



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

Máster en Ingeniería de Montes

Caracterización elastomecánica de vigas trío
reforzadas con fibras artificiales, de *P pinaster*
Ait. (región de procedencia Meseta
Castellana)

Alumno/a: Pozo Rodríguez, Pablo César

Tutor/a: Acuña Rello, Luis

Junio 2013

ÍNDICE GENERAL

1. RESUMEN	1
2. ANTECEDENTES.....	3
2.1 Introducción	3
2.2 Normativa referente a ensayos de madera aserrada.....	5
2.2.1 Análisis de la evolución de la normativa relativa a ensayos de madera aserrada.....	5
2.2.2 Clases resistentes y asignación de las clases de calidad a clases resistentes.....	7
2.2.3 Situación actual de la normativa sobre clasificación de la madera aserrada. Tipos de clasificación.....	10
2.2.3.1 Clasificación mediante ensayos no destructivos.....	10
2.2.3.1.1 Clasificación basada en criterios visuales.....	11
2.2.3.1.2 Clasificación basada en métodos instrumentales.....	16
2.2.3.1.2.1 Ensayos por ultrasonidos.....	16
2.2.3.1.2.2 Ensayos por métodos mecánicos.....	17
2.2.3.2 Clasificación mediante ensayos destructivos.....	19
2.3 Descripción de la especie empleada en este estudio.....	20
2.3.1 Descripción general.....	20
2.3.2 Floración y maduración.....	21
2.3.3 Ecología suelo y temperamento.....	21
2.3.4 Distribución.....	21
2.3.5 Descripción de la madera.....	21
2.3.6 Propiedades de la madera.....	22
2.3.7 Usos y aprovechamientos.....	22
2.3.8 Observaciones.....	22
2.4 Singularidades de la madera.....	22
2.4.1 Singularidades ligadas a la anatomía de la madera.....	23
2.4.1.1 Nudos.....	23
2.4.1.2 Anillos de crecimiento.....	23
2.4.1.3 Irregularidades de los anillos de crecimiento.....	24
2.4.1.4 Fendas.....	24
2.4.1.5 Acebolladuras.....	24
2.4.1.6 Bolsas de resina.....	24
2.4.1.7 Entrecasco.....	24
2.4.1.8 Madera de reacción.....	25

2.4.1.9 Desviación de la fibra.	25
2.4.1.10 Médula.	25
2.4.1.11 Madera juvenil.	26
2.4.2 Singularidades relacionadas con el proceso de aserrado de la madera.	26
2.4.2.1 Gemas.	26
2.4.2.1 Deformaciones máximas.	26
2.4.2.1 Daños mecánicos.	27
2.4.3 Singularidades relacionadas con alteraciones biológicas.	27
2.5 Principales propiedades de la madera estructural.	27
2.5.1 Principales propiedades físicas de la madera.	28
2.5.2 Propiedades mecánicas de la madera estructural.	31
2.5.3 Propiedades elásticas.	35
3. OBJETIVOS.	37
4. MATERIAL Y MÉTODOS.	39
4.1 Datos generales del muestreo.	39
4.2 Equipos de trabajo.	41
4.2.1 Equipo de ultrasonidos Sylvatest Trio ®.	41
4.2.2 Máquina Universal de Ensayos E.L.I.B.-100 Ibertest ®.	42
4.2.3 Equipos complementarios.	44
4.2.3.1 Rotulador permanente.	44
4.2.3.2 Cinta métrica.	44
4.2.3.3 Taladro eléctrico.	45
4.2.3.4 Balanza de precisión digital.	45
4.2.3.5 Tijeras.	45
4.2.3.6 Espátula metálica.	45
4.2.3.7 Martillo de carpintero.	45
4.2.3.8 Sargento de ariete rápido.	45
4.2.3.9 Sierra circular de banco.	45
4.3 Metodología empleada.	46
4.3.1 Descripción general.	46
4.3.2 Selección de tablas de <i>P. pinaster</i> a utilizar.	46
4.3.3 Clasificación según rectitud y azulado de las piezas.	46
4.3.4 Clasificación visual según norma.	47
4.3.5 Ensayos con métodos no destructivos de ultrasonidos.	47
4.3.6 Clasificación de las piezas según ultrasonidos.	48
4.3.7 Obtención de las vigas trío reforzadas con fibra de vidrio.	48

4.3.7.1 Preparación de las tiras de fibra de vidrio.	48
4.3.7.2 Encolado y colocación adecuada de las tiras de fibra de vidrio para obtener las vigas trío.	49
4.3.7.3 Proceso de fraguado de la cola y obtención final de las vigas.	55
4.3.8 Calculo de la densidad de la madera que conforma las vigas.	58
4.3.9 Obtención del MOEG y el MOR, mediante la realización de los ensayos a flexión con la máquina universal.	58
4.3.9.1 Determinación del módulo de elasticidad global de canto a flexión, (MOEG).	59
4.3.9.2 Determinación de la resistencia a la flexión estática, (MOR).	61
4.4 Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos.	63
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	65
5.1 Estadística descriptiva.	65
5.1.1 Análisis descriptivo de la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas en las probetas iniciales.	65
5.1.2 Análisis descriptivo de la clasificación según la norma UNE 56544 de las probetas iniciales.	66
5.1.3 Análisis descriptivo del nº total de nudos de las probetas iniciales.	68
5.1.4 Análisis descriptivo de la rectitud de las probetas iniciales.	70
5.1.5 Análisis descriptivo del nivel de azulado de las probetas iniciales.	72
5.1.6 Análisis descriptivo de la intensidad del azulado de las probetas iniciales.	73
5.1.7 Análisis descriptivo del porcentaje del □ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de las probetas iniciales.	74
5.1.8 Análisis descriptivo del MOR, MOE y de la densidad en vigas macizas.	76
5.1.9 Análisis descriptivo del MOR, MOE y de la densidad en vigas trío.	77
5.1.10 Asignación de clases resistentes.	79
5.2 Estadística comparativa.	79
5.2.1 Comparación del valor de la densidad entre las poblaciones de vigas trío y de vigas macizas.	80
5.2.2 Comparación de MOR entre las poblaciones de vigas trío y de vigas macizas.	80
5.2.3 Comparación de MOE entre las poblaciones de vigas trío y de vigas macizas.	81
5.3 Estadística predictiva.	82
5.3.1 Introducción.	82
5.3.2 Análisis de correlaciones.	82
5.3.2.1 Análisis de correlaciones de las variables existentes en vigas trío.	82
5.3.3 Regresiones lineales simples.	84
5.3.3.1 Regresión simple que describe la relación entre MOR y la densidad de la población de vigas macizas.	84

5.3.3.2 Regresión simple que describe la relación entre MOR y la densidad de la población de vigas trío.	85
5.3.3.3 Regresión simple que describe la relación entre MOE y la densidad de la población de vigas macizas.	86
5.3.3.4 Regresión simple que describe la relación entre MOE y la densidad de la población de vigas trío.	87
5.3.4 Modelo general lineal para vigas trío.	88
5.3.4.1 Modelo general lineal que describe la relación entre MOR y las variables que presentan una relación estadística significativa con este.	88
5.3.4.2 Modelo general lineal que describe la relación entre MOE y las variables que presentan una relación estadística significativa con este.	89
6. CONCLUSIONES.	91
7. BIBLIOGRAFÍA.	93
8. ANEJOS.	95
8.1 Resultados obtenidos.	95
8.1.1 Vigas trío reforzadas con fibra de vidrio.	95
8.1.2 Vigas macizas (material original).	102
8.2 Estadística descriptiva.	103
8.2.1 Análisis descriptivo de la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas.	103
8.2.1.1 Velocidad de ondas ultrasónicas en probetas del grupo 1.	103
8.2.1.2 Velocidad de ondas ultrasónicas en probetas del grupo 2.	104
8.2.1.3 Velocidad de ondas ultrasónicas en probetas del grupo 3.	105
8.2.2 Análisis descriptivo del porcentaje del \square máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de la tabla.	106
8.2.2.1 Porcentaje de \square máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de las probetas del grupo 1.	106
8.2.2.2 Porcentaje de \square máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de las probetas del grupo 2.	107
8.2.2.3 Porcentaje de \square máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de las probetas del grupo 3.	108
8.2.3 Análisis descriptivo del MOR, MOE y de la densidad en vigas macizas.	109
8.2.3.1 MOR.	109
8.2.3.2 MOE.	110
8.2.3.3 Densidad.	111
8.2.4 Análisis descriptivo del MOR, MOE y de la densidad en vigas trío.	112
8.2.4.1 MOR.	112
8.2.4.2 MOE.	113
8.2.4.3 Densidad.	114
8.3 Estadística predictiva.	115

8.3.1 Regresiones lineales simples. Análisis residuales.....	115
8.3.1.1 MOR vs densidad en vigas macizas.....	115
8.3.1.2 MOE vs densidad en vigas macizas.....	117
8.3.1.3 MOE vs densidad en vigas trío.....	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del método de transmisión	17
Figura 2. Ensayo no destructivo a flexión	18
Figura 3. Ensayo destructivo	20
Figura 4. Partes observadas en la sección de un tronco.....	28
Figura 5. Conjunto de probetas iniciales	39
Figura 6. Detalle de los defectos de las probetas iniciales.....	40
Figura 7. Equipo Sylvatest Trio ®.....	41
Figura 8. Maquina Universal E.L.I.B.-100 W Ibertest®.....	42
Figura 9. Software utilizado	43
Figura 10. Detalle de extensómetro utilizado	44
Figura 11. Selección y numeración de tablas iniciales	46
Figura 12. Detalle del azulado de las piezas	47
Figura 13. Esquema de la situación de las tiras de fibra	49
Figura 14. Dimensiones de las tiras de fibra utilizadas	49
Figura 15. Adhesivo bicomponente	50
Figura 16. Encolado 1.....	50
Figura 17. Encolado 2.....	51
Figura 18. Encolado 3.....	51
Figura 19. Encolado 4.....	52
Figura 20. Encolado 5.....	52
Figura 21. Encolado 6.....	53
Figura 22. Encolado 7.....	53
Figura 23. Encolado 8.....	54
Figura 24. Final de proceso de encolado	54
Figura 25. Prensado	55
Figura 26. Detalle de pérdida de cola	56
Figura 27. Detalle de listones de madera utilizados	56
Figura 28. Detalle del desplazamiento de tiras de fibra de vidrio	57
Figura 29. Viga antes y después de eliminar restos de tiras de fibra y cola sobrante	57
Figura 30. Peso de cada viga para posteriormente calcular la densidad	58
Figura 31. Inicio de ensayo.....	59
Figura 32. Esquema del ensayo	60
Figura 33. Momento que finaliza la presión y en el cual retiramos el extensómetro	60
Figura 34. Momento final del ensayo, rotura de la probeta	62

Figura 35. Detalle de probetas rotas después del ensayo	63
Figura 36. Gráfico de caja y bigotes para probetas de grupo 1	65
Figura 37. Gráfico de caja y bigotes para probetas de grupo 2.....	66
Figura 38. Gráfico de caja y bigotes para probetas de grupo 3.....	66
Figura 39. Gráfico de sectores según la clasificación UNE 56544 para probetas de grupo 1	67
Figura 40. Gráfico de sectores según la clasificación UNE 56544 para probetas de grupo 2	67
Figura 41. Gráfico de sectores según la clasificación UNE 56544 para probetas de grupo 3	67
Figura 42. Gráfico caja y bigotes para nº total de nudos en probetas del grupo 1.....	68
Figura 43. Gráfico caja y bigotes para nº total de nudos en probetas del grupo 2.....	69
Figura 44. Gráfico caja y bigotes para nº total de nudos en probetas del grupo 3.....	69
Figura 45. Gráfico sectores para frecuencia de nº de nudos en probetas de del grupo1	69
Figura 46. Gráfico sectores para frecuencia de nº de nudos en probetas de del grupo2	70
Figura 47. Gráfico sectores para frecuencia de nº de nudos en probetas de del grupo3	70
Figura 48. Gráfico sectores para el nivel de rectitud en probetas de grupo 1	71
Figura 49. Gráfico sectores para el nivel de rectitud en probetas de grupo 2.....	71
Figura 50. Gráfico sectores para el nivel de rectitud en probetas de grupo 3.....	71
Figura 51. Gráfico sectores para el nivel de azulado en probetas del grupo 1	72
Figura 52. Gráfico sectores para el nivel de azulado en probetas del grupo 2	72
Figura 53. Gráfico sectores para el nivel de azulado en probetas del grupo 3	73
Figura 54. Gráfico sectores para el nivel de intensidad de azulado en del grupo 1	73
Figura 55. Gráfico sectores para el nivel de intensidad de azulado en del grupo 2	74
Figura 56. Gráfico sectores para el nivel de intensidad de azulado en del grupo 3	74
Figura 57. Gráfico de caja y bigotes del % del □ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de las probetas del grupo 1	75
Figura 58. Gráfico de caja y bigotes del % del □ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de las probetas del grupo 2	75
Figura 59. Gráfico de caja y bigotes del % del □ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de las probetas del grupo 3	75
Figura 60. Gráfico de caja y bigotes del MOR para vigas macizas	76
Figura 61. Gráfico de caja y bigotes del MOE para vigas macizas	77
Figura 62. Gráfico de caja y bigotes para la densidad en vigas macizas.....	77
Figura 63. Gráfico de caja y bigotes del MOR para vigas trío	78
Figura 64. Gráfico de caja y bigotes del MOE para vigas trío	78
Figura 65. Gráfico de caja y bigotes para la densidad en vigas trío.....	78

Figura 66. Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para comparar las densidades de las poblaciones de vigas trío y vigas macizas.....	80
Figura 67. Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para comparar el MOR de las poblaciones de vigas trío y vigas macizas	81
Figura 68. Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para comparar el MOE de las poblaciones de vigas trío y vigas macizas	81
Figura 69. Gráfico del modelo ajustado para MOR vs densidad en vigas macizas	84
Figura 70. Gráfico del modelo ajustado para MOR vs densidad en vigas trío	85
Figura 71. Gráfico del modelo ajustado para MOE vs densidad en vigas macizas.....	86
Figura 72. Gráfico del modelo ajustado para MOE vs densidad en vigas trío.....	87
Figura 73. Grafico de P. Normal de velocidades de onda ultrasónica en probetas del grupo 1	104
Figura 74. Grafico de Dispersión de velocidades de ondas ultrasónicas en probetas del grupo 1.	104
Figura 75. Grafico de P. Normal de velocidades de ondas ultrasónicas en probetas del grupo 2	105
Figura 76. Grafico de Dispersión de velocidades de ondas ultrasónicas en probetas del grupo 2.	105
Figura 77. Grafico de P. Normal de velocidades de ondas ultrasónicas en probetas del grupo 3	106
Figura 78. Grafico de Dispersión de velocidades de ondas ultrasónicas en probetas del grupo 3.	106
Figura 79. Grafico de P. Normal del porcentaje del □ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de probetas del grupo 1	107
Figura 80. Grafico de Dispersión del porcentaje del □ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de probetas del grupo 1	107
Figura 81. Grafico de P. Normal del porcentaje del □ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de probetas del grupo 2.....	108
Figura 82. Grafico de Dispersión del porcentaje del □ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de probetas del grupo 2.....	108
Figura 83. Grafico de P. Normal del porcentaje del □ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de probetas del grupo 3.....	109
Figura 84. Grafico de Dispersión del porcentaje del □ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de probetas del grupo 3.....	109
Figura 85. Grafico de P. Normal del MOR para vigas macizas	110
Figura 86. Grafico de Dispersión del MOR para vigas macizas	110
Figura 87. Grafico de P. Normal del MOE para vigas macizas	111
Figura 88. Grafico de Dispersión del MOE para vigas macizas	111
Figura 89. Grafico de P. Normal de la densidad para vigas macizas.....	112
Figura 90. Grafico de Dispersión de la densidad para vigas macizas.....	112
Figura 91. Grafico de P. Normal del MOR para vigas trío.....	113
Figura 92. Grafico de Dispersión del MOR para vigas trío.....	113

Figura 93. Grafico de P. Normal del MOE para vigas trío	114
Figura 94. Grafico de Dispersión del MOE para vigas trío	114
Figura 95. Grafico de P. Normal de la densidad para vigas trío.....	115
Figura 96. Grafico de Dispersión de la densidad para vigas trío.....	115
Figura 97. Grafico de P. Normal del análisis de residuales de MOR vs densidad en vigas macizas.....	116
Figura 98. Grafico de Densidad Suavizada del análisis de residuales de MOR vs densidad en vigas macizas	116
Figura 99. Grafico de P. Normal del análisis de residuales de MOE vs densidad en vigas macizas.....	117
Figura 100. Grafico de Densidad Suavizada del análisis de residuales de MOE vs densidad en vigas macizas	117
Figura 101. Grafico de P. Normal del análisis de residuales de MOE vs densidad en vigas trío	118
Figura 102. Grafico de Densidad Suavizada del análisis de residuales de MOE vs densidad en vigas trío.....	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Normas a nivel internacional para la clasificación visual de madera estructural.....	6
Tabla 2. Valores asociados a clases de resistencia según norma UNE-EN-338. Madera aserrada de uso estructural. Frondosas.....	9
Tabla 3. Valores asociados a clases de resistencia según norma UNE-EN-338. Madera aserrada de uso estructural. Coníferas y chopo	9
Tabla 4. Especificaciones de la norma U.N.E. 56.544	15
Tabla 5. Propiedades de la madera de <i>Pinus pinaster</i>	22
Tabla 6. Velocidades en probetas de diferentes grupos	65
Tabla 7. Clasificación según norma UNE 56544 de las probetas de los diferentes grupos.....	66
Tabla 8. Nº total de nudos en probetas de diferentes grupos	68
Tabla 9. Frecuencias de nº de nudos en probetas de diferentes grupos	68
Tabla 10. Nivel de rectitud de probetas pertenecientes a los diferentes grupos	70
Tabla 11. Nivel de azulado de las probetas pertenecientes a los diferentes grupos....	72
Tabla 12. Nivel de intensidad de azulado de las probetas pertenecientes a los diferentes grupos.....	73
Tabla 13 Porcentaje del □ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de las probetas iniciales	74
Tabla 14. MOR, MOE y densidad en vigas macizas	76
Tabla 15. MOR, MOE y densidad en vigas trío	77
Tabla 16. Valores característicos y medios para MOR, MOE y densidad en vigas macizas y vigas trío	79
Tabla 17. Comparación de la densidad entre poblaciones de vigas trío y macizas	80
Tabla 18 Comparación de MOR entre poblaciones de vigas trío y macizas	80
Tabla 19. Comparación de MOE entre poblaciones de vigas trío y macizas	81
Tabla 20. Correlaciones en vigas trío	82
Tabla 21. Análisis de varianza del modelo MOR vs densidad en vigas macizas	84
Tabla 22. Principales valores estadísticos del modelo MOR vs densidad en vigas macizas	84
Tabla 23. Análisis de varianza del modelo MOR vs densidad en vigas trío	85
Tabla 24. Principales valores estadísticos del modelo MOR vs densidad en vigas trío	85
Tabla 25. Análisis de varianza del modelo MOE vs densidad en vigas macizas	86
Tabla 26. Principales valores estadísticos del modelo MOE vs densidad en vigas macizas	86
Tabla 27. Análisis de varianza del modelo MOE vs densidad en vigas trío	87
Tabla 28. Principales valores estadísticos del modelo MOE vs densidad en vigas trío	87

Alumno: Pablo César Pozo Rodríguez

E.T.S. Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid (Campus de Palencia)

Máster en Ingeniería de Montes

Tabla 29. Análisis de varianza del modelo MOR vs variables que presentan una relación estadística significativa con este.....	88
Tabla 30. Suma de Cuadrados Tipo III modelo MOR vs variables que presentan una relación estadística significativa con este.....	88
Tabla 31. Análisis de varianza del modelo MOE vs variables que presentan una relación estadística significativa con este.....	89
Tabla 32. Suma de Cuadrados Tipo III modelo MOE vs variables que presentan una relación estadística significativa con este.....	89
Tabla 33. Resultados de los ensayos en vigas trío	95
Tabla 34. Resultados de los ensayos en vigas trío	102
Tabla 35. Sesgo y curtosis de velocidades de ondas ultrasónicas en probetas del grupo 1	103
Tabla 36. Sesgo y curtosis de velocidades de ondas ultrasónicas en probetas del grupo 2	104
Tabla 37. Sesgo y curtosis de velocidades de ondas ultrasónicas en probetas del grupo 3	105
Tabla 38. Sesgo y curtosis del porcentaje del □ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de probetas del grupo 1	106
Tabla 39. Sesgo y curtosis del porcentaje del □ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de probetas del grupo 2	107
Tabla 40. Sesgo y curtosis del porcentaje del □ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de probetas del grupo 3	108
Tabla 41. Sesgo y curtosis para MOR en vigas macizas	109
Tabla 42. Sesgo y curtosis para MOE en vigas macizas	110
Tabla 43. Sesgo y curtosis para densidad en vigas macizas	111
Tabla 44. Sesgo y curtosis para MOR en vigas trío	112
Tabla 45. Sesgo y curtosis para MOE en vigas trío	113
Tabla 46. Sesgo y curtosis para densidad en vigas trío	114
Tabla 47. Sesgo y curtosis del análisis de residuales de MOR vs densidad en vigas macizas	115
Tabla 48. Prueba de Normalidad para Sresiduos1 de MOR vs densidad en vigas macizas	116
Tabla 49. Sesgo y curtosis del análisis de residuales de MOE vs densidad en vigas macizas	117
Tabla 50. Prueba de Normalidad para Sresiduos2 de MOE vs densidad en vigas macizas	118
Tabla 51. Sesgo y curtosis del análisis de residuales de MOE vs densidad en vigas trío	118
Tabla 52. Prueba de Normalidad para Sresiduos3 de MOE vs densidad en vigas trío	118

1. RESUMEN

RESUMEN

1. RESUMEN.

La madera es un material que ha estado presente desde sus comienzos en el proceso constructivo humano. Con la aparición del hormigón armado y el acero a mediados y final del siglo XIX respectivamente, la utilización de madera estructural sufre un retroceso primero y un parón después, del que no se empieza a recuperar hasta 1950.

