y longitudinal) utilizando la ecuación:

$$C_l = \frac{L_s - L_0}{L_0} \times 100$$

Donde:

C_l : contracción lineal total (%),

L_s : longitud de la probeta en la dirección que se considere para la madera saturada (cm),

L_0 : longitud de la probeta en la dirección que se considere para la madera en estado anhidro (cm).

Posteriormente, la humedad se determinó siguiendo la norma UNE 56-529-77 determinación del contenido de humedad por desecación hasta el estado anhidro.

Para llevar a cabo el ensayo se utilizaron 4 probetas con medidas 2 x 2 x 6 cm, estas probetas fueron pesadas en la balanza analítica de precisión 0,1 mg y posteriormente introducidas en la estufa a 103°C +/- 2°C durante 3 días para que obtuvieran una humedad de 0%.

Con los pesos a temperatura ambiente y en estado anhidro se calculó el porcentaje de humedad de las probetas, mediante la siguiente ecuación:

$$H = \left(\frac{P_h - P_0}{P_0} \right) \cdot 100$$

Donde:

H : contenido de humedad de la probeta (%),

P_h : peso húmedo de la probeta (g),

P_0 : peso anhidro de la probeta (g).

4.3.2. Medición de ultrasonidos

Los equipos comerciales utilizados para el cálculo del tiempo de propagación de las ondas ultrasónicas en el presente estudio fueron “Sylvatest Trio” y “Fakopp microsecond Timer”.

“Sylvatest” utiliza una frecuencia de 30 kHz y mide el tiempo (μs) que transcurre desde que la onda ultrasónica sale del palpador transmisor hasta que llega al palpador receptor. El equipo “Fakopp” mide el tiempo (μs) que tarda la onda ultrasónica en llegar al sensor receptor o de parada, desde el sensor transmisor; la onda se genera por el golpeo del sensor transmisor con un martillo. Los dos receptores tienen forma de aguja para poder ser insertados en la madera.



Figura 11. Equipo "Fakopp" y "Sylvatest".

En el presente estudio se utilizaron los dos equipos de medición de ultrasonidos en dos grupos de probetas, uno de 41 probetas y otro de 12 probetas de *Paulownia elongata* con dimensión 6 x 4 x 120 cm.

En el ensayo de “Fakopp” se realizaron cuatro mediciones en cada pieza, dos de testa a testa (mediciones directas) y dos de manera transversal (mediciones indirectas), como se puede observar en la figura 12.

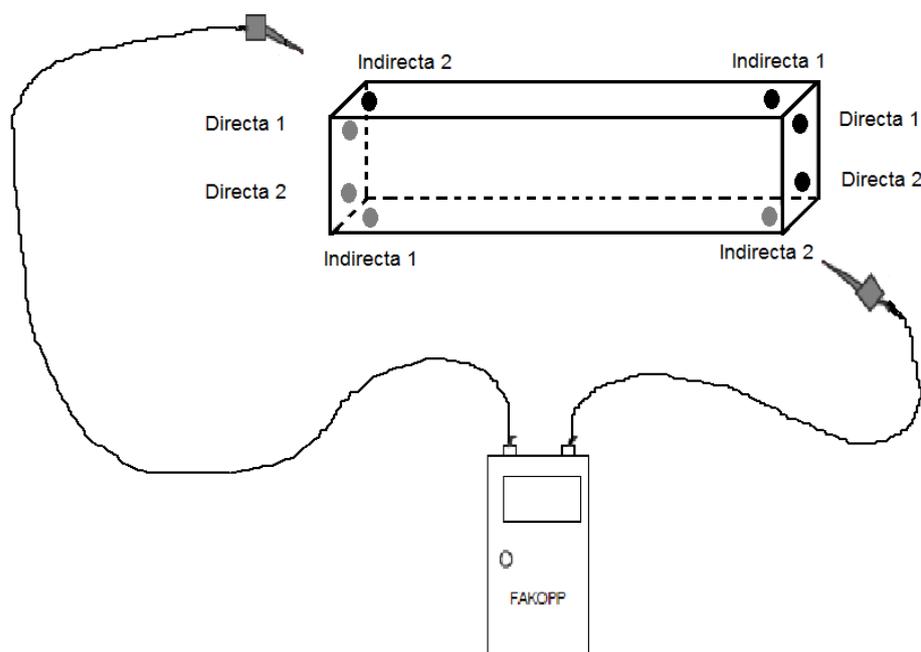


Figura 12. Medición en ensayo de ultrasonidos con el equipo "Fakopp".

Como se puede observar en la figura anterior (ver figura 12) las mediciones directas fueron realizadas una en la parte superior de la testa (de directa 1 a directa 1) y otra en la parte inferior de la testa (de directa 2 a directa 2). En cambio las mediciones indirectas fueron realizadas cruzando la onda ultrasónica la pieza de manera transversal, lanzando las dos transversales posibles desde los cantos (de indirecta 1 a indirecta 1 y de indirecta 2 a indirecta 2).

Posteriormente para la realización del ensayo con "Sylvatest" se procedió a realizar con un taladro convencional los agujeros en todas las piezas de madera; en tales agujeros iban a ser introducidos los dos palpadores del equipo de medición.

Los agujeros se efectuaron para la posterior realización de tres mediciones sobre cada pieza, una directa y dos indirectas; como se puede observar en la figura 13 la medición directa se realizó de testa a testa en el centro de las mismas, y las mediciones indirectas se realizaron cruzando la onda ultrasónica la pieza de manera transversal, lanzando las dos transversales posibles desde los cantos (de indirecta 1 a indirecta 1 y de indirecta 2 a indirecta 2).

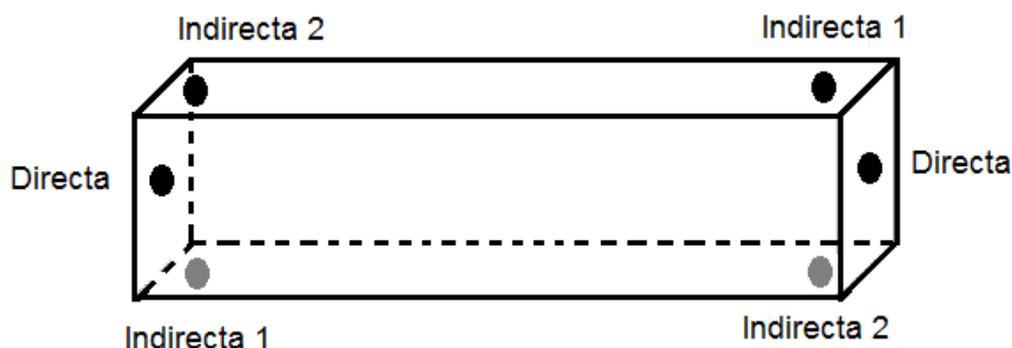


Figura 13. Medición en ensayo de ultrasonidos con equipo "Sylvatest".

Con los tiempos de propagación de la onda ultrasónica obtenidos de los ensayos se calcula la velocidad de propagación de la onda a la humedad a la que se han realizado los ensayos mediante la siguiente expresión matemática:

$$v_H = \frac{l}{t}$$

Donde:

v_H : velocidad de propagación de la onda ultrasónica a la humedad a la que se realiza el ensayo (m/s),

l : la distancia recorrida entre los palpadores de los equipos (m),

t : tiempo que tarda la onda ultrasónica en atravesar la pieza de madera (s).

Una vez obtenida toda la información citada anteriormente, y con otros datos como la longitud de la pieza, su densidad, etc., se puede determinar el Módulo de elasticidad Dinámico (MOE_d) mediante la expresión matemática (ARRIAGA et al., 2002):

$$MOE_d = \frac{\rho \times v^2}{1000000}$$

Donde:

MOE_d : módulo de elasticidad dinámico (N/mm^2),

ρ : densidad (kg/m^3),

v : velocidad de propagación de la onda longitudinal (m/s).

4.3.3. Medición de vibraciones

En el presente estudio se han realizado tres tipos de ensayos diferentes en los cuales se emplean las vibraciones inducidas para calcular el Módulo de Elasticidad de las piezas de madera, estos ensayos son: Mediante el equipo PLG (Portable Lumber Grader), Vibración transversal por impacto en Viga empotrada-libre y vibración transversal por impacto en viga biapoyada; estos ensayos serán descritos a continuación.

Portable Lumber Grader: El equipo Portable Lumber Grader (PLG) pertenece a la empresa Fakoopp y es el más utilizado en España. Este equipo mide la velocidad de transmisión de la onda vibratoria y la densidad de la pieza, y proporciona una muy buena estimación de los módulos de elasticidad de cada pieza que se estudia. Un dato importante a tener en cuenta es que la pieza a evaluar no debe estar empotrada, por este motivo esta técnica suele estar ceñida a su utilización en industria de producción de madera, en laboratorio o en el control del material a la recepción en obra (CARBALLO *et al.*, 2009). El equipo PLG se puede observar en la figura 14.

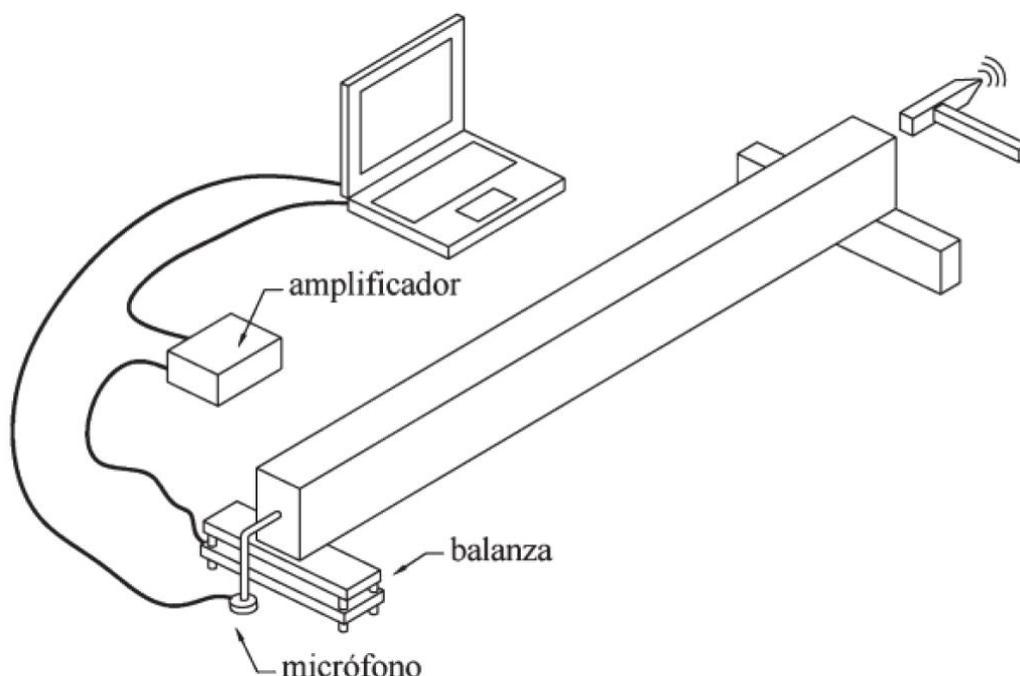


Figura 14. Esquema del equipo PLG. Fuente: ÍÑIGUEZ *et al.* (2007).

Este ensayo se realizó con las 53 piezas con dimensiones 6 x 4 x 120 cm pertenecientes a los dos grupos de probetas mencionados en apartados anteriores,

uno de 41 y otro de 12. A la hora de realizar la medición cada pieza fue apoyada sobre un taco de madera y la célula de carga que posee el equipo, de tal forma que la balanza soportara la mitad del peso de la pieza. El equipo posee un micrófono que capta la onda, este fue colocado apuntando a una de las testas y con un martillo se aplicó un golpe en la testa contraria. La onda una vez que es captada por el micrófono pasa por un amplificador y de este último al ordenador que registra el peso, la velocidad y la frecuencia de la onda. Con estos datos y las dimensiones de la pieza el ordenador obtiene la Densidad y el Módulo de Elasticidad Dinámico de la pieza.

Vibración transversal por impacto en viga empotrada-libre y viga biapoyada: estos ensayos se basan en la obtención del Módulo de elasticidad Dinámico de la pieza siendo esta empotrada con una parte libre (para el ensayo por impacto en viga empotrada-libre) o con doble apoyo (viga biapoyada). A la pieza de madera se le generan una serie de vibraciones transversales mediante el golpeo de la misma con un martillo; la vibración es recogida por un micrófono que detecta la frecuencia de la onda que atraviesa la pieza de madera, registrándose y analizándose dicha frecuencia mediante el software FFT Analyser (Fast Fourier Transform Analyser – Transformada rápida de Fourier) de Fakopp. El software muestra en la parte superior la onda de vibración registrada tras el impacto y en la parte inferior representa la frecuencia de esa vibración tras los cálculos que realiza la transformada rápida de Fourier, a la derecha muestra el valor de la frecuencia dependiendo del punto de la imagen en que se encuentre el ratón ordenador en ese momento. El FFT Analyser junto con los materiales utilizados para la medición de la frecuencia mediante este ensayo se presenta en la figura 15.

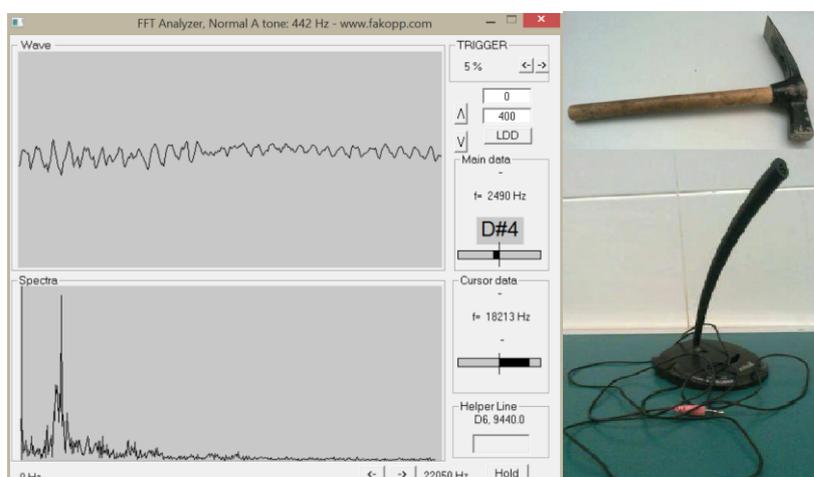


Figura 15. Materiales para ensayo de vibraciones transversales con viga empotrada libre: FFT Analyser, martillo y micrófono.

El FFT devuelve la frecuencia principal de la vibración que se produce en Hertzios y otras frecuencias armónicas de la principal. Con la medición de estas frecuencias mediante el software ya mencionado podemos calcular el Módulo de Elasticidad Dinámico de la pieza.

La pieza de madera al estar empotrada cuando se le origina la vibración transversal, hace que esta solo se de en la parte de la pieza que permanece libre, como se representa en la figura 16.

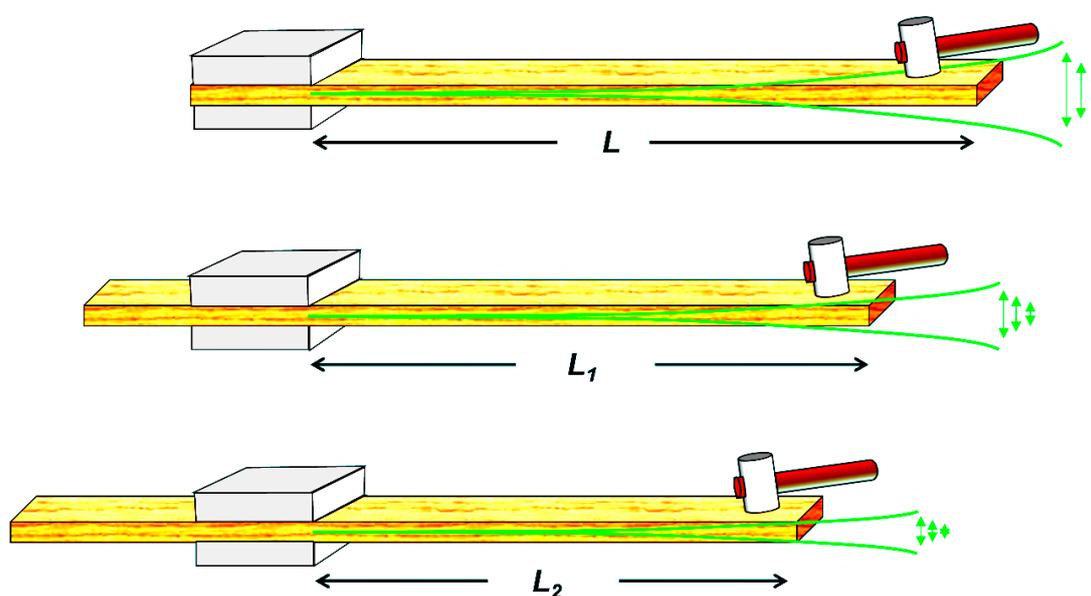


Figura 16. Pieza empotrada-libre vibrando.

El movimiento de cualquier punto libre de la pieza al recibir el impacto no es solo en una dirección, sino que cualquier punto de la pieza que se encuentre en la parte libre se va a mover como suma de los movimientos principal y sus armónicos de vibración:

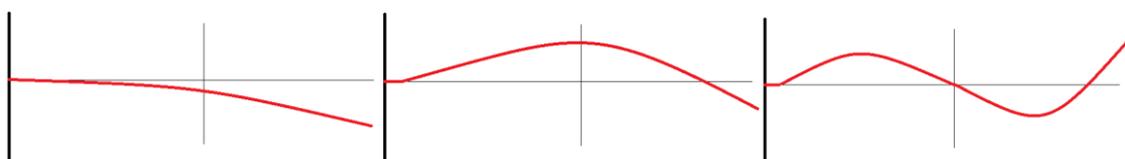


Figura 17. Diferentes movimientos de cualquier punto de la parte libre en viga empotrada-libre.

En el ensayo con la viga con doble apoyo el croquis del ensayo y los modos de movimiento de la pieza son diferentes a los de viga empotrada-libre, representándose en la figura 18 y 19.

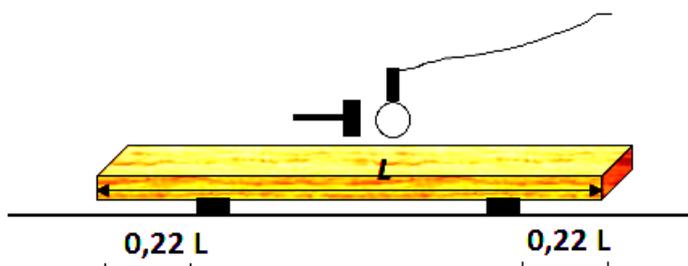


Figura 18. Pieza biapoyada.

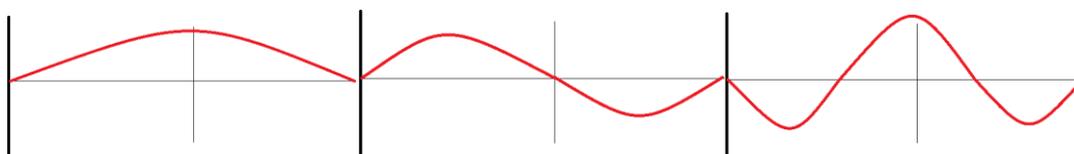


Figura 19. Tipos de movimiento de la vibración en el ensayo de pieza biapoyada.

En ambos ensayos los datos necesarios, a parte de la frecuencia de las ondas originadas en la pieza y el peso de las misma; para calcular el Módulo de Elasticidad Dinámico de la pieza que necesitamos conocer son la longitud libre de la pieza (L), su espesor o anchura (e) y su altura o canto (h). Como se muestra en la figura 20.

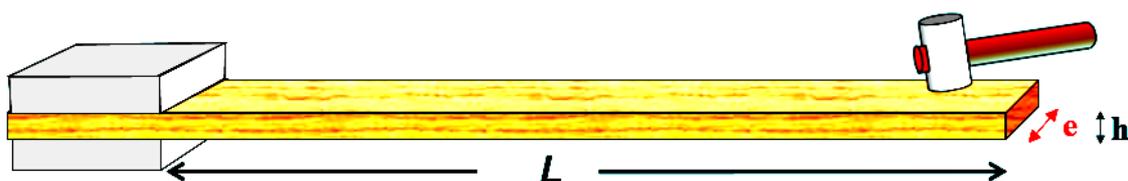


Figura 20. Datos a conocer en los ensayos.

Con estos datos conocidos y mediante la fórmula general de la frecuencia obtenida del estudio teórico del análisis dinámico de las vibraciones longitudinales de una pieza, se determina el Módulo de Elasticidad Dinámico (BLEVINS, 1975):

$$f_n = \left(\frac{k_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{(E \cdot I)}{\rho \cdot S \cdot L^4}} = C_n \sqrt{\frac{(E \cdot I)}{\rho \cdot S \cdot L^4}} = C_n \sqrt{\frac{(E \cdot I)}{m \cdot L^3}}$$

Donde:

f_n : frecuencia de la onda (Hz),

ρ : densidad (kg/m³),

S: sección de la pieza (m²),

L: longitud libre de la pieza (m),

C: Coeficiente para cada uno de los modos de vibración.

E: módulo de elasticidad Dinámico (N/m²),

I: momento de inercia (m⁴),

m: masa total de la pieza (kg).

De la expresión resultante se conocen todos los datos excepto f_n y E, ya que I se obtiene de la siguiente expresión:

$$I = \frac{e \cdot h^3}{12}$$

Donde:

I: momento de inercia (m⁴),

e: espesor o anchura (m),

h: altura o canto (m).

Estableciendo las condiciones de contorno para cada una de las tipologías estructurales, se obtendrían los coeficientes para cada uno de los modos de vibración correspondientes:

Tabla 8. Coeficientes dependiendo del tipo de frecuencia.

Coeficientes	Viga empotrada-libre	Viga biapoyada
C ₁	0,56	3,56
C ₂	3,51	9,82
C ₃	9,82	19,2
C ₄	19,24	47,5

Para ir determinando cada una de las frecuencias se ha determinado una hipótesis de referencia para la cual se ha utilizado un Módulo de Elasticidad Dinámico de 6000 N/mm², a partir de la cual obtendremos las frecuencias principales teóricas y sus armónicos para cada longitud libre de ensayo. El ensayo se ha realizado a diferentes longitudes libres, de 10 a 100 cm.

La regresión lineal es la que se utiliza para sacar el Módulo de Elasticidad Dinámico de la pieza. La pendiente de la recta es igual a L^4/f^2 , que al sustituirlo en la fórmula general de la frecuencia nos da la posibilidad de sacar el Módulo de Elasticidad:

$$f_n = C_n \cdot \sqrt{\frac{(E \cdot I)}{\rho \cdot S \cdot L^4}} ; f^2 = \frac{C_n^2 \cdot E \cdot I}{\rho \cdot S} \cdot \frac{1}{L^4}$$

$$y = a_1 \cdot x + b_1 ; b_1 \approx 0$$

$$E = \frac{a_1 \cdot \rho \cdot S}{C_n^2 \cdot I}$$

Donde:

f_n : frecuencia de la onda (Hz),

ρ : densidad (kg/m³),

S : sección de la pieza (m²),

L : longitud libre de la pieza (m),

C : Coeficiente para cada uno de los modos de vibración.

E : módulo de elasticidad Dinámico (N/m²),

I : momento de inercia (m⁴).

Los dos ensayos de vibraciones transversales fueron realizados con 12 piezas con escasez de defectos, de dimensiones 6 x 4 x 120 cm.

4.3.4. Ensayo de resistencia a flexión en máquina universal

Los ensayos de resistencia a flexión llevados a cabo en el presente estudio fueron realizados según la norma UNE-EN 408:2011 "*Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*".

Como se puede observar en la figura 21 el equipo que se ha utilizado para la realización de estos ensayos es la máquina universal de ensayos electromecánica, cuyo modelo es Elib-100W de la casa "Ibertest". El equipo está compuesto por un potro o bancada de gran dimensión que puede ser modificada en función de la pieza a ensayar. La máquina se conecta a un ordenador que dispone de un software específico en el cual se introducen los parámetros de ensayo y es controlado mientras se realiza. Para la determinación del Módulo de Elasticidad Global en Canto a flexión (MOEGTO) y el MOR, debemos colocar un extensómetro o sensor que capta la deformación de la pieza, sobre un soporte vertical. El extensómetro debe colocarse en la parte central de la pieza de madera en el canto inferior, donde se encuentra la fibra extrema de la zona de tracción. El software del ordenador facilita una gráfica tensión-deformación y diversos parámetros como la deformación de la tabla, la carga aplicada, etc.



Figura 21. Máquina universal "Ibertest", ordenador, extensómetro y travesaño.

En el presente trabajo se realizaron dos ensayos de resistencia a flexión, uno con un solo punto de carga sobre la viga (sin rotura final) y el otro con dos puntos de carga sobre la viga (con rotura final), ambos con una carga de 1,8N, para que no se rompieran antes de calcular el MOEGTO.

El ensayo con dos puntos de carga se realizó según la norma UNE-EN 408:2011, los puntos de apoyo en los cuales se sitúan las vigas deben estar separados a una distancia que sea 18 veces la altura de su canto. La sección de rotura debe situarse en el tercio central de la viga y el lado sometido a tensión debe ser elegido al azar (EN 384, 2010) (ver figura 22).

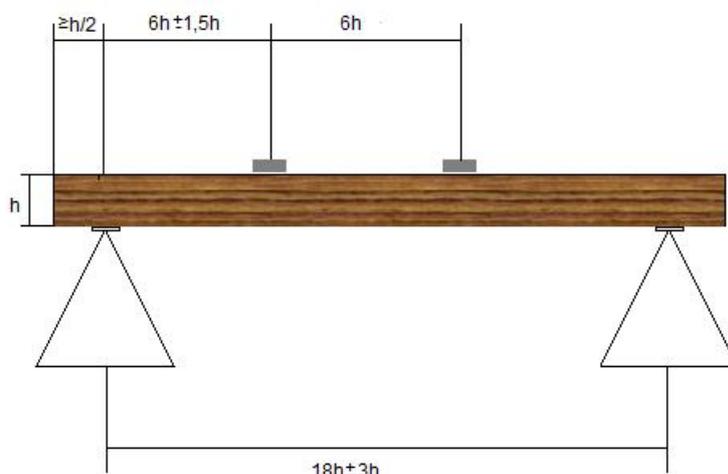


Figura 22. Colocación de tablas para realizar el ensayo de flexión en la máquina universal "Ibertest" con dos puntos de carga.

Para el ensayo de resistencia a flexión con un punto de carga sobre la viga, se equipa la máquina con el travesaño metálico que posee un solo punto de carga en el centro de la viga. El ensayo con un solo punto de carga sobre la viga fue realizado sobre las mismas 12 piezas de madera que se utilizaron para los ensayos de vibraciones transversales inducidas sobre viga empotrada-libre y con doble apoyo. En este ensayo no se llegó a romper la pieza y se obtiene únicamente el Módulo de Elasticidad Global en canto a flexión (MOEGTO).

El ensayo de resistencia a flexión con dos puntos de carga sobre la viga se realizó sobre todas las piezas de madera de mayor tamaño, un total de 53. El travesaño metálico utilizado para realizar la carga en este caso posee dos puntos que aplican la carga sobre la viga. Cuando se inicia el ensayo el travesaño comienza a bajar y aplica la carga sobre la viga en los dos puntos, a medida que avanza el ensayo la carga se incrementa hasta llegar a 1,8N que es el valor introducido, seguidamente se quita el

extensómetro y se sigue aplicando carga a la pieza. Al final de este ensayo la pieza de madera acaba rompiéndose y calculándose, además del MOEGTO, el Módulo de Rotura (MOR) de la misma.

La expresión matemática que permite calcular el MOEGTO es la siguiente:

$$MOEGTO = \left(\frac{l^3 * (F_2 - F_1)}{b * h^3 * (W_2 - W_1)} \right) * \left(\left(\frac{3 * a}{4 * l} \right) - \left(\frac{a}{l} \right)^3 \right)$$

Donde:

MOEGTO: Módulo de Elasticidad Global en Canto a flexión (N/mm²),

l: luz de la pieza (mm),

*F*₂ – *F*₁: incremento de la carga en la parte recta de la curva carga-deformación (N),

b: ancho de la sección de la pieza (mm),

h: altura de la sección de la pieza (mm),

*W*₂ – *W*₁: incremento de la deformación correspondiente al incremento de la carga (mm),

a: distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo (mm).

Para la determinación del MOR se seleccionan las variables de funcionamiento dependiendo del canto de la pieza a ensayar, al igual que para la determinación de MOEGTO.

La expresión matemática que permite calcular el MOR o resistencia a flexión estática es la siguiente:

$$MOR = \frac{a * F_{max}}{2 * W}$$

Donde:

MOR: Módulo de Rotura o resistencia a flexión estática (N/mm²),

a: distancia entre el punto de carga y el apoyo más próximo (mm),

*F*_{max}: carga máxima (N),

W: módulo resistente de la sección (mm^3).