En la actualidad, España dispone de un marco normativo que sitúa a la madera estructural en igualdad de condiciones frente a otros materiales y se está produciendo un aumento en la demanda de esta, que hace muy necesaria la actualización de este sector para poder dar respuesta a los nuevos retos que se presentan y poder ofrecer en edificación las mismas garantías de calidad y seguridad estructural, utilizando materiales que disminuyan los costes totales.

La madera en general, presenta respecto del resto de los materiales de construcción una ventaja exclusiva por su naturaleza. Se trata de un recurso natural renovable, estando el consumo de energía que se utiliza en su proceso de transformación, muy por debajo del de otros materiales, ofreciendo ventajas como sostenibilidad, adaptabilidad y facilidad de uso. Este conjunto de ventajas junto con las de carácter económico, que podrían suponer el uso de madera estructural de bajo coste en construcción, hacen muy interesante que en la actualidad se realicen estudios encaminados a estimar con una mayor garantía, las propiedades elastomecánicas de las piezas de madera para construcción.

En el presente Proyecto Fin de Máster, se ha realizado en primer lugar una caracterización elastomecánica sobre una muestra de 45 vigas trío reforzadas con fibra de vidrio, de dimensiones $[1200\pm 10] \times [55\pm 5] \times [40\pm 3]$ mm, realizando ensayos destructivos y no destructivos. Se han utilizado para la conformación de este tipo de vigas, una muestra de 135 probetas de *Pinus pinaster* Ait. (región de procedencia Meseta Castellana), de dimensiones $[1200\pm 10] \times [55\pm 5] \times [12\pm 3]$ mm, consideradas de baja calidad, por presentar multitud de singularidades o defectos que hacen que tengan unas propiedades mecánicas relativamente bajas, y que condicionan su utilización en aplicaciones constructivas. Para ello se ha realizado una clasificación visual previa de la totalidad de las probetas, atendiendo a la norma UNE-EN-56544.

Se ha comprobado que se puede dar un uso estructural a estas piezas de madera de bajas características estructurales, combinándolas con fibras de vidrio de altas propiedades elastomecánicas, sin producir una merma en las propiedades elastomecánicas, comprobando además que éstas se incrementaron de manera significativa, produciéndose una revalorización de este tipo de madera.

En segundo lugar hemos realizado una comparación elastomecánica entre una muestra de 49 vigas macizas de la misma clase de madera, consideradas después de analizarlas como una partida de madera no estructural, de las que ya teníamos sus caracterizaciones y que se utilizan como patrón de los valores elastomecánicos del material; y nuestra muestra de 45 vigas trío de madera laminada encolada, reforzadas con fibras de vidrio, de altas propiedades elastomecánicas, que después del análisis

Caracterización elastomecánica de vigas trío reforzadas con fibras artificiales, de *P. pinaster* Ait. (región de procedencia Meseta Castellana)

Resumen

realizado podemos afirmar que pertenecen a una población de madera estructural C-16.

Alumno: Pablo César Pozo Rodríguez
E.T.S. Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid (Campus de Palencia)
Máster en Ingeniería de Montes

2. ANTECEDENTES

ANTECEDENTES

2. ANTECEDENTES.

Procedemos a realizar una revisión de la normativa nacional y europea relativa a ensayos de madera aserrada estructural, analizaremos la especie objeto de nuestro estudio, las singularidades de la madera y por último las diferentes propiedades de la madera estructural.

2.1 Introducción.

La madera es un material que posee por lo general unas buenas propiedades físicas: dureza, ligereza, aislante, facilidad para modificarla, dilatación térmica muy baja, etc., y unas propiedades mecánicas que varían en cuanto a su resistencia, según trabajemos de manera perpendicular o paralela a la fibra. Además cuenta con la ventaja de ser un material natural, abundante en la naturaleza y en comparación con otros productos empleados en la construcción (acero, hormigón, etc.), la madera presenta una alta resistencia a flexión, sobre todo si se compara con su propio peso, y una buena resistencia a flexión y compresión, siempre paralelas al sentido de las fibras (Argüelles et al., 2000). Estos factores son los que hacen a la madera un material apropiado para su uso en la construcción.

La madera de uso estructural se emplea en diferentes piezas que por lo general pueden clasificarse dentro de los siguientes órdenes:

- Piezas principales, constituidas por vigas, pórticos, arcos u otras formas estructurales.
- Piezas secundarias, constituida por correas o viguetas que apoyan sobre las piezas principales. En algunos casos en los que la luz de estos elementos es grande, se puede introducir un tercer orden de piezas, como son los cabios y parecillos.
- Paneles de cubierta, forman el cerramiento y a su vez impermeabilizan la cubierta.
- Sistemas de arriostramiento, para garantizar la estabilidad transversal de la construcción.

La heterogeneidad característica de la madera en cuanto a sus propiedades, debido a su estructura interna y a la anisotropía que presenta, hace que pueda tener diferentes usos según la especie que queramos utilizar, y su comportamiento en cuanto a resistencia, según los esfuerzos a los que sea sometida, será diferente de unas a otras. Según las diferentes especies y las condiciones a las que estén sometidas (clima, suelo, duración del periodo vegetativo, etc.) pueden existir grandes variaciones de las propiedades físico-mecánicas de la madera. Incluso dentro de un mismo árbol la madera producida puede tener unas propiedades diferentes.

Para poder asegurar la resistencia que puede ofrecer la madera de una especie en concreto, será necesario conocer todas las características que tenga. Se clasifican

en grupos homogéneos en cuanto a calidad y resistencia estructural y según su caracterización física, mecánica y de elasticidad, para poder así asegurar unos valores mínimos de resistencia; requisito necesario para el empleo de este material en el mundo de la construcción.

Una clasificación de la madera aserrada según su resistencia, resulta imprescindible para poder aprovechar al máximo las ventajas de este material, optimizando de esta forma el heterogéneo comportamiento estructural que presenta la madera.

En algunos países el uso estructural de la madera está muy difundido desde hace muchos años, como es el caso de los Países Escandinavos, Estados Unidos, Rusia y otros pueblos del Norte de Europa, existiendo una clasificación estructural; en otros su empleo con estos fines es prácticamente inexistente y es difícil encontrar madera clasificada para fines estructurales.

Las primeras clasificaciones o normas sobre la madera de uso estructural, que en un primer momento fueron clasificaciones basadas únicamente en aspectos visuales de factores que podían llegar a afectar a la resistencia, como los nudos, fendas, etc., se introdujeron en 1922 en EEUU, apareciendo en Europa algunos años más tarde, a partir de 1930.

Hasta los años 60 no se empezaron a introducir algunas clasificaciones, atendiendo a aspectos mecánicos mucho más objetivos que los métodos visuales, que no reflejan con demasiada rigurosidad las calidades de cada tipo de madera, obteniendo siempre calidades muy por debajo de las reales al ser métodos muy estrictos y subjetivos. La madera que va a ser utilizada en construcción de estructuras necesita de la determinación de sus características, para asegurarnos su resistencia ante las sollicitaciones a las que va a estar sometida.

En un primer momento solo se ensayaban probetas de pequeñas dimensiones, libres de defectos, con el inconveniente de no tener las dimensiones ni todas las condiciones de la madera de tamaño estructural. Actualmente se pueden realizar ensayos mecánicos destructivos y no destructivos, con piezas de escuadrías y calidades comerciales, es decir con tamaño estructural, para conocer sus propiedades mecánicas reales y utilizarlas como piezas de manera objetiva. Se realizan ensayos con una alta cantidad de piezas que presentan singularidades y defectos comunes provocados en el proceso de aserrado y secado. Al realizarse este tipo de ensayos que incluyen los defectos normales que pueden presentar los elementos estructurales, se obtienen valores de resistencias características y no de tensiones básicas como ocurría antes. De esta forma se logra unificar, en cierta medida, su utilización con la de cualquier otro material estructural resistente y, lo que es más importante, un mayor nivel de confianza en estos ensayos.

A pesar de ello el cálculo de elementos estructurales es dificultoso y se suelen colocar piezas sobredimensionadas en muchas ocasiones, disminuyendo de esta manera las ventajas del empleo de madera de uso estructural en construcción.

2.2 Normativa referente a ensayos de madera aserrada.

2.2.1 Análisis de la evolución de la normativa relativa a ensayos de madera aserrada.

La madera es un material anisótropo que presenta acusada variabilidad en sus propiedades mecánicas. Esta elevada variabilidad tiene sus fundamentos en factores genéticos, selvícolas e incluso tecnológicos (Díez y Fernández-Golfín et al., 1998).

En la actualidad con el libre comercio existente entre los países europeos, ha habido un aumento de la heterogeneidad, a causa de la existencia de numerosas especies diferentes y distintas regiones de procedencia dentro de cada especie. Esta heterogeneidad existente, junto con la gran variabilidad propia de la madera y las nuevas especie, causa limitaciones importantes en su uso estructural, por el desconocimiento por parte de los comerciantes, de las características que presentan cada una.

Se empiezan a buscar y unificar criterios de clasificación, para conseguir una homogeneidad del material que minimice su variabilidad y haga que la madera de uso estructural cumpla con la nueva normativa, en cuanto a criterios de calidad y de seguridad que se les exige a otros materiales.

Con el crecimiento y desarrollo del sector maderero, aumenta en gran medida la importancia de la clasificación de estos productos, en cuanto sus características físicas y mecánicas. Con el reconocimiento y cumplimiento de estas normas de calidad para la madera estructural, aumenta la confianza y la protección de los consumidores, se crean limitaciones entre productores competidores y se produce un beneficio global.

En primera instancia existían diversos sistemas para clasificar y normas de clasificación visual, dentro del seno de los países europeos, siendo esto negativo para el mercado común. A partir de finales de los años 80 y durante los 90 se llevo a cabo una normalización, que se tradujo en unas notables mejoras para el mercado maderero europeo.

En la actualidad, la mayoría de los países europeos tienen sus propias normas de clasificación visual, las cuales están adaptadas a sus maderas y a las características de sus mercados (mayor demanda de una especie, empleo de determinadas maderas, procedimiento propio de clasificación, etc.), si bien es donde se establecen los requisitos mínimos que toda norma de clasificación visual debe contener.

Todas las normas europeas presentan una estructura muy similar, en la cual se desarrollan y se evalúan los criterios de calidad que afectan a la resistencia de la madera. A partir de unos determinados valores límites para cada uno de los criterios de calidad, la madera aserrada podrá ser clasificada en unas determinadas clases visuales de calidad, las cuales se podrían asignar posteriormente a una correspondiente clase resistente.

Una importante diferencia entre las normas de clasificación visual de los diferentes países, se encuentra en el procedimiento de medición y evaluación de la nudosidad, criterio de calidad que más relevancia tiene en la clasificación visual de la madera según su resistencia y a su vez criterio más complicado de evaluar, por las múltiples formas en las que el nudo puede presentarse en la pieza de madera aserrada. En la

siguiente tabla se citan algunas de las principales normas de clasificación visual de madera estructural utilizadas a nivel internacional, que posteriormente se describirán brevemente.

Tabla 1. Normas a nivel internacional para la clasificación visual de madera estructural

NORMAS	PAÍS
UNE 56544	España
NFB 52001	Francia
DIN 4074	Alemania
INSTA 142	Países Nórdicos
BSI 4978	Reino Unido
NGRDL	EEUU
NLGA	Canadá

Es el Comité Europeo de Normalización (CEN) a través de los Comités Técnicos (TC), el que crea y redacta la normativa sobre madera aserrada de uso estructural, para establecer a nivel europeo las normas de calidad y proteger los intereses de los usuarios. En el caso específico de la madera aserrada de uso estructural, el encargado de redactar esta normativa es el CEN-TC 124 “Estructuras de madera” creado en 1.987, en donde se incluye la normalización de las dimensiones y tolerancias UNE-EN-336 (Madera estructural. Coníferas y chopo. Tamaño y tolerancia), UNE-EN-338 (Madera estructural. Clases resistentes), UNE-EN-384 (Madera estructural. Clases resistentes. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad), UNE-EN-1912 (Asignación de calidades visuales y especies), UNE-EN-408 (Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas) y UNE-EN-1408-1 (Estructuras de madera. Clasificación de la madera estructural con sección transversal rectangular. Parte I: Especificaciones generales).

En lo referente a la normativa española, la madera aserrada comenzó siendo clasificada por su aspecto, donde los criterios de clasificación estaban basados en la apariencia y los defectos de la madera se penalizaban atendiendo al grado de apariencia en su superficie (Arriaga et al., 2003). Es habitual que estos criterios de clasificación varíen en función de las especies y sus procedencias. En 1996 se publicó definitivamente la norma UNE-56544 “Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural”. En esta norma se establece un sistema de clasificación visual aplicable a la madera aserrada para uso estructural de sección rectangular de las principales especies de coníferas españolas, siendo objeto en un primer momento, 6 especies de importancia comercial y utilizadas habitualmente en estructuras.

El desarrollo de esta norma española ha sido siempre paralelo a la norma europea homologa para estas clasificaciones, por lo que se puede asegurar que la normativa española cumple en estos momentos con todos los requisitos que se establecen a nivel europeo para la clasificación visual de la madera según su resistencia.

Las modificaciones de la norma española UNE 56544 en los últimos años han sido varias, destacando el paso de tres clases de clasificación visual (ME-1, ME-2 y ME-3) a las actuales dos clases (ME-1 y ME-2), la exclusión de las asignaciones consideradas en su día para maderas de frondosas y el desarrollo de diferentes criterios para la medición y evaluación de la nudosidad, intentando estimar así la influencia de los nudos sobre la resistencia de la madera, en función de la posición en la pieza donde estos se sitúan (los ya eliminados nudos axiales o los vigentes nudos de margen).

2.2.2 Clases resistentes y asignación de las clases de calidad a clases resistentes.

En los últimos años se ha llevado a cabo un proceso normalizador en el ámbito de la tecnología de la madera, que ha propiciado una serie de normativas y reglamentos que permiten y aseguran el empleo de la madera como material estructural con total garantía.

En Europa es el Comité Técnico Normalizador CEN TC 124, creado en 1987, el responsable de la normalización de los productos destinados a la construcción. Estas normas afectan tanto a aspectos cualitativos de los productos (normas armonizadas), como a aspectos de ensayo y clasificación (Hermoso, 2001).

Si queremos conocer las resistencia de un tipo de madera determinado, será necesario realizar una caracterización mecánica de ésta y determinar una serie de propiedades de la madera que estén relacionadas con su resistencia. Entre ellas podemos destacar la resistencia a flexión, el modulo de elasticidad a flexión, la densidad, el modulo de rotura, la resistencia a tracción y a compresión, el modulo de elasticidad a tracción, la resistencia al cortante y su modulo de elasticidad, etc.

Hoy en día con la gran variedad de tipos y calidades diferentes de maderas que podemos emplear procedentes de cualquier parte del mundo, con la diversidad de sus usos y aplicaciones y con las grandes capacidades de producción de las industrias de la madera, se han originado una gran variedad de combinaciones de especies y calidades, con propiedades mecánicas muy diferentes.

Esta situación genera un proceso de globalización del mercado, que provoca que se multiplique la oferta y la demanda de la madera de uso estructural y una reducción de sus precios, a la misma vez que se originan dificultades en el cálculo y la especificación de las estructuras de madera, al aumentar el número de especies.

Para evitar esta situación sin disminuir el libre comercio de la madera, se propuso en el ámbito europeo la introducción de un sistema de clases resistentes de la madera, aprovechando la experiencia positiva de iniciativas similares llevadas a cabo en el Reino Unido y Australia (Hermoso, 2001).

Este sistema para asignar clases resistentes, define una serie de grupos de resistencia a partir de unos valores mínimos de resistencia, elasticidad y densidad. Se aplicarán a cada combinación de especie-calidad una determinada clase resistente, siempre que las propiedades mecánicas de dicha combinación sean al menos iguales a las descritas como mínimas para cada clase de resistencia.

La norma que desarrolla la asignación de clases de calidad a clases resistentes es la UNE-EN-338, "Madera estructural. Clases resistentes". Esta norma es la versión oficial, en español de la Norma Europea EN-338. Establece un sistema de clases resistentes, agrupando calidades y especies que tienen niveles de resistencia similares, de forma que puedan ser intercambiables, facilitándose así los cálculos y diseños de las estructuras de madera. En ella se describen cada una de las clases resistentes, de tal forma que, para cada una de ellas, se adjuntan los valores característicos o medios de la resistencia, la elasticidad, la densidad, etc.

Se realiza una diferenciación entre clases resistentes de coníferas y de frondosas, presentando estas últimas un número menor de ellas, que se explica por su menor uso estructural. La estructura anatómica de coníferas y frondosas, al ser muy diferente, repercute en unos valores distintos de resistencia y tan solo el chopo presenta un comportamiento estructural similar al de coníferas, aplicándosele las mismas clases de resistencia.

Con este sistema se consigue que se puedan realizar los cálculos con las propiedades mecánicas pertenecientes a una clase resistente determinada, sin necesidad de conocer sus costes y calidades, independientemente del tipo de especie que después se utilice. Se amplía la oferta al poder obtener para una misma resistencia diferentes combinaciones especie-calidad, y a la misma vez se ofrece más información y unos productos que cumplan los valores mínimos de resistencia solicitados.

Esta norma incluye un total de 20 clases resistentes repartidas en 12 clases de resistencia para coníferas, y 8 para frondosas. Estas se definirán por el valor mínimo de la resistencia a flexión de esa clase de resistencia, en N/mm², precedido por la letra C o D, la cual hace referencia al género de la especie (“coniferous” y “deciduous”). El sistema de clases resistentes se define en las siguientes clases:

- **Coníferas y chopo:** se diferencian 12 clases resistentes denominadas con la letra C (C14, C16, C18, C20, C22, C24, C27, C30, C35, C40, C45 y C50).
- **Frondosas:** se diferencian 8 clases resistentes denominadas con la letra D (D18, D24, D30, D35, D40, D50, D60 y D70); este menor número de clases se debe a que las especies de frondosas no se utilizan frecuentemente con fines estructurales.

En la tabla 2 y la tabla 3, pertenecientes a la norma UNE-EN 338, podemos observar los valores mínimos de las propiedades resistentes (flexión, tracción paralela y perpendicular, compresión paralela y perpendicular y cortante), las propiedades elásticas (modulo de elasticidad paralelo y perpendicular a las fibras, modulo de elasticidad al 5% y modulo cortante medio) y los valores de la densidad (densidad característica y media), asociados a las diferentes clases de resistencia para madera aserrada de uso estructural de especies de frondosas y para coníferas y chopos respectivamente.

Tabla 2. Valores asociados a clases de resistencia según norma UNE-EN-338. Madera aserrada de uso estructural. Frondosas

Propiedades		Clase Resistente							
		D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Resistencia (característica), en N/mm²									
- Flexión	$f_{m,k}$	18	24	30	35	40	50	60	70
- Tracción paralela	$f_{t,0,k}$	11	14	18	21	24	30	36	42
- Tracción perpendicular.	$f_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
- Compresión paralela	$f_{c,0,k}$	18	21	23	25	26	29	32	34
- Compresión perpendicular.	$f_{c,90,k}$	7,5	7,8	8,0	8,1	8,3	9,3	10,5	13,5
- Cortante	$f_{v,k}$	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0
Rigidez, kN/mm²									
- Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,medio}$	10	11	12	12	13	14	17	20
- Módulo de elasticidad paralelo 5 ^o -percentil	$E_{0,k}$	8,4	9,2	10,1	10,1	10,9	11,8	14,3	16,8
- Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,medio}$	0,67	0,73	0,80	0,80	0,86	0,93	1,13	1,33
- Módulo transversal medio	G_{medio}	0,63	0,69	0,75	0,75	0,81	0,88	1,06	1,25
Densidad, kg/m³									
- Densidad característica	ρ_k	500	520	530	540	550	620	700	900
- Densidad media	ρ_{medio}	610	630	640	650	660	750	840	1080

Tabla 3. Valores asociados a clases de resistencia según norma UNE-EN-338. Madera aserrada de uso estructural. Coníferas y chopo

Propiedades		Clase resistente											
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Resistencia (característica) en N/mm²													
- Flexión	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
- Tracción paralela	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
- Tracción perpendicular.	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
- Compresión paralela	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	22	22	23	25	26	27	29
- Compresión perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
- Cortante	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Rigidez, en kN/mm²													
- Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,medio}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
- Módulo de elasticidad paralelo 5 ^o -percentil	$E_{0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
- Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,medio}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
- Módulo transversal medio	G_{medio}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Densidad, en kg/m³													
- Densidad característica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
- Densidad media	ρ_{medio}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

2.2.3 Situación actual de la normativa sobre clasificación de la madera aserrada. Tipos de clasificación.

La clasificación de de la madera para uso estructural la podemos realizar mediante dos procedimientos diferentes: los métodos visuales y por lo tanto no destructivos, son los más tradicionales y extendidos, basados en la medición visual de las diferentes singularidades que puede presentar la madera y que más limitan su resistencia estructural, como por ejemplo los nudos; y los métodos mecánicos, de más reciente introducción, para la determinación de las características mecánicas de la madera, pudiéndose utilizar métodos no destructivos y métodos destructivos.