Cuando la pieza llega a romperse el ordenador muestra la tensión soportada por la misma en el momento justo antes de romperse (MPa o N/mm^2), la carga máxima aplicada (kN), la deformación de la pieza (mm) y el tiempo que ha tardado en realizarse el ensayo (s).

Una vez determinado el MOEGTO se utiliza para calcular el Módulo de Elasticidad, y con este poder comparar con el de los diferentes ensayos, la siguiente expresión matemática.

$$\text{MOE} = 1,3 \times \text{MOEGTO} - 2690$$

Donde:

MOE: Módulo de elasticidad (MPa o N/mm^2),

MOEGTO: Módulo de Elasticidad Global en el Canto (MPa o N/mm^2).

4.4. Análisis estadístico.

Los datos obtenidos en la realización de todos los ensayos fueron tratados con el software informático "STATGRAPHICS CENTURIÓN XVI". Todos los datos antes de ser introducidos en el programa "Statgraphics" fueron recopilados en ficheros de Excel; formato compatible con el software.

En primer lugar se realizó un análisis descriptivo de todas las propiedades físico-mecánicas y de los Módulos de Elasticidad Dinámicos obtenidos en cada ensayo realizado (todas las variables utilizadas).

Seguidamente se compararon los Módulos de Elasticidad Dinámicos obtenidos en los ensayos y se obtuvieron sus correspondientes funciones de predicción para el MOE según UNE-EN 408:2011.

4.4.1. Análisis descriptivo

Los datos objeto de estudio del análisis descriptivo de cada variable, tanto física como mecánica, han sido:

Número (N): es el total de mediciones realizadas para un variable en concreto.

Promedio o media aritmética: suma de todos los valores dividida por el número total de datos, sirve como medida de centralidad de una muestra y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i x_i}{n}$$

Desviación estándar (Desv. Estand.): es una medida de dispersión para variables. Este valor se calcula como la raíz cuadrada de la varianza, es decir, la raíz cuadrada de la media de los cuadrados de las puntuaciones de desviación. La expresión utilizada para su cálculo es la siguiente:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^k (x_j - \bar{x})^2 \cdot n_i}$$

Coefficiente de Variación (CV): es la relación entre la desviación típica de una muestra y su media. El CV se utiliza como medida de la dispersión y se suele expresar en porcentajes, calculado mediante la expresión:

$$CV = \frac{\text{Desv. estand.}}{\text{Promedio}} * 100$$

Mínimo: coincide con el valor mínimo que toman los datos del total de valores para una variable.

Máximo: coincide con el valor máximo que toman los datos del total de valores para una variable.

Sesgo: se define sesgo de un estimador como la diferencia entre la esperanza matemática y el valor numérico del parámetro que estima. El estimador cuyo sesgo es nulo se denomina insesgado o centrado

Curtosis: esta medida determina el grado de concentración que presentan los valores en la regresión central de la distribución.

Normalidad: la variable tiene una distribución normal, distribución de Gauss o distribución gaussiana cuando la representación gráfica de los valores tiene una forma acampanada y es simétrica respecto a un determinado parámetro estadístico (campana de Gauss), se ajustan a los valores medios.

Para obtener la normalidad del total de valores para una variable en el presente estudio se realiza la prueba de normalidad para cada variable.

4.4.2. Comparación de muestras

4.4.2.1. Test de Levene

El test de Levene es utilizado cuando se calcula sobre una misma variable en diferentes grupos de datos, y determina si dicha variable posee una varianza que varía dependiendo del grupo.

Si se acepta la hipótesis nula del test, indica que existe homocedasticidad, es decir, que la varianza es igual para la variable calculada en los distintos grupos. Si se supone que la hipótesis nula es cierta calcularíamos p-valor (valor de probabilidad entre 0-1), que es una herramienta para rechazar o aceptar la hipótesis nula.

El valor de significación de test de Levene está en 5%, lo que quiere decir que si p-valor es inferior a 0,05% es probable que la hipótesis nula no sea cierta y se rechace. Esto ni quiere decir que se acepte la hipótesis de contraste, sino que se rechaza la hipótesis de partida y no es rechazada la hipótesis de contraste.

4.4.2.2. Análisis de varianza

El análisis de la varianza (ANOVA) es utilizado cuando se comparan medias entre distintos grupos de datos. Los supuestos que deben cumplirse para la realización del ANOVA son:

- Debe existir normalidad dentro de los datos obtenidos para cada grupo.
- Debe existir homogeneidad de varianzas u homocedasticidad.
- Independencias de las observaciones.

4.4.2.3. Test no paramétrico de Kruskal-Walis

Si no se cumple la hipótesis de igualdad de varianzas o homocedasticidad se empleado el test no paramétrico de Kruskal-Walis, y se utiliza para comparar la igualdad de medianas entre diferentes grupos de datos, comprobando de esta manera si presentas diferencias significativas entre ellas.

Si se acepta la hipótesis nula significa que no existen diferencias significativas entre las medianas de las muestras. Si el p-valor es menor de 0,05%, cuando el nivel de significación es de 5%, es probable que la hipótesis nula sea falsa y se rechace que no existen diferencias significativas entre grupos, es decir, que hay diferencia significativa entre los grupos.

4.4.2.4. Prueba de rango múltiple

Una vez realizados ANOVA o el test no paramétrico de Kruskal-Walis se realiza la prueba de rango múltiple, que se utiliza para comparar diferentes medias muestrales y determinar cuáles son diferentes entre sí. Las medias son agrupadas en grupos homogéneos que se pueden comparar intuitivamente.

Para realizar la prueba de rango múltiple se utilizó el test HSD de Tukey.

4.4.3. Funciones de predicción

En el presente estudio se hizo uso de regresiones con el MOE de cada ensayo como regresor, obteniendo la recta de cada regresión, sus respectivos coeficientes de correlación y sus respectivos coeficientes de determinación ajustados.

Las regresiones son un modelo estadístico utilizado para definir las funciones que relacionan dos variables una dependiente (Y) y una o más independiente/s (X_1 , X_2 , etc). EL objetivo de la regresión es indagar en la relación causa-efecto que existe entre dichas variables.

Las regresiones realizadas poseen un p-valor significativo (<0.05) con un coeficiente de determinación R^2 que muestra que la variable dependiente es definida por la variable independiente en un cierto porcentaje.

Cuando se ha definido el mejor modelo, función más eficaz a la hora de describir la variable dependiente con un error lo menor posible, se observan todos los residuos y de esta manera localizar posibles valores erráticos que se tendrán que dejar fuera del modelo.

En el estudio se lleva a cabo un ajuste con los datos depurados, permitiendo definir el grado de confianza que es significativa la relación entre las dos variables.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Análisis descriptivo

En el presente apartado se describen las propiedades físico-mecánicas más significativas en la caracterización de la *Paulownia elongata*, cuyas piezas de ensayo se encontraban aclimatadas en el laboratorio al 8% de humedad, obtenida según la norma UNE 56-529-77.

5.1.1. Propiedades físicas

Se realizó un análisis descriptivo de las propiedades físicas más significativas, representado en la tabla 9.

Tabla 9. Propiedades físicas de *Paulownia elongata*. n: número de muestras, CV: coeficiente de variación, máx: valor máximo, mín: valor mínimo.

Propiedad física	n	media	CV%	máx	mín	Normalidad*
Densidad anhidra (g/cm ³)	25	0,227	6,58	0,255	0,195	SI
Densidad básica (g/cm ³)	25	0,209	7,63	0,237	0,177	SI
Densidad normal (g/cm ³)	25	0,248	6,44	0,278	0,215	SI
Contracciones (%)						
Longitudinal	25	0,428	32,98	0,741	0,165	SI
Radial	25	3,807	22,92	6,039	2,464	SI
Tangencial	25	7,335	20,637	11,090	5,048	SI
Volumétrica	25	8,733	21,05	12,080	5,612	SI

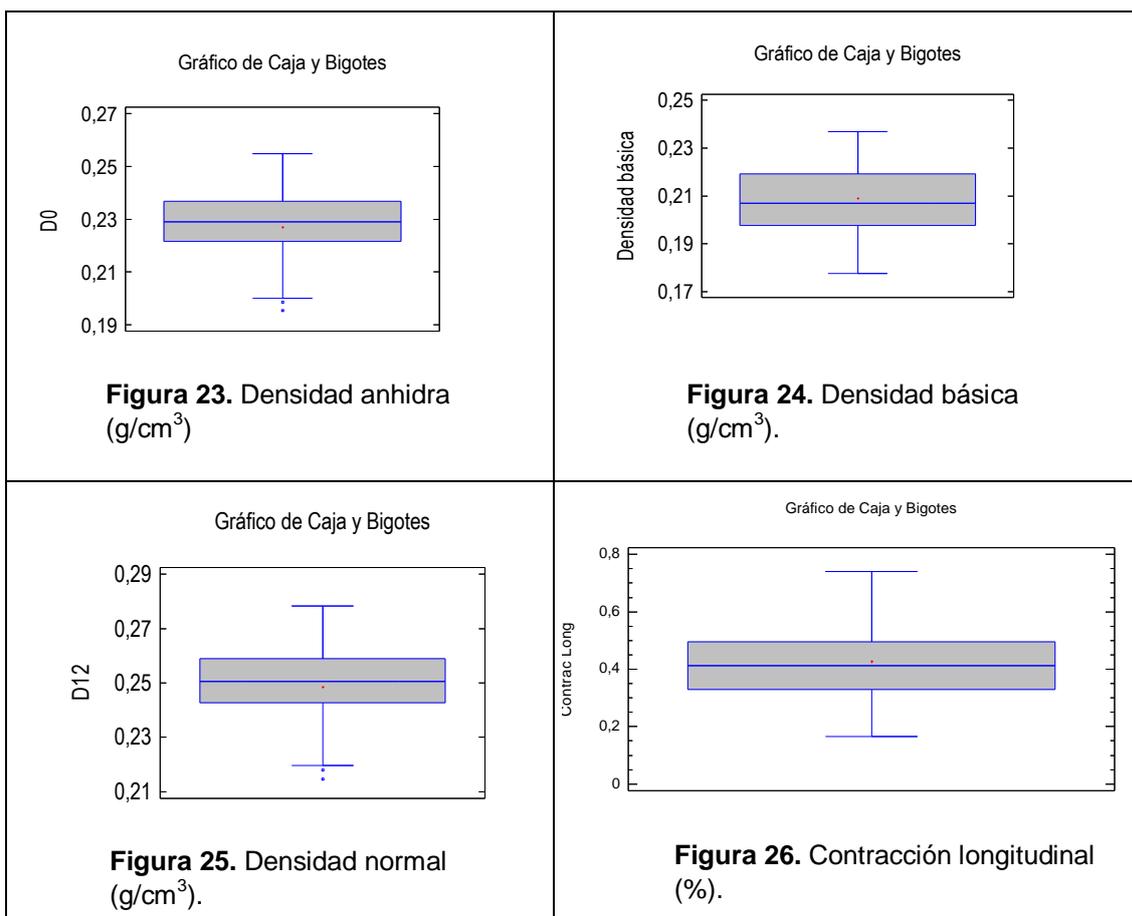
* Los test y gráficos de normalidad se encuentran en el Anexo. 8.1.1. Análisis de normalidad para propiedades físicas.

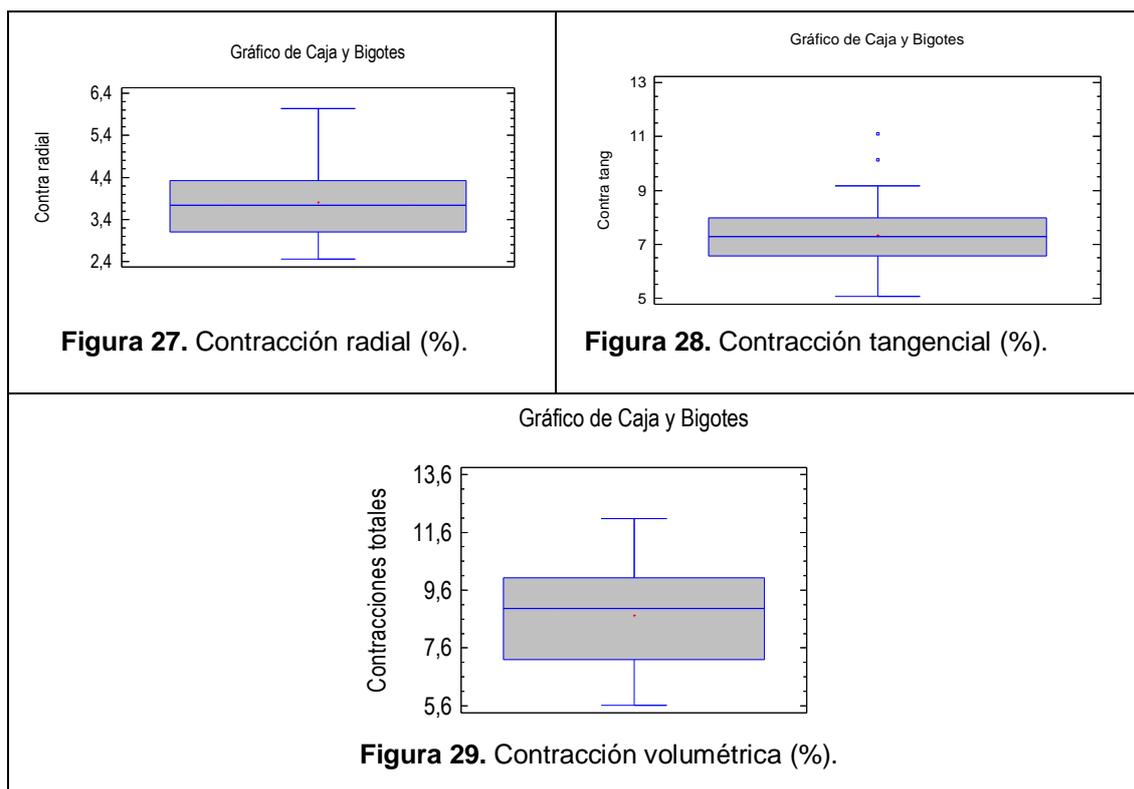
A la vista de los resultados obtenidos, y atendiendo a la norma UNE 56.529.77, la densidad de la especie al 12%, 0,248 g/cm³, se encuadra en el grupo de maderas muy ligeras; en estudios anteriores toma valores 0,264 g/cm³ y 0,283 g/cm³ (ZHAO-HUA et al., 1986); 0,266 g/cm³ y 0,271 g/cm³ (KAYMAKCI, 2010); y 0,281 g/cm³ (KAYMAKCI et al., 2013). El valor medio de la densidad anhidra de la madera de *Paulownia elongata* del presente estudio es 0,227 g/cm³, los obtenidos en estudios anteriores, 0,209 g/cm³ y 0,243 g/cm³ (ZHAO-HUA et al., 1986).

Respecto a sus valores de contracción, en particular su contracción volumétrica, con una media de 8,73 % se encuentra dentro de la clase "Contracción pequeña"; en estudios anteriores 8,76 % y 13,59 % (ZHAO-HUA et al., 1986). El valor medio de la contracción radial es de 3,81 %, mientras que Zhao-Hua et al. (1986) considera unos valores de 2,28 % y 4,41 %. El valor medio de la contracción tangencial es de 7,33 %, para Zhao-Hua et al. (1996) toma valores de 5,61 % y 8,07 %.

Los coeficientes de variación obtenidos en los ensayos se encuentran por debajo del rango aceptado en las normas de ensayo, UNE 56.528.77.

Haciendo referencia a las principales propiedades físicas y sus respectivas pruebas de normalidad, "no podemos decir que su distribución no sea normal", por lo cual asumimos la normalidad de la población. Para cada una de las propiedades físicas estudiadas se muestran a continuación sus respectivos gráficos de caja y bigotes.





5.1.2. Módulos de elasticidad y módulo de rotura con 41 piezas.

Se realizó un análisis descriptivo de todos los Módulos de Elasticidad (MOE) y el Módulo de Rotura (MOR) calculados para el grupo de 41 piezas.

Tabla 10. Módulos de elasticidad dinámicos (MPa) de *Paulownia elongata*. n: número de muestras, CV: coeficiente de variación, máx: valor máximo, mín: valor mínimo.

Módulos de elasticidad (MPa)	n	media	CV %	máx	mín	Normalidad*
MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1	41	5292,5	9,706	6465,03	4105,65	SI
MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2	41	5339,59	8,172	6196,31	4133,91	SI
MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio	41	5316,05	8,385	6004,23	4119,78	SI
MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1	41	5366,56	14,500	8265,03	4210,53	SI
MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2	41	5386,52	14,266	8208,98	4220,49	SI
MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio	41	5233,77	8,329	5904,76	4265,15	SI
MOEd ultrasonidos Sylvatest directo	41	6599,1	8,515	7677,48	5178,46	SI
MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1	41	6496,46	9,232	7407,2	5038,35	SI

Tabla 10 (Cont.). Módulos de elasticidad dinámicos (MPa) de *Paulownia elongata*. n: número de muestras, CV: coeficiente de variación, máx: valor máximo, mín: valor mínimo.

Módulos de elasticidad (MPa)	n	media	CV %	máx	mín	Normalidad*
MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2	41	6458,25	8,952	7278,94	5200,13	SI
MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio	41	6477,36	8,989	7343,07	5119,24	SI
MOEd vibraciones longitudinales	41	5235,71	9,334	6454,16	4345,65	SI

* Los test y gráficos de normalidad se encuentran en el Anexo. 8.1.2. Análisis de normalidad para Módulos de Elasticidad y Módulo de Rotura del grupo de 41 piezas.

Tabla 11. Módulo de elasticidad (MPa) y Módulo de rotura (MPa) de *Paulownia elongata*. n: número de muestras, CV: coeficiente de variación, máx: valor máximo, mín: valor mínimo.

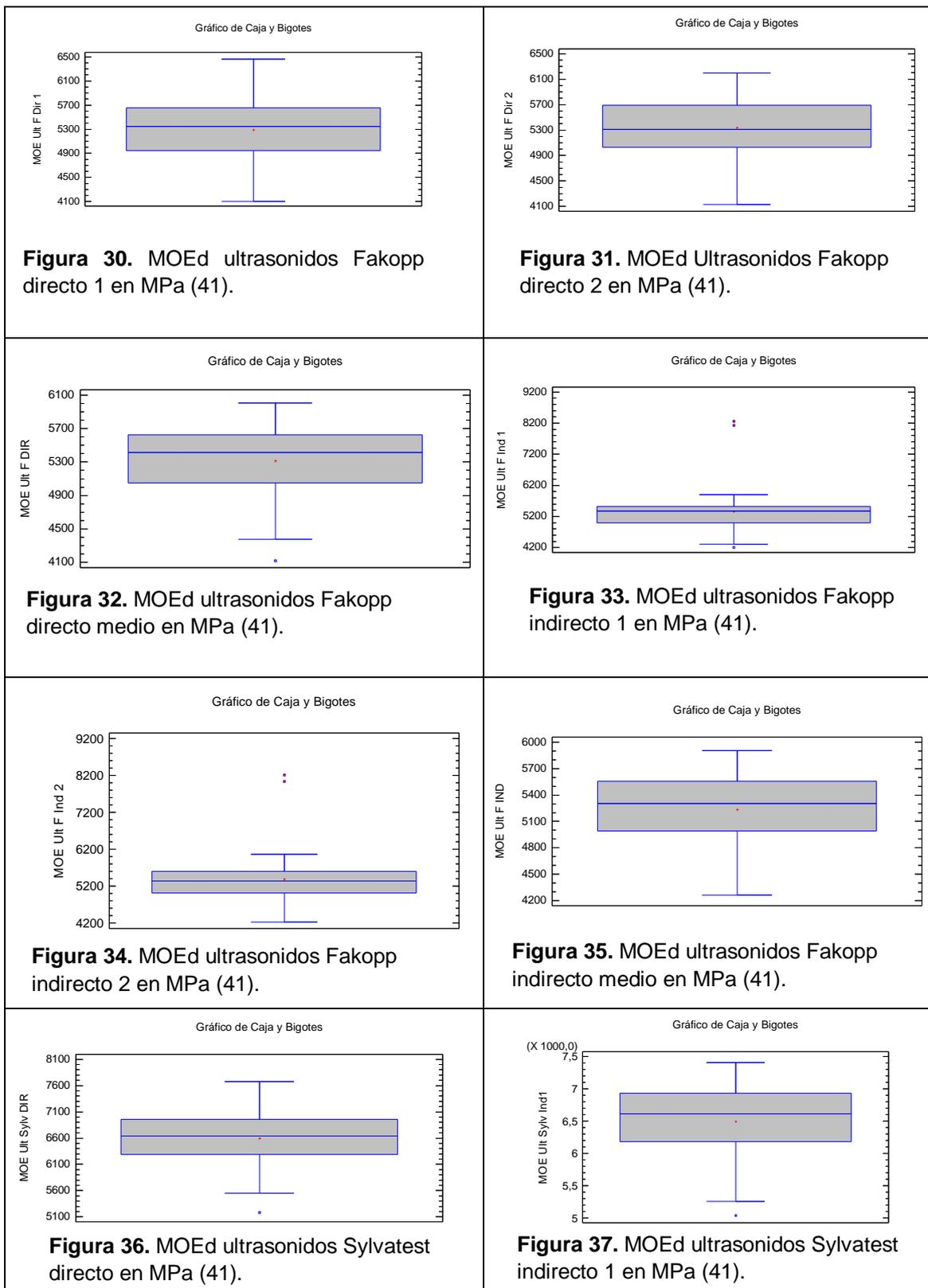
Valores UNE-EN 408:2011 (MPa)	n	media	CV%	máx	mín	Normalidad*
MOE	41	3100,1	12,356	3934,67	2284,84	SI
MOR	41	28,49	15,708	33,91	18,46	NO

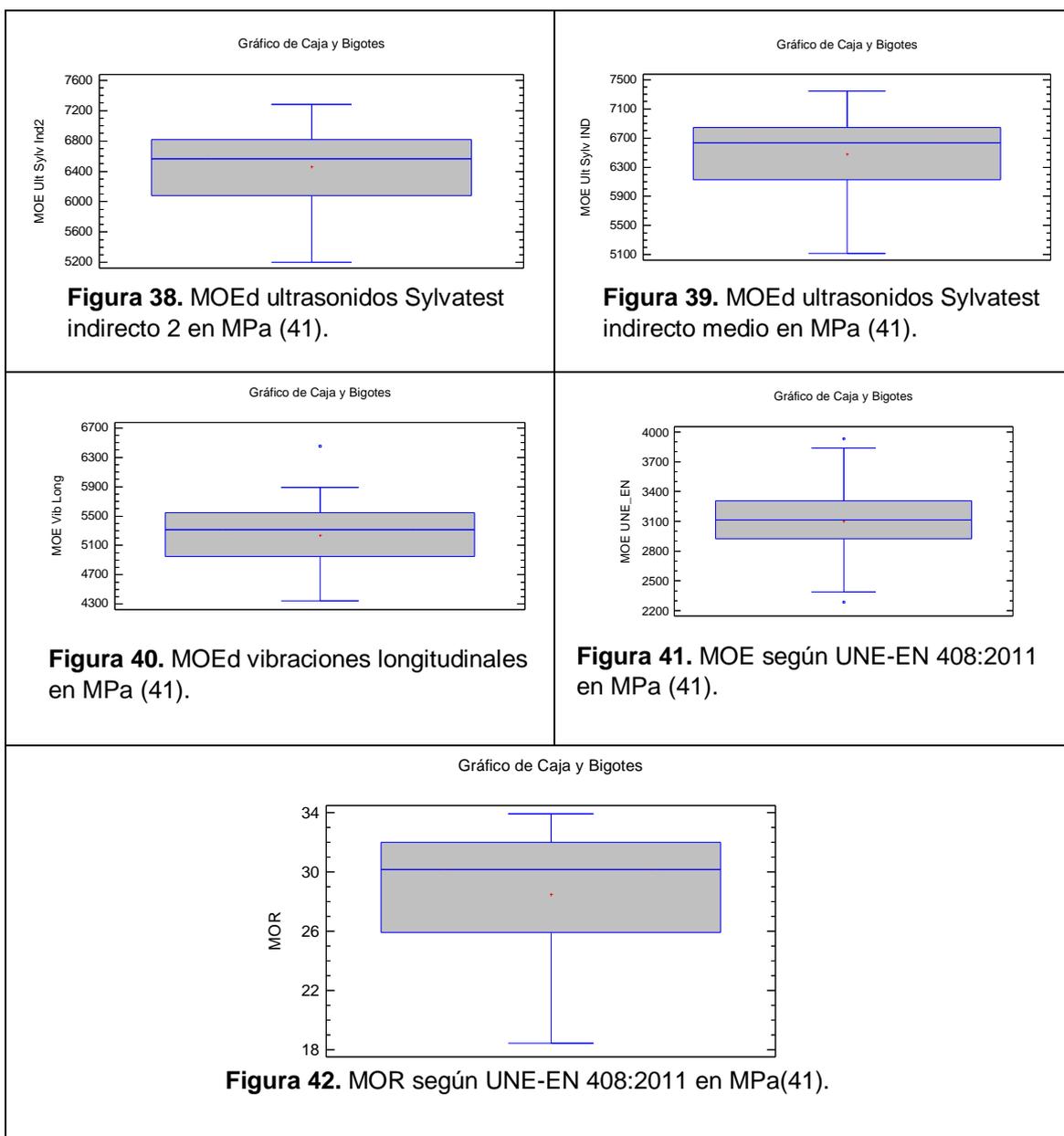
* Los test y gráficos de normalidad se encuentran en el Anexo. 8.1.2. Análisis de normalidad para Módulos de Elasticidad y Módulo de Rotura del grupo de 41 piezas.

A la vista de los resultados obtenidos, los MOEd tienen un valor medio comprendido entre 5233,77 MPa y 6599,1 MPa; exceptuando el MOE según la norma UNE EN 408:2011 que tiene un valor medio más bajo a los demás, 3100,1 MPa. El valor medio del MOR es de 28,49 MPa. El MOEd que tiene un menor coeficiente de variación es el de ultrasonidos Fakopp directo 2, y el que mayor coeficiente de variación tiene es el de ultrasonidos Fakopp indirecto. El MOR presenta un coeficiente de variación de 15,71% y no presenta normalidad ya que el sesgo estandarizado no se encuentra dentro del intervalo [-2,+2].

En estudios anteriores el valor medio del MOE fue de 4118,94 MPa y 4315,08 MPa (ZHAO-HUA et al., 1986); 3523,42 MPa y 2651,53 MPa (KAYMAKCI, 2010); o 3883,14 MPa (KAYMAKCI et al., 2013). Por otra parte la Resistencia a Flexión Estática alcanza valores medios de 35,76 MPa y 23,98 MPa (KAYMAKCI, 2010); o 35,79 MPa (KAYMAKCI et al., 2013).

Haciendo referencia a los MOEd para el grupo de 41 piezas y sus respectivas pruebas de normalidad, “no podemos decir que su distribución no sea normal”, por lo cual asumimos la normalidad de la población. Para cada uno de los MOEd calculados se muestran a continuación sus respectivos gráficos de caja y bigotes.





5.1.3. Módulos de elasticidad y módulos de rotura con 12 piezas.

En el presente apartado se muestra un análisis descriptivo de todos los Módulos de Elasticidad (MOE) y el Módulo de Rotura (MOR) calculados para el grupo de 12 piezas.

Tabla 12. Módulos de elasticidad dinámicos (MPa) de *Paulownia elongata*. n: número de muestras, CV: coeficiente de variación, máx: valor máximo, mín: valor mínimo.

Módulos de elasticidad (MPa)	n	media	CV%	máx	mín	Normalidad*
MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1	12	5249,96	9,556	5839,77	4190,08	SI
MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2	12	5297,36	6,945	5937,5	4562,36	SI
MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio	12	5273,66	7,826	5888,63	4376,22	SI
MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1	12	5216,72	7,742	5839,77	4320,00	SI
MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2	12	5166,71	8,349	5633,32	4254,3	SI
MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio	12	5191,72	7,806	5700,19	4287,15	SI
MOEd ultrasonidos Sylvatest directo	12	6588,59	7,327	7398,59	5617,73	SI
MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1	12	6464,66	7,990	7130,79	5333,33	SI
MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2	12	6382,71	8,331	7262,84	5472,76	SI
MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio	12	6423,69	8,063	7196,82	5403,05	SI
MOEd vibraciones longitudinales	12	5325,99	9,615	6454,15	4409,6	SI
MOEd empotrada-libre horizontal	12	6104,82	4,324	6576,12	5500,0	SI
MOEd empotrada-libre vertical	12	6100,65	3,934	6497,58	5673,13	SI
MOEd empotrada-libre medio	12	6102,74	3,998	6536,85	5586,57	SI
MOEd biapoyada horizontal	12	5228,66	11,769	6354,31	4643,65	SI
MOEd biapoyada vertical	12	5082,80	10,443	6225,53	4456,95	SI
MOEd biapoyada medio	12	5155,73	10,927	6289,92	4552,77	SI
MOEd "Ibertest" un punto de carga centro	12	4426,17	7,070	5168,6	4046,2	SI

* Los test y gráficos de normalidad se encuentran en el Anexo. 8.1.3. Análisis de normalidad para Módulos de Elasticidad y Módulo de Rotura del grupo de 12 piezas.