Las propiedades físico-mecánicas de la madera pueden variar fuertemente según las especies y las condiciones en las que se encuentren. Son muchos los factores que influyen dentro de una misma especie, tanto por la zona de procedencia de la madera, como por las diferencias de origen genético entre árboles del mismo lugar (Díez y Fernández-Golfín, 1.998). Existen además, otros parámetros de variación que aparecen con la transformación posterior, como es el tipo de aserrado de la madera.

En el caso de las propiedades resistentes, estas modificaciones pueden resultar muy significativas. Dentro de un lote de madera aserrada para uso estructural de la misma especie, no clasificada, el valor de la pieza con la máxima resistencia puede ser del orden de 10 veces mayor que la pieza con una menor resistencia (Argüelles et al., 2000).

Por este motivo la madera debe ser clasificada según su resistencia estructural, para poder asegurar así unos valores mínimos de resistencia y aprovechar al máximo las ventajas de este material, optimizando de esta forma el heterogéneo comportamiento estructural que presenta.

2.2.3.1 Clasificación mediante ensayos no destructivos.

Estos tipos de ensayos se realizan sin necesidad de la rotura de las probetas estudiadas y se caracterizan por no alterar las características ni las propiedades físico-mecánicas de la madera. Estas técnicas nos aportarán información sobre las propiedades mecánicas y físicas del material y así poder clasificarlo según su resistencia, elasticidad y densidad o para realizar un diagnóstico de cualquier tipo de estructura de madera.

Según la normativa se pueden realizar dos tipos de clasificaciones, para determinar la resistencia de la madera de uso estructural dentro de los ensayos no destructivos: la clasificación basada en criterio visuales, desarrollada en los países de la Unión Europea por las respectivas normas nacionales y el proyecto de norma marco europeo EN 14081 y la clasificación mecánica que se basa en la medición por métodos no destructivos, de las variables que influyen en la resistencia de la madera o permiten determinar ésta (modulo de elasticidad, densidad, etc.), clasificando la madera directamente en una determinada clase resistente.

En estos ensayos se pueden utilizar instrumentos de transmisión de ondas ultrasónicas, ondas de impacto, análisis de vibraciones, penetrómetro, etc., o simplemente mediante criterios visuales al observar singularidades de la madera que permitirán evaluar o detectar determinadas propiedades sin producirles alteración alguna.

Las clasificaciones visual y mecánica son sistemas normalizados y muy extendidos, por lo que facilitan el trabajo y permiten una asignación de clase resistente a la madera estudiada de forma prácticamente inmediata.

La clasificación mecánica no destructiva, se está utilizando desde el siglo XX y trata de identificar las propiedades físicas y mecánicas o defectos de un material o estructura sin modificar sus capacidades de uso. Éstas técnicas son adecuadas para medir algunos parámetros que estén relacionados con las propiedades de la madera (PELLERÍN & ROSS, 2002).

El método que más se utiliza en la actualidad es la clasificación visual, que se basa en la determinación de la calidad resistente de la madera aserrada a partir de las singularidades que presenta ésta, que se pueden evaluar a simple vista y que más limitan la resistencia estructural de la madera (nudosidad, fendas, anchura máxima de anillos de crecimiento, etc.). Es un método económico que permite una rápida clasificación de la madera como hemos dicho anteriormente, pero que presenta el problema de sobredimensionamiento en construcción.

2.2.3.1.1 Clasificación basada en criterios visuales.

Este fue el primer sistema de clasificación para madera aserrada de uso estructural que apareció y hasta la actualidad, es el más extendido. El proceso de clasificación se basa en la búsqueda de defectos o singularidades que presente cada pieza de madera, relacionados directamente con las propiedades físicas y mecánicas de este material, y su posterior medición para asignar directamente las distintas calidades visuales.

En la madera existen gran variedad de singularidades que afectan a su comportamiento estructural y que se utilizan como criterios de calidad, de manera que tras su identificación y medición nos determinan la calidad estructural de esta. Algunas de las más importantes son: las ligadas a la anatomía de la madera (nudos, fendas, anchura máxima del anillo de crecimiento, desviación de la fibra, etc.), las relacionadas con el proceso de aserrado de la madera (gemas), algunos tipos de deformaciones (curvatura, alabeo, etc.), alteraciones biológicas (azulado, pudrición, etc.), etc.

Es importante resaltar que no todas las singularidades o defectos que pueden presentar las piezas de madera aserrada de uso estructural, tienen la misma importancia en cuanto a la resistencia, siendo unos más perjudiciales que otros. Este grado de importancia de las diferentes singularidades deberá quedar reflejado en su comportamiento real.

Una particularidad que presenta este tipo de clasificación, es la dificultada para cuantificar y sobre todo para medir estas singularidades que afectan a la resistencia de la madera y que limitarán la asignación de las clases de calidad. Estos motivos podrían explicar el carácter conservador de las diferentes normas de clasificación visual para la madera de uso estructural que existen a nivel internacional. Estas deficiencias a la hora de clasificar visualmente, hacen que normalmente se subestima la resistencia mecánica de la madera, tendiendo habitualmente a una clasificación a la baja, que repercute negativamente en el mercado de este material y conduce al sobredimensionamiento de estructuras.

Existen una amplia variedad de normas para la clasificación visual de la madera de uso estructural a nivel internacional, en la que se diferencian unas determinadas calidades y en las que la evaluación de las singularidades se realiza de de diversas formas, según la norma concreta.

Cada país desarrolló su norma de clasificación visual, con el objetivo de homogeneizar las propiedades de los lotes de madera que se comercializaban. Posteriormente el fomento del comercio internacional de la madera produjo una situación de desconcierto, ya que en un mismo mercado podían incidir muy diversas especies clasificadas con normas muy diferentes (Capuz Llardó R. 2005).

En Europa con la creación del Mercado Único, se fomentó la unificación de criterios de calidad y la normalización común, por lo que se llegó a la publicación de una norma marco EN 14081, donde se asentaban los criterios básicos de calidad para la clasificación resistente de la madera estructural, ya que era imposible intentar aplicar una norma única de clasificación visual (Capuz Llardó R. 2005).

El objetivo de la norma EN 14081, es el establecimiento de unas bases comunes que sirvan de referencia a las normas nacionales. De esta forma se pueden mantener las clasificaciones visuales normalizadas en cada país miembro, siempre que, atiendan los requisitos de la norma marco (Capuz Llardó R. 2005).

A continuación se citan y describen brevemente las principales normas de clasificación visual de madera estructural a nivel europeo.

- **España:** UNE 56544. Define 2 calidades (ME-1 y ME-2) y rechazo.
- **Alemania:** DIN 4074. Define 3 calidades (S7, S10 y S13).
- **Francia:** NFB 52001. Define 3 calidades (ST-I, ST-II y ST-III).
- **Países Nórdicos:** INSTA 142. Define 4 calidades (T0, T1, T2 y T3).
- **Reino Unido:** Norma BSI 4978. Define 2 calidades (SS y GS) y rechazo.

En cada una de las normas se definen un determinado número de calidades, que normalmente varia en 1 y 4, y la evaluación de las singularidades naturales de la madera o de los defectos producidos en el proceso de aserrado, que definen estas calidades, se realizan de acuerdo con lo establecido en cada una de ellas. Las diferentes calidades de cada una de las normas, de los diferentes países europeos, quedarán integradas dentro de las clases resistentes definidas en la norma UNE-EN-338.

Una importante diferencia entre las diferentes normas de clasificación visual está en la medición y evaluación de la nudosidad, criterio de calidad más importante en cuanto a resistencia, como hemos citado anteriormente, y a la vez el más complicado de evaluar por las diversas formas en las que puede presentarse en cada pieza.

Además de las limitaciones dadas por los defectos o singularidades presentes en el material, existen otras en función de los defectos ocasionados por fallos en el aserrado, por las deformaciones de las piezas, por las alteraciones de tipo biológico, etc.

Norma de Alemania DIN 4074.

La norma DIN 407 “Clasificación de la madera aserrada para su uso estructural”, desarrolla los criterios de calidad para una clasificación visual principalmente de madera de coníferas, según su resistencia estructural, estableciendo 3 clases de clasificación denominadas S7 (madera estructural con una escasa resistencia), S10 (madera estructural con una resistencia media) y S13 (madera estructural con una elevada resistencia), validas para el su empleo en construcciones de madera. Aquellas piezas que no estén incluidas en alguna de las anteriores clases visuales serán consideradas rechazo. Destacamos también que en esta norma se incluye un capítulo dedicado íntegramente a la clasificación visual de frondosas.

Como madera aserrada, en el sentido de esta norma, se entenderá aquella pieza de madera con un grosor de al menos de 6 mm, la cual se obtiene a partir de madera en rollo mediante un proceso de corte paralelo en el sentido longitudinal del tronco.

En función del tipo de especie y de acuerdo a lo establecido en las normas europeas EN 338 y EN 1912, a cada clase de clasificación visual le corresponderá un determinada clase resistente.

Para valorar la nudosidad en una pieza de madera escuadrada, se evalúa el menor diámetro visible (d) del mayor de los nudos, sobre la superficie donde éste se presenta (cara h o canto b). Obtendremos por cada nudo, un valor de su nudosidad como el cociente de d/h o d/b . El mayor valor de esta relación, es el que determina la nudosidad total de la pieza y permite clasificar ésta de acuerdo al criterio de la nudosidad. Los nudos con un diámetro inferior a 5 mm no deberían de ser considerados, independientemente de si estos son pasantes o no. Serán los nudos que se presentan sobre el canto los que más limitarán esta clasificación visual.

Norma de Francia NFB 5200.

La norma francesa, NFB 5200 (“Reglas de utilización de la madera en la construcción: clasificación visual para su empleo en estructuras para las principales especies coníferas y frondosas”), es aplicable a la madera de procedencia francesa (pino silvestre, pino pinaster, píceas, abeto, chopo etc.).

En esta norma se definen tres calidades distintas: ST-I, ST-II y ST-III; además en la introducción de la norma se indica que los resultados de las propiedades mecánicas se han obtenido con ensayos de piezas con escuadrías relativamente pequeñas (40 x 100, 50 x 150 y 65 x 200 mm).

Los nudos se miden en dirección perpendicular al eje longitudinal de la pieza, teniendo en cuenta el agrupamiento de los nudos, cuando se produce. Las especificaciones para cada calidad varían ligeramente en función de la especie de madera.

Norma de Reino Unido BSI 4978.

La norma BSI 4978, permite clasificar madera de coníferas y define 2 clases de calidad que son: Special Structural Grade (SS), General Structural Grade (GS) y también Reject (Rechazo). El método de medición y evaluación de la nudosidad se realiza según la relación del área de nudos. Este procedimiento es el que también se

recoge en las recomendaciones ECE editadas por las Naciones Unidas para la clasificación de madera aserrada de coníferas.

Norma de Países Nórdicos INSTA 142.

La norma INSTA 142, permite clasificar madera de abeto, pino y picea, definiendo 4 clases de calidad que son: T3, T2, T1 y T0. Distingue 3 tipos de piezas en función de sus dimensiones, con criterios de clasificación diferentes. La medición del tamaño de los nudos se efectúa considerando la anchura entre dos rectas paralelas a las aristas de la pieza. Se evalúan varios tipos de nudos: de cara, de canto, de arista, pasantes y agrupados.

Norma de España UNE 56544.

La norma UNE 56544, ("Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas"), ha sido la norma utilizada para la elaboración de este estudio y se aplica para la clasificación de madera aserrada de procedencia española, destinada a usos estructurales, con una sección rectangular y perteneciente a alguna de las siguientes especies de coníferas: *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris*, *Pinus radiata* y *Pinus nigra*.

Esta norma cumple con todos los requisitos establecidos por el proyecto de norma pr EN 14081-1 y establece dos clases de calidad para las piezas de madera, denominadas ME-1 (madera estructural de primera) y ME-2 (madera estructural de segunda), denominándose como rechazo a las piezas que no cumplen las características necesarias para pertenecer a ninguna de las calidades anteriores

En este caso solo hemos tenido en cuenta las limitaciones relativas a la calidad en función de los nudos existentes, ya que hemos considerado esta singularidad como la más limitante e importante a la vez, para determinar la calidad de nuestras probetas.

Los nudos se miden perpendicularmente al eje longitudinal de la pieza, diferenciando entre nudos de cara y nudos de canto, considerándose como despreciables los que tengan un diámetro inferior o igual a 10 mm y todos los nudos superficiales, salvo aquellos que se presenten también sobre el canto. La corteza de alrededor de un nudo se considerará como parte de él y por lo tanto deberá ser medida junto a éste cuando se realiza la medición y su posterior valoración.

En esta clasificación se pueden considerar nudos de cara, nudos de canto, nudos pasante (de cara o canto), nudo de margen, nudo de arista y nudos agrupados, aunque tendrán más importancia los nudos de cara y los de canto.

Para los nudos de cara, la valoración se realizará como el cociente entre el diámetro del nudo y la anchura o altura de la cara (d/h). Para el caso de nudos de canto, la relación se establecerá entre su diámetro y el grosor del canto (d/b).

Las maderas aserradas españolas destinadas al mercado estructural, tienen su calidad y propiedades perfectamente reguladas en el ámbito nacional, gracias a lo establecido en esta norma y en el ámbito europeo, por lo considerado en las normas EN 338 y EN 1912.

Tabla 4. Especificaciones de la norma U.N.E. 56.544

CRITERIOS DE CALIDAD		ME-1	ME-2
DIAMETRO DE LOS NUDOS SOBRE LA CARA		$D \leq 1/5$ de "a" y $D \leq 30$ mm	$D \leq 1/2$ de "a", para "a" < 150 mm y $D \leq 80$ mm, para "a" > 150 mm
DIAMETRO DE LOS NUDOS SOBRE EL CANTO		$D \leq 2/3$ de "e" y $D \leq 30$ mm	$D \leq 2/3$ de "e"
DIÁMETRO DE LOS NUDOS AXIALES	DE CANTO A CANTO	$D \leq 1/3$ "e"	$D \leq 1/2$ "e"
	DE CARA A CARA	$D \leq 1/5$ "a" y $D \leq 30$ mm	$D \leq 1/3$ "a"
ANCHURA MÁXIMA DEL ANILLO DE CRECIMIENTO (cuando se clasifica en verde) - Pino silvestre - Pino laricio - Pino gallego y pinaster - Pino insigne (radiata)		≤ 4 mm ≤ 5 mm ≤ 8 mm ≤ 10 mm	Sin limitación Sin limitación Sin limitación Sin limitación
FENDAS (de cara, canto, testa y secado)	Que no atraviesen a la pieza	No mayores que 1 m o $1/4$ de la longitud de la pieza, la que sea menor	No mayores que 1,5 m o $1/2$ de la longitud de la pieza, la que sea menor
	Que atraviesen a la pieza	Sólo permitidas se son de testa y con una longitud no mayor que la anchura de la pieza	No mayores que 1 m o $1/4$ de la longitud de la pieza, la que sea menor. Si son de testa, la longitud no será mayor que dos veces la anchura de cara "a"
ACEBOLLADURAS		No permitidas	No permitidas
BOLSAS DE RESINA		No se admiten	Se admiten si su longitud es menor de 80 mm
ENTRECASCO		No se admite	
MADERA DE REACCION		Admisible en $1/5$ de la sección o de la superficie externa de la pieza	Admisible en $2/5$ de la sección o de la superficie externa de la pieza
DESVIACION DE LA FIBRA		1:10 (10%)	1:6 (16,7%)
GEMAS * longitud * anchura		No admitidas	$\leq 1/3$ de "L" pero ≤ 100 cm. $\leq 1/3$ de "e"
MEDULA		No admitida	Admisible
ALTERACIONES BIOLÓGICAS * Muérdago (V. Album) * Azulado * Pudrición * Galerías de insectos xilófagos		* No se admite * Se admite * No se admite * No se admiten ataques activos. En caso de ataques inactivos, se admitirán orificios aislados de hasta 2 mm de diámetro	

2.2.3.1.2 Clasificación basada en métodos instrumentales.

A continuación describiremos los métodos instrumentales no destructivos, mecánicos y no mecánicos, utilizados en este estudio para la clasificación de las probetas de madera utilizadas.

2.2.3.1.2.1 Ensayos por ultrasonidos.

El empleo de los ultrasonidos en madera comenzó hacia 1950, inicialmente orientados a la clasificación del material. A partir de los años 70 se empezó a analizar sus posibilidades en la inspección de estructuras existentes (Pellerin et al., 2002).

La velocidad de propagación de una onda de ultrasonidos a lo largo de la madera, es medible y está directamente relacionada con las propiedades físicas del material.

Se trata de un método instrumental acústico, no destructivo y no mecánico, utilizado en este estudio, para la medición de la velocidad de transmisión de las ondas ultrasónicas a través de la madera. Utilizaremos un equipo de ultrasonidos Sylvatest Trio ®, que medirá los ultrasonidos (ondas acústicas de la misma naturaleza que las ondas sónicas pero con frecuencias que se encuentran por encima de la zona audible) para conseguir un haz muy concentrado que permita la localización de los defectos con precisión.

Con el cálculo de esta velocidad ultrasónica, podemos determinar la resistencia de las probetas, ya que los defectos o singularidades que puedan presentar las piezas, como nudos, fendas, acebolladuras, degradaciones internas, etc., hacen que dicha velocidad de onda sea diferente a la que pueda presentar un material sin ningún tipo de defecto. La velocidad de propagación será mayor, cuanto menores defectos que puedan producir discontinuidades en el material e interrupciones en la continuidad de onda presente la pieza de madera. El camino seguido por las ondas será menor al no tener que sortear ningún obstáculo.

La variación de la velocidad, nos permite detectar defectos que implican cambios en la dirección de la fibra como son los nudos. En definitiva, la velocidad de propagación será mayor cuanto menor sea la presencia de defectos en la madera, debido a que por ejemplo, las fendas, las desviaciones de la fibra generales o las locales producidas por los nudos, etc., provocan una interrupción en la continuidad de la transmisión de la onda, y por tanto retardan su llegada al receptor.

Se medirán las velocidades de onda generada, a partir del tiempo (μs) que tardan las ondas ultrasónicas con una frecuencia de 30 kHz, en recorrer la distancia entre dos sensores, el palpador emisor y el receptor. Este ensayo se realiza mediante método directo, es decir colocando los palpadores de forma perpendicular en las testas de la pieza de madera, evitando zonas de defectos, como pueden ser nudos o fendas. Estos sensores se colocarán totalmente enfrentados entre sí, en cada uno de los extremos de las probetas. Con estos datos, la velocidad se determina como el cociente entre la distancia y el tiempo.

Este equipo utiliza un método de ensayo por transmisión para la aplicación de los ultrasonidos, que presenta frecuencias bajas, para así poder conseguir un mayor alcance de los impulsos emitidos y poder rodear más fácilmente los defectos que

presenten las probetas. Este método será el más adecuado para la madera, al ser un material heterogéneo.

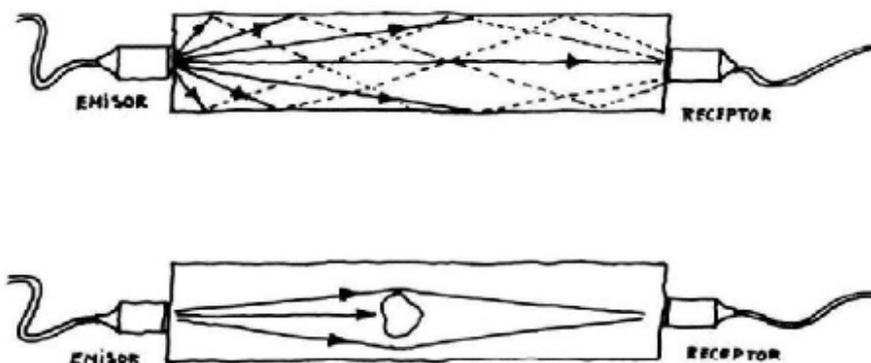


Figura 1. Esquema del método de transmisión

En estudios similares a este, se ha llegado a la conclusión que la asignación de la calidad por ultrasonidos, aún siendo conservadora, presenta un mayor número de aciertos que el obtenido mediante la clasificación visual, lo que supone una primera ventaja del método. En cuanto a los riesgos (sobrestimas) de los dos métodos de clasificación, se observa que en la clasificación por ultrasonidos el porcentaje es menor que por medio de la clasificación visual. Las piezas sobrevaloradas suponen un serio inconveniente para el consumidor final, puesto que presentan características por debajo de las exigencias técnicas que se esperan de ellas.

En el presente estudio realizaremos una clasificación por ultrasonidos con el equipo Sylvatest Trio®, como hemos citado anteriormente, para realizar una clasificación de las probetas iniciales de las que partimos, y poder clasificarlas en 3 grupos de diferentes calidades, con el mismo número de piezas en cada uno de ellos. Posteriormente se conforman las vigas trío utilizando una probeta de cada grupo de calidad.

2.2.3.1.2.2 Ensayos por métodos mecánicos.

Los métodos mecánicos se basan en la aplicación de fuerzas sobre probetas de madera, para posteriormente realizar una medición de las deformaciones producidas y de otras propiedades mecánicas. Existen diversos métodos mecánicos no destructivos, como pueden ser el ensayo a flexión con máquina universal, el extractor de tornillos, el penetrómetro, etc.

Para la realización de este estudio hemos realizado un ensayo mecánico no destructivo a flexión con la máquina universal Ibertest®, utilizando para ello un sensor de la deformación o extensómetro. Se realizan estos ensayos según la norma UNE-EN 408 "Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas". Obtendremos el módulo de elasticidad global, MOEG.

El procedimiento consiste en aplicar una carga que aumenta de manera progresiva y medir, con ayuda del extensómetro, la deformación provocada en la probeta. A partir de estas medidas se deduce el módulo de elasticidad global a flexión de manera directa.

Este equipo está conectado a un ordenador y mediante un software propio seleccionaremos las variables de funcionamiento de la máquina, dependiendo del canto de la pieza a ensayar, de modo que la velocidad sea la adecuada para que el ensayo se realice según la norma indicada. En este caso la carga empleada no excederá de 2,6 kN, para no sobrepasar el límite elástico de las piezas ensayadas, ya que esto provocaría una deformación permanente y no estaría considerado como ensayo no destructivo.

Las probetas a ensayar se colocan sobre 2 apoyos separados 18 veces la altura del canto, y la carga se aplica en 2 puntos, separados 6 veces la altura del canto. El extensómetro se colocará en el centro del canto inferior de la pieza, es decir, en la fibra extrema de la zona traccionada. Una vez calculada la carga y la deformación del canto, retiraremos el sensor de deformación y obtendremos el valor del MOEG para dicha probeta.

Al finalizar este ensayo, comenzará el ensayo de rotura que se realiza con el mismo equipo.



Figura 2. Ensayo no destructivo a flexión

Entre la clasificación visual y la clasificación instrumental o automática se presentan ventajas e inconvenientes que mencionamos a continuación (según Hermoso et al., 2002):

- La clasificación visual es una técnica sencilla y fácil de aprender, basta con una preparación previa del operario. No supone grandes costes de inversión, salvo los costes de formación.
- La clasificación visual resulta más subjetiva que la clasificación mecánica al tratarse de una decisión del operario en última instancia.

- La clasificación visual siempre subestima la calidad resistente de la madera, por lo tanto es una técnica de garantías para el consumidor, pero produce pérdidas económicas en el productor. Es por lo tanto una clasificación muy conservadora y segura en cuanto a la resistencia.
- La clasificación visual se puede combinar con métodos instrumentales no destructivos para evitar infravalorar la madera, aumentando así el rendimiento y la eficacia de la clasificación.
- La clasificación visual es una técnica imprescindible y recomendable para mercados que por su nivel económico y por su volumen de negocio, no pueden tener acceso a otros métodos de clasificación de resistencia, en los que se utilizan equipos complejos y costosos.
- La clasificación mecánica presenta unos mejores rendimientos que los que se pueden obtener con una clasificación visual y a su vez permite clasificar la madera estructural en diferentes clases de resistencia (C14, C16, etc.). Este sistema de clases resistentes desarrolla una serie de grupos de resistencia a partir de unos valores mínimos de resistencia, elasticidad y densidad, aplicándose a cada combinación de especie-calidad, independientemente de su origen o método de clasificación seguido, una determinada clase resistente, siempre que las propiedades mecánicas de dicha combinación especie-calidad sean al menos iguales a los valores mínimos de la correspondiente clase resistente. De esta forma se puede calcular y proyectar con las propiedades mecánicas de una clase resistente determinada, independientemente del tipo de especie utilizada posteriormente y producir de esta forma una optimización del comercio de la madera estructural.
- La clasificación mecánica permite evaluar la densidad, el módulo de elasticidad dinámico, el módulo de elasticidad global, etc., variables muy relacionadas con la resistencia del material.
- La clasificación mecánica alcanza velocidades de clasificación de aproximadamente 300 metros por minuto.
- La clasificación mecánica tiene como principal inconveniente, limitando su utilización, el elevado precio de los equipos necesarios para realizar los ensayos. La rentabilidad para clasificar volúmenes grandes de madera se puede lograr en un breve espacio de tiempo, pero solo los grandes aserraderos pueden permitirse la instalación de estos equipos.

2.2.3.2 Clasificación mediante ensayos destructivos.

Los ensayos destructivos se caracterizan, por concluir con la rotura de las probetas y la posterior determinación de las características mecánicas que presenta. Obtendremos de forma exacta y directa, la resistencia a flexión estática de las piezas, MOR. Una vez obtenidos los valores de rotura de cada probeta, podremos compararlos con los resultados obtenidos mediante otros métodos menos exactos.

Este ensayo se realiza con la misma máquina universal Ibertest®, utilizada para el ensayo no destructivo a flexión. La resistencia a la flexión estática, se calculará después de la realización del primer ensayo a flexión para el cálculo del MOEG y podremos determinar las características resistentes, resistencia a flexión y las características de rigidez de la madera, modulo de elasticidad global, entre otras.

El software empleado ofrece: la tensión que ha soportado la viga en el momento inmediatamente anterior a la rotura (MPa), la deformación (mm), la carga máxima aplicada (kN) y el tiempo de realización del ensayo (s), que debe de ser de 5 ± 2 minutos, según la norma UNE-EN-408.



Figura 3. Ensayo destructivo

2.3 Descripción de la especie empleada en este estudio.

La especie utilizada para la realización del presente estudio ha sido el *Pinus pinaster* Ait. (región de procedencia Meseta Castellana).

2.3.1 Descripción general.

El *Pinus pinaster* Ait., es un árbol de la familia de las pináceas que presenta un porte piramidal en los ejemplares jóvenes, copa aparasolada o irregular en los individuos de mayor edad, a veces desproporcionada, por lo pequeña, con el tronco; alcanza 20 ó 30 m de altura como máximo, aunque en suelos buenos y profundos puede llegar hasta los 40 m (López González G. 2001).

El tronco es derecho o flexuoso, con corteza áspera profundamente resquebrajada, de gran grosor y de color pardo-rojiza, que toma una tonalidad muy oscura al contacto con el aire. Presenta ramas arqueado-erguidas o casi horizontales, dispuestas en verticilos más o menos regulares y ásperas al tacto, por estar cubiertas

de las cicatrices. Las ramillas tienen numerosas hojas aciculares largas, recias y punzantes, de color verde oscuro, que se agrupan por parejas en la axila de una hoja rudimentaria escamosa (López González G. 2001).

Los conos masculinos y femeninos nacen en la misma planta. Los primeros de forma lateral, en la terminación de las ramillas, agrupados en número variable y de forma largamente ovoide. Los conos femeninos son pequeños y se pueden presentar de forma solitaria o más frecuentemente verticilados, ovoides y de color pardo rojizo (López González G. 2001).

Las piñas tienen una forma ovado-cónica, se presentan revueltas, casi sentadas sobre las ramas, con escamas provistas en el dorso de un escudete piramidal rómbico, muy prominente y punzante; cada una lleva 2 piñones de 6-8 mm, largamente alados (López González G. 2001).

2.3.2 Floración y maduración.

Florece en la primavera, de abril a mayo, madurando las piñas a finales del verano o en el otoño del segundo año; pero no diseminan los piñones hasta el tercer año, en primavera o en verano (López González G. 2001).

2.3.3 Ecología, suelo y temperamento.

Se puede encontrar desde el nivel del mar hasta unos 1700 m de altitud, principalmente en terrenos silíceos, prefiere los suelos sueltos y arenosos, en los que soporta la caliza y es una planta amante de la luz y resistente a la sequía y heladas, aunque no tanto como otros pinos (López González G. 2001).

2.3.4 Distribución.

Se distribuye en la mitad occidental de la región mediterránea y su contorno, así como en zonas atlánticas de Francia y la Península Ibérica. No aparece en las Islas Baleares y se encuentra en casi toda la Península, aunque no es natural ni en Galicia ni en la mayor parte del norte (López González G. 2001).

2.3.5 Descripción de la madera.

Su madera es de grano grueso, ligera y con anillos de crecimiento muy visibles, bien marcados, presentando un fuerte contraste entre la madera de primavera y la de verano. Presenta numerosos canales resiníferos y suele estar muy impregnada de resina. También presenta fibras rectas y numerosos nudos, que pueden tener grandes diámetros. La madera de albura está claramente diferenciada, siendo su color blanco amarillento y el duramen varía del amarillo naranja al rojizo.

2.3.6 Propiedades de la madera.

A continuación en la tabla 5 se presentan las propiedades de la madera de *Pinus pinaster*.

Tabla 5. Propiedades de la madera de *Pinus pinaster*

P.FÍSICAS		P.MECÁNICAS	
Densidad (kg/m ³)	530/550	Flexión estática (N/mm ²)	78
Contracción	Medianamente nerviosa	Módulo de elasticidad (N/mm ²)	7230
Geof. Contracción	Volumétrica	Compresión axial (N/mm ²)	39
	Tangencial	Compresión perpendicular (N/mm ²)	6
	Radial	Cortante (N/mm ²)	9
Dureza	Semidura	Flexión dinámica (J/cm ²)	3

2.3.7 Usos y aprovechamientos.

El *Pinus pinaster* Ait., es uno de los pinos más empleados en repoblaciones forestales y la principal fuente de obtención de la trementina común, que se beneficia industrialmente, sangrando sus troncos mediante grandes incisiones longitudinales que profundizan hasta las primeras capas del leño y canalizando la resina hasta unos recipientes de barro que se cuelgan en la base de las muescas. Hay que tener en cuenta que la madera que procede de árboles resinados es de peor calidad.

El aserrado es fácil y presenta buenas aptitudes para la obtención de chapa por desenrollado. Al ser una madera menos apreciada, también se utiliza para tablonos alistonados, carpintería de interior, traviesas de ferrocarril, cajas de embalaje, encofrados, pasta de papel, tableros de partículas y fibras, etc.

2.3.8 Observaciones.

El *Pinus pinaster* Ait., es el pino de crecimiento más rápido de todos los peninsulares, pudiendo llegar a vivir hasta 200 o 300 años. Las poblaciones del norte y noroeste de España, Portugal y sur de Francia son a veces de menor talla, con acículas algo más cortas que solo tienen dos canales resiníferos en la base, y piñas más pequeñas. Algunos autores las han considerado como subespecie y la han denominado *Pinus pinaster* Aiton subsp. atlántica, pero la supuesta raza carece de valor y el nombre que se le da es ilegítimo (López González G. 2001).

2.4 Singularidades de la madera.

La madera es un material de origen natural que destaca por su heterogeneidad, ya que presenta defectos y singularidades que determinan sus propiedades físicas y mecánicas. Estas singularidades, se tendrán en cuenta como criterios de calidad y resultan determinantes para su clasificación visual, ya que influyen en mayor o menor medida en su resistencia. Aquellas singularidades que puedan ser evaluadas a simple vista y tengan una relación directa con la estructura interna de la madera, y por lo tanto su resistencia estructural, (nudosidad, fendas, gemas, desviación de la fibra, etc.) serán determinantes en su clasificación visual. Las principales singularidades de la madera son las siguientes:

2.4.1 Singularidades ligadas a la anatomía de la madera.

2.4.1.1 Nudos.

Por nudo se entiende a la porción de una rama muerta o no, incluida en el tronco, como consecuencia del crecimiento secundario de éste (Fernández-Golfín Seco et al., 2003). La nudosidad es la singularidad que más limita la resistencia a flexión de la pieza de madera, ya que provocan la formación de desviaciones de fibra alrededor de estos, consecuencia de su crecimiento perpendicular a la dirección longitudinal del árbol, de las deformaciones en la pieza, etc.

Una clasificación general de los tipos de nudos, nos permite distinguir (según Fernández-Golfín Seco et al., 2003):

- **Por su estado:** (nudo sano y nudo podrido)
- **Por su grado de adherencia con el resto de la pieza:** (nudo adherente, nudo parcialmente adherente y nudo saltadizo)
- **Por su posición en la pieza:** (nudo de cara, nudo de canto, nudo pasante, nudo de margen, nudo de arista, nudo superficial, nudo en espiga y nudos agrupados)
- **Otros tipos de nudos:** (nudo con corteza y nudo muerto o cortado)

Como conclusión podemos afirmar, que las propiedades mecánicas de un pieza de madera con nudos quedan reducidas notablemente.

2.4.1.2 Anillos de crecimiento.

Conjunto de capas de células de madera (xilema secundario), producidas generalmente en un periodo vegetativo (Fernández-Golfín Seco et al., 2003). Tiene su origen en la actividad fisiológica del árbol; como consecuencia de las condiciones ambientales y el estado de la masa. En coníferas europeas, la madera de verano suele presentar una coloración más oscura con una mayor densidad y la madera de primavera un color más claro y una menor densidad.

La norma utiliza en este estudio UNE-EN-56544, valora el criterio de los anillos de crecimiento como estimador indirecto para reconocer la madera juvenil.

Podemos hacer una estimación cualitativa, de una manera indirecta de la densidad de la madera, a partir del valor medio de la anchura de los anillos de crecimiento. Esta densidad está muy relacionada con la resistencia de la madera. De manera general se puede decir, que una mayor anchura media de los anillos de crecimiento, está asociada a una menor densidad de la madera y por lo tanto a una menor resistencia de ésta (Glos, Richter, 2002).

2.4.1.3 Irregularidades de los anillos de crecimiento.

Se refiere a las variaciones de la anchura de las capas sucesivas anuales de crecimiento. Si esta irregularidad es muy notable, pueden llegar a causar planos de rotura entre anillo y anillo de crecimiento. Su principal inconveniente es que causan alabeos en las piezas.

2.4.1.4 Fendas.

Las fendas son separaciones de las fibras, producidas en sentido longitudinal, y pueden ser de cara, de canto y de testa (Fernández-Golfín Seco et al., 2003). Podremos diferenciar, según las causas que las originan, fendas de secado (consecuencia de un rápido secado), fendas de heladura (producidas por la intensidad del frío), fendas producidas por un rayo y fendas producidas por el viento o la falta de humedad. Salvo las fendas de secado, el resto suelen originarse sobre la madera en pie, como consecuencia de agentes atmosféricos o tensiones producidas durante el crecimiento del árbol.

Este tipo de defectos y singularidades, provocan pérdidas de resistencia, especialmente en esfuerzos a flexión y tracción perpendicular a la fibra y por otra parte dificultan cualquier proceso de acabado de la madera.

2.4.1.5 Acebolladuras.

Las acebolladuras son roturas locales de la madera, producidas entre los anillos de crecimiento y a lo largo del eje del árbol. Se podría decir que son separaciones causadas por una fenda de dos anillos de crecimiento consecutivos y por lo tanto, poseen el mismo origen que éstas, aumentando la probabilidad de aparición de acebolladuras en los individuos de menor diámetro y de mayor edad. Están causadas por esfuerzos, que inciden sobre la madera que ha crecido de forma irregular (sequía, defoliación, etc.). Este defecto de la madera, provoca pérdidas de resistencia estructural como ocurría con las fendas.

2.4.1.6 Bolsas de resina.

Son aquellas zonas de la madera que presentan cavidades, donde existe o ha existido resina. Estas pequeñas cavidades llenas de resina, presentan en general, una forma alargada en la dirección del eje del árbol (Vignote et al., 1999). Provocan discontinuidades en el material, que además de condicionar algunas operaciones que se realizan en el aserradero, como corte, lijado, etc., provocan una pérdida en la resistencia mecánica de las piezas.

2.4.1.7 Entrecasco.

Se denomina entrecasco a la presencia de restos de corteza entre las fibras de la madera. Su presencia suele estar asociada a una bifurcación en el crecimiento del tronco del árbol, produciéndose en esa zona una pérdida de resistencia mecánica.

2.4.1.8 Madera de reacción.

Se entiende por madera de reacción, aquel tipo de madera con unas características anatómicas propias, que surge como respuesta a los esfuerzos de flexión en una determinada dirección a los que se ve sometido un árbol, por causas de orografía del terreno, vientos dominantes, etc. Suele aparecer por tanto sobre troncos inclinados o curvos, presentando una fuerte excentricidad, anillos anormalmente anchos y densidades elevadas.

En las coníferas se forma madera de compresión, mientras que en las frondosas se desarrolla madera de tracción.

En el caso de coníferas (madera de compresión), se asocia a la presencia de anillos anormalmente anchos y presenta una característica coloración oscura, asociada a elevadas densidades de la madera de verano. Su principal inconveniente reside en la anormal contracción longitudinal que produce, lo que puede provocar fuertes deformaciones (de cara o canto) en las piezas. La evaluación de la madera de compresión es complicada, resultando difícil de detectar y de realizar, una valoración exacta de este criterio, ya que en su determinación la madera de compresión puede a veces confundirse con madera tardía o de verano.

2.4.1.9 Desviación de la fibra.

Se considera desviación de las fibras de la madera, cuando éstas no siguen la dirección longitudinal del sentido del eje de la pieza. Su evaluación se realiza a partir del valor de la desviación de la fibra observado en una distancia determinada, generalmente un metro, sobre la dirección longitudinal.

La desviación de la fibra puede ser local o general. La primera suele ser producida por el crecimiento perpendicular de los nudos sobre la dirección longitudinal de las fibras. La segunda tiene que ver más con un defecto en el corte de la madera, habitual en troncos con acusada conicidad, y por las condiciones genéticas del crecimiento del árbol (Fernández-Golfín Seco et al., 2003).

La presencia de una acusada desviación general de la fibra puede afectar a la resistencia de la pieza, ya que está relacionada con una disminución de las propiedades elastomecánicas de la madera (Glos, Richter, 2002).

Un caso extremo de desviación de la fibra, es la denominada fibra revirada, suele presentarse en la madera juvenil de conífera y frondosas, orientándose las fibras helicoidalmente a lo largo del eje del árbol. Su presencia supone una pérdida de resistencia en el sentido axial, equivalente al ángulo de revirado, así como mayores deformaciones sobre la madera (Vignote et al., 1999).

2.4.1.10 Médula.

La médula es la zona situada en el interior del primer anillo de crecimiento, constituida fundamentalmente por tejido blanco. Podríamos decir que es el núcleo central del tallo y de ciertas raíces, alrededor del cual se produjo el crecimiento en espesor. Se compone principalmente de parénquima y su presencia indica la posible proximidad de madera juvenil, que presentará propiedades mecánicas resistentes diferentes.

La consideración de este criterio, a la hora de clasificar la madera visualmente, tiene que ver con los efectos negativos que su presencia puede ocasionar sobre la madera (mayores deformaciones, mayor número de fendas durante el secado, etc.).

2.4.1.11 Madera juvenil.

La madera juvenil es la madera que forman los árboles en los primeros años de vida, y dentro de una misma pieza, presenta unas características diferentes a las del conjunto. Se sitúa alrededor de la médula, en general en los primeros 20 mm alrededor de ésta, por lo que su presencia estará ligada a la existencia próxima de médula.

En general la madera juvenil se caracteriza por ser muy ligera, flexible, presentar un valor medio de la anchura de los anillos elevado, así como una menor densidad, con traqueidas más cortas, paredes celulares más delgadas, mayor desviación de la fibra y menor resistencia.

Este tipo de madera, provoca unos valores elevados de contracción longitudinal de las piezas, produciendo en las piezas alabeo y curvaturas de cara y de canto, tras el proceso de secado.

2.4.2 Singularidades relacionadas con el proceso de aserrado de la madera.

2.4.2.1 Gemas.

Se denomina gema, a la superficie redondeada original de un tronco, con o sin corteza, que se manifiesta sobre la aristas de la pieza de madera aserrada (Fernández-Golfín Seco et al., 2003).

Se producen como consecuencia de una mal corte de la pieza en el aserradero, que deja ver claramente la sección circular del fuste. La aparición de gemas suele ser frecuente en árboles curvados, en los que el aserrado no puede ajustar el corte en la dirección de la fibra a la forma del árbol o cuando se trata de ajustar una determinada medida a la pieza resultante (Vignote et al., 1999). Su presencia produce una merma en las propiedades mecánicas de la pieza y disminuye la trabajabilidad de la madera.

2.4.2.2 Deformaciones máximas.

Entendemos por deformaciones en una pieza de madera aserrada, la desviación espacial que sufre ésta respecto a sus dimensiones originales y tienen su origen en la forma del tronco, la especie que se trabaja y la forma en que se ha trabajado la pieza. Algunos de los motivos destacables, que provocan la aparición de estas deformaciones en la madera son: el rápido e intenso secado de la madera, la existencia de tensiones internas en la madera en rollo, lo que hace que tras su corte éstas se manifiesten en forma de deformaciones sobre la madera aserrada, el diferente comportamiento de la madera en la contracción y la expansión en sentido radial y tangencial, la presencia de una excesiva deformación de la fibra, sobre todo en el caso de la fibra revirada, así como presencia de altos porcentajes de madera de compresión.