Tabla 13. Módulo de elasticidad (MPa) y Módulo de Rotura (MPa) de *Paulownia elongata*. n: número de muestras, CV: coeficiente de variación, máx: valor máximo, mín: valor mínimo.

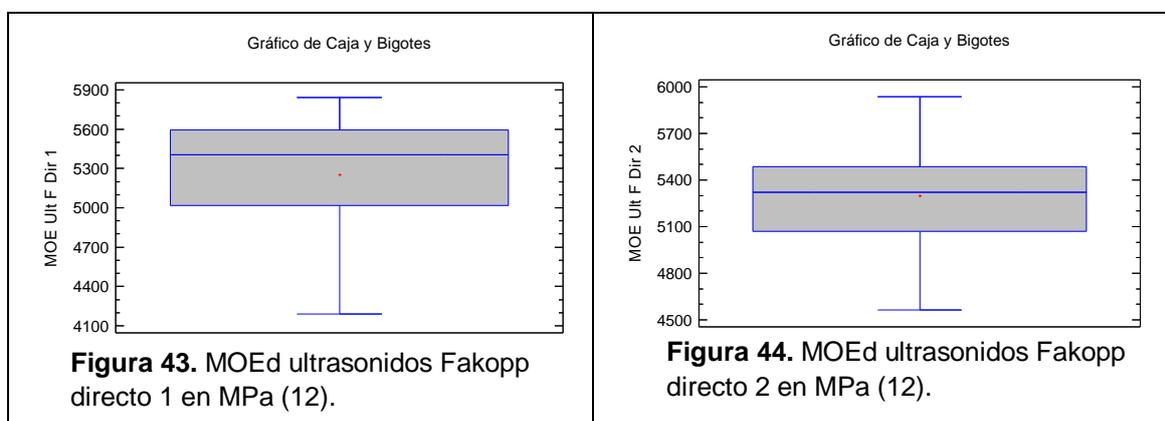
Valores UNE-EN 408:2011 (MPa)	n	media	CV%	máx	mín	Normalidad*
MOE	12	3089,26	10,480	3531,54	2488,16	SI
MOR	12	28,425	14,891	32,2	18,7	SI

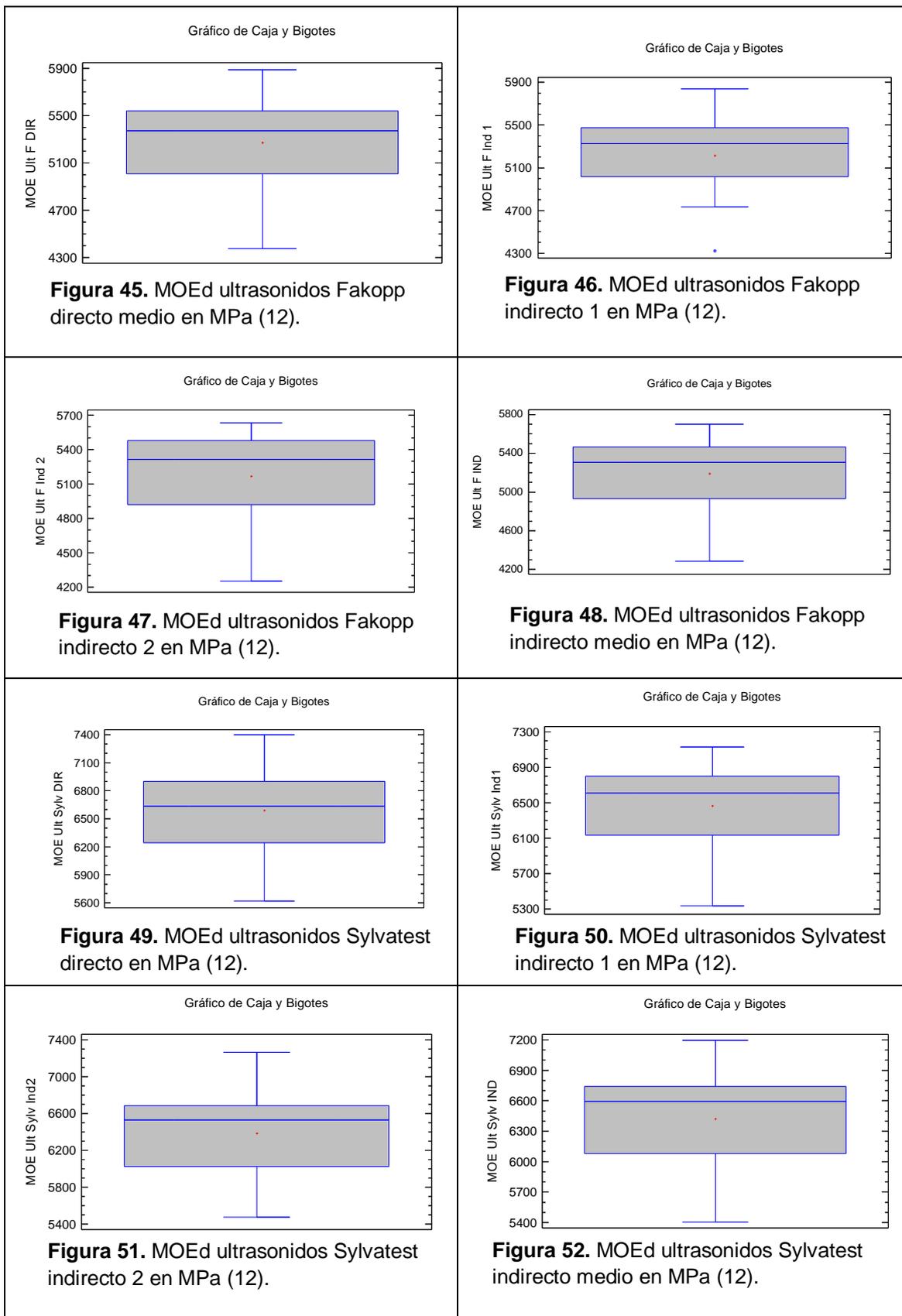
* Los test y gráficos de normalidad se encuentran en el Anexo. 8.1.3. Análisis de normalidad para Módulos de Elasticidad y Módulo de Rotura del grupo de 12 piezas.

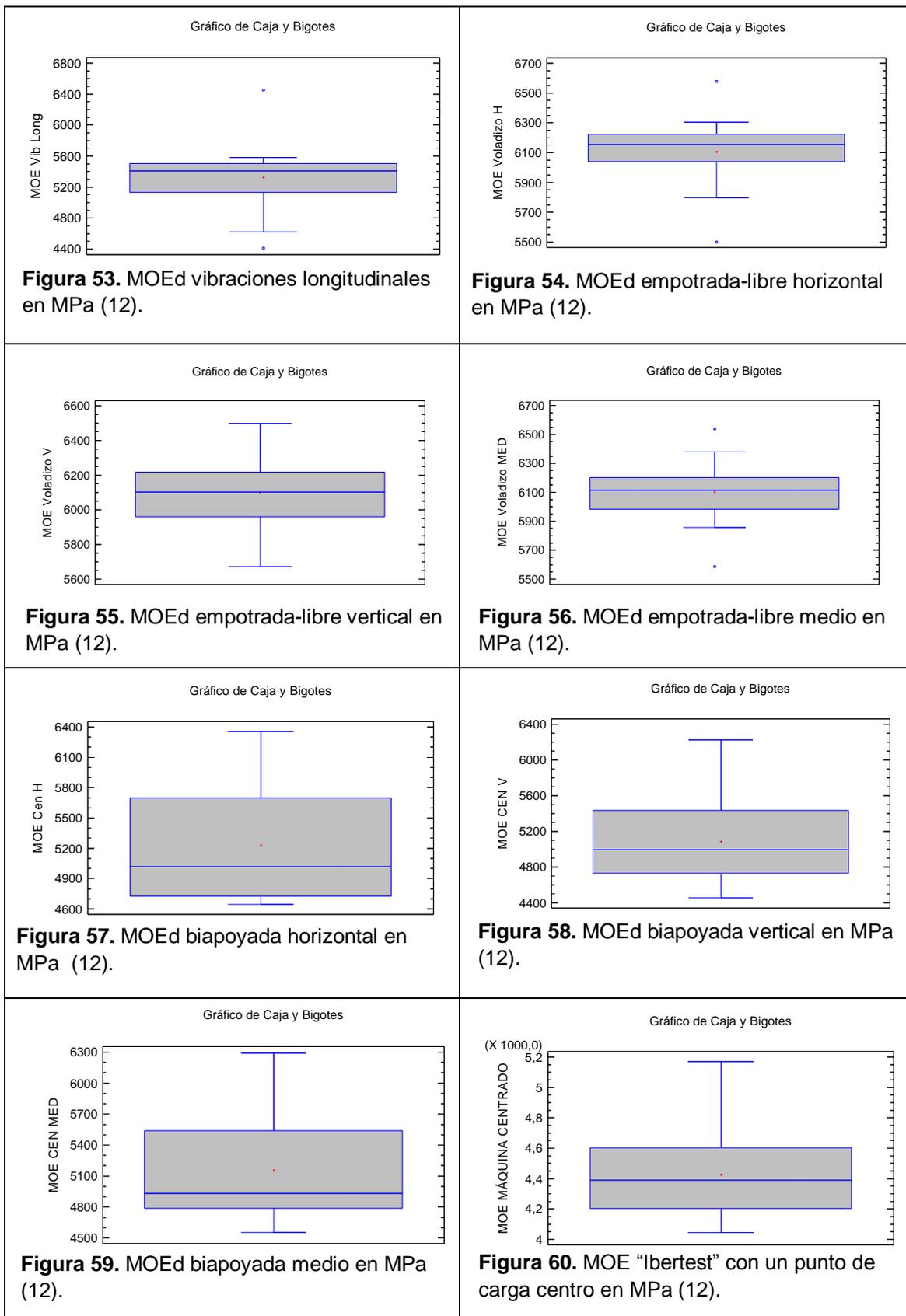
A la vista de los resultados obtenidos, los MOEd tienen un valor medio comprendido entre 5082,80 MPa y 6588,59 MPa; exceptuando el MOEd según la norma UNE EN 408:2011 que tiene un valor medio más bajo a los demás, 3089,26 MPa; y el MOEd obtenido con la máquina “Ibertest” con un punto de carga en el centro, el cual alcanza un valor de 4426,17 MPa. El valor medio del MOR es de 28,425 MPa. Los MOEd que tienen un menor coeficiente de variación son los calculados con la viga empotrada-libre, es decir, el ensayo se realizó correctamente; y el que mayor coeficiente de variación tiene es el calculado con la viga con doble apoyo horizontal. El MOR presenta un coeficiente de variación más alto de 14,891%.

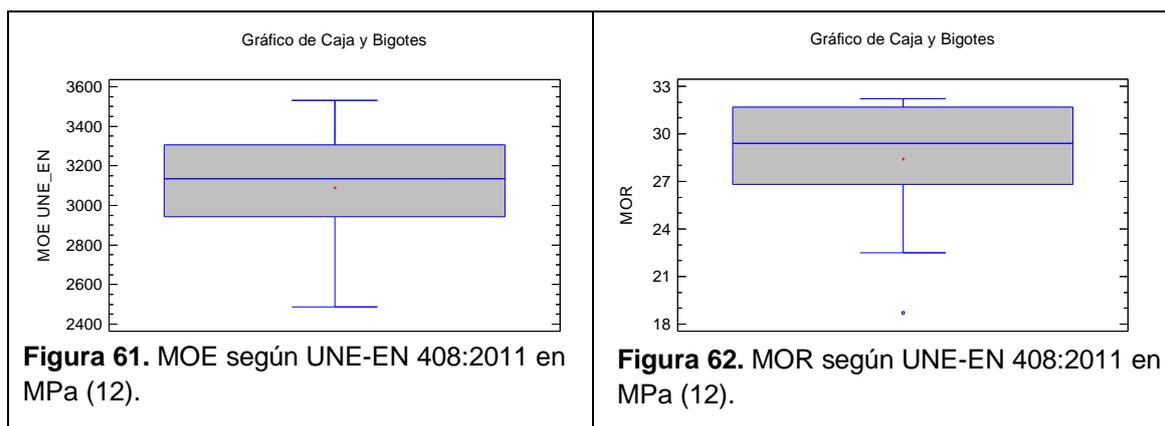
Como ha sido mencionado en el apartado anterior, en estudios anteriores el valor medio del MOE fue de 4118,94 MPa y 4315,08 MPa (ZHAO-HUA et al., 1986); 3523,42 MPa y 2651,53 MPa (KAYMAKCI, 2010); y 3883,14 MPa (KAYMAKCI et al., 2013). Por otra lado la Resistencia a Flexión Estática alcanza valores medios de 35,76 MPa y 23,98 MPa (KAYMAKCI, 2010); o 35,79 MPa (KAYMAKCI et al., 2013).

Haciendo referencia a los MOEd y el MOR para el grupo de 12 piezas y sus respectivas pruebas de normalidad, “no podemos decir que su distribución no sea normal”, por lo cual asumimos la normalidad de la población. Para cada una de las propiedades físicas estudiadas se muestran a continuación sus respectivos gráficos de caja y bigotes.









5.1.4. Propiedades físicas de *Paulownia elongata* vs *Pinus pinaster*.

Para tratar de situar los valores de las propiedades físicas y elastomecánicas de la *Paulownia elongata*, se muestran las propiedades de una especie ampliamente conocida, como es *Pinus pinaster*. Sus propiedades han sido obtenidas por el laboratorio de maderas del Campus universitario “La Yutera”, bajo las mismas normas y condiciones que lo fueron las de las *Paulownia*.

Tabla 14. Propiedades físicas del *Pinus pinaster*.

Propiedad física	n	media	CV%	máx	mín
Densidad anhidra (g/cm ³)	15	0,482	8,825	0,556	0,416
Densidad básica (g/cm ³)	15	0,437	10,384	0,550	0,386
Densidad normal (g/cm ³)	15	0,514	8,409	0,601	0,447
Contracciones (%)					
Longitudinal	15	0,456	37,292	0,8	0,162
Radial	15	3,502	46,537	6,161	0,478
Tangencial	15	6,566	26,527	9,346	2,871
Volumétrica	15	9,798	19,908	11,295	6,083

Se puede observar en los gráficos 63 a 69, las importantes diferencias existentes entre las propiedades físicas del *Pinus pinaster* y las de la *Paulownia elongata*, se muestran a continuación los gráficos de caja y bigotes obtenidos con las propiedades físicas de las dos especies.

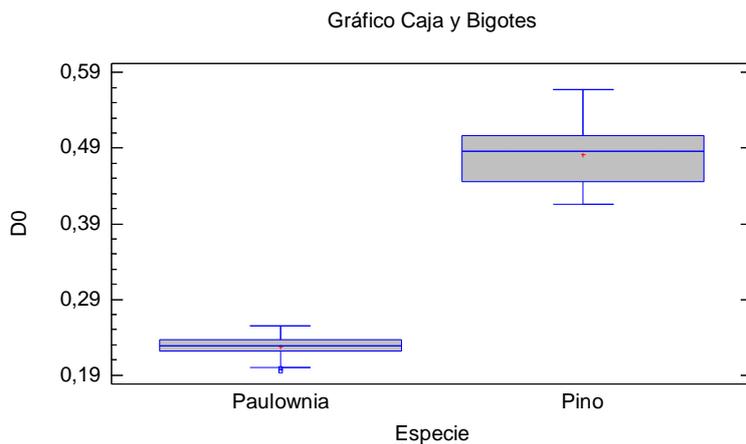


Figura 63. Densidad anhidra paulownia vs pino (g/cm^3).

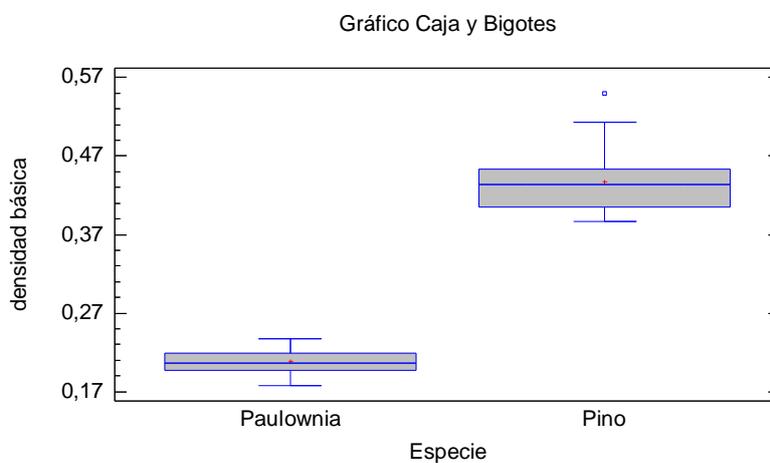


Figura 64. Densidad básica paulownia vs pino (g/cm^3).

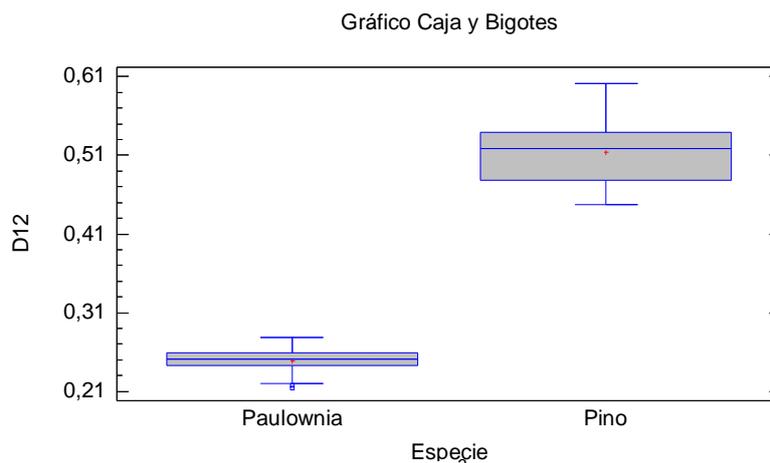


Figura 65. Densidad normal paulownia vs pino (g/cm^3).

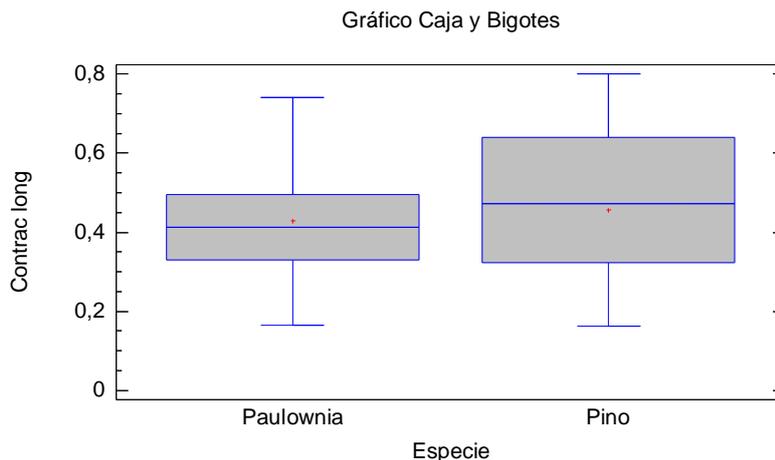


Figura 66. Contracción longitudinal paulownia vs pino (%).

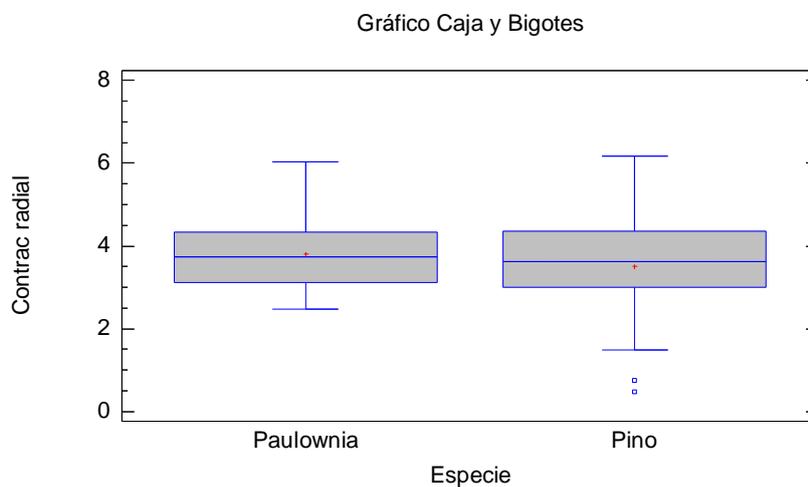


Figura 67. Contracción radial paulownia vs pino (%).

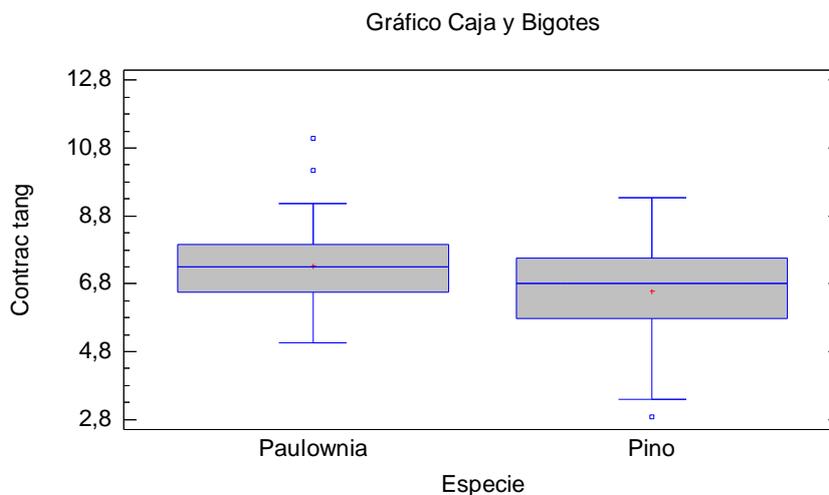


Figura 68. Contracción tangencial paulownia vs pino (%).

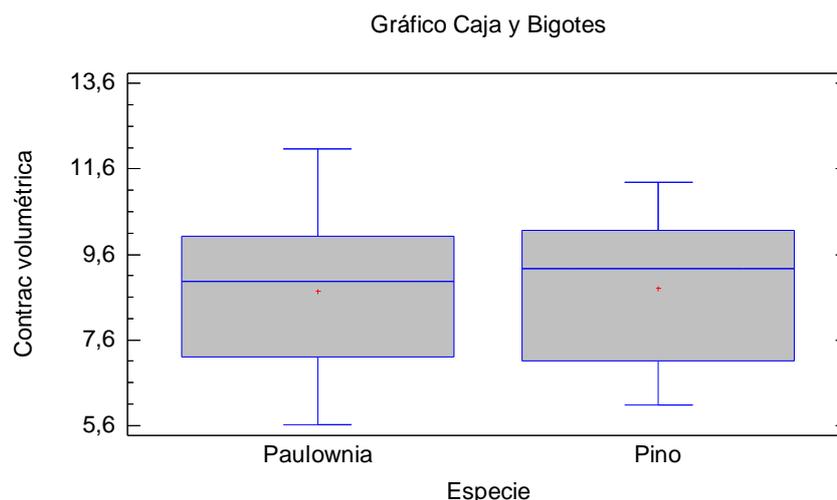


Figura 69. Contracción volumétrica paulownia vs pino (%).

A la vista de los resultados obtenidos se puede decir que la densidad del *Pinus pinaster* se encuentra muy por encima de la de la *Paulownia elongata*, En cuanto a contracciones, las longitudinales, radiales, tangenciales y volumétricas tiene valores similares en ambas especies, no podemos decir que existan diferencias.

5.2. Análisis comparativo

5.2.1. Análisis comparativo de los módulos de elasticidad para el grupo de 41 piezas.

El método utilizado para la comparación de los módulos de elasticidad obtenidos en los ensayos realizados sobre el grupo de 41 piezas, fue el de muestras pareadas. Las comparaciones han sido realizadas sobre las poblaciones formadas por:

5.2.1.1. MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1 y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2

Los resultados obtenidos de la comparación por pares entre MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto1 y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2 se exponen en la tabla 15.

Tabla 15. Resumen estadístico para la población formada por los MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1 y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2 (41).

Número de observaciones	41
Promedio	38,206
Desviación Estándar	178,609
Coefficiente de Variación	467,49%
Mínimo	-289,669
Máximo	344,826
Rango	634,495
Sesgo Estandarizado	-0,202
Curtosis Estandarizada	-1,060

El intervalo de confianza al 95% para la media resultó ser: 38,206 +/- 56,376 [-18,170; 94,582], en el que se encuentra el valor 0, por lo que se puede concluir que no existen diferencias significativas entre los puntos de ensayo.

5.2.1.2. MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1 y MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2

Los resultados obtenidos de la comparación por pares entre MOEd ultrasonidos Fakopp directo1 y MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2 se exponen en la tabla 16.

Tabla 16. Resumen estadístico para la población formada por los MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1 y MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2 (41).

Número de observaciones	41
Promedio	-47,084
Desviación Estándar	337,167
Coefficiente de Variación	-716,09%
Mínimo	-789,567
Máximo	1122,03
Rango	1911,6
Sesgo Estandarizado	1,915
Curtosis Estandarizada	3,399

El intervalo de confianza al 95% para la media resultó ser: -47,084 +/- 106,423 [-153,507; 59,339], en el que se encuentra el valor 0, por lo que se puede concluir que no existen diferencias significativas entre los puntos de ensayo.

5.2.1.3. MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1 y MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2

Los resultados obtenidos de la comparación por pares entre MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto1 y MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2 se exponen en la tabla 17.

Tabla 17. Resumen estadístico para la población formada por los MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1 y MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2 (41).

Número de observaciones	41
Promedio	-19,958
Desviación Estándar	200,628
Coefficiente de Variación	-1005,27%
Mínimo	-480,832
Máximo	473,785
Rango	954,617
Sesgo Estandarizado	-0,430
Curtosis Estandarizada	0,376

El intervalo de confianza al 95% para la media resultó ser: -19,958 +/- 63,326 [-83,284; 43,368], en el que se encuentra el valor 0, por lo que se puede concluir que no existen diferencias significativas entre los puntos de ensayo.

5.2.1.4. MOEd ultrasonidos Sylvatest directo y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio

Los resultados obtenidos de la comparación por pares entre MOEd ultrasonidos Sylvatest directo y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio se exponen en la tabla 18.

Tabla 18. Resumen estadístico para la población formada por los MOEd ultrasonidos Sylvatest directo y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio (41).

Número de observaciones	41
Promedio	121,738
Desviación Estándar	138,216
Coefficiente de Variación	113,53%
Mínimo	-127,015
Máximo	433,059
Rango	560,074
Sesgo Estandarizado	1,493
Curtosis Estandarizada	0,230

El intervalo de confianza al 95% para la media resultó ser: 121,738 +/- 43,626 [78,112; 165,365], en el que no se encuentra el valor 0, por lo que se puede concluir que existen diferencias significativas entre los métodos de ensayo.

5.2.1.5. MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio y MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio

Los resultados obtenidos de la comparación por pares entre MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio y MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio se exponen en la tabla 19.

Tabla 19. Resumen estadístico para la población formada por los MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio y MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio (41).

Número de observaciones	41
Promedio	58,619
Desviación Estándar	123,609
Coficiente de Variación	210,87%
Mínimo	-257,756
Máximo	365,686
Rango	623,442
Sesgo Estandarizado	0,160
Curtosis Estandarizada	0,906

El intervalo de confianza al 95% para la media resultó ser: 58,619 +/- 40,069 [18,550; 98,689], en el que no se encuentra el valor 0, por lo que se puede concluir que existen diferencias significativas entre los métodos de ensayo.

5.2.1.6. MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo

Los resultados obtenidos de la comparación por pares entre MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo se exponen en la tabla 20.

Tabla 20. Resumen estadístico para la población formada por los MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).

Número de observaciones	41
Promedio	-1283,05
Desviación Estándar	198,79
Coefficiente de Variación	-15,49%
Mínimo	-1673,26
Máximo	-723,211
Rango	950,047
Sesgo Estandarizado	2,139
Curtosis Estandarizada	2,201

El intervalo de confianza al 95% para la media resultó ser: -1283,05 +/- 62,746 [-1345,8; -1220,3], en el que no se encuentra el valor 0, por lo que se puede concluir que existen diferencias significativas entre los métodos de ensayo.

5.2.1.7. MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio

Los resultados obtenidos de la comparación por pares entre MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio y MOEd ultrasonidos Sylvatest Indirecto medio se exponen en la tabla 21.

Tabla 21. Resumen estadístico para la población formada por los MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio (41).

Número de observaciones	41
Promedio	-1216,68
Desviación Estándar	210,657
Coefficiente de Variación	-17,31%
Mínimo	-1657,35
Máximo	-610,592
Rango	1046,76
Sesgo Estandarizado	0,940
Curtosis Estandarizada	0,768

El intervalo de confianza al 95% para la media resultó ser: -1216,68 +/- 68,287 [-1284,96; -1148,39], en el que no se encuentra el valor 0, por lo que se puede concluir que existen diferencias significativas entre los métodos de ensayo.

5.2.1.8. MOEd vibraciones longitudinales y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo

Los resultados obtenidos de la comparación por pares entre MOEd vibraciones longitudinales y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo se exponen en la tabla 22.

Tabla 22. Resumen estadístico para la población formada por los MOEd vibraciones longitudinales y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).

Número de observaciones	41
Promedio	-1363,39
Desviación Estándar	263,934
Coefficiente de Variación	-19,36%
Mínimo	-2030,75
Máximo	-832,81
Rango	1197,94
Sesgo Estandarizado	-1,213
Curtosis Estandarizada	0,335

El intervalo de confianza al 95% para la media resultó ser: -1363,39 +/- 83,308 [-1446,7; -1280,08], en el que no se encuentra el valor 0, por lo que se puede concluir que existen diferencias significativas entre los métodos de ensayo.

5.2.1.9. MOEd vibraciones longitudinales y MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio

Los resultados obtenidos de la comparación por pares entre MOEd vibraciones longitudinales y MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio se exponen en la tabla 23.

Tabla 23. Resumen estadístico para la población formada por los MOEd vibraciones longitudinales y MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).

Número de observaciones	41
Promedio	-80,338
Desviación Estándar	253,625
Coefficiente de Variación	-315,69%
Mínimo	-751,408
Máximo	565,518
Rango	1316,93
Sesgo Estandarizado	-1,014
Curtosis Estandarizada	0,956

El intervalo de confianza al 95% para la media resultó ser: -80,339 +/- 80,054 [-160,393; -0,284], en el que no se encuentra el valor 0, por lo que se puede concluir que existen diferencias significativas entre los métodos de ensayo.

5.2.1.10. MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio

Los resultados obtenidos de la comparación por pares entre MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio se exponen en la tabla 24.

Tabla 24. Resumen estadístico para la población formada por los MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).

Número de observaciones	41
Promedio	-2234,02
Desviación Estándar	332,512
Coefficiente de Variación	-14,88%
Mínimo	-2861,26
Máximo	-1582,57
Rango	1278,68
Sesgo Estandarizado	-0,672
Curtosis Estandarizada	-0,962

El intervalo de confianza al 95% para la media resultó ser: -2234,02 +/- 106,343 [-2340,36; -2127,67], en el que no se encuentra el valor 0, por lo que se puede concluir que existen diferencias significativas entre los métodos de ensayo.

5.2.1.11. MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo

Los resultados obtenidos de la comparación por pares entre MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo se exponen en la tabla 25.

Tabla 25. Resumen estadístico para la población formada por los MOEd según UNE-EN 408:2011 y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).

Número de observaciones	41
Promedio	-3519,32
Desviación Estándar	422,659
Coefficiente de Variación	-12,01%
Mínimo	-4534,51
Máximo	-2752,38
Rango	1782,13
Sesgo Estandarizado	-0,561
Curtosis Estandarizada	-0,282

El intervalo de confianza al 95% para la media resultó ser: -3519,32 +/- 135,173 [-3654,49; -3384,15], en el que no se encuentra el valor 0, por lo que se puede concluir que existen diferencias significativas entre los métodos de ensayo.

5.2.1.12. MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd vibraciones longitudinales

Los resultados obtenidos de la comparación por pares entre MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd vibraciones longitudinales se exponen en la tabla 23.

Tabla 26. Resumen estadístico para la población formada por los MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd vibraciones longitudinales (41).

Número de observaciones	41
Promedio	-2153,0
Desviación Estándar	369,364
Coefficiente de Variación	-17,16%
Mínimo	-3181,44
Máximo	-1285,03
Rango	1896,41
Sesgo Estandarizado	-1,361
Curtosis Estandarizada	1,022

El intervalo de confianza al 95% para la media resultó ser: -2153,0 +/- 118,128 [-2271,13; -2034,88], en el que no se encuentra el valor 0, por lo que se puede concluir que existen diferencias significativas entre los métodos de ensayo.

Las pruebas de hipótesis y los gráficos de dispersión correspondientes a cada uno de los análisis comparativos realizados se muestran en el Anexo. 8.2.1. Análisis comparativo de los módulos de elasticidad dinámicos para el grupo de 41 piezas.

5.2.2. Análisis comparativo de los módulos de elasticidad para el grupo de 12 piezas.

Para comparar los Módulos de Elasticidad (MOE) obtenidos de los ensayos realizados para el grupo de 12 piezas, se realiza una comparación múltiple con todos ellos.

En primer lugar para la justificación de la normalidad se observa la tabla 27.

Tabla 27. Sesgo estandarizado y curtosis estandarizada comparación de varios Módulos de Elasticidad (12).

Módulos de Elasticidad	Sesgo Estandarizado	Curtosis Estandarizada
MOEd biapoyada medio	1,381	-0,103
MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio	-1,246	0,531
MOEd ultrasonidos Sylvatest directo	-0,679	0,195
MOEd empotrada-libre medio	-0,556	0,827
MOE según UNE-EN 408:2011	-1,040	0,021

En el resumen estadístico se observa que el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada para cada MOE se encuentran dentro del intervalo [-2;+2]; “no podemos decir que su distribución no sea normal”, por lo cual asumimos la normalidad de la población.

Seguidamente se realiza la verificación de la varianza, homocedasticidad, mediante el test de Levene's, el cual se muestra en la tabla 28.

Tabla 28. Verificación de la varianza para comparación de varios Módulos de Elasticidad (12).

	Prueba	Valor-P
Levene's	1,36543	0,257846

Como se asume la normalidad y se verifica la varianza, p-valor para Levene's mayor que 0,05, se recurre al análisis de la varianza (ver Tabla 29),

Tabla 29. Tabla ANOVA para comparación de varios Módulos de Elasticidad (12).

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	8,63629E7	4	2,15907E7	121,95	0,0000
Intra grupos	9,73718E6	55	177040,		
Total (Corr.)	9,61001E7	59			

Como el p-valor es menor a 0,05, se puede decir que estadísticamente existen diferencias significativas entre las 5 poblaciones del MOE al 95% de confianza.

Para determinar que medias son estadísticamente diferentes de otras se realiza la prueba de Rango Múltiple de Tukey HSD, tabla 30 y figura 70.

Tabla 30. Prueba de rango múltiple de tukey Módulos de Elasticidad (12).

Módulos de Elasticidad	Casos	Media	Grupos Homogéneos
MOE según UNE-EN 408:2011	12	3089,26	X
MOEd biapoyada medio	12	5155,73	X
MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio	12	5273,66	X
MOEd empotrada-libre medio	12	6102,74	X
MOEd ultrasonidos Sylvatest directo	12	6588,59	X

Medias y 95,0% de Tukey HSD

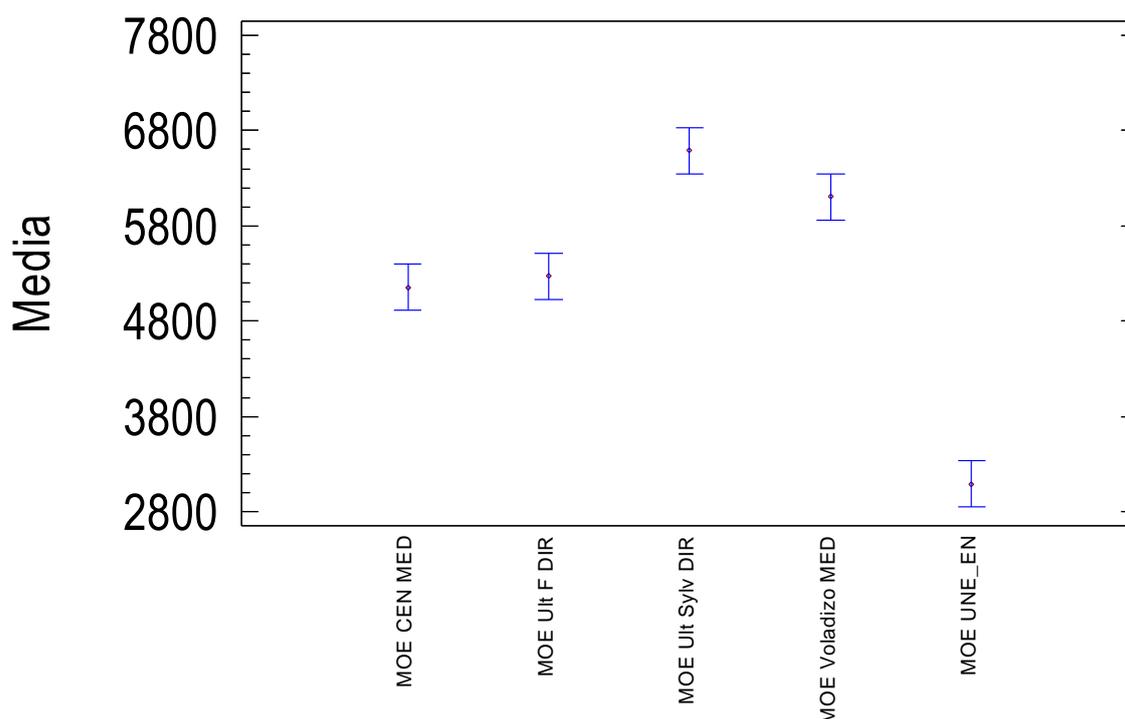


Figura 70. Gráfica de medias de Tukey para Módulos de Elasticidad (12).

Con los resultados obtenidos en la prueba de rango múltiple de tukey se observa que existen diferencias significativas entre todos los MOE comparados, excepto para el MOEd biapoyada y el MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio que no presentan diferencia significativa.

5.3. Funciones de predicción

En este punto se trata de observar las relaciones que existen entre cada uno de los Módulos de Elasticidad dinámicos calculados con el obtenido según la norma UNE-EN 404:2011. A continuación se muestran las regresiones simples realizadas con el MOE

según UNE-EN como variable dependiente y el resto de MOEd obtenidos en los diferentes ensayos como regresores, tabla 31.

Tabla 31. Regresiones simples de MOE según UNE-EN 408:2011 con el resto de MOEd calculados (41).

Grupo de 41 piezas				
Regresor	Pendiente (a)	Intercepto (b)	Coefficiente de correlación	R ² ajustado (%)
MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio	0,594	-74,265	0,677	44,457
MOEd ultrasonidos Sylvatest directo	0,448	135,132	0,647	40,379
MOEd vibraciones longitudinales	0,522	357,185	0,657	41,663
Grupo de 12 piezas				
Regresor	Pendiente (a)	Intercepto (b)	Coefficiente de correlación	R ² ajustado
MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio	0,476	581,077	0,606	30,434
MOEd ultrasonidos Sylvatest directo	0,375	619,725	0,559	24,364
MOEd vibraciones longitudinales	0,283	1583,43	0,447	12,002
MOEd empotrada-libre medio	0,905	-2435,82	0,682	41,211
MOEd biapoyada medio	-0,013	3155,68	-0,022	-9,945
MOE "Ibertest" con un punto de carga centro	0,449	1100,73	0,434	10,744

A la vista de los resultados obtenidos se puede decir que para el grupo de 41 piezas los MOEd que han actuado como "regresor" se relacionan con el MOE según UNE-EN 408:2011 de manera análoga, siendo MOEd ultrasonidos Fakopp el que más se podría relacionar con este con un coeficiente de correlación de 0,677 y un R² ajustado de 44,46%.

Atendiendo al grupo de 12 piezas los MOEd que más relación tienen con el MOE según UNE-EN 408:2011 es el obtenido mediante el ensayo con la viga empotrada-libre, con un coeficiente de correlación de 0,682 y un R² ajustado de 41,21%; Los MOEd de ultrasonidos Fakopp y Sylvatest y vibraciones longitudinales disminuyen su relación con MOE según UNE-EN 408:2011 al obtenerse con 12 piezas en lugar de 41 piezas. El MOEd que no tiene relación alguna con el calculado según la norma es el MOEd biapoyada medio.

En resumen, en los ensayos realizados con el grupo de 41 piezas, los MOEd que presentan de más a menos correlación con MOE según UNE-EN 408:2011 son: MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio seguido de MOEd vibraciones longitudinales y por último MOEd ultrasonidos Sylvatest directo. En los ensayos realizados con el grupo de 12 piezas los MOEd que presentan de más a menos correlación con MOE según UNE-EN 408:2011 son: MOEd empotrada-libre medio, MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio, MOEd ultrasonidos Sylvatest directo, MOEd vibraciones longitudinales y MOE “Ibertest” con un punto de carga centro; el MOEd biapoyada no presenta correlación.

Se muestran a continuación los gráficos de cada una de las regresiones realizadas.

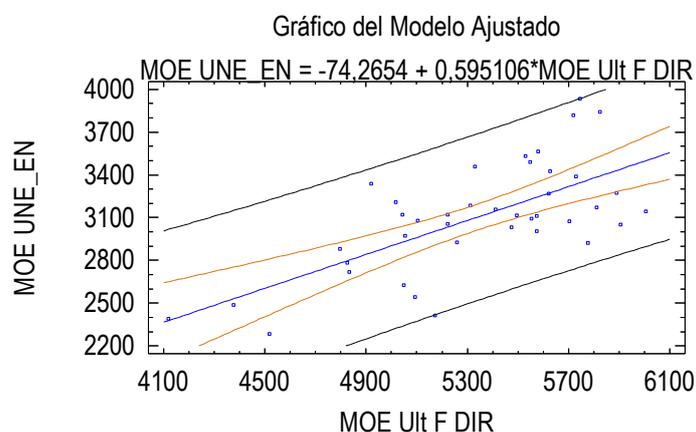


Figura 71. Regresión simple. MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).

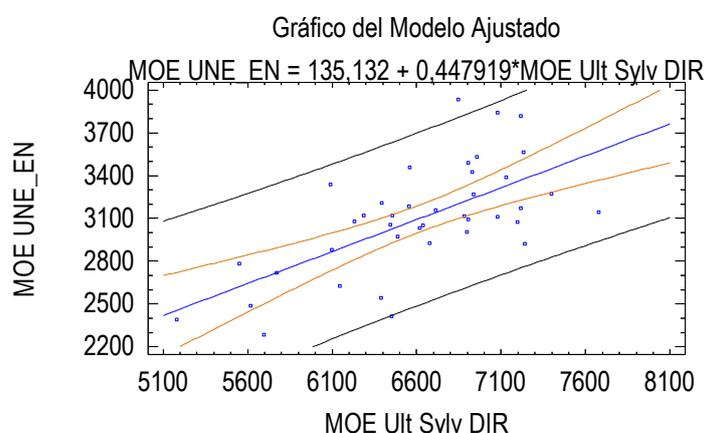


Figura 72. Regresión simple. MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).

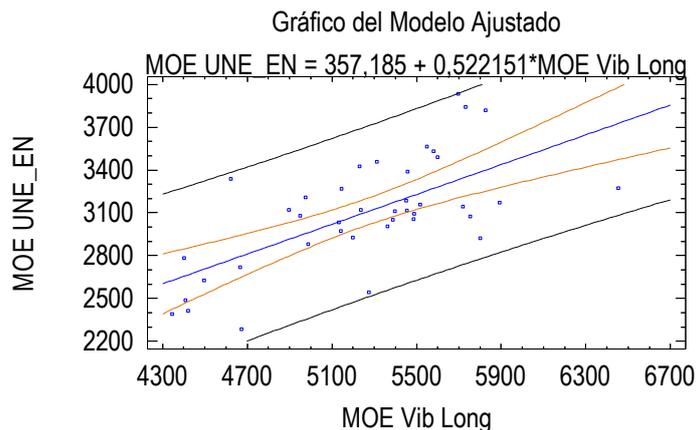


Figura 73. Regresión simple. MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (41).

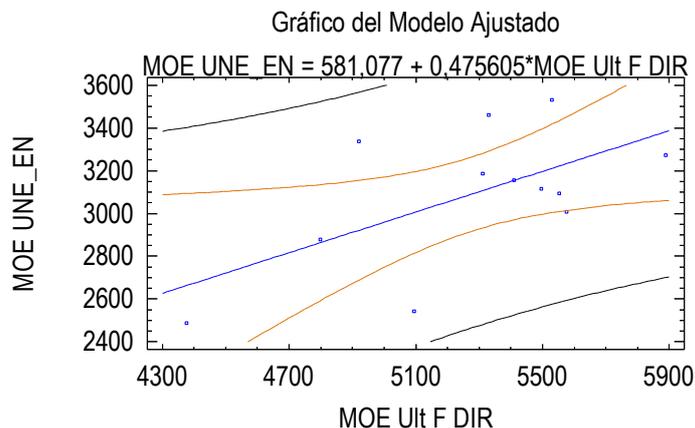


Figura 74. Regresión simple. MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (12).

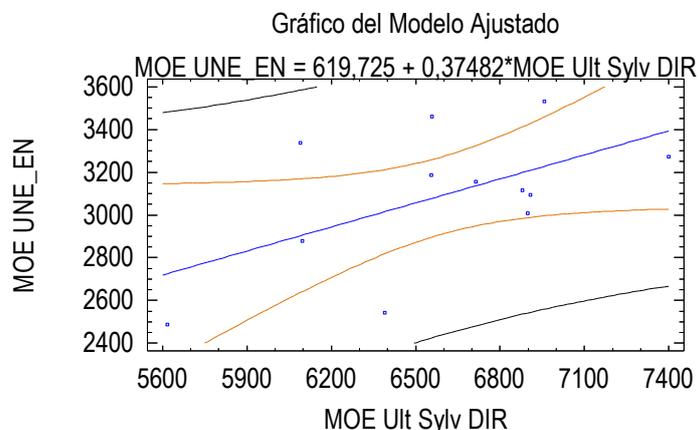


Figura 75. Regresión simple. MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (12).

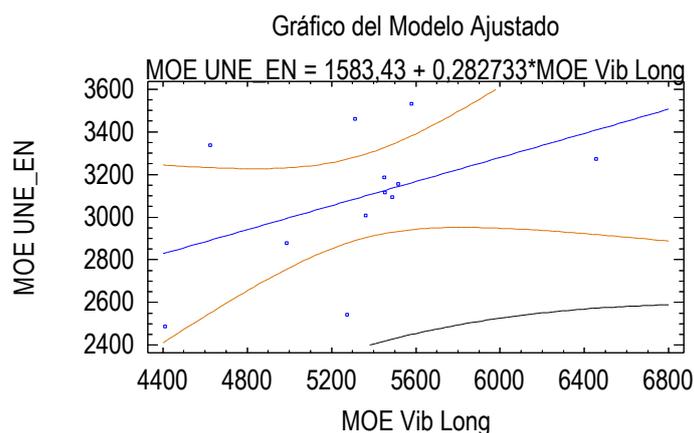


Figura 76. Regresión simple. MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (12).

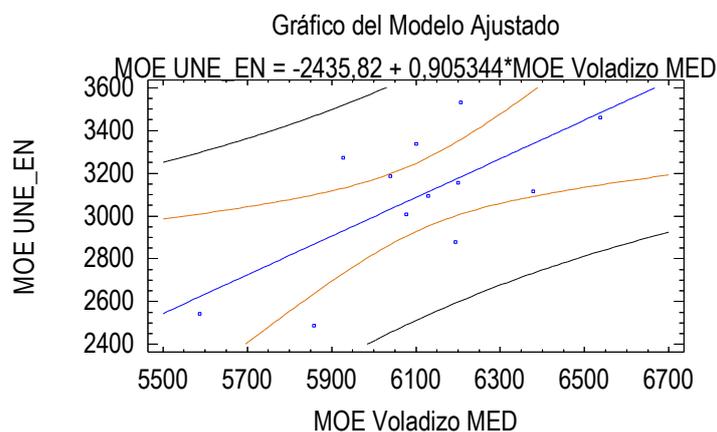


Figura 77. Regresión simple. MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd empotrada-libre medio (12).

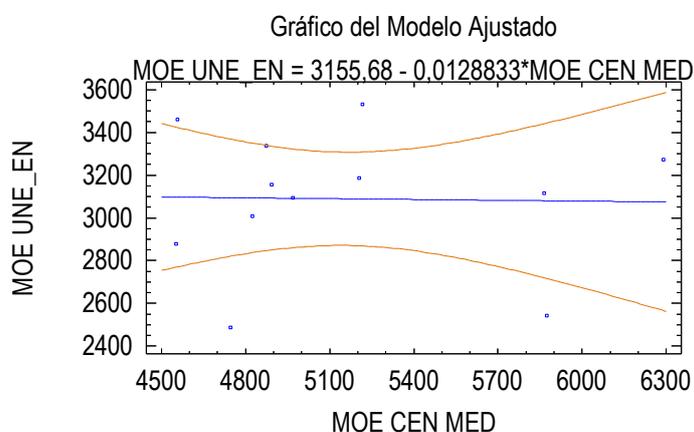


Figura 78. Regresión simple. MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd biapoyada medio (12).

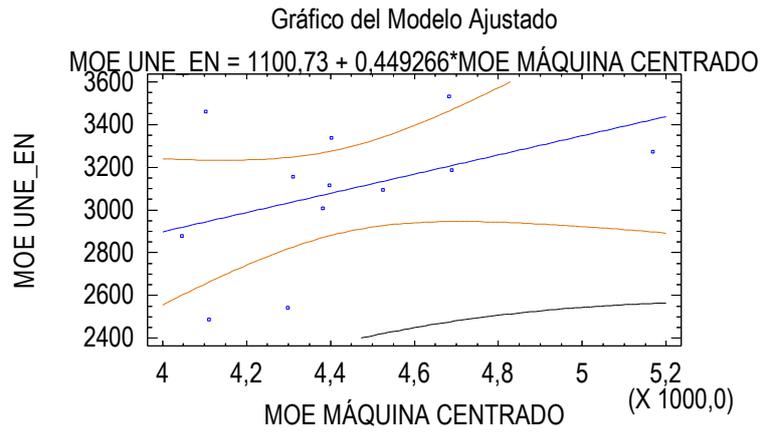


Figura 79. Regresión simple. MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd “Ibertest” con un punto de carga (12).

6. CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

A continuación se exponen las principales conclusiones obtenidas después de la realización del presente estudio.

La madera de *Paulownia elongata* en la actualidad es utilizada para uso ornamental y obtención de biomasa principalmente, siendo posible su uso para obtención de chapa y pulpa.

La cultura sobre la madera de esta especie y su cultivo es muy escasa en la actualidad, siendo la zona Asiática la que mayor conocimiento sobre la especie presenta.

En cuanto a la determinación de las propiedades físicas de la especie, se han obtenido los valores medios de densidad anhidra, densidad normal, densidad básica, contracción longitudinal, contracción radial, contracción tangencial y contracción volumétrica siendo, 0,227 g/cm³ la densidad anhidra media, 0,248 g/cm³ la densidad normal media, 0,209 g/cm³ la densidad básica media, 0,43 % la contracción longitudinal media, 3,81 % la contracción radial media, 7,33 % contracción tangencial media y 8,73 % la contracción volumétrica media. Observando que la mayor contracción se realiza en la medición tangencial, seguida de radial y finalmente longitudinal.

Atendiendo a la norma UNE 56.529.77, interpretación de resultados, la madera de *Paulownia elongata* se engloba dentro de las maderas ligeras, por su densidad, y presenta una contracción pequeña.

Al comparar las propiedades físicas de la madera de *Paulownia elongata* con las del *Pinus pinaster* se observa que los valores medios que toma la densidad son mayores para el *Pinus pinaster*, que posee una densidad normal de 0,514 g/cm³; los valores medios de las contracciones por el contrario son similares para las dos especies.

De los resultados obtenidos en los ensayos realizados con el grupo formado por 41 probetas se observa que los MOEd tienen un valor medio comprendido entre 5233,77 MPa y 6599,1 MPa; exceptuando el MOE según la norma UNE EN 408:2011 que tiene un valor medio más bajo a los demás, 3100,1 MPa. El valor medio del MOR es de 28,492 MPa.

Por otro lado, los resultados obtenidos en los ensayos realizados con el grupo formado por 12 probetas dan valores medios de MOEd comprendido entre 5082,80 MPa y 6588,59 MPa; exceptuando el MOEd según la norma UNE EN 408:2011 que tiene un valor medio más bajo a los demás, 3089,26 MPa; y el MOEd obtenido con la máquina "Ibertest" con un punto de carga en el centro, el cual alcanza un valor de 4426,17 MPa. El valor medio del MOR es de 28,425 MPa.

Una vez realizada la comparación por pares entre los MOEd y el MOE según la norma UNE-EN 408:2011 obtenidos con el grupo formado por 41 probetas se observa que existen diferencias significativas entre todos ellos.

Los valores medios de MOEd Sylvatest, MOEd Fakopp, MOEd de las vibraciones transversales y MOE según la norma UNE-EN 408:2011, obtenidos de los ensayos realizados con el grupo de 12 piezas, fueron comparados mediante el análisis de la varianza, indicando que existen diferencias significativas entre todos los MOE comparados, excepto para el MOEd biapoyada y el MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio que no presentan diferencia significativa.

Una vez realizadas las funciones de predicción se obtiene que, atendiendo al grupo de 41 piezas los MOEd que han actuado como "regresor" se relacionan con el MOE según UNE-EN 408:2011 de manera análoga, siendo MOEd ultrasonidos Fakopp el que más se podría relacionar con este con un coeficiente de correlación de 0,677 y un R^2 ajustado de 44,46%.

Atendiendo al grupo de 12 piezas los MOEd que más relación tienen con el MOE según UNE-EN 408:2011 es el obtenido mediante el ensayo con la viga empotrada-libre, con un coeficiente de correlación de 0,682 y un R^2 ajustado de 41,21%; Los MOEd de ultrasonidos Fakopp y Sylvatest y vibraciones longitudinales disminuyen su relación con MOE según UNE-EN 408:2011 al obtenerse con 12 piezas en lugar de 41 piezas. El MOEd que no tiene relación alguna con el calculado según la norma es el MOEd biapoyada medio

7. BIBLIOGRAFÍA

7. BIBLIOGRAFÍA

- AKYILDIZ, M. H. & KOL, S. H. (2010). Some Technological Properties and Uses Of *Paulownia* (*Paulownia Tomentosa* Steud.) Wood. **Journal of Environmental Biology**, 31, 351–355.
- ARRIAGA, F., PERAZA, F, ESTEBAN, M., BOBADILLA, I. & GARCÍA, F. (2002). **Intervención en estructuras de madera**. Ed. AITIM. Madrid.
- AYRILMIS, N. & KAYMAKCI, A. (2013). Fast growing biomass as reinforcing filler thermplastic composites: *Paulownia elongata* wood. **Industrial Crops and Products. Vol 43.**
- BLEVINS, R. (1975). **Formulas for Natural Frequency and Mode Shape**, Wiley, 1975.
- CAPARRÓS, S., DÍAZ, M. J., ARIZA, J., LÓPEZ, F. & JIMÉNEZ, L. (2008). New perspectives for *Paulownia fortunei* L. calorisation of the autohydrolysis and pulping processes. **Biorresource Technology. Vol 99. Issue 4.**
- CARBALLO, J., HERMOSO, E. & FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J. I.; 2009. Mechanical properties of structural maritime pine sawn timber from Galicia (*Pinus pinaster* Ait. ssp. *atlantica*)". **Invest Agrar: Sist Recur For (2009)** 18(2), 152-158.
- DOUMETT, S., LAMPERI, L., CHECCHINI, L., AZZARELLO, E., MUDNAI, S. & MANCUSO, S. (2008). Heavy metal distribution between contaminated soil and *Paulownia tomentosa*, in a pilot-scale assisted phytoremediation study: influence of didderent complexing agents. **Chemosphere. Volume 72. Issue 10.** 1481-1490.
- FAO (2001). **State of the World's Forest 2001**. Food and Agriculture Organisation of the United Nations. Roma.
- FAO (2010). **Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010**. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma.