Se consideran como deformaciones, a las curvaturas de cara (ambas caras se curvan con respecto al eje transversal de la pieza), curvaturas de canto (los cantos se curvan con respecto al eje transversal de la pieza), al alabeo (los cantos se curvan de

modo que las cuatro esquinas de una misma cara no queden en el mismo plano) y el abarquillado (ambas caras se curvan con respecto al eje longitudinal de la pieza).

2.4.2.3 Daños mecánicos.

Podemos considerar daños mecánicos sobre la madera, a las heridas, cicatrices, etc., y se suelen producir durante el proceso de extracción en el monte o durante el proceso de aserrado, en el propio aserradero.

2.4.3 Singularidades relacionadas con alteraciones biológicas.

Se incluirán todos aquellos agentes biológicos o factores producidos por éstos, que tienen como consecuencia una progresiva disminución de la resistencia mecánica de la madera. Entre los más importantes, que deben ser considerados cuando se realiza una clasificación visual de la madera, se encuentran los siguientes:

- **Muérdago:** Planta parásita (*Viscum album*) que afecta a la madera de coníferas y de frondosas de árboles en pie.
- **Azulado:** Alteración del color de la madera de coníferas, producido por el ataque de hongos cromógenos, generalmente ascomicetos, que se alimentan del contenido interno de la célula. No afectan a la pared celular y por lo tanto no influyen en la resistencia de la madera.
- **Pudriciones pardas y rojizas o bandas pardas y rojizas:** Son pudriciones producidas por ataques de hongos, generalmente basidiomicetes, los cuales se alimentan de las sustancias de almacenamiento y de la celulosa de la pared celular. En madera seca no se producen ataques de éste tipo de hongos. Provocan una disminución en las propiedades mecánicas resistentes de la madera.
- **Pudriciones blancas:** Representan un estado avanzado de la pudrición de la madera, producida por hongos que se alimentan de la lignina de la pared celular, dando así a la madera un característico tono blanquecino. Afectan negativamente a la resistencia de la madera.
- **Galerías de insectos xilófagos:** Galerías realizadas por diversos tipos de insectos en la madera según la especie, su contenido de humedad, estado sanitario del árbol, etc. Provocan disminución en la resistencia mecánica de la madera según los diámetros de las galerías realizadas en ésta.

2.5 Principales propiedades de la madera estructural.

Se llama madera al conjunto de tejidos leñosos que forman el tronco, las ramas y las raíces de los árboles, excluida la corteza. Como material complejo, posee unas características que dependen no sólo de su composición, sino también de su constitución (la forma en que estén colocados los elementos que la forman).

En el estudio de la madera, para explicar todas las características de su comportamiento físico-mecánico, es necesario distinguir 3 niveles de observación: macroscópico, microscópico y ultramicroscópico.

De forma macroscópica en una sección de un árbol se puede distinguir la corteza, el cambium, la albura, el duramen y la médula.

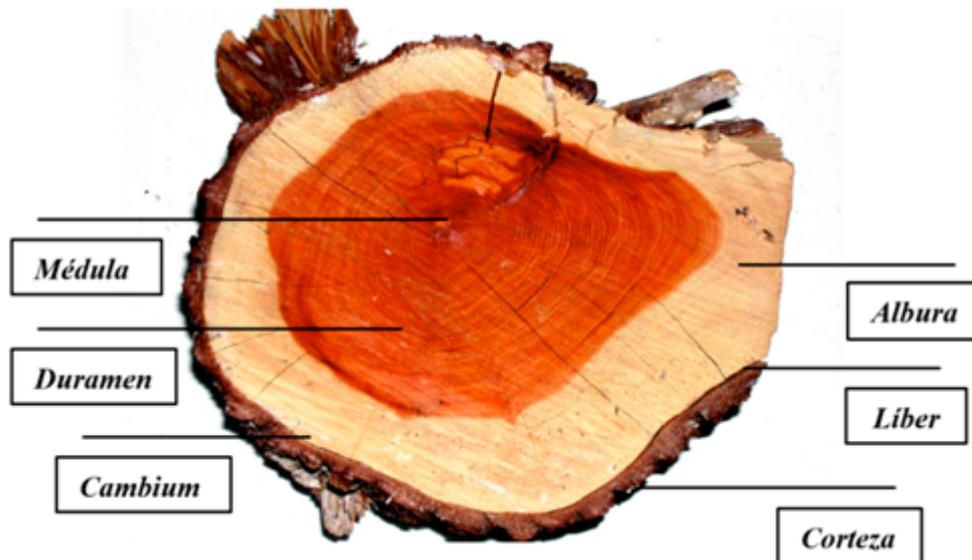


Figura 4. Partes observadas en la sección de un tronco

En cuanto a la estructura microscópica, la anatomía de las frondosas es más compleja que la de las coníferas. Las coníferas muestran una estructura relativamente sencilla en la que del 90 al 95% son células denominadas traqueidas, mientras que el tejido básico de las frondosas con funciones estructurales está constituido por fibras libriformes, es decir, de paredes más gruesas y traqueidas.

De la estructura ultramicroscópica podemos decir que los principales elementos químicos que componen la madera son: la celulosa, la lignina y las hemicelulosas, presentándose cada uno de ellos en una proporción diferente dependiendo de la especie. La sustancia básica que forma la pared de las células es la celulosa, que se agrupa en unidades mayores denominadas fibrillas elementales.

2.5.1 Principales propiedades físicas de la madera.

Son aquellas propiedades que determinan el comportamiento de la madera frente a los distintos factores que intervienen en el medio natural, sin producir ninguna modificación mecánica o química en su estructura. Las principales propiedades físicas que caracterizan a la madera estructural y su comportamiento físico-mecánico son: la anisotropía, la densidad, la humedad, la higroscopicidad y la dureza.

- **Anisotropía:** La madera no es un material homogéneo sino un material anisótropo, ya que presenta desigual comportamiento tanto mecánico como dieléctrico, dependiendo del plano o dirección que se considere respecto a las fibras. Por este motivo es necesario referenciar el plano o dirección en el que se trabaja o se ha cortado una viga. Se define el eje longitudinal, como el paralelo a la fibra, el eje radial, como el que sigue la dirección normal al crecimiento de los anillos (perpendicular a la dirección

de la fibra) y por último la dirección tangencial, que es perpendicular a la dirección de la fibra, pero tangente a los anillos de crecimiento.

La madera es más resistente a los esfuerzos axiales que a los tangenciales, siendo también de diferente comportamiento frente a los esfuerzos en dirección radial. Por este motivo se unifican las direcciones radial y tangencial en una única dirección, denominada transversal o perpendicular a la fibra y por lo tanto tendremos únicamente dos direcciones a considerar, la longitudinal y la perpendicular a la fibra o transversal.

- **Densidad:** La densidad de la madera se define como la relación que existe entre la masa y el volumen de la madera a una humedad determinada. La densidad está directamente relacionada con el contenido de humedad, por este motivo es necesario referirla a una determinada humedad. Se denomina normal, en caso de que las medidas de masa y volumen se realicen cuando las muestras están en torno al 12% de humedad, anhidra si las medidas se realizan al 0% de contenido de humedad, o bien verde si estas se realizan cuando la madera está recién apeada.

La variación entre árboles de una misma especie es del orden del 10 al 20%, respecto a su valor medio. Incluso dentro del mismo árbol, la densidad varía según la posición del mismo. En algunas especies como los pinos, la densidad disminuye con la altura el árbol, mientras que en otras como los chopos ocurre todo lo contrario. La densidad también varía dentro de la misma sección de un tronco, aumentando generalmente con la distancia a la médula.

Una de las propiedades más ventajosas de la madera es su baja densidad. Se pueden distinguir dos tipos: la densidad real y la aparente. En la real, sólo se considera como volumen, el ocupado por las paredes de las células, es decir, es la densidad de la pared celular. Su valor es del orden de 1,54 g/cm³ y es prácticamente igual para todas las especies. La densidad aparente, considera como volumen, el ocupado tanto por la pared celular como por los huecos interiores de las células. Ésta es la densidad que normalmente se mide en la madera (Jiménez, F. J., 1999).

La densidad de la madera es muy variable entre especies, desde 300 kg/m³ (densidades ligeras) hasta 1200 kg/m³ (densidades muy pesadas), aunque las especies empleadas habitualmente en estructuras, presentan densidades entre 450 kg/m³ (densidades ligeras) y 600 kg/m³ (densidades semipesadas). Para la comparación entre especies, se utiliza la densidad determinada con peso y volumen medidos, al 12% de humedad.

- **Humedad e Higroscopicidad:** La relación de la madera con la humedad es otra de sus particularidades. La humedad de la madera se define como la relación de la masa del agua contenida, respecto al peso de la madera anhidra.

La humedad no es constante en todo el espesor de la pieza, siendo menor en el interior y teniendo más humedad la albura que el duramen. El estudio tecnológico de las relaciones entre el agua y la madera es seguramente el

más importante de todos los que dependen de este material, dado que afecta a todos los procesos de transformación de la misma y a su comportamiento. Además, la variación de la cantidad de agua en una misma pieza, hace variar considerablemente la mayoría de sus propiedades físicas y mecánicas.

La higroscopicidad es la capacidad que poseen ciertos materiales de absorber humedad de la atmósfera que les rodea y retenerla en forma de agua líquida o vapor de agua. La madera es un material higroscópico que cumple con estas características, ya que puede contener agua de adsorción, de condensación o capilar y líquida. Además, dependiendo del contenido de humedad, sus propiedades mecánicas varían y, lo que es más grave, también lo hacen sus dimensiones. Se produce entonces el proceso de hinchazón y merma, que es la propiedad que posee la madera de variar sus dimensiones y por tanto su volumen cuando su contenido de humedad cambia. Puede aumentar (hinchazón) o disminuir (merma). Esto es debido a que el espacio existente entre las microfibrillas disminuye, cuando disminuye el contenido de agua y viceversa, cuando aumenta el contenido de agua de la madera. Al variar el tamaño de este espacio, también varía el tamaño de la pared celular y el de la célula y con ello el de la madera.

A cada estado ambiental corresponde un grado de humedad de la madera, llamado Humedad de Equilibrio Higroscópico (HEH). La Humedad de Equilibrio Higroscópico es el contenido de humedad de la madera en el que se equilibran las fuerzas de absorción de humedad de la madera con la fuerza desecante del aire y es prácticamente constante para todas las especies.

La madera de un árbol recién apeado, a lo largo del proceso de secado, tiene la pared celular completamente saturada y cierta cantidad de agua libre. Primero elimina el agua libre, esta pérdida se hace sin apenas variación de sus características. La máxima humedad que puede tener una madera, sin que exista agua libre, recibe el nombre de Punto de Saturación de Fibras (PSF), que oscila dependiendo de la especie alrededor del 30% del contenido de humedad. La variación del contenido de humedad, cuando ésta se encuentra por debajo del 30%, provoca cambios dimensionales, a partir de ahí, solamente varía el peso mientras que el volumen permanece constante. Una vez que baja la humedad de este punto, no podrá recuperar agua libre a no ser que sea por inmersión.

- **Dureza:** Se define la dureza de la madera como la resistencia que opone al desgaste, rayado, clavar, etc., en definitiva, a ser penetrado por otro material. Depende de su densidad, edad, estructura y si se trabaja manual o mecánicamente y en sentido de sus fibras o en el perpendicular. Cuanta más vieja y dura es, mayor será la resistencia que opone. Las maderas se clasifican como: blandas, semiduras y duras.

Las maderas duras son aquellas que proceden de árboles de un crecimiento lento, por lo que son más densas y soportan mejor las inclemencias del tiempo que las blandas. Estas maderas proceden de árboles de hoja caduca, que tardan décadas, e incluso siglos, en alcanzar

el grado de madurez suficiente para ser cortadas y poder ser empleadas en la elaboración de vigas, pilares, etc. Son mucho más caras que las blandas, debido a que su lento crecimiento provoca su escasez (ébano, encina, tejo, etc.).

Las maderas blandas engloban a las maderas de la mayoría de los árboles pertenecientes a la orden de las coníferas. La gran ventaja que tienen respecto a las maderas duras, es su ligereza y su precio mucho más reducido. No tienen una vida tan larga como las duras (pinos, abeto, sauces, etc.).

2.5.2 Propiedades mecánicas de la madera estructural.

La madera sometida a cargas, presenta un comportamiento visco-elástico. Por una parte es elástico, ya que la deformación que se produce por una carga, cesa cuando cesa la carga. Pero por otra parte, se comporta como un material plástico, cuando se incrementa la deformación por acción del tiempo de aplicación de la carga.

Cuando hablamos de las propiedades mecánicas de la madera, hemos de hacer hincapié en su constitución anatómica. Debido a la anisotropía de su estructura, a la hora de definir sus propiedades mecánicas, se consideran la dirección perpendicular y la dirección paralela a la fibra. Las resistencias y módulos de elasticidad en la dirección paralela a la fibra, son mucho más elevados que en la dirección perpendicular.

La madera presenta un comportamiento mecánico diferente a otros materiales estructurales como el acero o el hormigón, en dos aspectos concretos (GENERALIDADES DE LA MADERA, AITIM, 2011). La deformación ante una cierta carga aumenta con el tiempo. Si se carga una madera con 10 kg durante unos instantes, la deformación que presenta es del orden de 2.5 veces menor que si la carga se mantiene durante varios minutos. Además, el valor de la deformación en el estado elástico es muy elevado respecto a cualquier otro material.

Las principales propiedades mecánicas son:

- Resistencia a compresión paralela y perpendicular a la fibra.
- Resistencia a tracción paralela y perpendicular a la fibra.
- Resistencia a flexión.
- Resistencia al esfuerzo cortante.

La madera, es un material que presenta una acusada variabilidad en sus propiedades mecánicas. Esta elevada variabilidad tiene su fundamento en factores de tipo genético, de tipo selvícola e incluso de tipo tecnológico (Díez y Fernández-Golfín, 1998).

Para la valoración de la madera como material estructural, es importante tener en cuenta la resistencia que ofrece frente a fuerzas externas. Los árboles están diseñados por la naturaleza, para resistir con eficacia los esfuerzos a los que va a estar sometido en su vida; principalmente los esfuerzos de flexión, producidos por la acción del viento y los de compresión, producidos por las acciones gravitatorias.

Para referirse a las propiedades mecánicas en madera estructural se suelen dar los valores característicos, que se definen como aquellos que son seguros con un 95% de probabilidad y son los que se emplean, por ejemplo, para comprobar la resistencia. Lo valores medios son seguros con una probabilidad del 50%.

La resistencia mecánica de una pieza de madera, varía sensiblemente según el contenido de humedad y por ello, la resistencia a un esfuerzo dado no puede definirse con exactitud sino respecto a un contenido en humedad determinado. Aunque la relación con el contenido en humedad varía con el esfuerzo y además no es exactamente lineal, se puede aproximar que cuando la madera aumenta un 1% su contenido en humedad, la resistencia merma entre el 1.5 y 2% hasta contenidos de humedad del 30%. Para contenidos de humedad superiores, la resistencia no varía. Por ejemplo, si la resistencia con un contenido de humedad del 12% es de 1, con un contenido de humedad del 20% será de 0.7 y con uno del 30% será de 0.6 (Vignote y Martínez, 2006).

Otro factor importante, es que la resistencia mecánica varía de forma considerable con la especie, es decir, la densidad va a influir directamente en el comportamiento mecánico de la madera de las distintas especies e incluso dentro de una misma especie.

Los defectos o singularidades, de dimensiones importantes, que aparecen en las piezas de madera influyen directamente en las características mecánicas. La inclinación de la fibra afecta de forma significativa a la resistencia a flexión y tracción, con menor importancia en la compresión axial y apenas en la compresión perpendicular a la fibra y en el esfuerzo cortante. Los nudos poseen un efecto similar a la inclinación de la fibra, afectando de forma importante a la flexión y tracción, y no alterando de forma apreciable la resistencia al esfuerzo cortante y a la compresión perpendicular a la fibra. Sin embargo las fendas son singularidades que si afectan de forma determinante la resistencia al esfuerzo cortante. Por último, hay que tener presente que las gemas y pudriciones afectan a todos los valores de resistencia.

- **Resistencia a compresión:** La madera en la dirección de las fibras, resiste menos a compresión que a tracción.

La resistencia a la compresión, depende en gran medida del contenido de humedad de la madera y por su calidad, no afectando tanto esta segunda característica a la resistencia a la tracción (Fernández-Golfín et al.,2000). Otros factores que influyen son la inclinación de las fibras, la densidad, los nudos o la propia constitución química de la madera.

La resistencia a compresión perpendicular a la fibra, como ocurre con las propiedades transversales, es muy inferior a la existente en la dirección paralela. Los valores característicos de resistencia varían entre 4,3 y 5,7 N/mm², lo que representa la cuarta parte de la resistencia en dirección paralela a la fibra, que será elevada, alcanzando valores característicos en la madera clasificada de 16 a 23 N/mm².

El esfuerzo de compresión perpendicular a la fibra, es característico de las zonas de apoyo de las vigas, donde se concentra toda la carga en pequeñas superficies que deben de ser capaces de transmitir la reacción,

si sufrir deformaciones importantes o aplastamiento (Argüelles y Arriaga, 2000).

En el esfuerzo de compresión paralela a la fibra, el cálculo de los elementos comprimidos, se ha de realizar comprobando la inestabilidad de la pieza (pandeo), en el que influye decisivamente el módulo de elasticidad. El valor relativamente bajo de este módulo, reduce en la práctica la resistencia a la compresión en piezas esbeltas. Esta propiedad resulta importante en una gran cantidad de tipos de piezas, como los pilares, montantes de muros entramados, pares de cubierta, etc. (Argüelles y Arriaga, 2000).

La rotura de la madera solicitada a compresión no resulta clara, ya que lo que se produce en la práctica es un aplastamiento de las fibras, que no impide que el material pueda seguir aguantando solicitaciones.

- **Resistencia a tracción:** La tracción es el esfuerzo al que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas, que actúan en sentido opuesto una a otra y que tienden a producirle una elongación.

La resistencia a la tracción perpendicular a la fibra es muy baja (del orden de 30 a 70 veces menos que en la dirección paralela). El valor característico de la resistencia a tracción perpendicular es de 0,3 a 0,4 N/mm². Esta baja resistencia se justifica por las escasas fibras que tiene la madera en la dirección perpendicular al eje del árbol (radios leñosos) y la consiguiente falta de trabazón transversal de las fibras longitudinales. (Argüelles y Arriaga, 2000).

Este hecho, que podríamos denominar como de economía de medios, es coherente con las reducidas necesidades resistentes del árbol en esa dirección, que está mucho más preparado para resistir las solicitaciones de flexión a las que se ve sometido.

En la práctica y aplicado a estructuras, esta sollicitación resulta crítica únicamente en piezas de directriz curva (arcos, vigas curvas, etc.) o en zonas de cambio brusco de directriz (zonas de vértice). Estas tensiones de tracción también se pueden producir como consecuencia de la coacción del libre movimiento transversal de la madera en soluciones constructivas incorrectas, que pueden ser evitadas fácilmente con el conocimiento del material. (Argüelles y Arriaga, 2000).

La resistencia a la tracción paralela a la fibra es elevada, presentando unos valores característicos que oscilan entre 8 y 18 N/mm². Como ejemplo de piezas solicitadas a este esfuerzo, se encuentran principalmente los tirantes y los pendolones de las cerchas (Argüelles y Arriaga, 2000).

La resistencia a la tracción está muy relacionada con la calidad de la madera, pero no es sensible a la humedad, por este motivo no suelen considerarse factores correctores (Fernández-Golfín et al., 2000).

- **Resistencia a flexión:** La resistencia a la flexión de la madera es muy elevada, sobre todo comparada con la densidad. El Módulo de Rotura (MOR), refleja 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, aunque no es una medida real de la tensión porque la fórmula que se emplea para su cálculo sólo es válida hasta el límite elástico.

Los valores característicos de la resistencia a flexión de las coníferas, que se utilizan habitualmente en estructuras, varían entre 14 y 30 N/mm². (Argüelles y Arriaga, 2000).

La flexión se origina por un momento flector, que produce en la sección de la pieza tensiones de compresión y de tracción paralelas a la fibra, que tienen sus valores máximos en las fibras extremas y que son nulas en la zona de fibra neutra.

En madera es necesario hablar de resistencia a flexión, aunque esta esté formada por la combinación de una tracción y una compresión, ya que el comportamiento mecánico de estas 2 propiedades es diferente, y por lo tanto resulta más práctico referirse al efecto conjunto de ambas, en el caso de flexión. (Argüelles y Arriaga, 2000).

La resistencia a la flexión de la madera, depende de la calidad de esta y de los defectos o singularidades que presente, tales como nudos, desviación de la fibras, fendas, etc., ya que la rotura se produciría en estos puntos. La densidad y la humedad también tienen una importante influencia en la resistencia a flexión.

Esta propiedad es importante en piezas tales como vigas, viguetas de forjado, pares de cubierta, etc. Los ensayos a flexión se suelen realizar sobre una viga apoyada en sus extremos, aplicándole una carga en la parte central de ésta. En este tipo de esfuerzo la parte superior trabaja a compresión y la inferior a tracción.

- **Cortante:** El esfuerzo cortante se produce por sollicitaciones en dirección perpendicular a las fibras, que a su vez origina tensiones tangenciales que actúan sobre las fibras de la madera según diversos modos:

-Tensiones tangenciales de cortadura: las fibras son cortadas transversalmente por la acción del esfuerzo que se genera, en dirección perpendicular a las fibras. El fallo se produce por aplastamiento.

-Tensiones tangenciales de deslizamiento: el fallo se produce por deslizamiento de unas fibras con respecto a otras, en la dirección longitudinal.

-Tensiones tangenciales de rodadura: el fallo se produce por rodadura de de unas fibras sobre otras.

En las piezas sometidas a flexión y a cortante, las tensiones que intervienen son conjuntamente las de cortadura y deslizamiento (tensiones rasantes).

Los valores característicos de la resistencia a cortante (por deslizamiento), varían entre 1,7 y 3 N/mm², en las especies y calidades utilizadas normalmente en construcción. (Argüelles y Arriaga, 2000).

Las tensiones tangenciales por rodadura de fibras, solo se producen en casos muy concretos, como son las uniones encoladas entre el alma y el ala de una vigueta con sección en doble T. El valor de la resistencia por rodadura es del orden del 20 al 30% de la resistencia por deslizamiento (Argüelles y Arriaga, 2000).

La influencia del cortante en la deformación a flexión es mucho más marcada en la madera que en el hormigón y el acero; y la resistencia al cortante, está muy relacionada con el contenido en humedad de la madera.

2.5.3 Propiedades elásticas.

Cualquier tipo de sollicitación aplicada a la madera, produce en esta, una deformación en la dirección del esfuerzo. El diseño de las estructuras de madera se basa en la teoría elástica, en la que se establecen que las deformaciones son directamente proporcionales a los esfuerzos a las que éstas están sometidas, es decir, existe una relación lineal entre las tensiones y las deformaciones. Esta relación se mantiene sólo hasta un cierto límite, hasta este punto la madera se comporta de forma elástica, desapareciendo las deformaciones al cesar el esfuerzo.

Después de este límite, denominado límite elástico o límite de proporcionalidad del material (que en una sollicitación a flexión se sitúa en el intervalo del 70 al 80% de la carga última o de rotura), la deformación comienza a aumentar en un grado mayor que los incrementos de la carga aplicada y dejan de ser totalmente recuperables (aparece un componente permanente), apareciendo un comportamiento inelástico.

En el Método de Esfuerzos Admisibles, empleado para el cálculo de estructuras, el diseño establece que no se debe sobrepasar el límite elástico para la estructura sometida a cargas de servicio.

El Módulo de Elasticidad de un material (MOE), es la medida de su rigidez (relación entre el esfuerzo unitario y la deformación unitaria) y la variable de mayor trascendencia para el análisis de las propiedades elásticas.

3. OBJETIVOS

OBJETIVOS

3. OBJETIVOS.

Para la consecución del objetivo fundamental de este T.F.M., se realizarán una serie de ensayos mecánicos en una muestra de vigas trío reforzadas con fibras artificiales, que hemos obtenido en el Laboratorio de Tecnología de la Madera de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia (Universidad de Valladolid).

Los objetivos concretos que se persiguen con el siguiente Trabajo de Investigación son los siguientes:

- 1- Determinar las propiedades elastomecánicas de las vigas trío reforzadas con fibra de vidrio, de *Pinus pinaster* Ait., mediante métodos mecánicos de ensayo, determinando los valores de los módulos de elasticidad (MOE), por métodos no destructivos y de rotura (MOR), mediante métodos destructivos, para determinar si sus valores resistentes son suficientes para poder emplearlas como madera estructural.
- 2- Contrastar los valores y resultados obtenidos en esta investigación, sobre una población de vigas trío reforzadas, con los pertenecientes al material original, vigas de madera maciza de *Pinus pinaster* Ait (región de procedencia Meseta Castellana), y ver si mejoran algunas de las características de la madera maciza original.
- 3- Obtener vigas trío reforzadas con fibra de vidrio, que presenten algún tipo de uso estructural, partiendo de probetas de madera consideradas de baja calidad.
- 4- Determinar si existe una homogeneidad en los resultados, que aporte fiabilidad al estudio.

Caracterización elastomecánica de vigas trío reforzadas con fibras artificiales, de *P. pinaster* Ait.
(región de procedencia Meseta Castellana)

Objetivos

4. MATERIAL Y MÉTODOS

MATERIAL Y MÉTODOS.

4. MATERIAL Y MÉTODOS.

4.1 Datos generales del muestreo.

El material analizado en el presente estudio, consta de 49 vigas de madera maciza que se utilizarán como patrón de los valores elastomecánicos del material y 45 vigas trío de madera laminada encolada, reforzadas con fibra de vidrio de altas propiedades elastomecánicas, obtenidas a partir de 135 tablas de *Pinus pinaster* Ait. (región de procedencia Meseta Castellana), consideradas de baja calidad.

Se han tomado medidas y analizado las características de un total de 150 tablillas, después de desechar algunas más, por presentar falta de rectitud, nudos, defectos de aserrado, etc., utilizando finalmente las 135 tablas señaladas anteriormente para obtener las vigas trío.

La madera de *Pinus pinaster* Ait. (región de procedencia Meseta Castellana) utilizada en este estudio, pertenece al Laboratorio de Tecnología de la Madera de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia (Universidad de Valladolid) y se utilizará, para la realización de los ensayos de caracterización y comparación elastomecánica de madera maciza y de vigas trío reforzadas con fibras artificiales.



Figura 5. Conjunto de probetas iniciales

En la figura 5, en la que se encuentra el conjunto de probetas con las que comenzaremos este estudio, puede observarse la baja calidad de las mismas y algunos de los defectos que presentan.

Las dimensiones finales de las vigas trío reforzadas con fibra de vidrio, son de $[1200\pm 10] \times [55\pm 5] \times [40\pm 3]$ mm, y se han obtenido a partir de 3 tablas de $[1200\pm 10] \times [55\pm 5] \times [12\pm 3]$ mm respectivamente. Las dimensiones de las vigas macizas serán similares a las de las vigas trío reforzadas.

No se han obtenido pequeñas probetas de la parte central de las vigas trío, no afectada por la rotura, después del ensayo de rotura de cada una de ellas, ya que para este estudio no requeríamos conocer la humedad de la madera y para conocer la densidad real de esta, hemos utilizado el peso y el volumen de cada viga completa. De esta forma los resultados se ajustan más a la realidad.

La madera utilizada en este estudio, está considerada de baja calidad por presentar muchos nudos, ser resinosa, presentar azulado, falta de rectitud del fuste por la presencia de madera de compresión en gran parte del tronco y por el crecimiento desigual en diámetro, etc. Está devaluada como madera de uso estructural y su uso final queda condicionado.



Figura 6. Detalle de los defectos de las probetas iniciales

En primer lugar se numerarán correlativamente las 150 tablas seleccionadas, se clasificarán por ultrasonidos en 3 niveles de calidad diferentes, aportando cada nivel el mismo número de estas, y por último obtendremos cada viga trío utilizando 1 tabla de cada uno de los 3 niveles de calidad. Finalmente sólo utilizamos 135 tablas de las seleccionadas y numeradas anteriormente. Antes de comenzar con el ensayo de flexión y el del módulo de rotura con la máquina universal, numeraremos las 45 vigas finales, de la misma forma que habíamos numerado las tablas iniciales en un principio.

4.2 Equipos de trabajo.

Se utilizarán para la determinación de las propiedades elastomecánicas métodos instrumentales de ensayo, diferenciando entre “métodos no destructivos” y “métodos destructivos”. Para los primeros, utilizamos un equipo de ultrasonidos, con el que podemos determinar los valores de los módulos de elasticidad dinámico (MOEd), y una máquina universal de ensayos con la que realizaremos un ensayo a flexión para obtener el módulo de elasticidad global (MOEG). Para los segundos, se utiliza la misma máquina universal de ensayos, determinando los valores de los módulos de rotura (MOR).

4.2.1 Equipo de ultrasonidos Sylvatest Trio ®.

Para la realización del estudio y en concreto en la parte de métodos no destructivos, se ha utilizado el Sylvatest Trio ®.



Figura 7. Equipo Sylvatest Trio ®

Este aparato está formado básicamente por un generador de ultrasonidos, compuesto por una pantalla digital y una batería recargable, además de un par de palpadores metálicos, de forma cilíndrica con terminación en punta cónica, que les permite una sencilla sujeción a la madera. Estos palpadores se conectan al sistema principal mediante unos cables de conexión de diferentes medidas.

Con este equipo podemos medir el tiempo (μs) que tardan las ondas ultrasónicas, con una frecuencia de 30 kHz, en recorrer la distancia que separa el palpador emisor del receptor.

Los palpadores se colocarán totalmente enfrentados entre sí, cada uno en uno de los dos extremos de las tablas y de forma paralela a estas.

Una vez obtenida la velocidad de onda y la densidad de la madera, podemos calcular el Módulo de Elasticidad Dinámico (MOEd), utilizando la siguiente ecuación (ARRIAGA et al., 1994):

$$MOEd \left(\frac{N}{mm^2} \right) = \left[Densidad \left(\frac{Kg}{m^3} \right) \cdot Velocidad^2 \left(\frac{m}{s} \right) \right] \cdot 10^{-6}$$

4.2.2 Máquina Universal de Ensayos E.L.I.B.-100 Ibertest®.

Para la realización del estudio, se ha utilizado una maquina universal de ensayos E.L.I.B.-100W Ibertest®, para la realización de ensayos no destructivos y de ensayos destructivos.



Figura 8. Maquina Universal E.L.I.B.-100 W Ibertest®

Este equipo consta de un potro o bancada metálica, resistente y de grandes dimensiones, sobre el que se dispondrán los accesorios necesarios, según el tipo de ensayo que queramos realizar.

La maquina funciona con un software de un ordenador, al que está conectada y que tiene diferentes opciones de trabajo, según las condiciones del tipo de ensayo que queramos realizar. Los datos que se van obteniendo se almacenan en el programa.

En este estudio concretamente, utilizaremos la maquina universal para trabajar a flexión y calcular el MOEG (MPa) y el MOR (MPa), según la Norma UNE-EN-408, para ello le acoplamos un accesorio, que consiste en una viga metálica que presenta dos puntos de carga, para actuar sobre la parte central del canto superior cada viga. Cada una de dichas vigas, se coloca de canto y horizontalmente sobre dos apoyos, variables según las dimensiones de las probetas a ensayar, situados cada uno de ellos en las partes más externas de cada una de ellas. De esta forma están paralelas al accesorio metálico que efectúa la carga sobre los dos puntos.



Figura 9. Software utilizado

Desde el software controlamos la colocación de otro de los accesorios que tendremos que utilizar, el sensor de deformación o extensómetro. Este estará sujeto en un soporte y se situará en la parte central del canto inferior de cada viga, de forma que entre en contacto levemente en posición perpendicular a estas. Se utiliza para realizar el primero de los ensayos a flexión, con el que obtendremos una primera medida de la deformación en la parte central.

Una vez concluido este primer ensayo, comenzaremos con el ensayo de rotura definitivo.



Figura 10. Detalle de extensómetro utilizado

4.2.3 Equipos complementarios.

En el presente estudio además de los equipos principales, citados anteriormente, y utilizados para la realización de cada uno de los métodos de ensayo, ha sido necesario el empleo de algunos otros aparatos, instrumentos y materiales que aún siendo secundarios son fundamentales para la correcta ejecución de este T.F.M y con los que se han realizado algunas pequeñas operaciones como medir, taladrar, pesar, marcar, etc.

Ahora citamos cada uno de ellos y explicamos la utilidad que han tenido dentro de la realización de este estudio.

4.2.3.1 Rotulador permanente.

Utilizado para marcar y numerar, en primer lugar cada una de las tablas de partida, y posteriormente cada una de las vigas trío reforzadas con fibra de vidrio, obtenidas tras el encolado. También ha servido para señalar los puntos de apoyo de cada viga, en el momento de la realización del ensayo en la maquina universal, para la obtención de resultados más precisos.

4.2.3.2 Cinta métrica.

Cinta con precisión de 1mm, utilizada para determinar la longitud de las tablas, las dimensiones de cada una de las vigas trío obtenidas, para conocer y marcar exactamente los puntos de apoyo de las probetas al realizar el ensayo a flexión y para obtener las porciones de las tiras de fibra de vidrio necesarias, para la conformación de las vigas.

4.2.3.3 Taladro eléctrico.

Utilizado para realizar pequeños agujeros en los cantos de cada una de las tablas, y de esta forma poder colocar correctamente el palpador emisor y el receptor, para el correcto uso del equipo de ultrasonidos Sylvatest®.

4.2.3.4 Balanza de precisión digital.

Utilizada para pesar cada una de las tablas iniciales y posteriormente las vigas trío obtenidas, para tenerlas clasificadas por pesos antes de la realización del ensayo en la maquina universal, y de esta forma, una vez que conozcamos el volumen de cada una de ellas poder calcular su densidad.

4.2.3.5 Tijeras.

Utilizadas para cortar las tiras de fibra de vidrio con las que vamos a encolar y reforzar las vigas trío.

4.2.3.6 Espátula metálica.

Utilizada para repartir uniformemente la cola, por las caras de las tablas a encolar y por las tiras de fibra de vidrio, que se colocan entre cada pieza. Se utilizan dos tiras de fibra por cada viga trío.

4.2.3.7 Martillo de carpintero.

Utilizado para fijar con clavos cada una de las tres tablas que forman las vigas trío y no permitir el desplazamiento de las tiras de fibra de vidrio dentro de estas, una vez estén encoladas y ejerzamos presión para comprimirlas y compactarlas con los gatos sargento.

4.2.3.8 Sargentos de ariete rápido.

Utilizados para fijar y prensar las piezas, una vez estén encoladas y con las tiras de fibra de vidrio en su interior. Utilizamos como mínimo cinco de ellos, distribuidos uniformemente para lotes de 5 vigas trío, superpuestas una encima de otra.

4.2.3.9 Sierra circular de banco.

Utilizada una vez ha transcurrido el tiempo de fraguado de la cola y hemos obtenido todas las vigas trío, para repasar y eliminar restos de cola seca y de fibra desplazada que hay fuera de los bordes y que no son de utilidad a la hora de la realización del ensayo.

4.3 Metodología empleada.

4.3.1 Descripción general.

Se realizan métodos mecánicos de ensayo, no destructivos, calculando el MOEG y destructivos, calculando el MOR, para determinar las propiedades elastomecánicas de vigas trío, reforzadas con fibra de vidrio (según la norma UNE-EN-408), obtenidas en el Taller de Tecnología de la Madera de la E.T.S. Ingenierías Agrarias de Palencia, a partir de 135 tablas de *Pinus pinaster* Ait. (región de procedencia Meseta Castellana), adquiridas por el Laboratorio de Tecnología de la Madera de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias (E.T.S.II.AA.).

4.3.2 Selección de tablas de *P. pinaster* a utilizar.

En primer lugar el estudio comienza con la selección visual y numeración, de 150 probetas, dentro de un lote de piezas de madera de *P. pinaster* Ait. (región de procedencia Meseta Castellana), utilizando finalmente 135 de ellas, que son con las que conforman las vigas trío reforzadas con fibra de vidrio. Rechazamos las que estén en peores condiciones, en cuanto a rectitud, nudos, grietas, etc., para no tener ningún problema a la hora de encolar y prensar las vigas. De esta forma los resultados de los ensayos son más coherentes.



Figura 11. Selección y numeración de tablas iniciales

4.3.3 Clasificación según rectitud y azulado de las piezas.

Realizamos una clasificación de las probetas seleccionadas previamente, según la rectitud que presenten y el porcentaje de azulado que las recubra, de menor a mayor, asignándole valores de 0 a 5 respectivamente. A continuación se clasifican según la intensidad del azulado que presenten, si es el caso, de menor a mayor, asignándole valores de 0 a 3 respectivamente.



Figura 12. Detalle del azulado de las piezas

4.3.4 Clasificación visual según norma.

Realizamos una clasificación visual de las tablas seleccionadas, según la norma UNE-56.544 sobre “Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural”, siguiendo los criterios de diámetro de los nudos sobre la cara y diámetro de los nudos sobre el canto, denominándose ME-1, ME-2 o rechazo según corresponda.

4.3.5 Ensayos con métodos no destructivos de ultrasonidos.

Se le realiza a cada una de las tablas seleccionadas un ensayo no destructivo de transmisión de ultrasonidos, con un equipo Sylvatest®, que mide la velocidad de propagación a través de la madera de ondas ultrasónicas de frecuencia 30 kHz, desde el palpador emisor al receptor, situados cada uno de ellos en uno de los extremos de la pieza, siendo esta velocidad menor, cuanto mayores sean los defectos que presente la tabla.

La expresión que mide la velocidad a la que se desplazan las ondas ultrasónicas es la siguiente:

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

Donde:

V: Velocidad de propagación de la onda ultrasónica a través de la madera.

l: Distancia recorrida entre palpadores.

t: Tiempo que tarda la onda ultrasónica en atravesar la viga de madera.

Las mediciones se realizan mediante método directo, consistente en colocar los palpadores, evitando zonas de defecto, de forma perpendicular en cada una de las testas de las piezas de estudio. Tomaremos dos mediciones de cada una de las tablas mediante este método y utilizaremos la media de las mismas como valor final.

4.3.6 Clasificación de las piezas según ultrasonidos.

Una vez obtenidas las diferentes velocidades de onda de cada una de las piezas, las organizamos en 3 grupos diferentes de calidad, (calidad 1, calidad 2 y calidad 3), siendo las que presentan mayor velocidad de onda, las pertenecientes al grupo de calidad 1 y las de menor velocidad las pertenecientes al grupo de calidad 3. En cada uno de los 3 grupos realizados, habrá el mismo número de piezas.

Los intervalos que comprenden las velocidades de onda de los grupos de calidad 1, calidad 2 y calidad 3 serán [3643; 4485], [4499; 4870,5] y [4870,6; 5721] m/s respectivamente.

Con esta clasificación nos aseguramos poder utilizar una tabla de cada una de las 3 calidades para la conformación de las vigas trío reforzadas.

4.3.7 Obtención de las vigas trío reforzadas con fibra de vidrio.

4.3.7.1 Preparación de las tiras de fibra de vidrio.

Será necesario utilizar el doble de tiras de fibra de vidrio que de vigas trío vayamos a conformar, ya que necesitamos 2 tiras para cada una. Estas van encoladas y colocadas entre cada una de las tablas de las que forman cada viga trío.

La fibra se presenta en rollo y tenemos que utilizar las tijeras para obtener las tiras necesarias. Hemos utilizado un total de 90 tiras de fibra de vidrio, para obtener las 45 vigas trío reforzada sobre las que se desarrolla este estudio.

Como del ensayo a flexión con la maquina universal, nos interesa únicamente la parte traccionada de cada viga, ya que la parte afectada por compresión no se será de utilidad para el cálculo del MOEG y del MOR, según la norma UNE-EN-408, utilizamos solamente tiras de fibra que midan de ancho como mínimo, la mitad de lo que mida la cara de cada tabla. Estas tiras de fibras se colocan encoladas y ajustadas a la parte de la viga que va a ser traccionada.

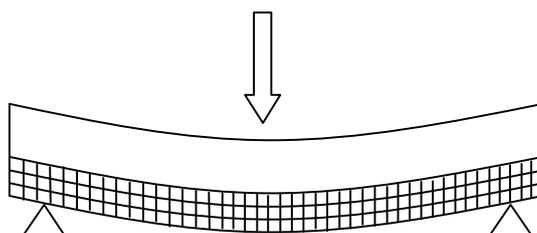


Figura 13. Esquema de la situación de las tiras de fibra

Las dimensiones de las tiras de fibra de vidrio utilizadas en este estudio han sido de $[1220] \times [30 \pm 5]$ mm, asegurándonos de esta manera que cubrirán totalmente el largo y la mitad del ancho o más de cada probeta.



Figura 14. Dimensiones de las tiras de fibra utilizadas

4.3.7.2 Encolado y colocación adecuada de las tiras de fibra de vidrio para obtener las vigas trío.

Una vez cortadas las tiras de fibra de vidrio, a la medida adecuada, procederemos a encolar cada una de las 3 tablas de calidades diferentes que conformaran las vigas trío, con sus correspondientes tiras de fibra ajustadas a uno de los bordes.

Las posiciones de las 3 tablas utilizadas para conformar las vigas trío siempre van a ser las mismas, dependiendo del grupo de calidad al que pertenezcan. Se coloca siempre la tabla perteneciente a la calidad 2 en la posición central de cada viga trío, quedando las tablas de calidad 1 y de calidad 3 en los extremos. De esta forma tendremos una población de vigas trío lo más homogénea posible y evitaremos, que si por ejemplo colocamos la tabla de calidad 1 en la parte central de la viga, los resultados de los ensayos a flexión sean mejores.