- FAO (2014). **El estado de los bosques en el mundo 2014**. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma.
- FERNÁNDEZ-GOLFÍN SECO, J. I., DÍEZ BARRA, M. R. & HERMOSO PRIETO, E. (2000). Análisis y estado del arte de la técnica reclasificación mecánica por máquina de la madera aserrada estructural (Revisión). **Investigación Agraria**, 10 (1): 5-19.
- GIL SÁNCHEZ, L. & TORRE ANTÓN, M. (2007). **Atlas forestal de Castilla y León. Junta de Castilla y León**. Consejería de Medio Ambiente. Valladolid. 2 vols.: vol I 388 pp.; vol II 500 pp.
- GOIA ROSA DE OLIVEIRA, F., PLETZ, E. & SALES, A. (2002). Assessment of mechanical properties of wood using an Ultrasonic Technique. **13th International Symposium on Non destructive Testing of Wood**.
- ÍÑIGUEZ GONZÁLEZ, G., ARRIAGA MARTITEGUI, F. & ESTEBAN HERRERO, M. (2007). Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural. **Informes de la Construcción** 59(506): 97 - 105.
- JIMÉNEZ PERIS, F.J (1999). **La madera: propiedades básicas**. GET Grupo de Estudios Técnicos.
- KAYMAKCI, A., BEKTAS, I. & BAL, B. C. (2013). Some mechanical properties of paulownia (*Paulownia elongata*) wood. **International Caucasian Forestry Symposium**. Turkey. 917-919.
- KIAEI, M. (2012). Physical and Mechanical Properties of Paulownia Wood (*Paulownia fortunei*) in North Iran. **Middle-East Journal of Research**. 11(7): 964-968.
- LÓPEZ, F., PÉREZ, A., ZAMUDIO, M. A. M., DE ALVA, H. E. & GARCÍA, J. C. (2012). Paulownia as raw material for solid biofuel and cellulose pulp. **Biomass and Bioenergy**. Vol 45. 77-86.
- LÓPEZ DE ROMA, A., GUTIERREZ, A., ALVAREZ, H., BAONZA, M. V., DÍEZ, M. R., FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J. I., GONZÁLEZ, F., JIMÉNEZ, F. J., NAVARRETE, M.

- A., ORTIZ, J., SEOANE, I., ARANA, M. C., GUIJARRO, A., LÓPEZ DE ROMA, M. T. & GRACÍA DE CELA, J. L. (1991). **Propiedades y Tecnología de la madera de pino radiata del País Vasco**. MAPA. Monografías INIA nº 80, 241 pp.
- MADEJÓN, P., XIONG, J., CABRERA, F. & MADEJÓN, E. (2014). Quality of trace element contaminated soils amended with compost under fast growing tree *Paulownia fortunei* plantation. **Journal of Environment Management. Vol 144**. 176-185.
- MADEJÓN, P., DOMÍNGUEZ, M.T., DÍAZ, M.J. & MADEJÓN, E. (2016). Improving sustainability in the remediation of contaminated soils by the use of compost and energy valorization by *Paulownia fortunei*. **Science of The Total Environment. Vol 539**. 401-409.
- MARTÍN VICENTE, R. (2009). **Determinación de la capacidad resistente en madera estructural de Populus x euramericana I-214 mediante ultrasonidos**. Trabajo Fin de Carrera. E.T.S.II.Agrarias, Palencia. Universidad de Valladolid.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (1997-2007). **Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3)**. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ifn3.aspx>
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (2011). **Anuario de estadística forestal 2011**. Disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/estadisticas/forestal_anuario_2011.aspx
- MONTERO, G. & SERRADA, R. (2013). **La situación de los bosques y el sector forestal en España – ISFE 2013**. Edit. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Lourizán (Pontevedra).
- RECUERO, M. (1999). **Ingeniería Acústica**. Ed. Parafino. Madrid.
- ROJAS GUTIÉRREZ, A.M. (2008). Paulownia: Valioso Género que Conquista el Mercado. **Revista MM**. 9-15.

- SANDOZ, J. L. (1989). Grading of construction timber by ultrasound. **Wood Science and Technology**, 23: 95-108.
- SECF. 2010. **Situación de los bosques y del sector forestal en España. Informe 2010**. 300 pp. Disponible en: <http://www.secforestales.org/content/informe-isfe>
- SOBHANI, M., KHAZAEIAN, A., TABARSA, T. & SHAKERI, A. (2011). Evaluation of physical and mechanical properties of paulownia wood core and fiberglass surfaces sándwich panel. **Key Engineering Materials. Vols 471-472**. pp 85-90.
- UNE-EN 408:2011. “*Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*”.
- UNE 56-529-77. ‘*Determinación del contenido en humedad por desecación hasta el estado anhidro*’. AENOR.
- UNE 56-531-77. “*Determinación del peso específico*”. AENOR.
- UNE 56-533-77. “*Determinación de las contracciones lineal y volumétrica*”. AENOR.
- UNE-EN 384:2010. “*Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad*”. AENOR.
- UNE-EN 56544:2011. “*Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas*”.
- VIGNOTE PEÑA, S. & MARTÍNEZ ROJAS, I. (2006). **Tecnología de la madera**. 3ª Edición. Ed. Mundi Prensa. 678 pp.
- YORGUN, S. & YILDI, D. (2015). Slow pyrolysis of paulownia wood: effects of pyrolysis parameters on product yields and bio-oil characterization. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Vol 114**. 68-78.
- ZHAO-HUA, Z., CHING-JU, C., XIN-YU L. & YAO GAO, X. (1986). **Paulownia in China: cultivation and utilization**. Chinese Academy of Forestry, Beijing. China.

Páginas web consultadas:

<http://paulownianepal.blogspot.com.es/2013/07/paulownia-tree-history-and-description.html>. [Diciembre 2015].

<http://www.agrodesierto.com/paulownia.html>. [Diciembre 2015].

<http://www.proyectosfindecarrera.com/definicion/Fenda.htm>. [Enero2016].

<http://paulownias.es/paulownia-cultivo.html>. [Enero2016].

<http://www.banrepcultural.org/node/65127>. [Enero2016].

<http://plantarpaulownias.blogspot.com.es/2013/11/resistencias-de-las-distintas.html>. [Febrero 2016].

<http://paulownia-newerafarms.blogspot.com.es/>. [Marzo 2016].

8. ANEXO

8. ANEXO

8.1. Análisis descriptivo

8.1.1. Análisis de normalidad para propiedades físicas.

Análisis de normalidad de Densidad anhidra

Tabla 32. Sesgo y curtosis de la densidad anhidra.

Sesgo Estandarizado	-1,09131
Curtosis Estandarizada	0,103769

Tabla 33. Pruebas de normalidad para densidad anhidra.

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	9,16	0,607126
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,958468	0,398053

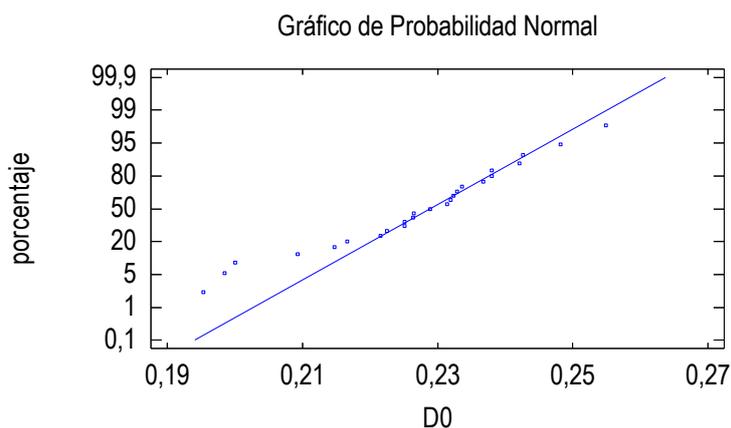


Figura 80. Gráfico de probabilidad normal para densidad anhidra.

Análisis de normalidad de densidad básica

Tabla 34. Sesgo y curtosis de la densidad básica.

Sesgo Estandarizado	-0,747381
Curtosis Estandarizada	-0,494137

Tabla 35. Pruebas de normalidad para densidad básica.

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	10,28	0,505391
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,963187	0,493581

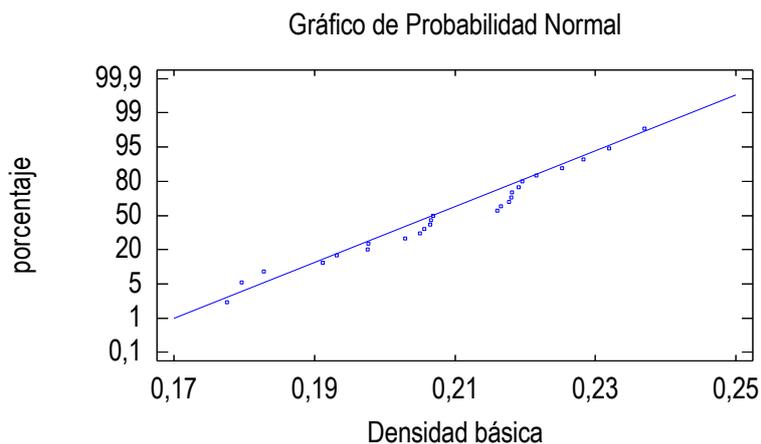


Figura 81. Gráfico de probabilidad normal para densidad básica.

Análisis de normalidad de densidad normal

Tabla 36. Sesgo y curtosis de la densidad normal.

Sesgo Estandarizado	-1,10635
Curtosis Estandarizada	0,108238

Tabla 37. Pruebas de normalidad para densidad normal.

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	9,16	0,607126
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,95795	0,38842

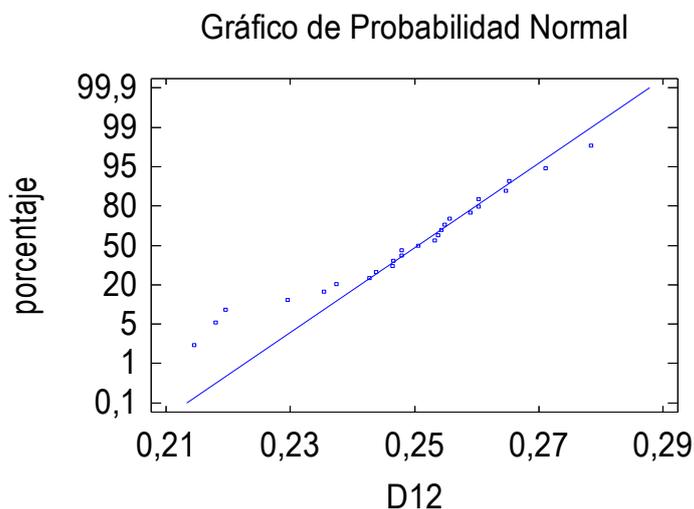


Figura 82. Gráfico de probabilidad normal para densidad normal.

Análisis de normalidad de Contracción longitudinal

Tabla 38. Sesgo y curtosis de la contracción longitudinal.

Sesgo Estandarizado	0,310041
Curtosis Estandarizada	-0,464538

Tabla 39. Pruebas de normalidad para contracción longitudinal.

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	29,32	0,00202428
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,969878	0,648586

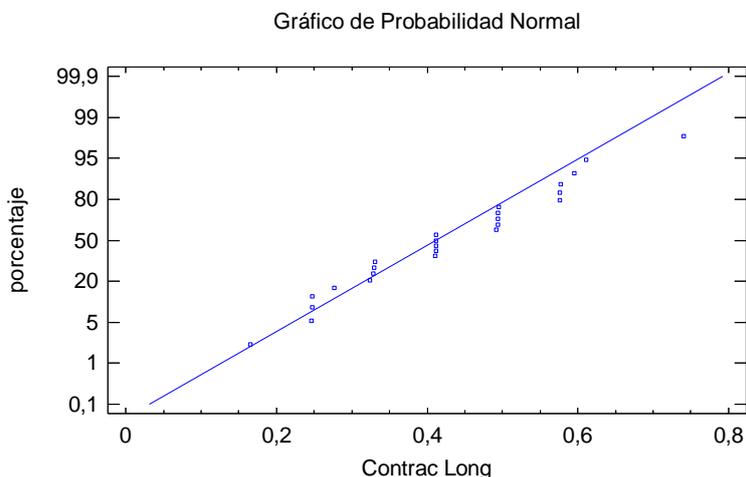


Figura 83. Gráfico de probabilidad normal para contracción longitudinal.

Análisis de normalidad de Contracción radial

Tabla 40. Sesgo y curtosis de la contracción radial.

Sesgo Estandarizado	0,893943
Curtosis Estandarizada	0,323455

Tabla 41. Pruebas de normalidad para contracción radial.

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	27,08	0,00446906
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,955791	0,350183

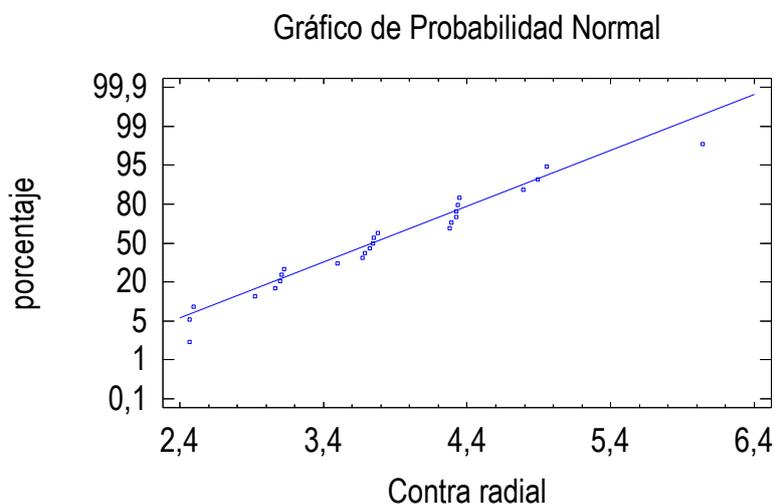


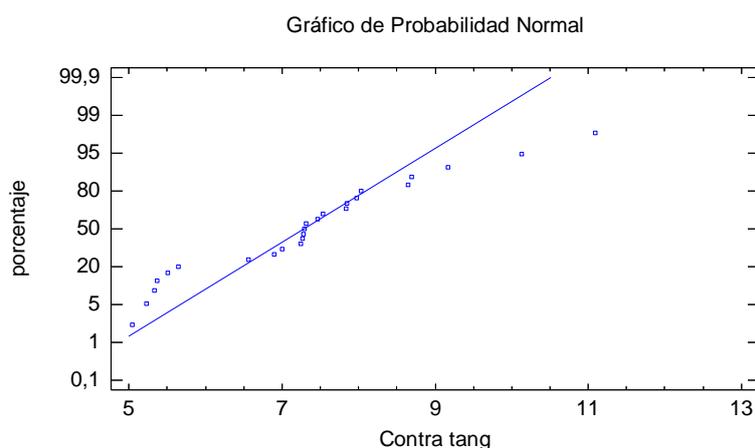
Figura 84. Gráfico de probabilidad normal para contracción radial.

Análisis de normalidad de Contracción tangencial**Tabla 42.** Sesgo y curtosis de la contracción tangencial.

Sesgo Estandarizado	1,00968
Curtosis Estandarizada	0,42665

Tabla 43. Pruebas de normalidad para contracción tangencial.

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	18,12	0,0788377
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,942604	0,178648

**Figura 85.** Gráfico de probabilidad normal para contracción tangencial.Análisis de normalidad de Contracción volumétrica.**Tabla 44.** Sesgo y curtosis de la contracción volumétrica.

Sesgo Estandarizado	0,111666
Curtosis Estandarizada	-1,14683

Tabla 45. Pruebas de normalidad para contracción volumétrica.

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	15,88	0,145645
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,954875	0,334878

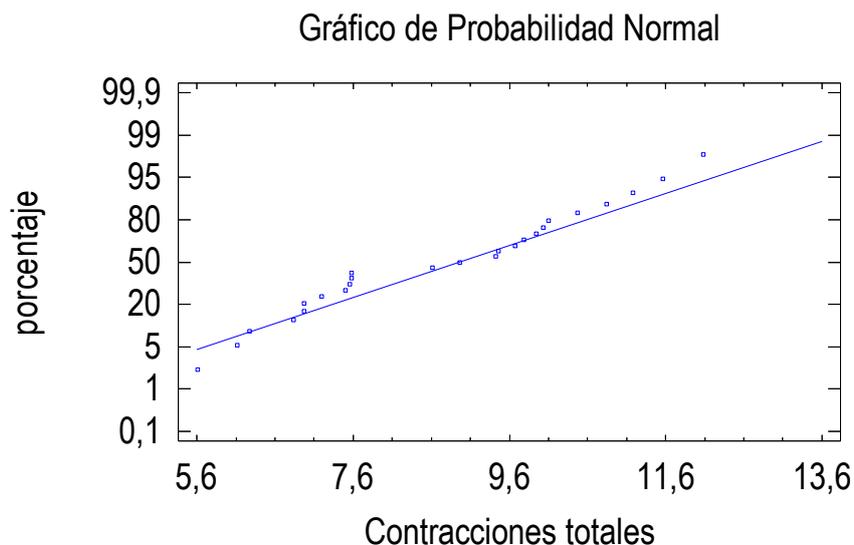


Figura 86. Gráfico de probabilidad normal para contracción volumétrica.

8.1.2. Análisis de normalidad para Módulos de Elasticidad y Módulo de Rotura del grupo de 41 piezas.

Análisis de normalidad de MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1

Tabla 46. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1 (41).

Sesgo Estandarizado	-1,25398
Curtosis Estandarizada	0,258031

Tabla 47. Pruebas de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1 (41).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	9,17073	0,81996
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,963212	0,287734

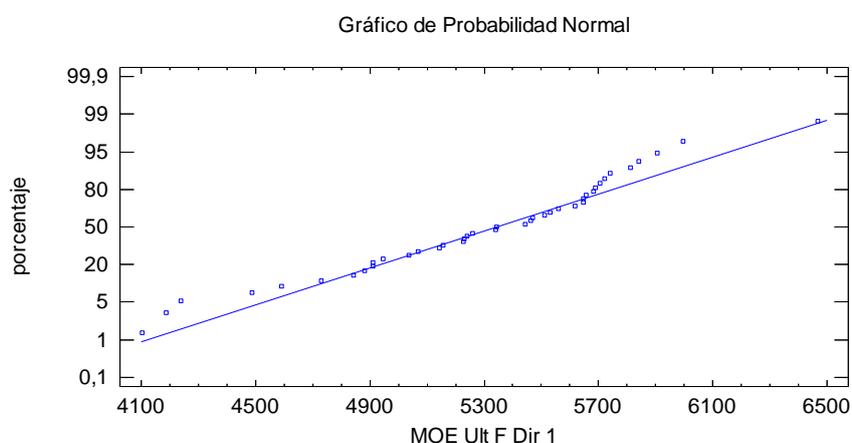


Figura 87. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1 (41).

Análisis de normalidad de MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2

Tabla 48. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2 (41).

Sesgo Estandarizado	-0,931539
Curtosis Estandarizada	0,411734

Tabla 49. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2 (41).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	11,6585	0,633704
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,983887	0,8883

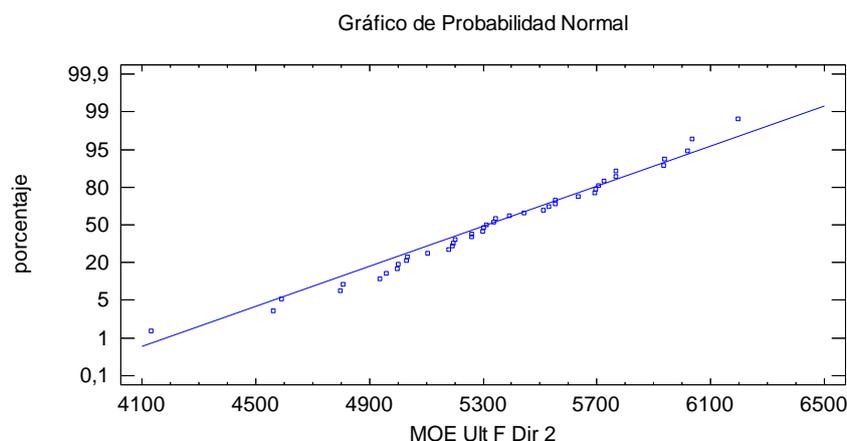


Figura 88. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2 (41).

Análisis de normalidad de MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio

Tabla 50. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).

Sesgo Estandarizado	-1,9153
Curtosis Estandarizada	0,109367

Tabla 51. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	15,8049	0,325435
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,946795	0,077667

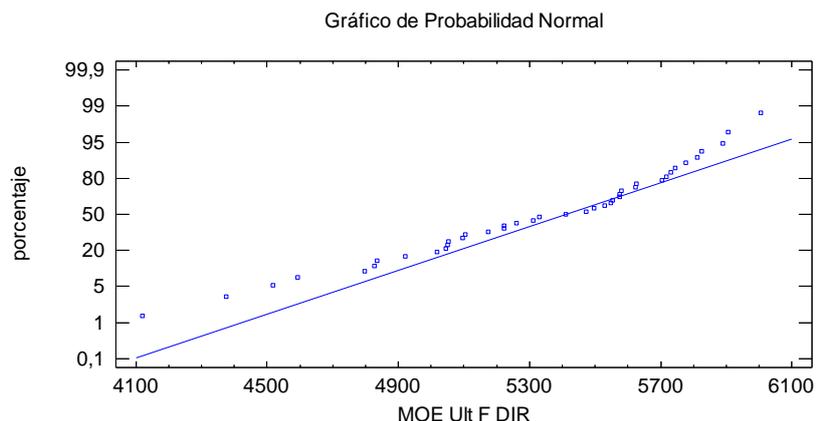


Figura 89. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).

Análisis de normalidad de MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1

Tabla 52. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1 (41).

Sesgo Estandarizado	5,77911
Curtosis Estandarizada	9,78611

Tabla 53. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1 (41).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	33,2195	0,00267822
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,761031	3,24325E-8

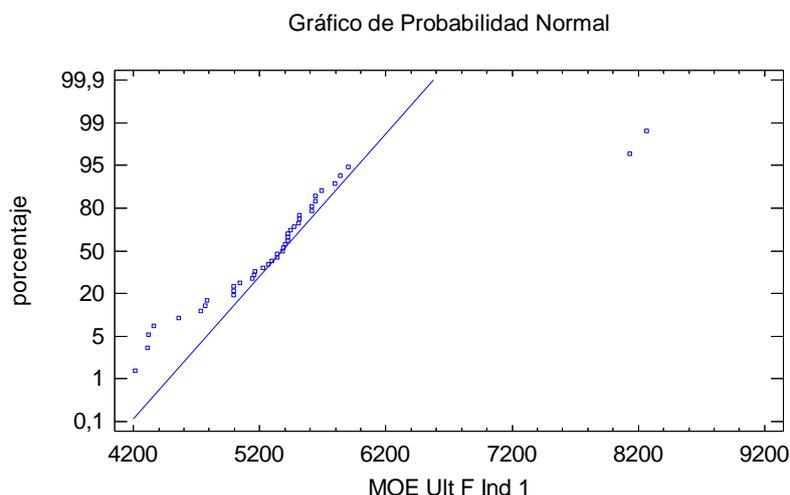


Figura 90. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1 (41).

Análisis de normalidad de MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2

Tabla 54. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2 (41).

Sesgo Estandarizado	5,4383
Curtosis Estandarizada	8,72066

Tabla 55. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2 (41).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	19,9512	0,131687
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,799068	4,72509E-7

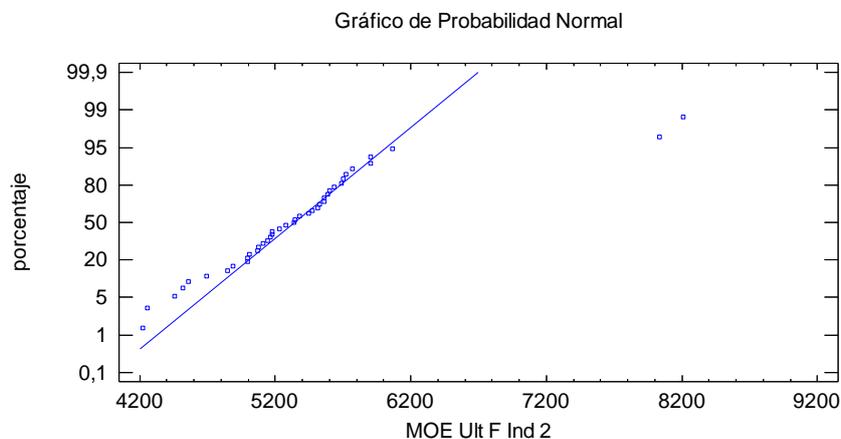


Figura 91. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2 (41).

Análisis de normalidad de MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio

Tabla 56. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio (41).

Sesgo Estandarizado	-1,76521
Curtosis Estandarizada	-0,310913

Tabla 57. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio (41).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	15,4872	0,345683
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,93501	0,0342941

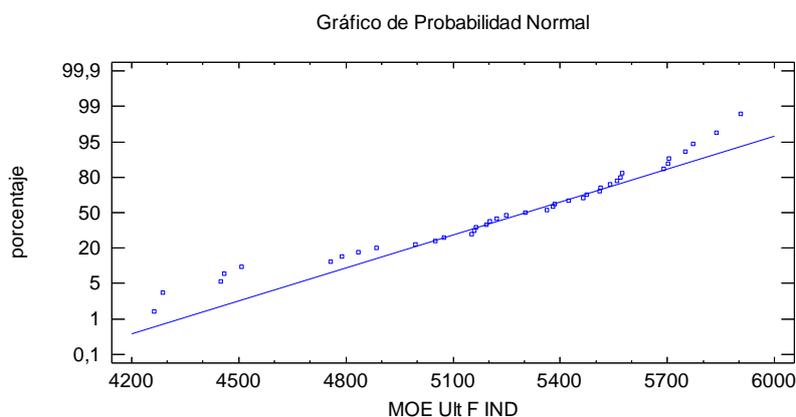


Figura 92. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio (41).

Análisis de normalidad de MOEd ultrasonidos Sylvatest directo

Tabla 58. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).

Sesgo Estandarizado	-1,42757
Curtosis Estandarizada	-0,135573

Tabla 59. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	21,6098	0,0869964
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,965053	0,32868

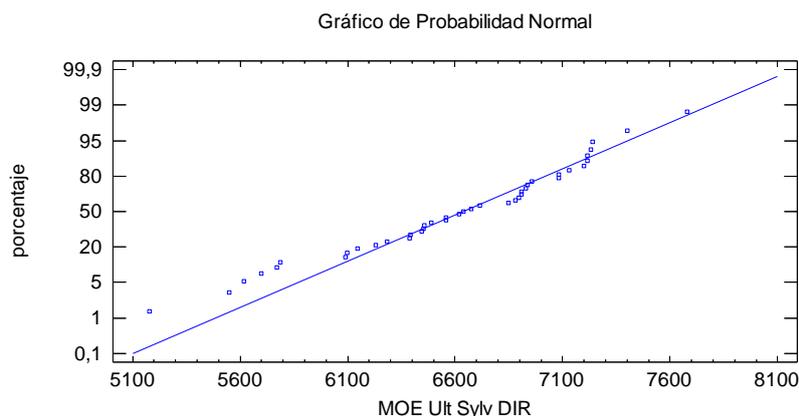


Figura 93. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).

Análisis de normalidad de MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1

Tabla 60. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1 (41).

Sesgo Estandarizado	-1,82737
Curtosis Estandarizada	-0,261267

Tabla 61. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1 (41).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	19,122	0,160342
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,939916	0,0432446

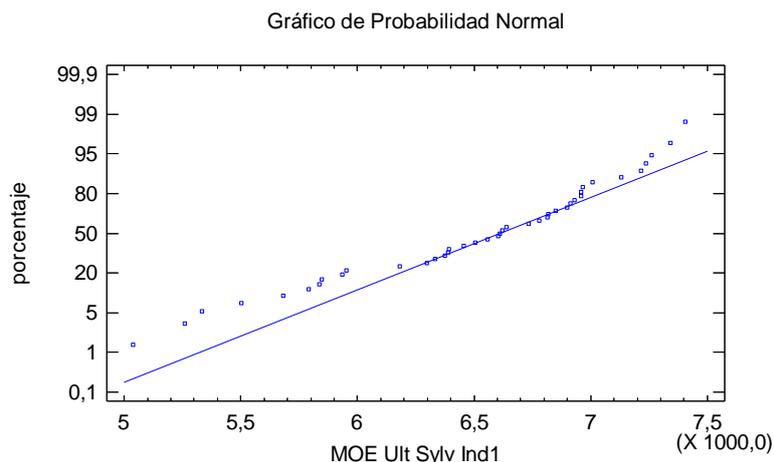


Figura 94. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1 (41).

Análisis de normalidad de MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2

Tabla 62. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2 (41).

Sesgo Estandarizado	-1,17811
Curtosis Estandarizada	-0,886442

Tabla 63. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2 (41).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	21,6098	0,0869964
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,941137	0,0480228

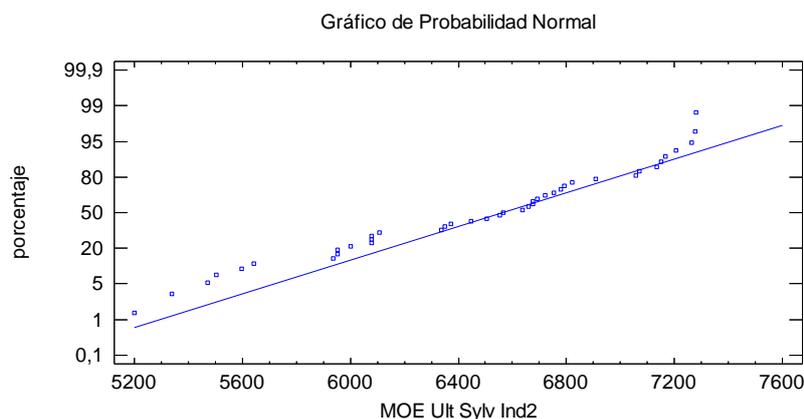


Figura 95. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2 (41).

Análisis de normalidad de MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio

Tabla 64. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio (41).

Sesgo Estandarizado	-1,53969
Curtosis Estandarizada	-0,58525

Tabla 65. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio (41).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	16,6341	0,276199
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,944585	0,0644354

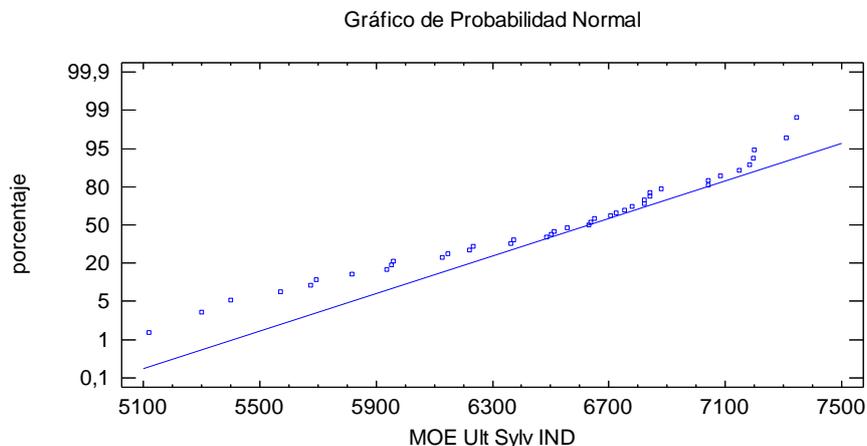


Figura 96. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio (41).

Análisis de normalidad de MOEd vibraciones longitudinales

Tabla 66. Sesgo y curtosis de MOEd vibraciones longitudinales (41).

Sesgo Estandarizado	-0,3848
Curtosis Estandarizada	-0,348775

Tabla 67. Prueba de normalidad para MOEd vibraciones longitudinales (41).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	14,9756	0,379824
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,955641	0,160764

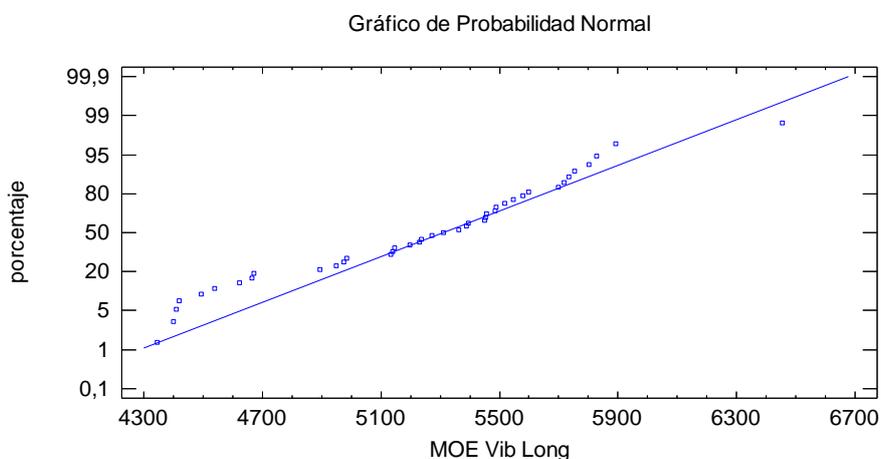


Figura 97. Gráfico de probabilidad normal para MOEd vibraciones longitudinales (41).

Análisis de normalidad de MOE según UNE EN 408:2011

Tabla 68. Sesgo y curtosis de MOE según UNE EN 408:2011 (41).

Sesgo Estandarizado	-0,147542
Curtosis Estandarizada	0,182285

Tabla 69. Prueba de normalidad para MOE según UNE EN 408:2011 (41).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	15,25	0,361281
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,967099	0,389631

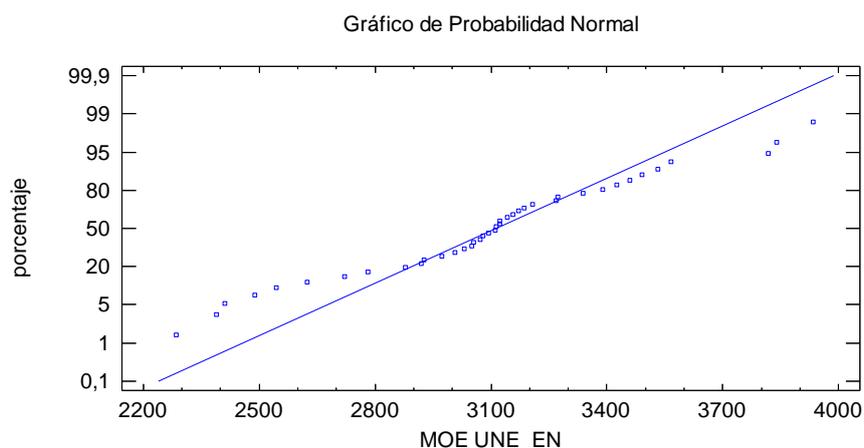


Figura 98. Gráfico de probabilidad normal para MOE según UNE EN 408:2011 (41).

Análisis de normalidad de MOR según UNE EN 408:2011

Tabla 70. Sesgo y curtosis de MOR según UNE EN 408:2011 (41).

Sesgo Estandarizado	-2,43562
Curtosis Estandarizada	-0,407481

Tabla 71. Prueba de normalidad para MOR según UNE EN 408:2011 (41).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	27,15	0,0184069
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,863031	0,0000821539

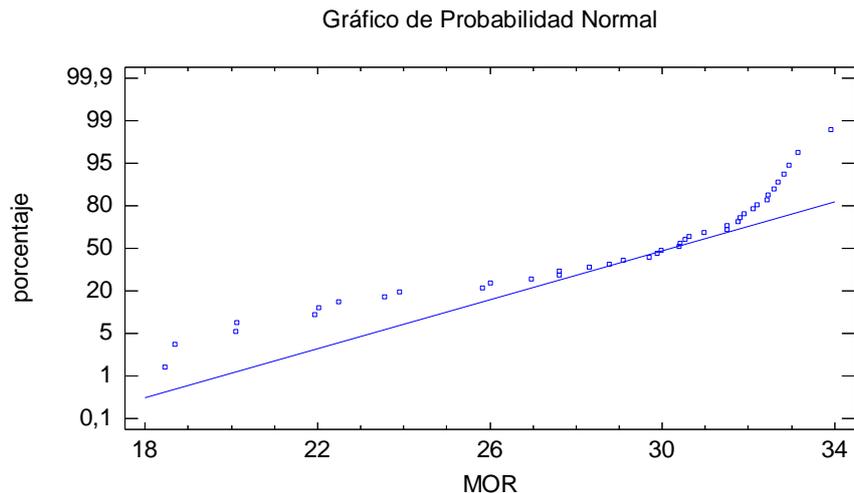


Figura 99. Gráfico de probabilidad normal para MOR según UNE EN 408:2011 (41).

8.1.3. Análisis de normalidad para Módulos de Elasticidad y Módulo de Rotura del grupo de 12 piezas.

Análisis de normalidad de MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1

Tabla 72. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1 (12).

Sesgo Estandarizado	-1,54302
Curtosis Estandarizada	0,347413

Tabla 73. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1 (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	6,33333	0,501411
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,900208	0,152519

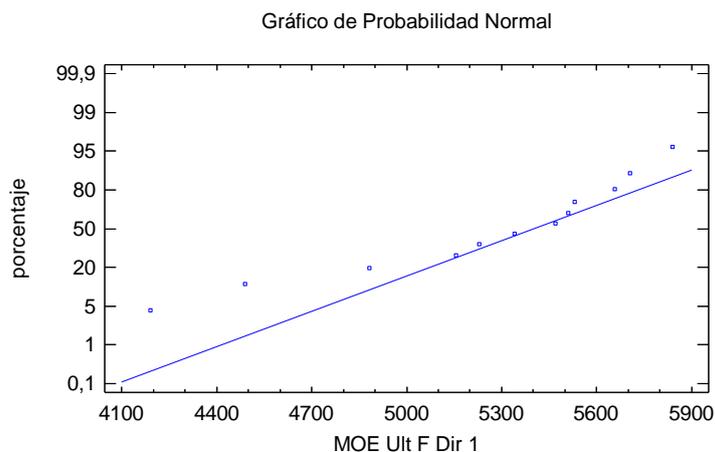


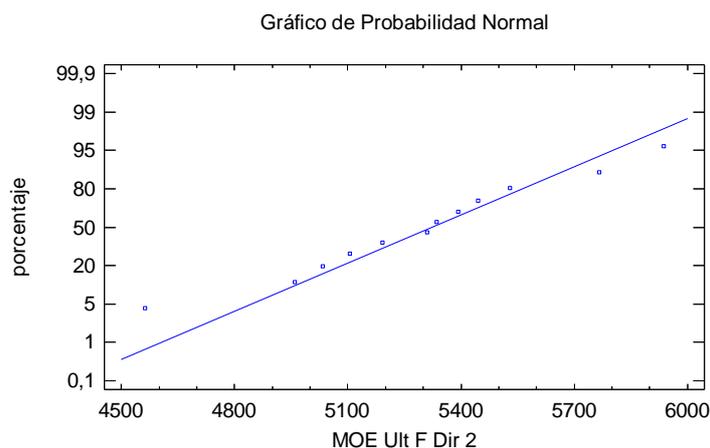
Figura 100. Gráfico de probabilidad normal para MOEEd ultrasonidos Fakopp directo 1 (12).

Análisis de normalidad de MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2**Tabla 74.** Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2 (12).

Sesgo Estandarizado	-0,248305
Curtosis Estandarizada	0,3784

Tabla 75. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2 (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	3,0	0,885002
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,983946	0,979787

**Figura 101.** Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2 (12).Análisis de normalidad de MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio**Tabla 76.** Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (12).

Sesgo Estandarizado	-1,24624
Curtosis Estandarizada	0,530877

Tabla 77. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	11,3333	0,124726
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,933597	0,392859

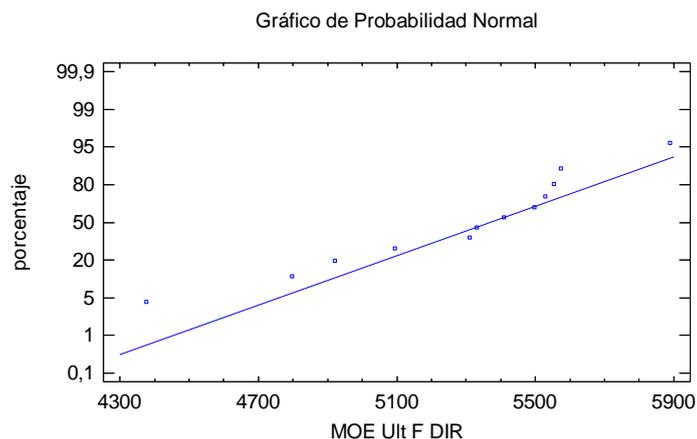


Figura 102. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (12).

Análisis de normalidad de MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1

Tabla 78. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1 (12).

Sesgo Estandarizado	-1,25431
Curtosis Estandarizada	0,80754

Tabla 79. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1 (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	4,66667	0,700566
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,940332	0,467773

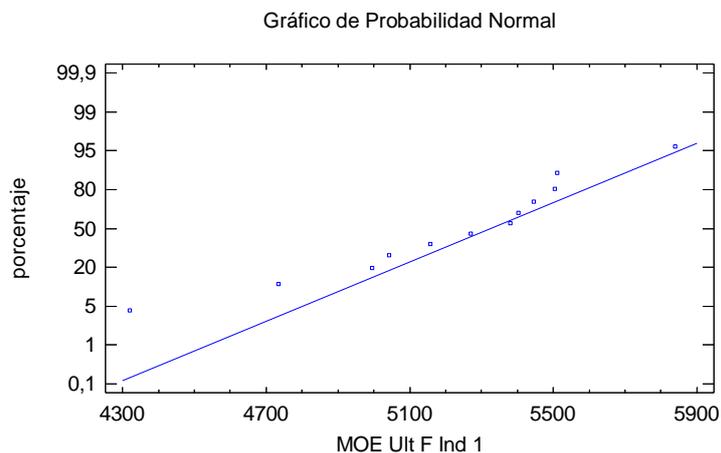


Figura 103. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1 (12).

Análisis de normalidad de MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2

Tabla 80. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2 (12).

Sesgo Estandarizado	-1,58554
Curtosis Estandarizada	0,279538

Tabla 81. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2 (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	8,0	0,332594
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,884265	0,0949986

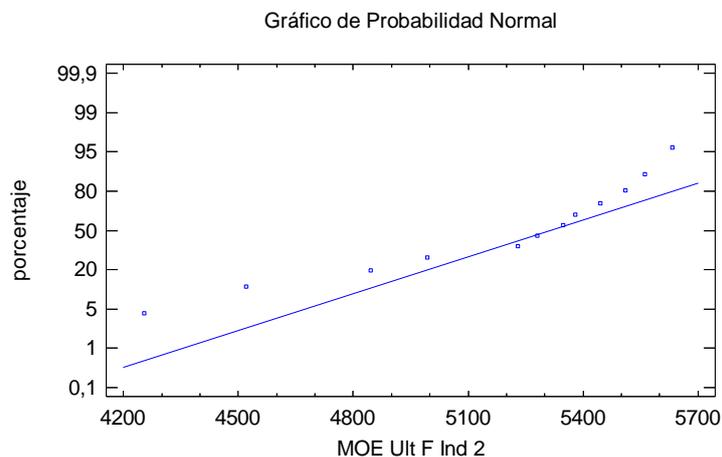


Figura 104. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2 (12).

Análisis de normalidad de MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio

Tabla 82. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio (12).

Sesgo Estandarizado	-1,49776
Curtosis Estandarizada	0,591736

Tabla 83. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	6,33333	0,501411
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,919089	0,263594

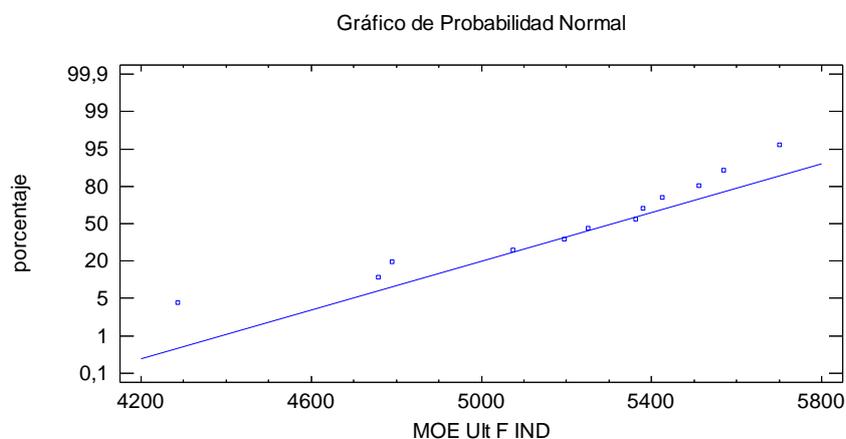


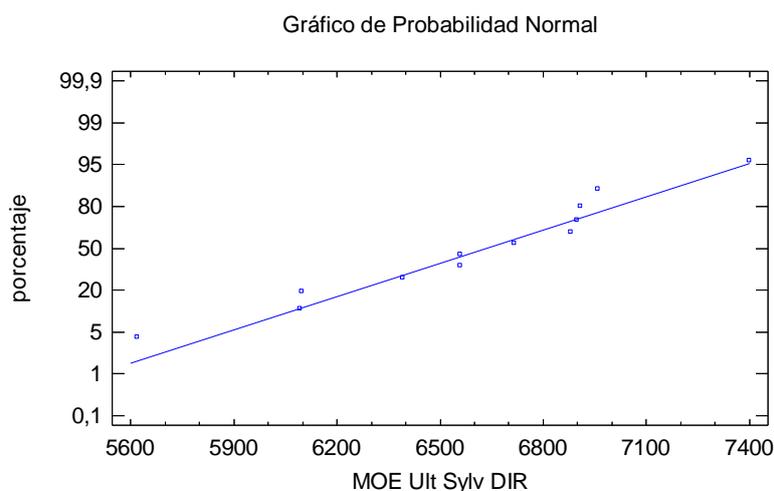
Figura 105. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio (12).

Análisis de normalidad de MOEd ultrasonidos Sylvatest directo**Tabla 84.** Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (12).

Sesgo Estandarizado	-0,678929
Curtosis Estandarizada	0,195276

Tabla 85. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	11,3333	0,124726
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,9592	0,717639

**Figura 106.** Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (12).Análisis de normalidad de MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1**Tabla 86.** Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1 (12).

Sesgo Estandarizado	-1,51952
Curtosis Estandarizada	0,475338

Tabla 87. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1 (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	9,66667	0,208263
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,902628	0,163775

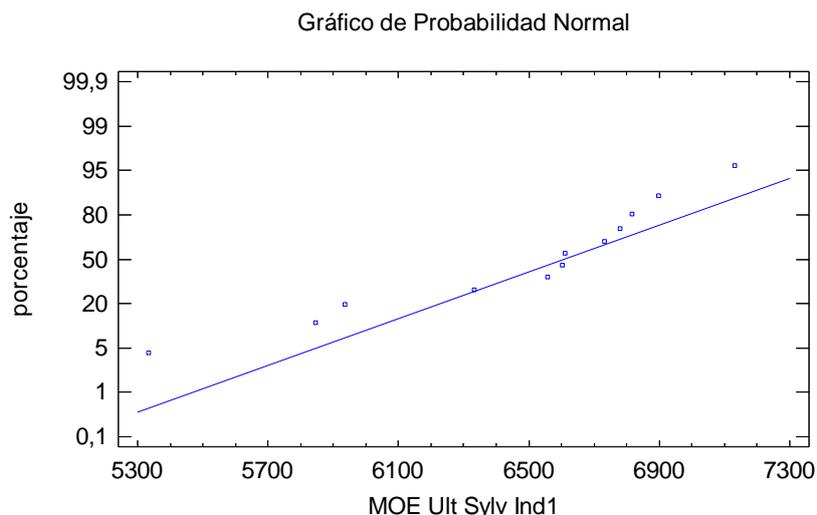


Figura 107. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1 (12).

Análisis de normalidad de MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2

Tabla 88. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2 (12).

Sesgo Estandarizado	-0,732207
Curtosis Estandarizada	-0,101482

Tabla 89. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2 (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	8,0	0,332594
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,921164	0,279492

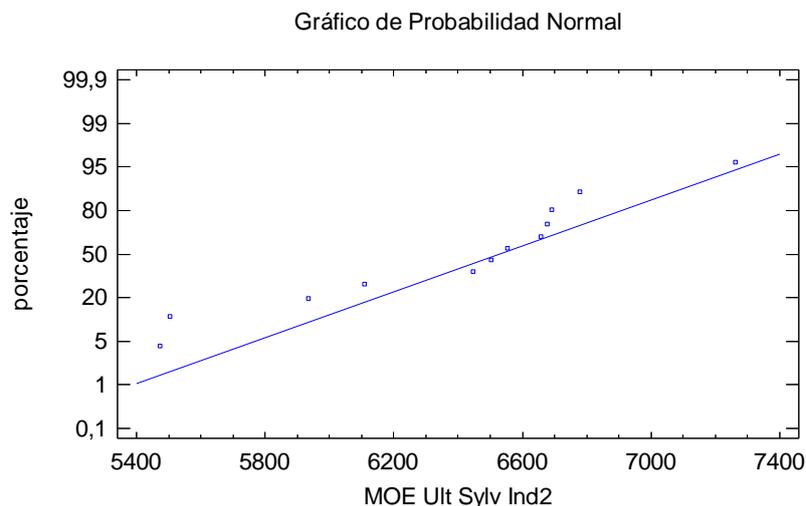


Figura 108. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2 (12).

Análisis de normalidad de MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio

Tabla 90. Sesgo y curtosis de MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio (12).

Sesgo Estandarizado	-1,1129
Curtosis Estandarizada	0,0258071

Tabla 91. Prueba de normalidad para MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	11,3333	0,124726
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,913837	0,226908

Gráfico de Probabilidad Normal

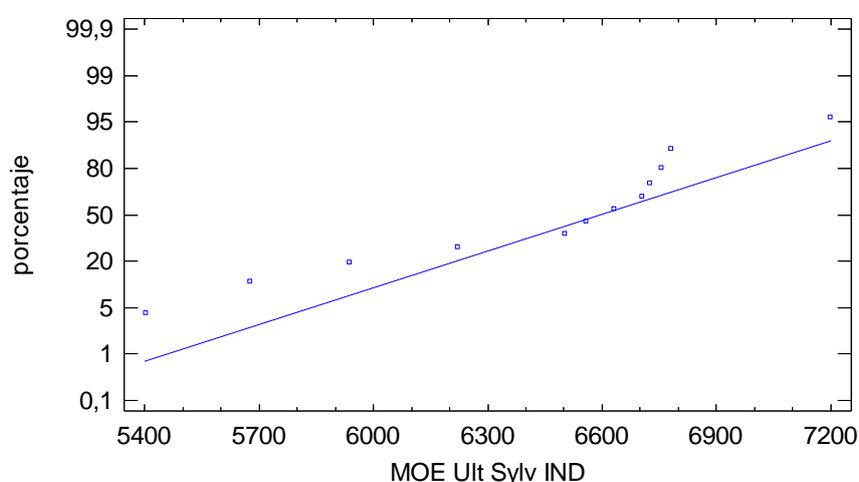


Figura 109. Gráfico de probabilidad normal para MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio (12).

Análisis de normalidad de MOEd vibraciones longitudinales

Tabla 92. Sesgo y curtosis de MOEd vibraciones longitudinales (12).

Sesgo Estandarizado	0,358214
Curtosis Estandarizada	1,34091

Tabla 93. Prueba de normalidad para MOEd vibraciones longitudinales (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	11,3333	0,124726
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,896473	0,136588

Gráfico de Probabilidad Normal

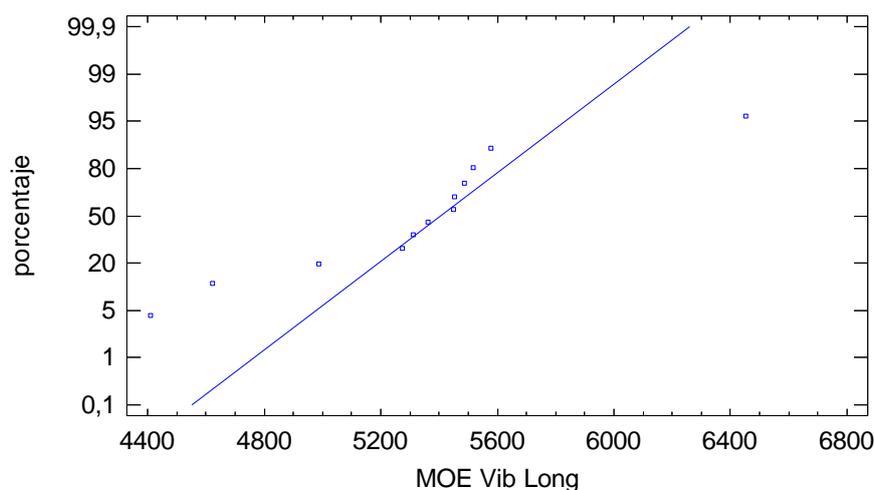


Figura 110. Gráfico de probabilidad normal para MOEd vibraciones longitudinales (12).

Análisis de normalidad de MOEd empotrada-libre horizontal

Tabla 94. Sesgo y curtosis de MOEd empotrada-libre horizontal (12).

Sesgo Estandarizado	-1,13179
Curtosis Estandarizada	1,60406

Tabla 95. Prueba de normalidad para MOEd empotrada-libre horizontal (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	6,33333	0,501411
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,90888	0,196611

Gráfico de Probabilidad Normal

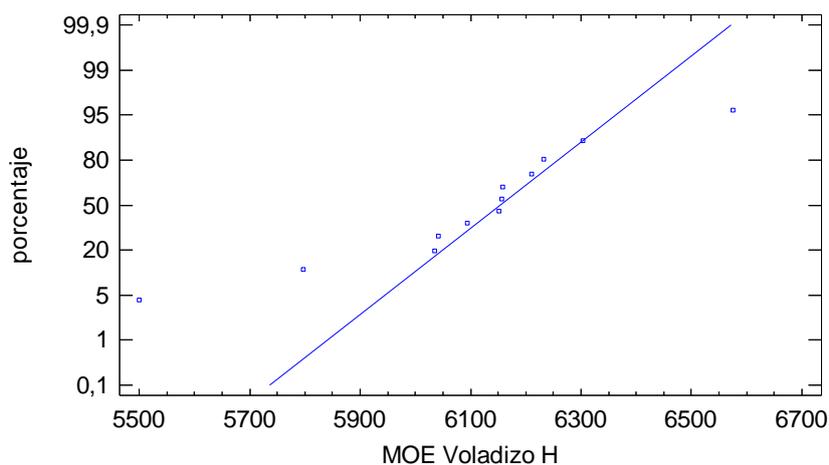


Figura 111. Gráfico de probabilidad normal para MOEd empotrada-libre horizontal (12).

Análisis de normalidad de MOEd empotrada-libre vertical

Tabla 96. Sesgo y curtosis de MOEd empotrada-libre vertical (12).

Sesgo Estandarizado	0,0035781
Curtosis Estandarizada	-0,0929918

Tabla 97. Prueba de normalidad para MOEd empotrada-libre vertical (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	6,33333	0,501411
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,974671	0,911897

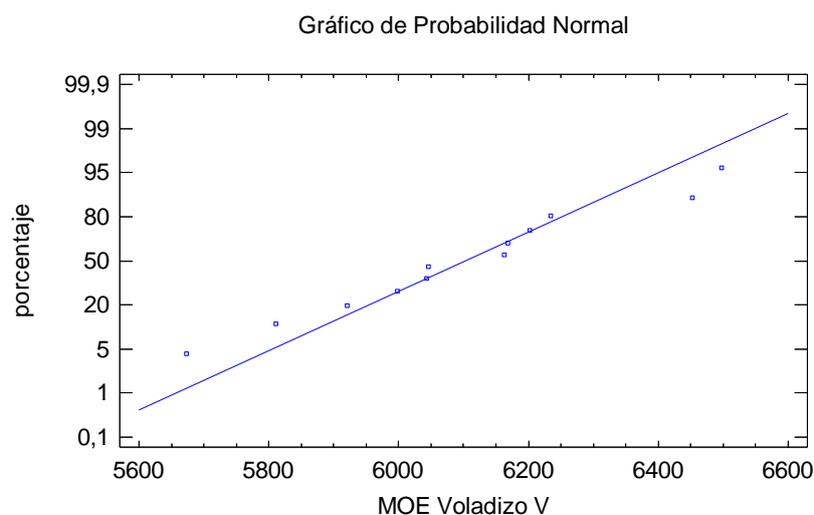


Figura 112. Gráfico de probabilidad normal para MOEd empotrada-libre vertical (12).

Análisis de normalidad de MOEd empotrada-libre medio

Tabla 98. Sesgo y curtosis de MOEd empotrada-libre medio (12).

Sesgo Estandarizado	-0,55612
Curtosis Estandarizada	0,827016

Tabla 99. Prueba de normalidad para MOEd empotrada-libre medio (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	4,66667	0,700566
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,963759	0,780439

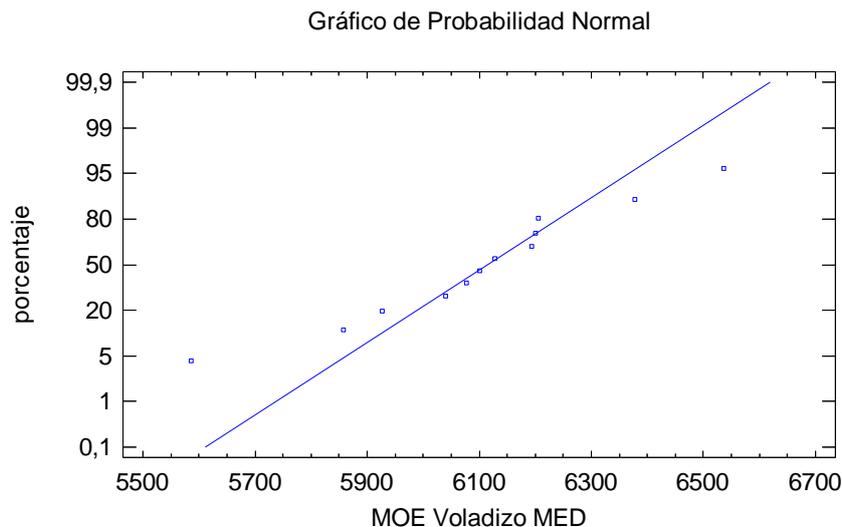


Figura 113. Gráfico de probabilidad normal para MOEd empotrada-libre medio (12).