Se colocan progresivamente, según avance el proceso de formación, 4 clavos de sujeción por cada una de las vigas, situados en sus extremos 2 a 2. Con esta operación se facilita una mejor unión de las tablas, así como una mejor sujeción de las tiras de fibra, para conseguir disminuir su desplazamiento una vez que ejercemos presión sobre ellas con los sargentos, antes del proceso de secado.

Para este estudio y en el proceso de encolado, se ha utilizado una cola epoxi bicomponente con una proporción de 4 a 1, según indica el fabricante.

El proceso de encolado y formación de las vigas trío reforzadas comienza con la mezcla de la resina epoxi y el catalizador correspondiente, en proporción 4 a 1 respectivamente. Para ello se irán mezclando cantidades 800g de resina y 200g de catalizador, ya que si mezclamos cantidades mayores, tendremos problemas con el fraguado relativamente rápido de este tipo de colas. Realizamos esta mezcla las veces que sean necesarias y para controlar las cantidades utilizamos una balanza de precisión digital.



Figura 15. Adhesivo bicomponente

Procedemos a encolar sobre las caras que presenten mejores características a simple vista, así evitamos fallos en el proceso de encolado y posteriormente en los resultados de los ensayos a flexión.

El orden cronológico del encolado de las 3 tablas de calidades diferentes y de las 2 tiras de fibra de vidrio, que conforman cada viga trío reforzada será el siguiente:

- 1- Encolar la cara superior (cara A) de la tabla de calidad 1.



Figura 16. Encolado 1

- 2- Colocar la tira de fibra de vidrio 1 encima de la cara encolada y volver a encolar esta cara con la tira encima, para que ésta quede totalmente impregnada.



Figura 17. Encolado 2

- 3- Encolar la cara inferior (cara B) de la tabla de calidad 2 y colocar encima de la cara de la tabla de calidad 1, anteriormente encolada con la tira de fibra 1.



Figura 18. Encolado 3

- 4- Colocar un clavo en cada extremo de la tabla de calidad 2, que sirva como unión de ambas tablas y sujeción de la tira de fibra 1, evitando desplazamientos de ésta tras la presión.



Figura 19. Encolado 4

- 5- Encolar la cara superior (cara A) de la tabla calidad 2, previamente unida mediante clavos a la tabla de calidad 1.

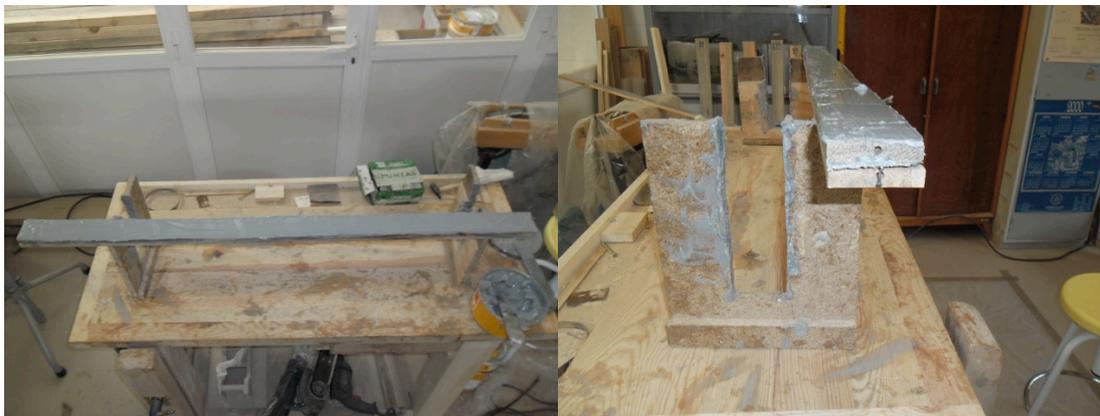


Figura 20. Encolado 5

- 6- Colocar la tira de fibra de vidrio 2 encima de la cara encolada de la tabla de calidad 2 y volver a encolar esta cara con la tira encima, para que ésta quede totalmente impregnada.



Figura 21. Encolado 6

- 7- Encolar la cara inferior (cara B) de la tabla de calidad 3 y colocar encima de la cara de la tabla de calidad 2, anteriormente encolada con la tira de fibra 2.



Figura 22. Encolado 7

- 8- Colocar un clavo en cada extremo de la tabla de calidad 3, que sirva como unión a la tabla de calidad 2 y sujeción de la tira de fibra 2, evitando desplazamientos de ésta tras la presión.

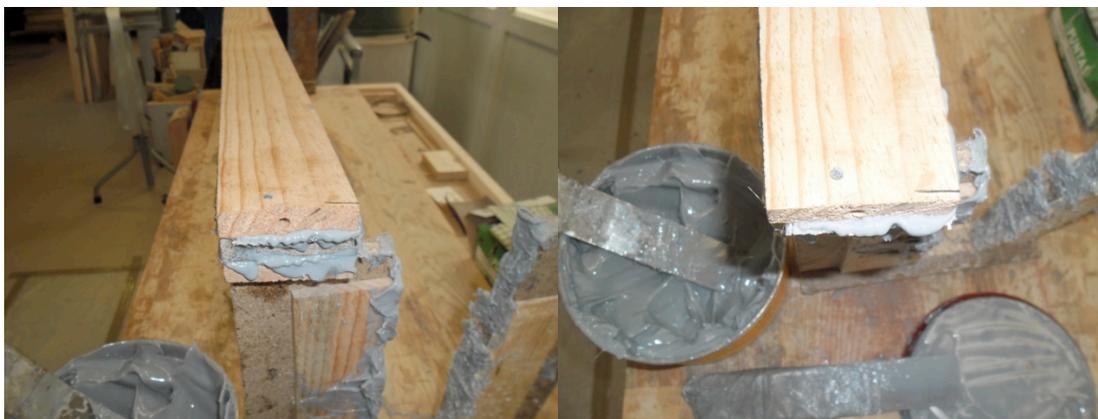


Figura 23. Encolado 8

Una vez finalizado este proceso, comenzaremos desde el principio con la siguiente viga trío, hasta completar un lote de 5 vigas como máximo, momento en el que pasaremos al prensado y secado.



Figura 24. Final de proceso de encolado

El encolado debe hacerse de forma regular, aplicando la cantidad de cola suficiente, para que las tiras de fibra de vidrio queden totalmente impregnadas y no quede ningún espacio sin cola entre cada tabla. Esta unión homogénea perseguida, entre tablas y fibra, será fundamental para que los ensayos finales sean correctos.

Destacar que este proceso será el más laborioso y delicado a su vez de los realizados en este estudio, y al que más tiempo se le ha dedicado.

Se debe tener cuidado con la mezcla exacta de los 2 componentes que forman la cola, la aplicación homogénea y generosa en las superficies a encolar, el rápido fraguado que obliga a realizar la mezcla de componentes en muchas ocasiones, la correcta colocación de las tiras de fibra, etc.

4.3.7.3 Proceso de fraguado de la cola y obtención final de las vigas.

Una vez finalizado el encolado y la colocación de tiras de fibra de las vigas trío, procedemos a prensarlas y compactarlas en lotes, utilizando los sargentos de ariete rápido. Posteriormente comienza el proceso de secado de estas.

Se prensan lotes con un máximo de 5 vigas trío reforzadas con fibra de vidrio, superpuestas una encima de otra, siendo necesarios un mínimo de 5 sargentos, que se repartirán de forma que ejerzan una presión lo más uniformemente posible sobre toda la superficie de cada lote, ofreciendo unos mejores resultados en los ensayos posteriores. No se pueden prensar lotes compuestos por un mayor número de vigas, ya que la abertura de los sargentos no lo permite.



Figura 25. Prensado

La presión que se ejerce con los sargentos no debe ser muy alta, ya que el objetivo perseguido es que permanezca, después del secado, un película de cola continua entre cada tabla de las que forman la viga y que las tiras de fibra de vidrio queden flotando entre ellas. Aunque siempre se producen pérdidas, si la presión aplicada es excesiva, éstas serán mucho mayores y podrían quedar huecos en los que no haya cola.



Figura 26. Detalle de pérdida de cola

Se colocan dos listones de madera, uno en la parte inferior y otro en la parte superior de cada lote, para evitar dañar las vigas que están en contacto con las cabezas de los sargentos, una vez que se empieza a ejercer presión. Con esta medida evitamos posibles daños producidos por los gatos, que puedan influir en los ensayos posteriores.



Figura 27. Detalle de listones de madera utilizados

Hay que señalar los continuos problemas de desplazamiento de las tiras de fibra colocadas en el interior de cada viga, ocasionados por la presión de los sargentos sobre estas. Para paliar estos contratiempos se toman algunas medidas, como dejar fraguar un poco la cola antes de comenzar a hacer presión, de esta manera al no ser tan líquida, las tiras de fibra de vidrio tienden a desplazarse en menor medida, colocar clavos para anclar las tiras en los extremos de cada viga, o ejercer una mínima presión

con los sargentos, para reducir estos desajustes interiores. A pesar de tomar estas precauciones, no se ha conseguido solucionar completamente este problema.



Figura 28. Detalle del desplazamiento de tiras de fibra de vidrio

Después de colocar todos los sargentos de ariete rápido en cada lote de vigas, procedemos a dejar fraguar la cola un mínimo de 48 horas.

Una vez transcurrido el tiempo recomendado, se retira la presión de cada lote y se procede a separar las vigas que hayan quedado unidas entre sí por restos de cola sobrante, utilizando un martillo y un pequeño cincel.

Por último se procede a eliminar los restos de cola sobrante y de la fibra de vidrio desplazada fuera de cada viga, utilizando la sierra circular de banco que hay en el Taller de Tecnología de la Madera de la E.T.S. Ingenierías Agrarias (E.T.S.II.AA.) de Palencia (Universidad de Valladolid). Una vez realizado este proceso, se numeran todas las vigas obtenidas, un total de 45, para tener un mayor control en el manejo de datos, durante los ensayos posteriores.



Figura 29. Viga antes y después de eliminar restos de tiras de fibra y cola sobrante

4.3.8 Calculo de la densidad de la madera que conforma las vigas.

Calculamos la densidad o peso específico de cada una de las probetas obtenidas, una vez hayamos calculado el volumen de cada una de ellas y su peso.



Figura 30. Peso de cada viga para posteriormente calcular la densidad

La expresión que utilizaremos será la siguiente:

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

Siendo:

ρ : Densidad (kg/m³).

m : Peso de la probeta (kg).

v : Volumen de la probeta (m³).

4.3.9 Obtención del MOEG y el MOR, mediante la realización de los ensayos a flexión con la maquina universal.

Después de haber obtenido y numerado la totalidad de las vigas trío reforzadas con fibra de vidrio que vamos a utilizar en este estudio, procedemos a realizar los ensayos a flexión, tanto destructivos como no destructivos, con la maquina universal Ibertest® que hay en el Laboratorio de Tecnología de la Madera de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias (E.T.S.II.AA.) de Palencia (Universidad de Valladolid).

Este equipo está compuesto por una bancada de grandes dimensiones, en la que se colocan los accesorios adecuados a cada tipo de ensayo, y trabaja mediante un software específico, que manejaremos a través de un ordenador al que está conectado.

Para este estudio, en el que los ensayos que realizaremos serán a flexión, se coloca un travesaño metálico que presenta dos puntos de carga, que actúan sobre la parte central del canto superior de cada viga. Estas se colocan horizontalmente sobre dos apoyos, variables según las dimensiones de las probetas a ensayar. También se utiliza un sensor de la deformación, colocado sobre un soporte metálico vertical regulable, que actúa sobre la parte central del canto inferior de cada viga.



Figura 31. Inicio de ensayo

Los ensayos de rotura realizados para este T.F.M. se realizan conforme a la norma UNE-EN-408 “Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas”. Se determinan el módulo de elasticidad global (MOEG) y la resistencia a la flexión estática (MOR).

4.3.9.1 Determinación del módulo de elasticidad global de canto a flexión, (MOEG).

Se mide la deformación de la viga, en el punto central de la misma, respecto de los apoyos (18 veces la altura del canto), para ello las dimensiones de estas deben ser superiores o iguales a 19 veces la altura del canto.

Se aplica sobre cada probeta una carga que aumenta progresivamente y a la misma vez se va midiendo la deformación de ésta, mediante un sensor de la deformación, extensómetro. Los dos puntos de aplicación de la carga están separados 6 veces la altura del canto.

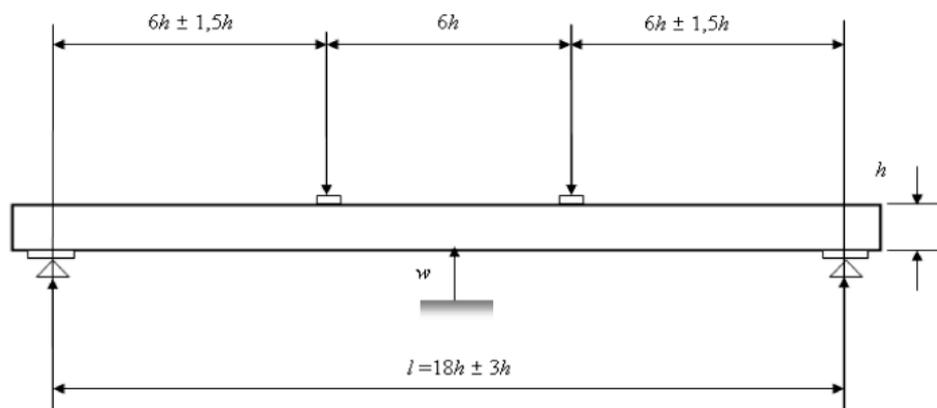


Figura 32. Esquema del ensayo

Antes de comenzar el ensayo, debemos introducir las dimensiones de las probetas a ensayar en el software para que sea correcto. Las probetas se colocan totalmente centradas en la máquina y lo mas horizontal posible sobre los apoyos, utilizando para ello si fuera necesario, pequeñas laminas de madera colocadas en los extremos. Se debe conseguir un perfecto y total apoyo de las vigas, para evitar movimientos indeseados a medida que aumenta la carga aplicada, que pueden causar errores en las mediciones.

Posteriormente, procedemos a colocar el sensor de deformación, ejerciendo la presión adecuada, según indique el programa informático utilizado, en la parte central del canto inferior de la probeta y en el punto medio de esta. Este sensor mide la deformación de la viga en su punto medio, a medida que se va aumentando la carga hasta la medida establecida. Una vez realizada dicha medición, la maquina universal deja de ejercer presión y procedemos a retirar el extensómetro.



Figura 33. Momento que finaliza la presión y en el cual retiramos el extensómetro

El software ofrece los resultados de la deformación de la probeta, la carga total aplicada sobre esta, así como una gráfica tensión-deformación.

La expresión que permite calcular el MOEG en N/mm², es la siguiente:

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

En donde:

a: Distancia entre un punto de carga y el apoyo más próximo en mm.

b: Anchura de la sección transversal en el ensayo a flexión en mm.

h: Altura de la sección en mm.

F₂-F₁: Incremento de carga sobre la línea de regresión en N con un coeficiente de correlación de 0,99 o mejor.

W₂-W₁: Incremento de deformación correspondiente a F₂-F₁ en mm.

Si no se conoce G se puede tomar como infinito.

4.3.9.2 Determinación de la resistencia a la flexión estática (MOR).

Para la determinación del módulo de rotura de las vigas, se ha de calibrar la máquina antes de comenzar el ensayo, teniendo en cuenta las dimensiones de las probetas y que el canto de las piezas a ensayar, determina la velocidad de presión que va a actuar sobre ellas, atendiendo a lo establecido en la norma UNE-EN-408. Por último, se han de colocar las vigas horizontalmente sobre los apoyos, para minimizar los posibles errores.

La resistencia a la flexión estática, se calcula después de la realización del primer ensayo a flexión para el cálculo del MOEG y al obtenerse mediante un tipo de ensayo destructivo, la conocemos después de la rotura de la pieza a ensayar.

Mediante el software empleado, podemos obtener la tensión soportada por cada probeta en el momento inmediatamente anterior a la rotura (MPa ó N/mm²), su deformación (mm), la carga máxima aplicada sobre ella (kN) y el tiempo de duración del ensayo (s), que debe estar dentro de una duración de 5±2 minutos, según la norma UNE-EN-408.



Figura 34. Momento final del ensayo, rotura de la probeta

La expresión que permite el cálculo de la Resistencia a la Flexión Estática o MOR (N/mm²), es la siguiente:

$$MOR = \frac{(a \cdot F_{\max})}{(2 \cdot W)}$$

En donde:

MOR: Resistencia a Flexión Estática (N/mm²).

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

Fmax: Carga máxima (N).

W: Módulo resistente de la sección (mm³).



Figura 35. Detalle de probetas rotas después del ensayo

Realizados todos los ensayos de rotura y con los datos obtenidos de la maquina universal Ibertest®, calculamos el MOE según la norma UNE-384, a partir del MOEG, mediante la expresión:

$$\text{MOE UNE-384} = (1,3 * \text{MOEG}) - 2.690$$

4.4 Tratamiento estadístico de los resultados obtenidos.

Después de obtener los resultados necesarios para este estudio, mediante la realización de las diferentes clasificaciones, de los diferentes ensayos y tras realizar los cálculos oportunos, para obtener otros datos de interés, los introduciremos en una tabla de Microsoft Excel y posteriormente pasamos a su tratamiento estadístico, mediante el software StatGraphics Centurion XV.

En este apartado también utilizamos los resultados obtenidos en un estudio anterior, realizado sobre vigas macizas de *Pinus pinaster* Ait. (región de procedencia Meseta Castellana).

Se realizan análisis descriptivos de cada una de las variables de interés, calculando coeficientes de variación, valores medios, etc..

Para el análisis comparativo entre variables, pertenecientes al grupo de vigas trío y al de vigas macizas, se analizará inicialmente la normalidad de nuestras poblaciones, y se asumirá atendiendo a los valores de sesgo y curtosis estandarizados, al gráfico de probabilidad normal y al test de normalidad de Shapiro-Wilk. Estos análisis se recogerán en los anejos.

En el análisis predictivos, se realizan regresiones lineales entre las diferentes variables objeto de estudio, obteniendo las funciones que las relacionan.

Finalmente comprobamos los resultados obtenidos, dependiendo las distintas variables analizadas, estudiamos correlaciones entre diferentes variables y también estudiamos las varianzas para comprobar la existencia de diferencias estadísticas significativas.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

5.1 Estadística descriptiva.

La estadística descriptiva se puede considerar como la primera etapa a desarrollar en un análisis de información. En este apartado se obtienen y se reflejarán de manera breve, mediante tablas y gráficos, algunos de los estadísticos más importantes que podemos calcular para nuestras muestras de vigas trío reforzadas y de vigas macizas. Podemos analizar y representar de forma resumida los datos de las diferentes variables que afectan a las dos poblaciones de vigas, con el fin de describir las diversas características que presenten cada una de ellas.

5.1.1 Análisis descriptivo de la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas en las probetas iniciales.

Tabla 6. Velocidades en probetas de diferentes grupos

Variables	Velocidades de ondas ultrasónicas		
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Nº de datos	45	45	45
Media	5175,16	4703,78	4164,73
Coefficiente de Variación	4,46%	2,48%	5,74%
Mínimo	4870	4499	3661
Máximo	5721	4870	4485
Rango	851	371	824

En la tabla anterior podemos observar que la media de la velocidad de las ondas ultrasónicas, como era de esperar, va disminuyendo según el grupo al que pertenecen las probetas. En el grupo 1 se incluyen las probetas con mayor velocidad de ondas ultrasónicas y por lo tanto de mayor calidad y en el grupo 3 las probetas con menor velocidad de ondas ultrasónicas y de menor calidad. Los coeficientes de variación obtenidos son muy bajos, por lo que la variabilidad intergrupos es baja.

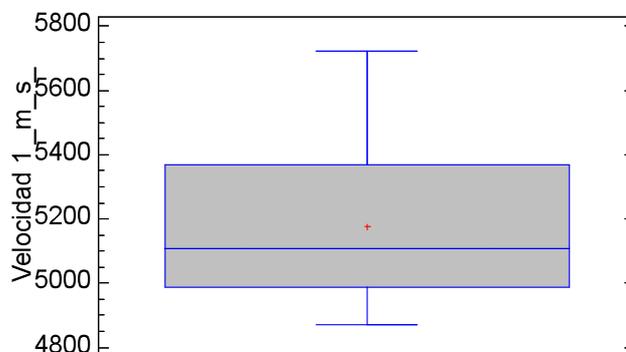


Figura 36. Gráfico de caja y bigotes para probetas de grupo 1

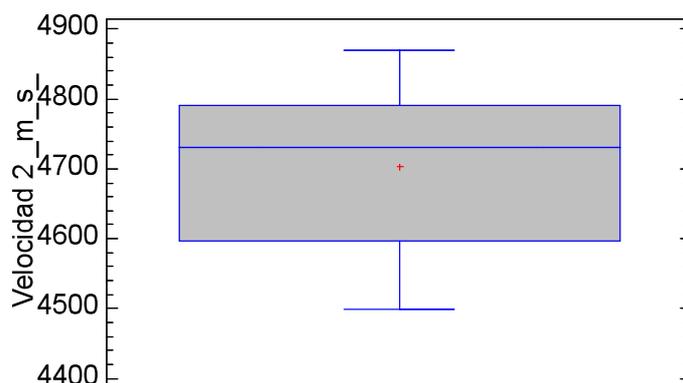


Figura 37. Gráfico de caja y bigotes para probetas de grupo 2

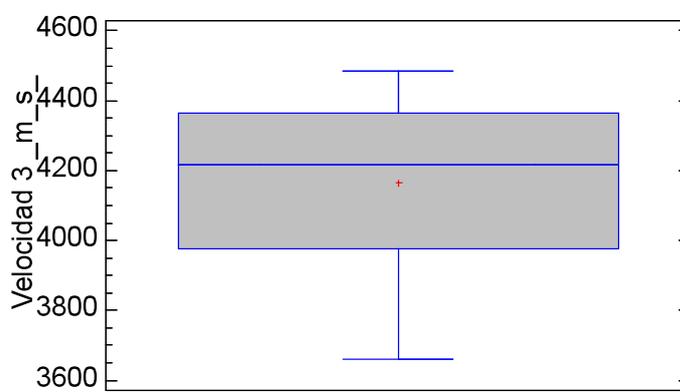


Figura 38. Gráfico de caja y bigotes para probetas de grupo 3

5.1.2 Análisis descriptivo de la clasificación según la norma UNE 56544 de las probetas iniciales.

Tabla 7. Clasificación según norma UNE 56544 de las probetas de los diferentes grupos.