Análisis de normalidad de MOEd biapoyada horizontal

Tabla 100. Sesgo y curtosis de MOEd biapoyada horizontal (12).

Sesgo Estandarizado	1,36125
Curtosis Estandarizada	-0,414672

Tabla 101. Prueba de normalidad para MOEd biapoyada horizontal (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	11,3333	0,124726
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,834627	0,0216475

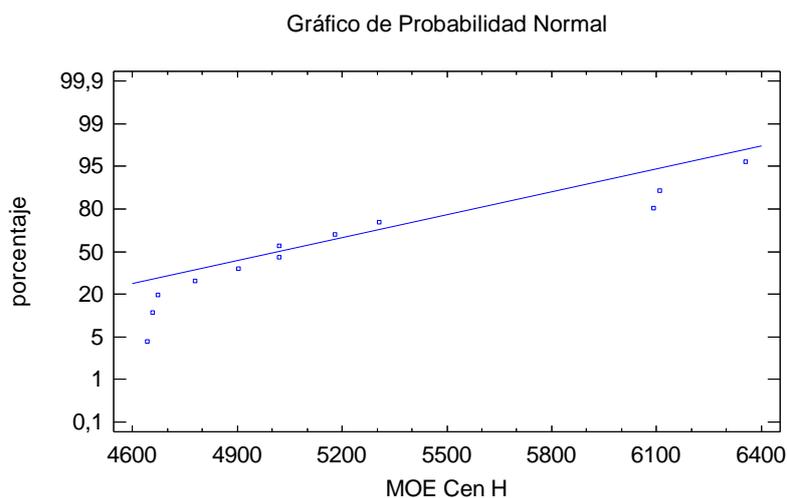


Figura 114. Gráfico de probabilidad normal para MOEd biapoyada horizontal (12).

Análisis de normalidad de MOEd biapoyada vertical

Tabla 102. Sesgo y curtosis de MOEd biapoyada vertical (12).

Sesgo Estandarizado	1,26619
Curtosis Estandarizada	0,290508

Tabla 103. Prueba de normalidad para MOEd biapoyada vertical (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	6,33333	0,501411
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,923917	0,301865

Gráfico de Probabilidad Normal

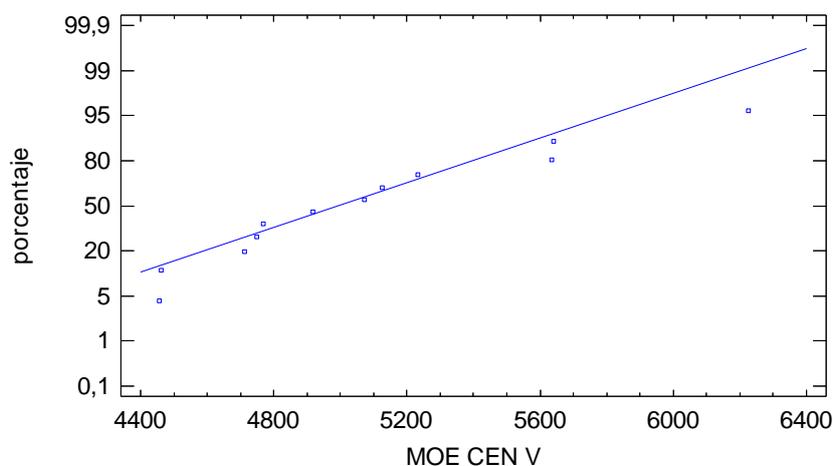


Figura 115. Gráfico de probabilidad normal para MOEd biapoyada vertical (12).

Análisis de normalidad de MOEd biapoyada medio

Tabla 104. Sesgo y curtosis de MOEd biapoyada medio (12).

Sesgo Estandarizado	1,3814
Curtosis Estandarizada	-0,103229

Tabla 105. Prueba de normalidad para MOEd biapoyada medio (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	9,66667	0,208263
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,875118	0,0722736

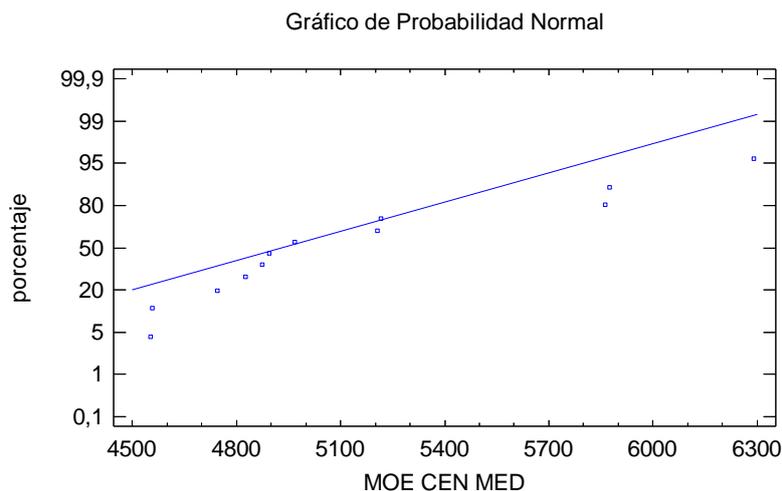


Figura 116. Gráfico de probabilidad normal para MOEd biapoyada medio (12).

Análisis de normalidad de MOEd “Ibertest” un punto de carga

Tabla 106. Sesgo y curtosis de MOEd “Ibertest” un punto de carga (12).

Sesgo Estandarizado	1,61883
Curtosis Estandarizada	1,27278

Tabla 107. Prueba de normalidad para MOEd “Ibertest” un punto de carga (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	11,3333	0,124726
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,90629	0,18232

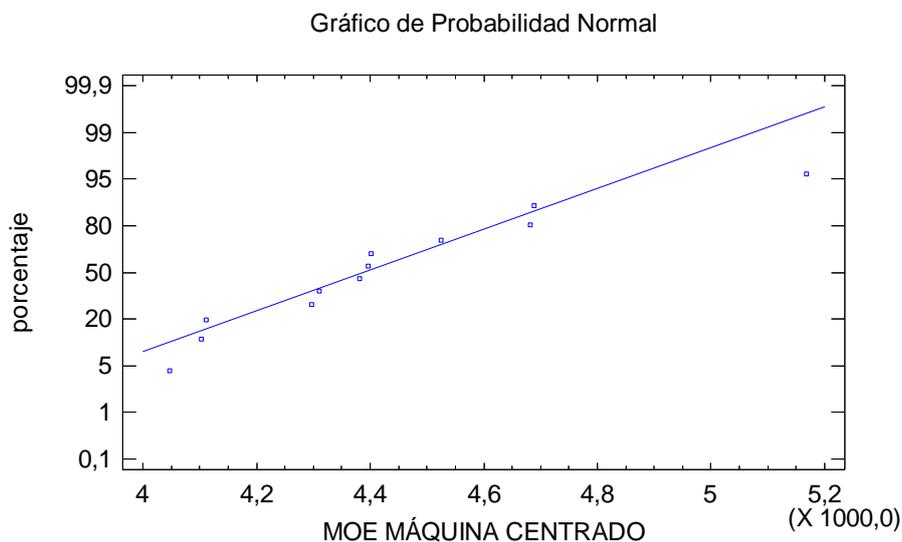


Figura 117. Gráfico de probabilidad normal para MOEd “Ibertest” un punto de carga (12).

Análisis de normalidad de MOE según UNE-EN 408:2011

Tabla 108. Sesgo y curtosis de MOE según UNE-EN 408:2011 (12).

Sesgo Estandarizado	-1,04004
Curtosis Estandarizada	0,0208153

Tabla 109. Prueba de normalidad para MOE según UNE-EN 408:2011 (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	6,33333	0,501411
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,931211	0,368601

Gráfico de Probabilidad Normal

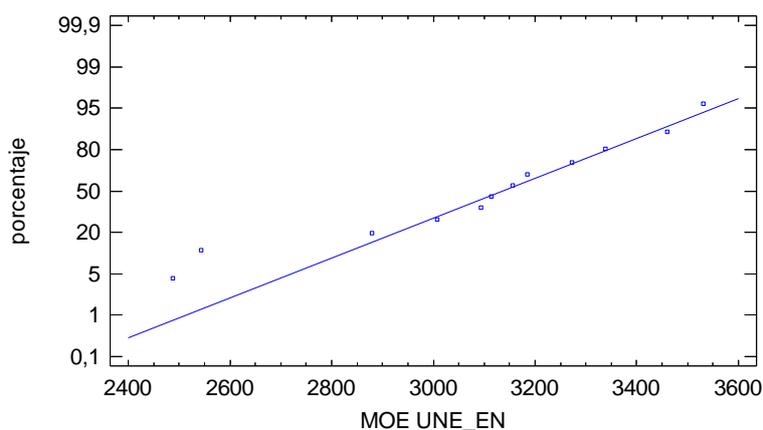


Figura 118. Gráfico de probabilidad normal para MOE según UNE-EN 408:2011 (12).

Análisis de normalidad de MOR según UNE-EN 408:2011

Tabla 110. Sesgo y curtosis de MOR según UNE-EN 408:2011 (12).

Sesgo Estandarizado	-1,90545
Curtosis Estandarizada	0,940139

Tabla 111. Prueba de normalidad para MOR según UNE-EN 408:2011 (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	8,0	0,332594
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,845096	0,0295066

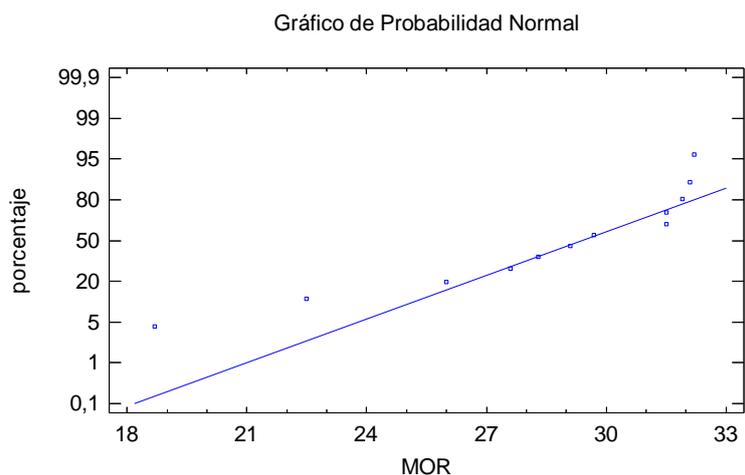


Figura 119. Gráfico de probabilidad normal para MOR según UNE-EN 408:2011 (12).

8.2. Análisis comparativo

8.2.1. Análisis comparativo de los módulos de elasticidad para el grupo de 41 piezas.

- MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1 y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2

Tabla 112. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1 y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2 (41).

Prueba t	Estadístico t = 1,369
Hipótesis Nula: media = 0,0	P-valor = 0,178
Alternativa: no igual	No se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05

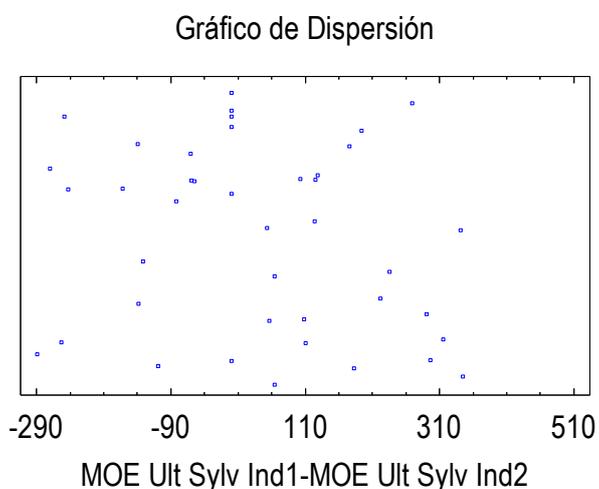


Figura 120. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 1 y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto 2 (41).

- MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1 y MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2

Tabla 113. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1 y MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2 (41).

Prueba t	Estadístico t = -0,894
Hipótesis Nula: media = 0,0	P-valor = 0,376
Alternativa: no igual	No se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05

Gráfico de Dispersión

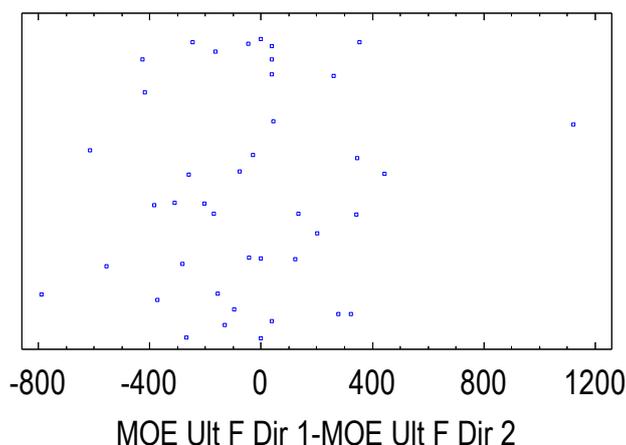


Figura 121. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Fakopp directo 1 y MOEd ultrasonidos Fakopp directo 2 (41).

- MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1 y MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2

Tabla 114. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1 y MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2 (41).

Prueba t	Estadístico t = -0,637
Hipótesis Nula: media = 0,0	P-valor = 0,528
Alternativa: no igual	No se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05

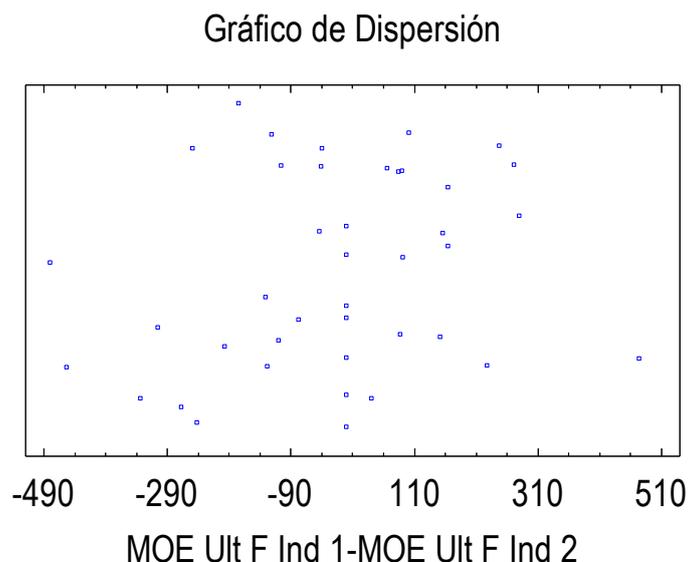


Figura 122. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 1 y MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto 2 (41).

- MOEd ultrasonidos Sylvatest directo y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio

Tabla 115. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Sylvatest directo y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio (41).

Prueba t	Estadístico t = 5,639
Hipótesis Nula: media = 0,0	P-valor = 0,000
Alternativa: no igual	Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05

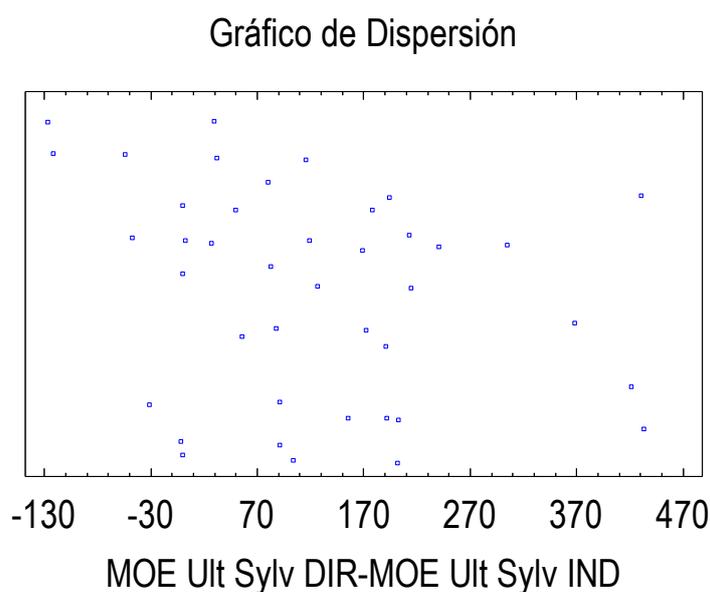


Figura 123. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Sylvatest directo y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio (41).

- MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio y MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio

Tabla 116. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio y MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio (41).

Prueba t	Estadístico t = 2,962
Hipótesis Nula: media = 0,0	P-valor = 0,005
Alternativa: no igual	Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05

Gráfico de Dispersión

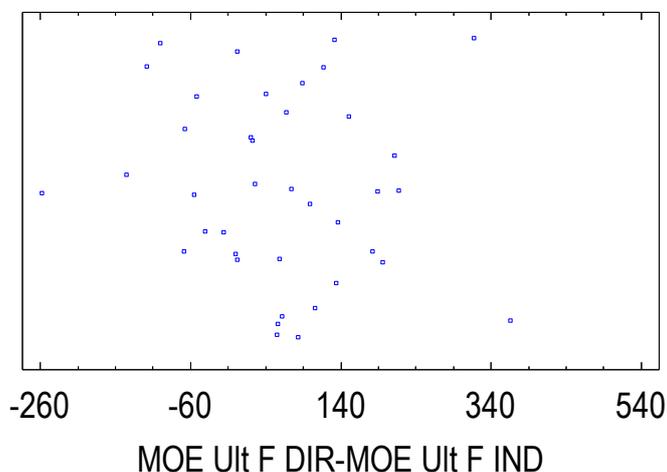


Figura 124. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio y MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio (41).

- MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo

Tabla 117. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).

Prueba t	Estadístico t = -41,328
Hipótesis Nula: media = 0,0	P-valor = 0,0
Alternativa: no igual	Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05

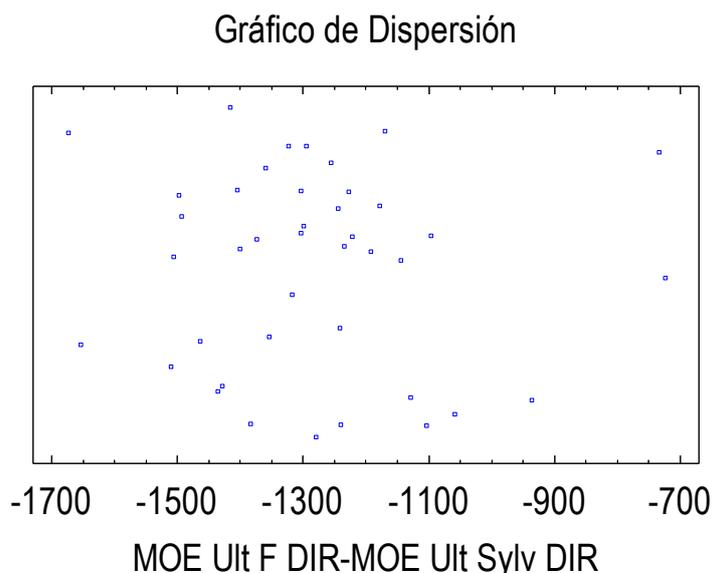


Figura 125. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).

- MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio

Tabla 118. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio (41).

Prueba t	Estadístico t = -36,069
Hipótesis Nula: media = 0,0	P-valor = 0,0
Alternativa: no igual	Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05

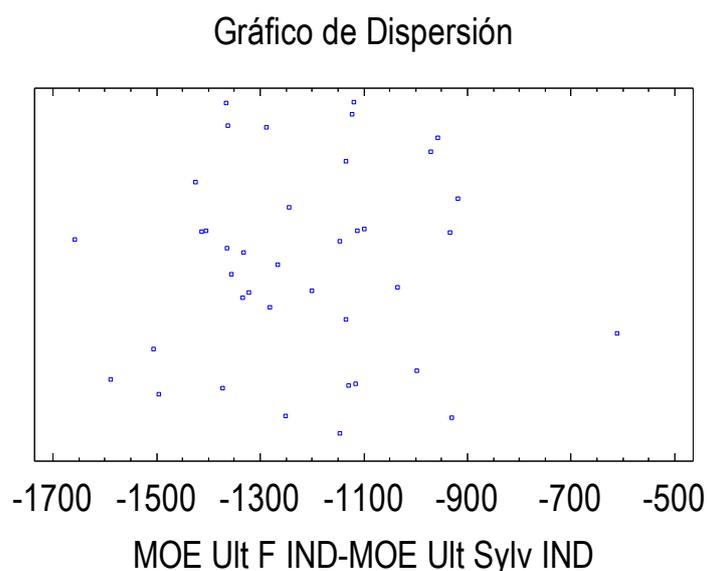


Figura 126. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOEd ultrasonidos Fakopp indirecto medio y MOEd ultrasonidos Sylvatest indirecto medio (41).

- MOEd vibraciones longitudinales y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo

Tabla 119. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOEd vibraciones longitudinales y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).

Prueba t	Estadístico t = -33,076
Hipótesis Nula: media = 0,0	P-valor = 0,0
Alternativa: no igual	Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05

Gráfico de Dispersión

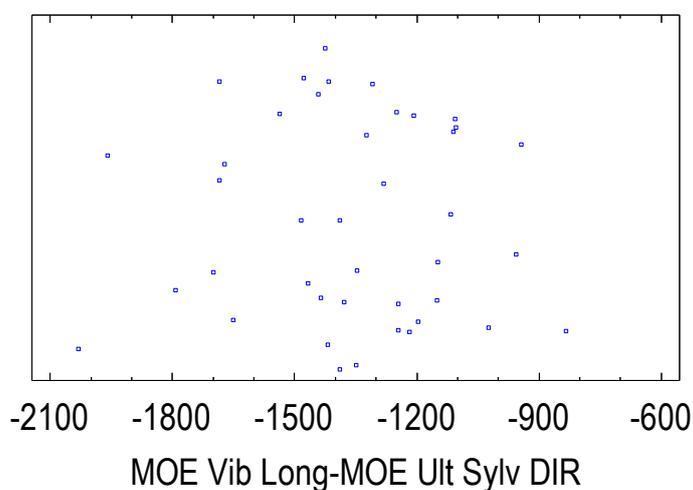


Figura 127. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOEd vibraciones longitudinales y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).

- MOEd vibraciones longitudinales y MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio

Tabla 120. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOEd vibraciones longitudinales y MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).

Prueba t	Estadístico t = -2,028
Hipótesis Nula: media = 0,0	P-valor = 0,049
Alternativa: no igual	Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05

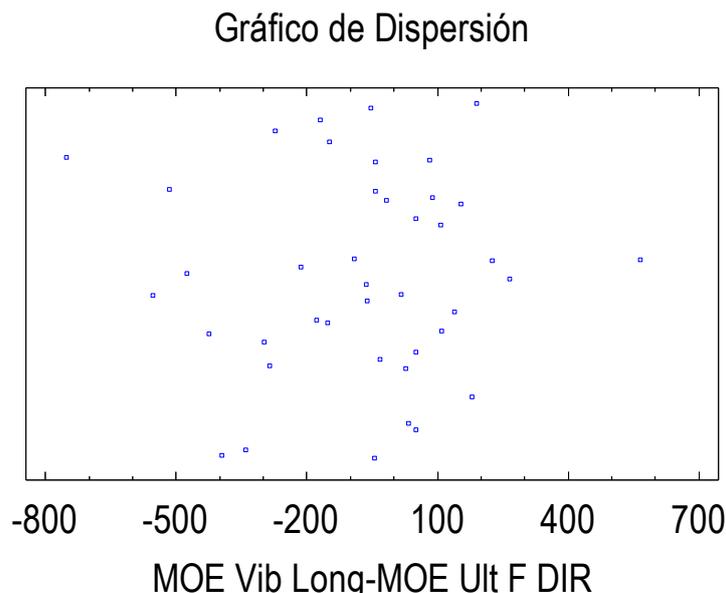


Figura 128. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOEd vibraciones longitudinales y MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).

- MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio

Tabla 121. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).

Prueba t	Estadístico t = -42,492
Hipótesis Nula: media = 0,0	P-valor = 0,0
Alternativa: no igual	Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05

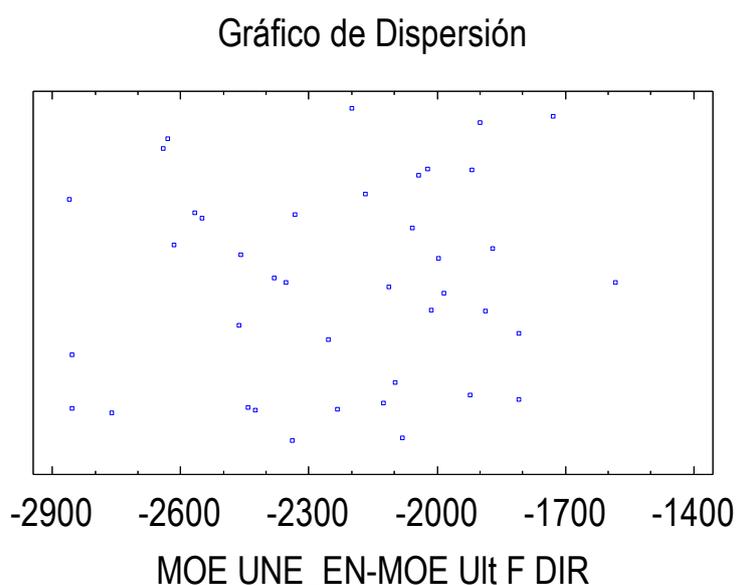


Figura 129. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).

- MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo

Tabla 122. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).

Prueba t	Estadístico t = -52,662
Hipótesis Nula: media = 0,0	P-valor = 0,0
Alternativa: no igual	Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05

Gráfico de Dispersión

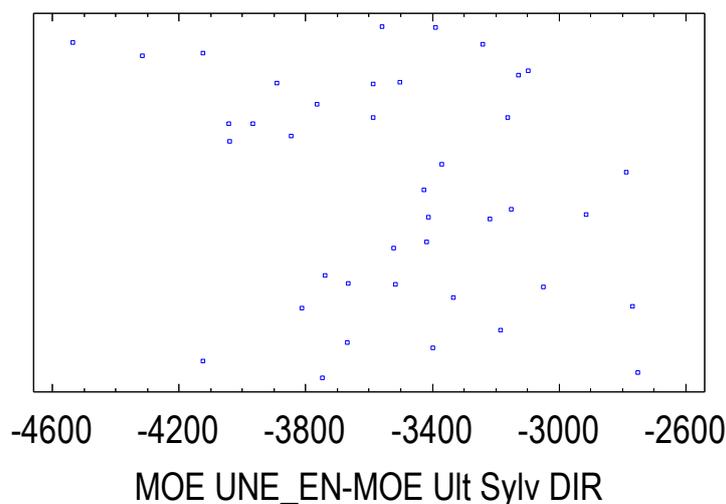


Figura 130. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).

- MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd vibraciones longitudinales

Tabla 123. Prueba de hipótesis en el análisis comparativo de MOE según UNE-EN 408:2011 y MOEd vibraciones longitudinales (41).

Prueba t	Estadístico t = -36,865
Hipótesis Nula: media = 0,0	P-valor = 0,0
Alternativa: no igual	Se rechaza la hipótesis nula para alfa = 0,05

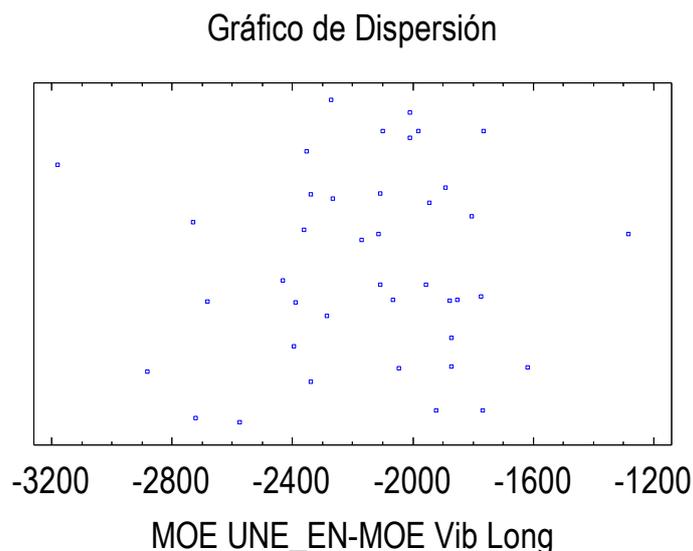


Figura 131. Gráfico de dispersión para el análisis comparativo de MOE según UNE-EN 408:2011 y MOE de vibraciones longitudinales (41).

8.3. Funciones de predicción

8.3.1. Regresiones simples para el grupo de 41 piezas

Para cada una de las regresiones realizadas se expone el resumen del modelo, el gráfico de observados y predichos, y su análisis de residuos.

- MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOE de ultrasonidos Fakopp directo medio

Tabla 124. Coeficientes MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOE de ultrasonidos Fakopp directo medio (41).

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	-74,2654	561,093	-0,132359	0,8954
Pendiente	0,595106	0,104849	5,67586	0,0000

Tabla 125. Análisis de varianza MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOE de ultrasonidos Fakopp directo medio (41).

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2,62532E6	1	2,62532E6	32,22	0,0000
Residuo	3,09672E6	38	81492,7		
Total (Corr.)	5,72204E6	39			

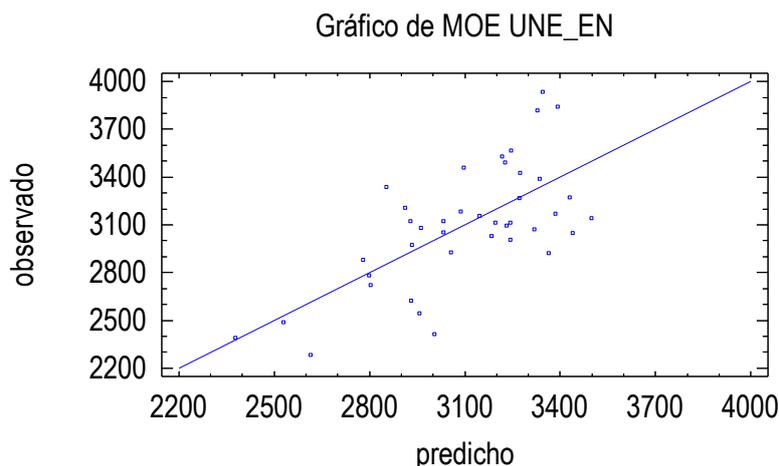


Figura 132. Gráfico de observado y predicho MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).

Tabla 126. Sesgo y curtosis estandarizados de residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).

Sesgo Estandarizado	0,36257
Curtosis Estandarizada	-0,442558

Tabla 127. Prueba de normalidad para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	11,85	0,618348
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,984434	0,904069

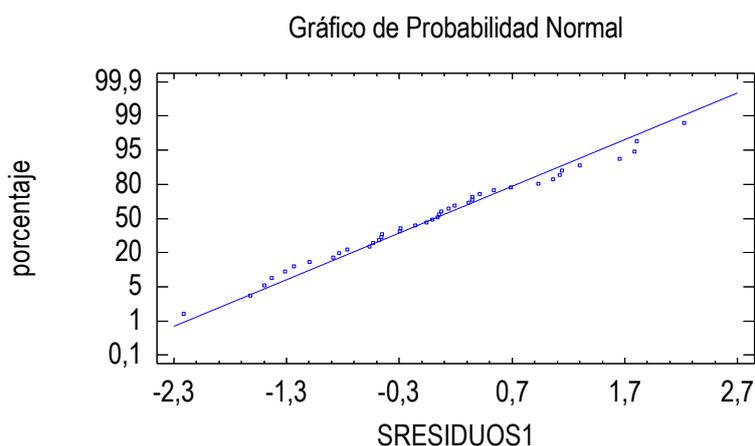


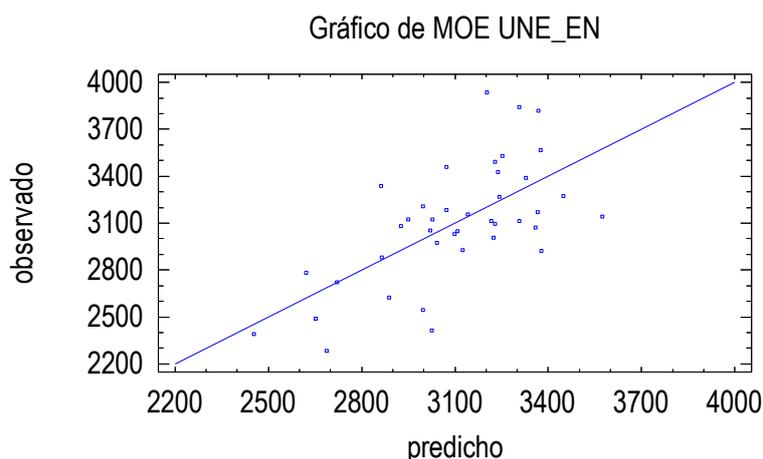
Figura 133. Gráfico de probabilidad normal para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (41).

- MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo**Tabla 128.** Coeficientes MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	135,132	568,22	0,237816	0,8133
Pendiente	0,447919	0,0855502	5,23575	0,0000

Tabla 129. Análisis de varianza MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2,39797E6	1	2,39797E6	27,41	0,0000
Residuo	3,32407E6	38	87475,5		
Total (Corr.)	5,72204E6	39			

**Figura 134.** Gráfico de observado y predicho MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).**Tabla 130.** Sesgo y curtosis estandarizados de residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).

Sesgo Estandarizado	0,724371
Curtosis Estandarizada	0,38485

Tabla 131. Prueba de normalidad para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	16,95	0,258852
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,98582	0,932135

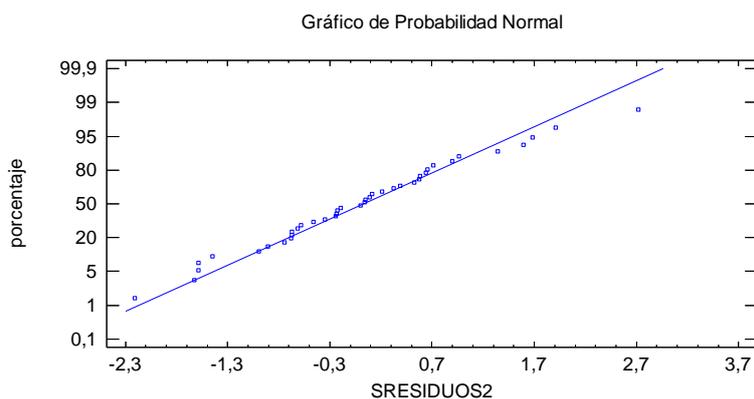


Figura 135. Gráfico de probabilidad normal para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (41).

- MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales

Tabla 132. Coeficientes MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (41).

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	357,185	512,73	0,696633	0,4903
Pendiente	0,522151	0,0972072	5,37153	0,0000

Tabla 133. Análisis de varianza MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (41).

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2,46958E6	1	2,46958E6	28,85	0,0000
Residuo	3,25246E6	38	85591,0		
Total (Corr.)	5,72204E6	39			

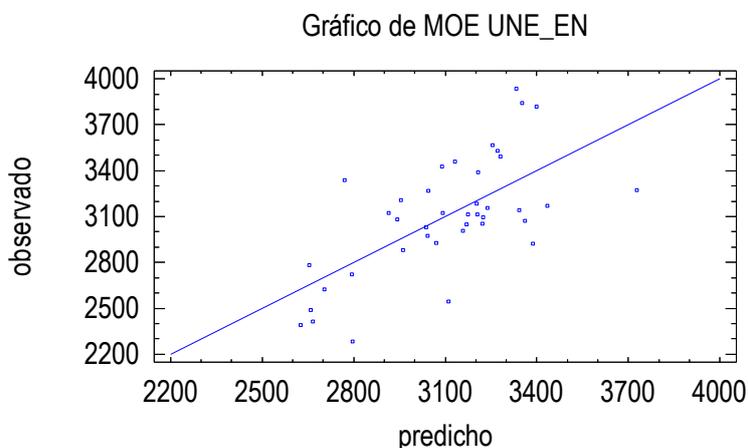


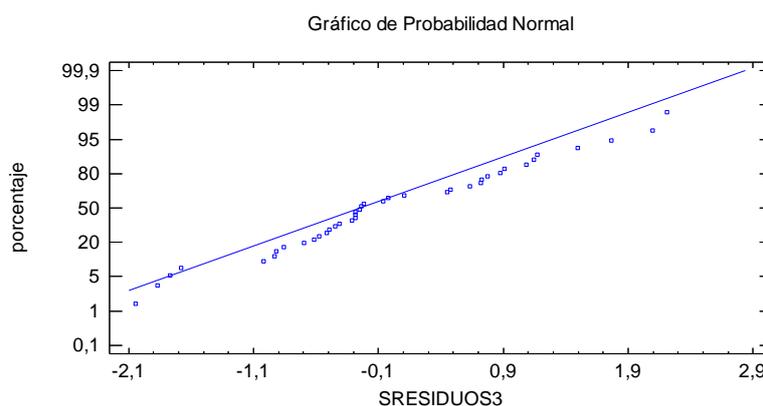
Figura 136. Gráfico de observado y predicho MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (41).

Tabla 134. Sesgo y curtosis estandarizados de residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (41).

Sesgo Estandarizado	0,429596
Curtosis Estandarizada	-0,352956

Tabla 135. Prueba de normalidad para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (41).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	16,95	0,258852
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,96813	0,416983

**Figura 137.** Gráfico de probabilidad normal para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (41).

8.3.2. Regresiones simples para el grupo de 12 piezas

- MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio

Tabla 136. Coeficientes MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (12).

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	581,077	1043,27	0,556974	0,5898
Pendiente	0,475605	0,197274	2,41088	0,0366

Tabla 137. Análisis de varianza MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (12).

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	423844,	1	423844,	5,81	0,0366
Residuo	729214,	10	72921,4		
Total (Corr.)	1,15306E6	11			

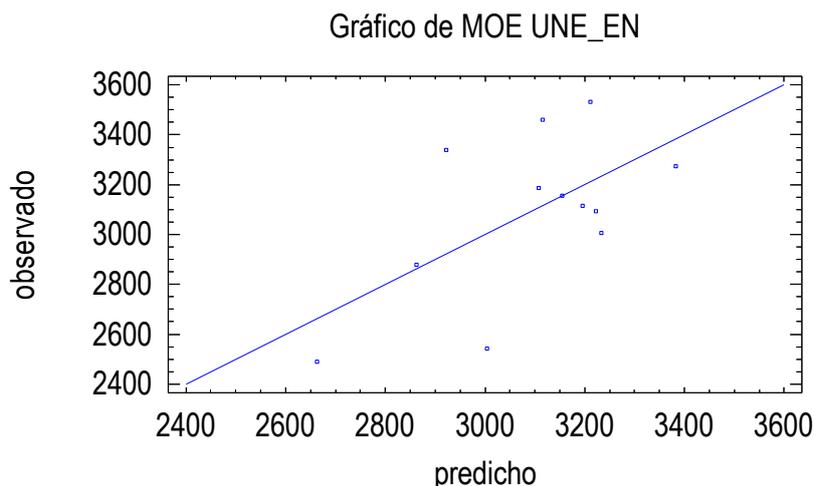


Figura 138. Gráfico de observado y predicho MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (12).

Tabla 138. Sesgo y curtosis estandarizados de residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (12).

Sesgo Estandarizado	0,176826
Curtosis Estandarizada	-0,0564304

Tabla 139. Prueba de normalidad para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	8,0	0,332594
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,958312	0,705258

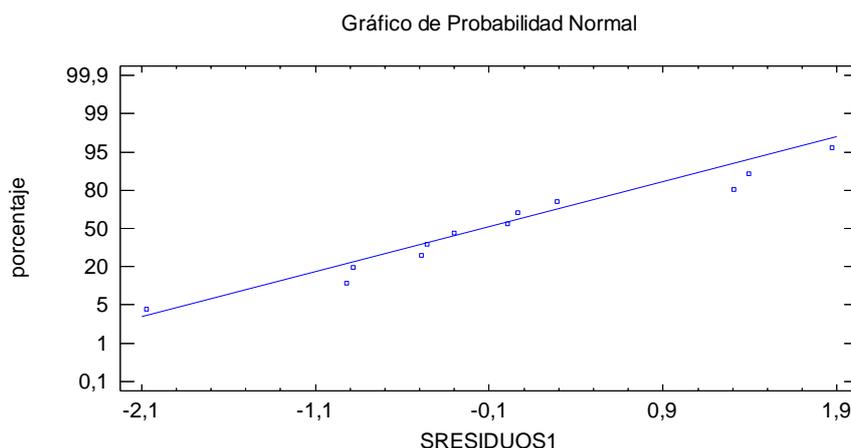


Figura 139. Gráfico de probabilidad normal para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Fakopp directo medio (12).

- MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo

Tabla 140. Coeficientes MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (12).

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	619,725	1161,44	0,533584	0,6053
Pendiente	0,37482	0,175848	2,1315	0,0589

Tabla 141. Análisis de varianza MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (12).

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	360212,	1	360212,	4,54	0,0589
Residuo	792846,	10	79284,6		
Total (Corr.)	1,15306E6	11			

Gráfico de MOE UNE_EN

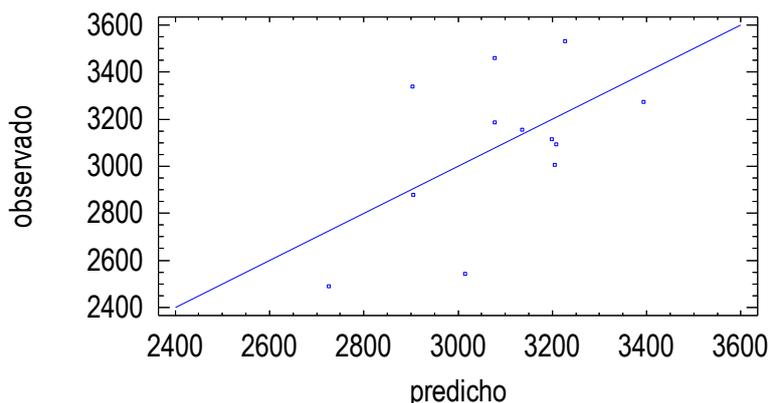


Figura 140. Gráfico de observado y predicho MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (12).

Tabla 142. Sesgo y curtosis estandarizados de residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (12).

Sesgo Estandarizado	0,270778
Curtosis Estandarizada	-0,123823

Tabla 143. Prueba de normalidad para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	4,66667	0,700566
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,970463	0,866001

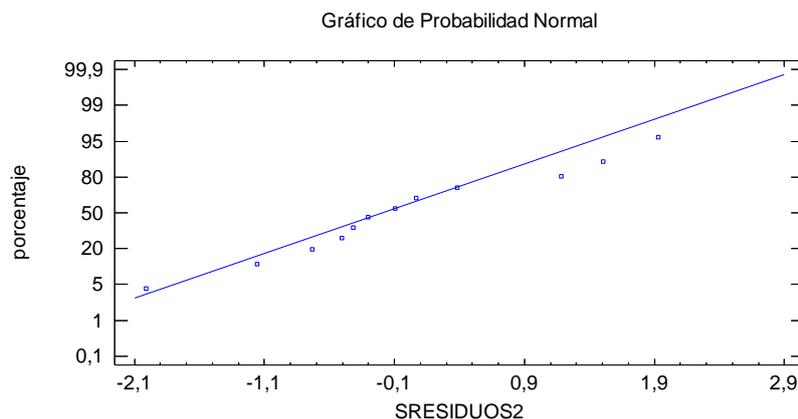


Figura 141. Gráfico de probabilidad normal para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd ultrasonidos Sylvatest directo (12).

- MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales

Tabla 144. Coeficientes MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (12).

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	1583,43	956,345	1,65571	0,1288
Pendiente	0,282733	0,178806	1,58123	0,1449

Tabla 145. Análisis de varianza MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (12).

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	230633,	1	230633,	2,50	0,1449
Residuo	922425,	10	92242,5		
Total (Corr.)	1,15306E6	11			

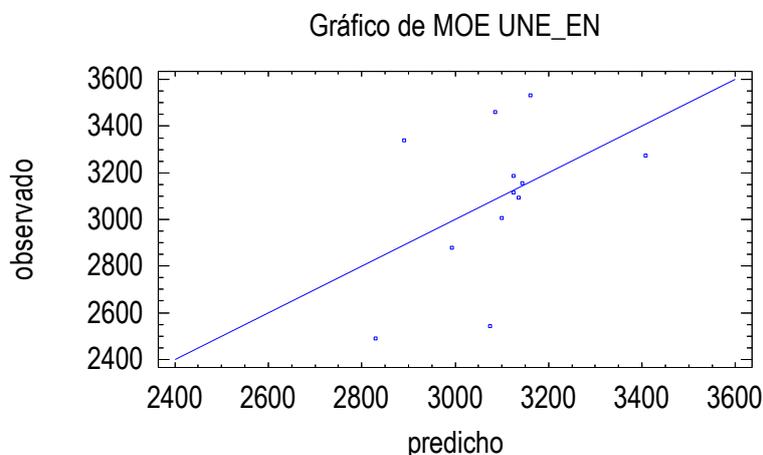


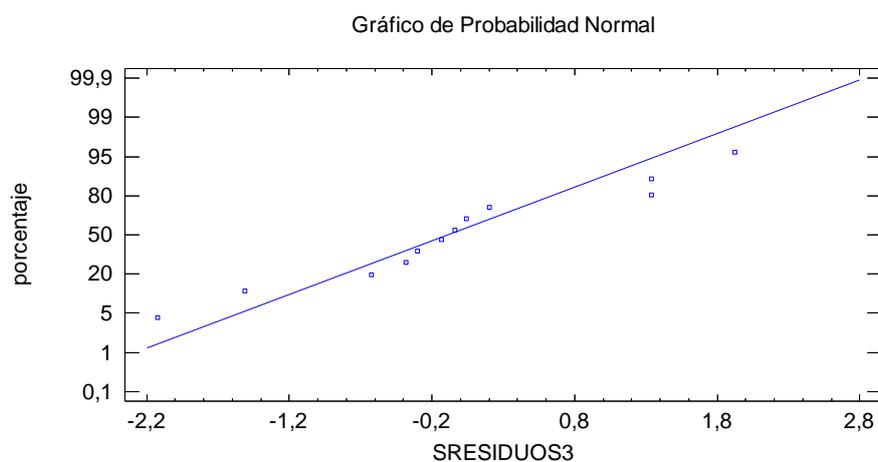
Figura 142. Gráfico de observado y predicho MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (12).

Tabla 146. Sesgo y curtosis estandarizados de residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (12).

Sesgo Estandarizado	-0,0365011
Curtosis Estandarizada	-0,0255129

Tabla 147. Prueba de normalidad para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	9,66667	0,208263
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,953235	0,634597

**Figura 143.** Gráfico de probabilidad normal para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd vibraciones longitudinales (12).

- MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd empotrada-libre medio

Tabla 148. Coeficientes MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd empotrada-libre medio (12).

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	-2435,82	1873,38	-1,30023	0,2227
Pendiente	0,905344	0,306748	2,95142	0,0145

Tabla 149. Análisis de varianza MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd empotrada-libre medio (12).

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	536808,	1	536808,	8,71	0,0145
Residuo	616250,	10	61625,0		
Total (Corr.)	1,15306E6	11			

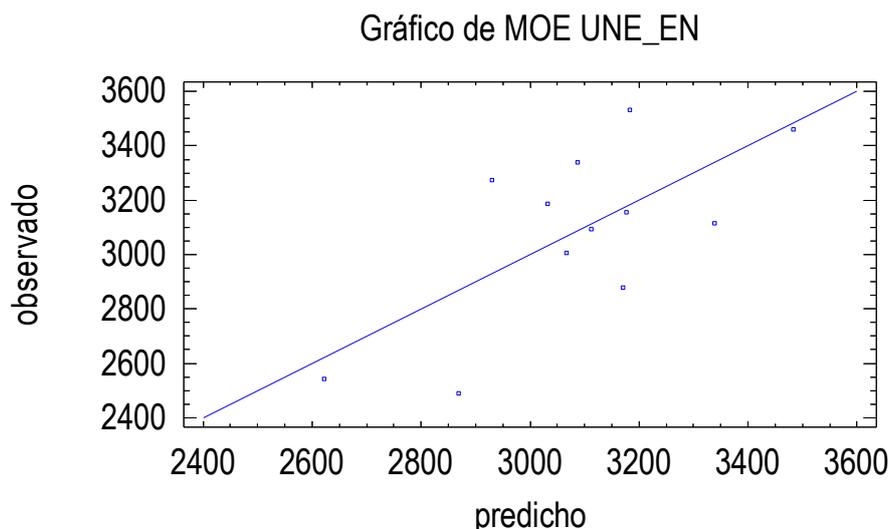


Figura 144. Gráfico de observado y predicho MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd empotrada-libre medio (12).

Tabla 150. Sesgo y curtosis estandarizados de residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd empotrada-libre medio (12).

Sesgo Estandarizado	0,0349863
Curtosis Estandarizada	-0,425195

Tabla 151. Prueba de normalidad para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd empotrada-libre medio (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	11,3333	0,124726
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,954866	0,657179

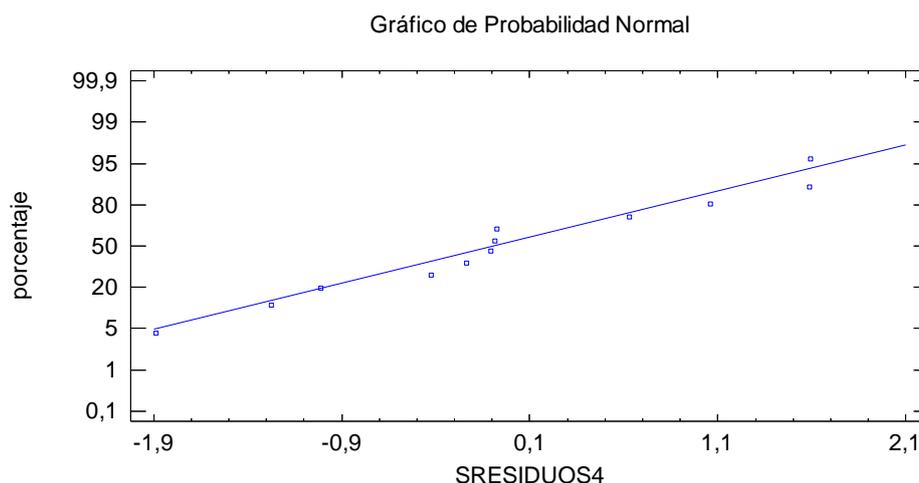


Figura 145. Gráfico de probabilidad normal para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs empotrada-libre medio (12).

- MOEd según UNE-EN 408:2011 vs MOEd biapoyada medio

Tabla 152. Coeficientes MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd biapoyada medio (12).

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	3155,68	941,817	3,35063	0,0074
Pendiente	-0,0128833	0,181682	-0,0709113	0,9449

Tabla 153. Análisis de varianza MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd biapoyada medio (12).

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	579,513	1	579,513	0,01	0,9449
Residuo	1,15248E6	10	115248,		
Total (Corr.)	1,15306E6	11			

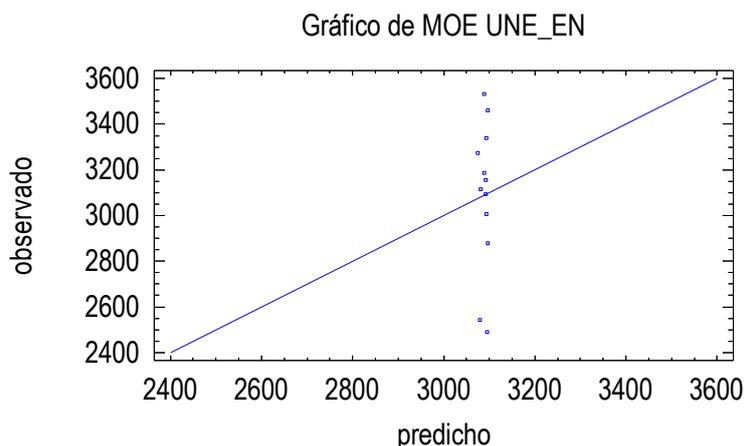


Figura 146. Gráfico de observado y predicho MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd biapoyada medio (12).

Tabla 154. Sesgo y curtosis estandarizados de residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd biapoyada medio (12).

Sesgo Estandarizado	-1,32794
Curtosis Estandarizada	0,226287

Tabla 155. Prueba de normalidad para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd biapoyada medio (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	8,0	0,332594
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,902432	0,162838

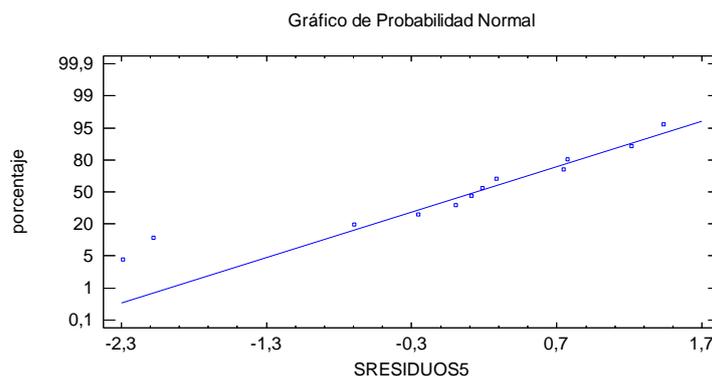


Figura 147. Gráfico de probabilidad normal para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd biapoyada medio (12).

- MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd “Ibertet” con un punto de carga

Tabla 156. Coeficientes MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd “Ibertest” con un punto de carga (12).

	Mínimos Cuadrados	Estándar	Estadístico	
Parámetro	Estimado	Error	T	Valor-P
Intercepto	1100,73	1307,36	0,84195	0,4195
Pendiente	0,449266	0,294695	1,52451	0,1584

Tabla 157. Análisis de varianza MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd “Ibertest” con un punto de carga (12).

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	217448,	1	217448,	2,32	0,1584
Residuo	935610,	10	93561,0		
Total (Corr.)	1,15306E6	11			

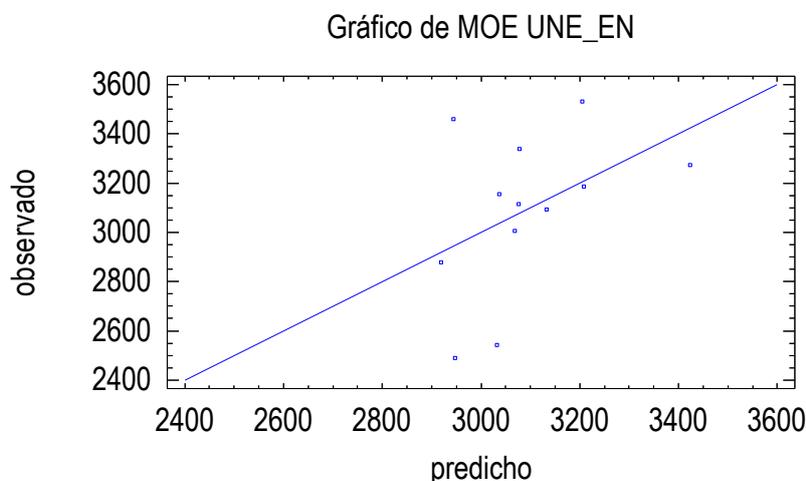


Figura 148. Gráfico de observado y predicho MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd “Ibertest” con un punto de carga (12).

Tabla 158. Sesgo y curtosis estandarizados de residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd “Ibertest” con un punto de carga (12).

Sesgo Estandarizado	0,0487183
Curtosis Estandarizada	0,262682

Tabla 159. Prueba de normalidad para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd “Ibertest” con un punto de carga (12).

Prueba	Estadístico	Valor-P
Chi-Cuadrado	9,66667	0,208263
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,948718	0,573354

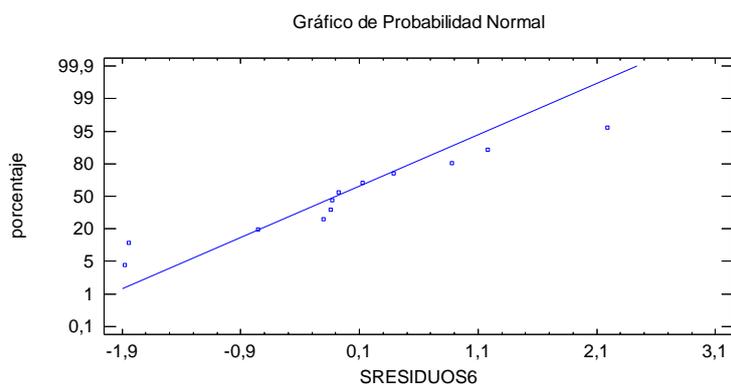


Figura 149. Gráfico de probabilidad normal para residuos MOE según UNE-EN 408:2011 vs MOEd “Ibertest” con un punto de carga (12).