Clasificación según norma	Frecuencia		
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
ME1	18	17	6
ME2	3	2	6
Rechazo	24	26	33

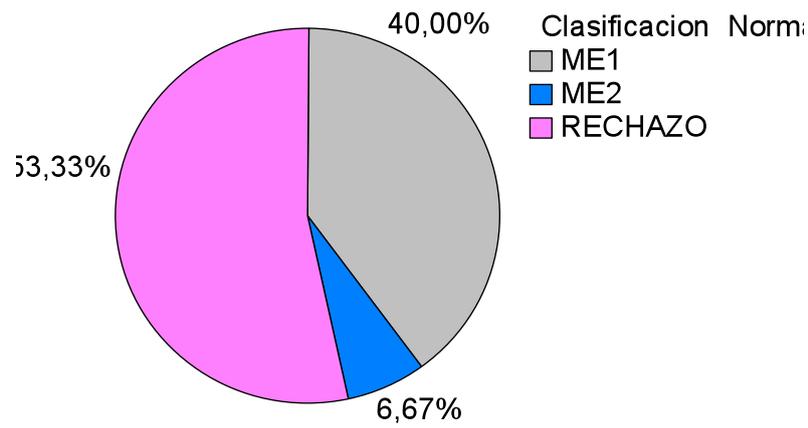


Figura 39. Gráfico sectores según la clasificación UNE 56544 para probetas de Grupo 1

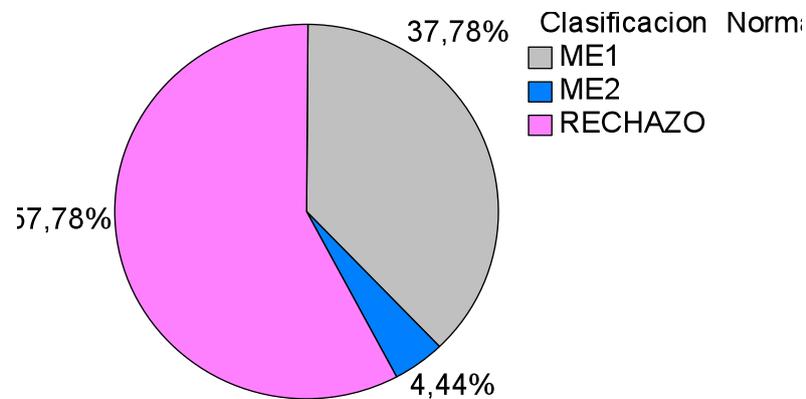


Figura 40. Gráfico sectores según la clasificación UNE 56544 para probetas de Grupo 2

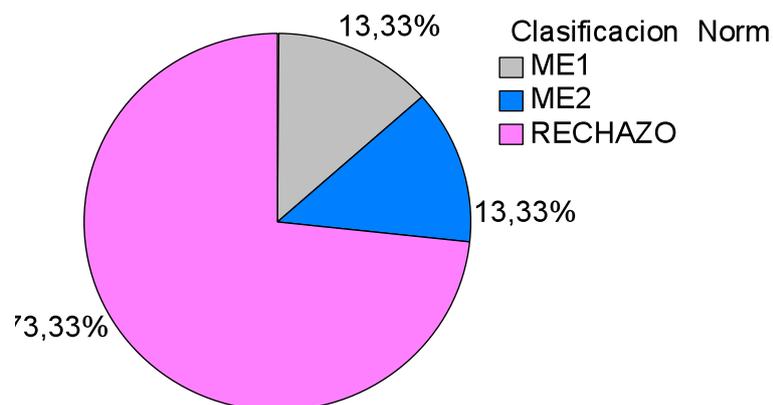


Figura 41. Gráfico sectores según la clasificación UNE 56544 para probetas de Grupo 3

5.1.3 Análisis descriptivo del nº total de nudos de las probetas iniciales.

Tabla 8. Nº total de nudos en probetas de diferentes grupos

Variables	Nº total de nudos en probetas		
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Nº de datos	45	45	45
Media	1,04444	1,33333	2,06667
Coefficiente de Variación	91,19%	97,26%	58,72%
Mínimo	0	0	0
Máximo	3	5	5
Rango	3	5	5

Tabla 9. Frecuencias de nº de nudos en probetas de diferentes grupos

Nº nudos	Frecuencia		
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
0	16	16	5
1	14	8	10
2	12	15	12
3	3	4	14
4	0	0	3
5	0	2	1

En las tablas anteriores podemos comprobar, como el número medio de nudos disminuye a medida que aumenta la calidad de las probetas, perteneciendo la menor media al grupo 1 que es el de mayor calidad. Vemos como dentro de los grupos 1 y 2, existen muy pocas probetas que tengan más de 2 nudos y como existen muy pocas probetas dentro del grupo 3 que no tengan ningún nudo. También podemos observar unos coeficientes de variación altos dentro de los tres grupos, presentando valores por encima del 90% los grupos 1 y 2.

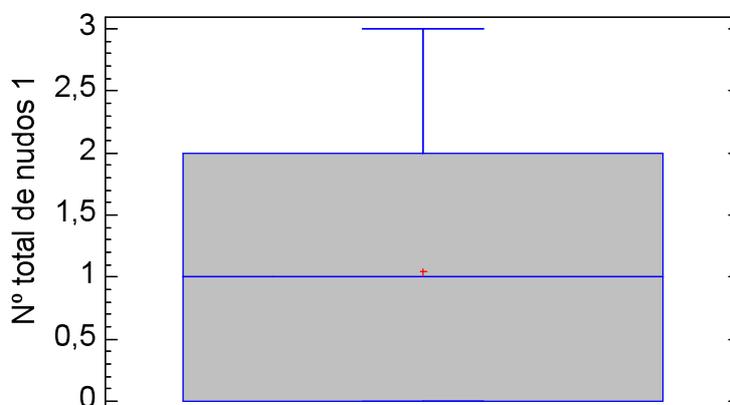


Figura 42. Gráfico de caja y bigotes para nº total de nudos en probetas del grupo 1

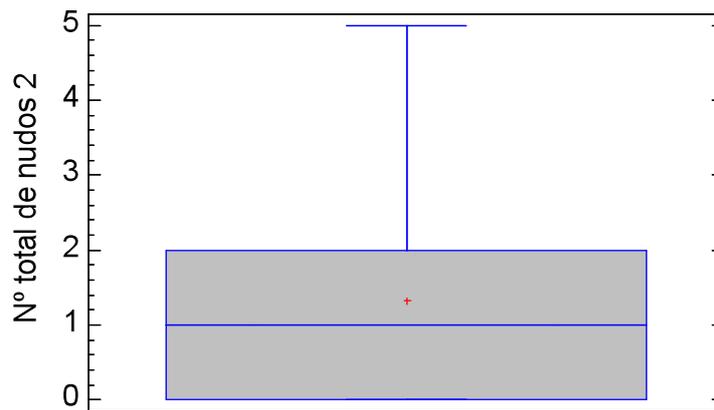


Figura 43. Gráfico de caja y bigotes para nº total de nudos en probetas del grupo 2

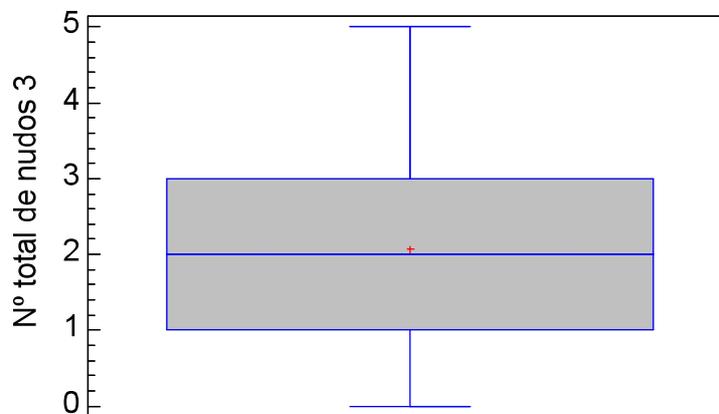


Figura 44. Gráfico de caja y bigotes para nº total de nudos en probetas del grupo 3

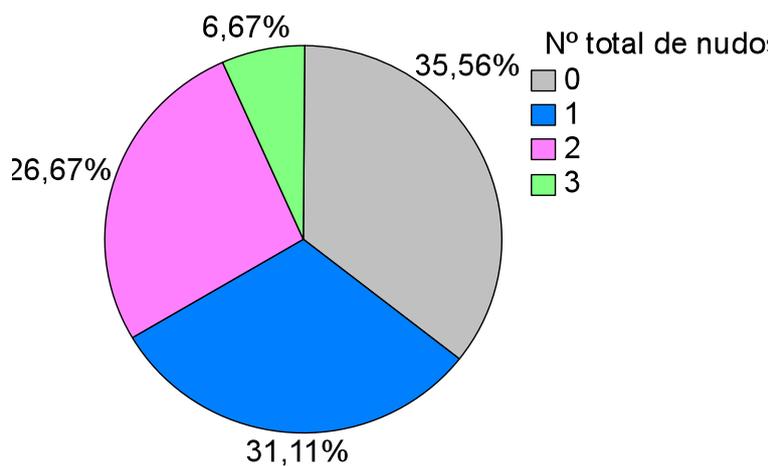


Figura 45. Gráfico sectores para frecuencia de nº de nudos en probetas de del grupo 1

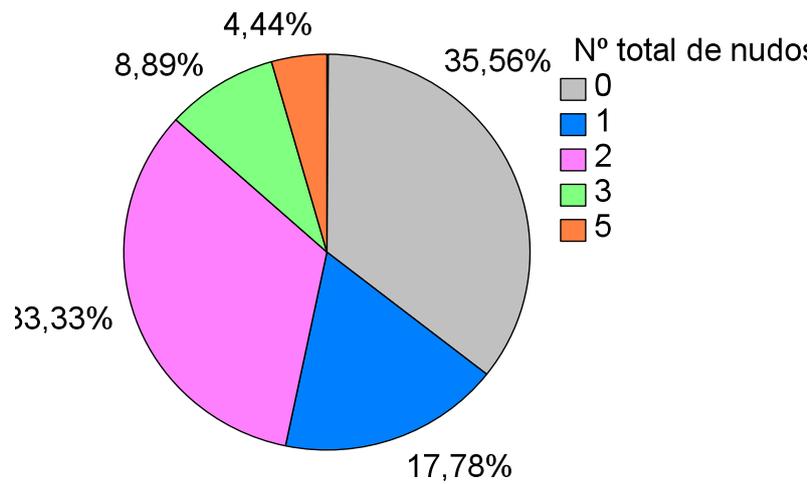


Figura 46. Gráfico sectores para frecuencia de nº de nudos en probetas de del grupo 2

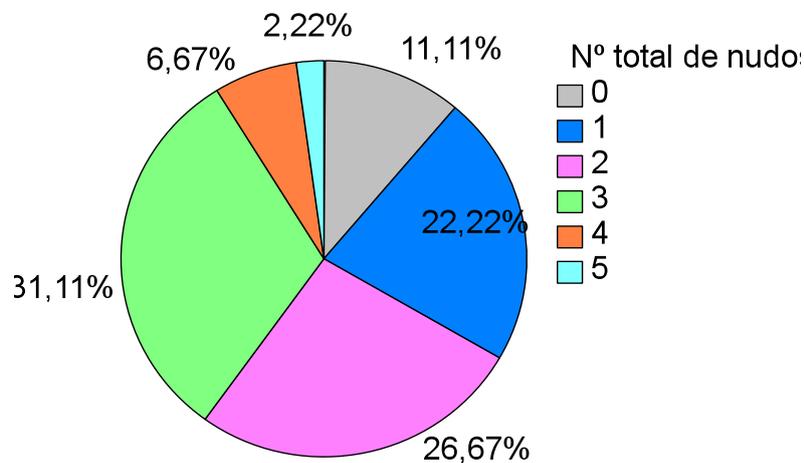


Figura 47. Gráfico sectores para frecuencia de nº de nudos en probetas de del grupo 3

5.1.4 Análisis descriptivo de la rectitud de las probetas iniciales.

Tabla 10. Nivel de rectitud de probetas pertenecientes a los diferentes grupos

Nivel rectitud	Frecuencia		
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
0	0	0	0
1	1	1	5
2	0	4	4
3	2	7	10
4	18	20	16
5	24	13	10

En la tabla anterior podemos observar, como la mayoría de las probetas están por encima del nivel 3 de rectitud, que las probetas de máxima rectitud (nivel 5)

pertencen en mayor medida a grupo 1, que para los niveles de rectitud 3 y 4 las proporciones de probetas pertenecientes a los grupos 1 y 2 son similares y que la mayor parte de las probetas pertenecientes al grupo 3 presentan un nivel de rectitud aceptable.

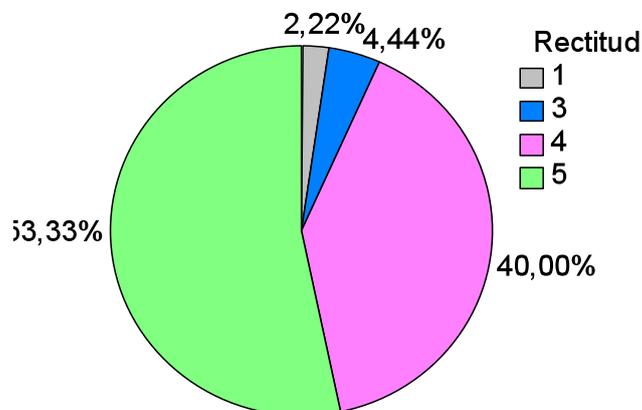


Figura 48. Gráfico sectores para el nivel de rectitud en probetas de grupo 1

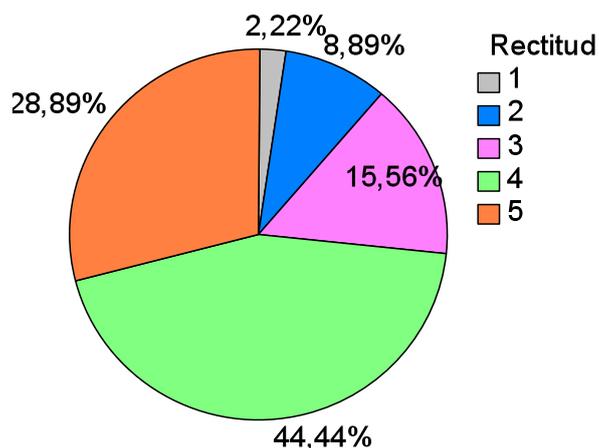


Figura 49. Gráfico sectores para el nivel de rectitud en probetas de grupo 2

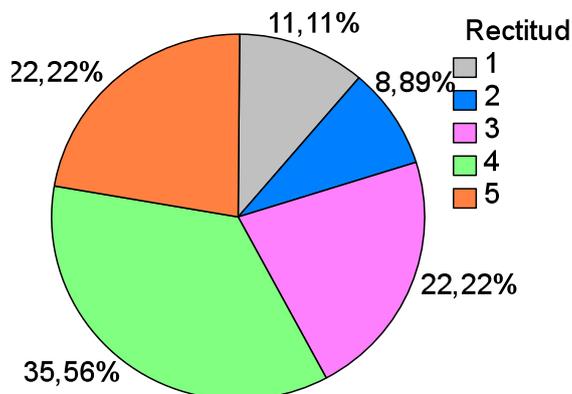


Figura 50. Gráfico sectores para el nivel de rectitud en probetas de grupo 3

5.1.5 Análisis descriptivo del nivel de azulado de las probetas iniciales.

Tabla 11. Nivel de azulado de las probetas pertenecientes a los diferentes grupos

Nivel de azulado	Frecuencia		
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
0	2	3	16
1	9	5	15
2	6	5	5
3	4	7	2
4	12	11	4
5	12	14	3

En la tabla anterior podemos observar como en el grupo 3, el de menor calidad, existen un gran número de probetas que no presentan azulado o que presentan un nivel muy bajo de este, por el contrario comprobamos como los grupos de mayor calidad, el grupo 1 y el grupo 2, presentan una gran proporción de probetas con niveles altos de azulado.

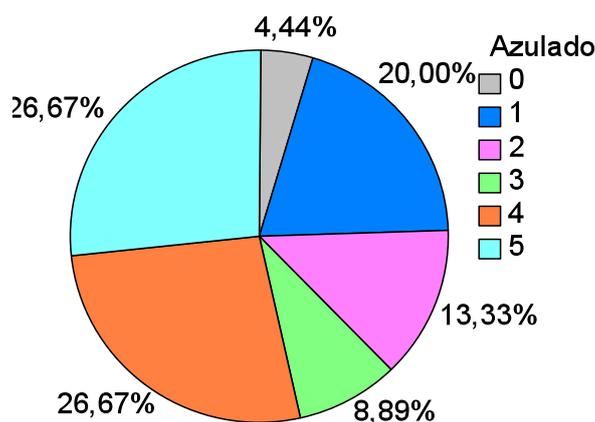


Figura 51. Gráfico sectores para el nivel de azulado en probetas del grupo 1

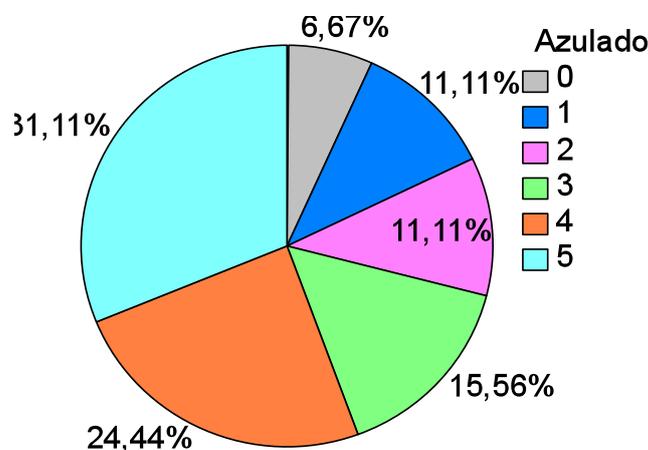


Figura 52. Gráfico sectores para el nivel de azulado en probetas del grupo 2

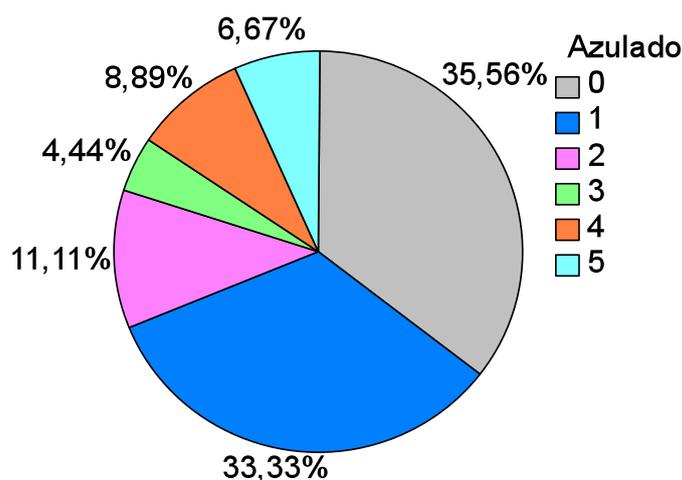


Figura 53. Gráfico sectores para el nivel de azulado en probetas del grupo 3

5.1.6 Análisis descriptivo de la intensidad del azulado de las probetas iniciales.

Tabla 12. Nivel de intensidad de azulado de las probetas pertenecientes a los diferentes grupos

Intensidad de azulado	Frecuencia		
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
0	2	3	16
1	4	0	5
2	23	19	16
3	16	23	8

En la tabla anterior, observamos que el grupo que presenta intensidades de azulado menores es el grupo 3, el de probetas de menor calidad, y que los grupos 1 y 2, el de mayor calidad y el de calidad intermedia respectivamente, presentan similitudes en cuanto a proporción de probetas con intensidad alta de azulado, valores de 2 y 3.

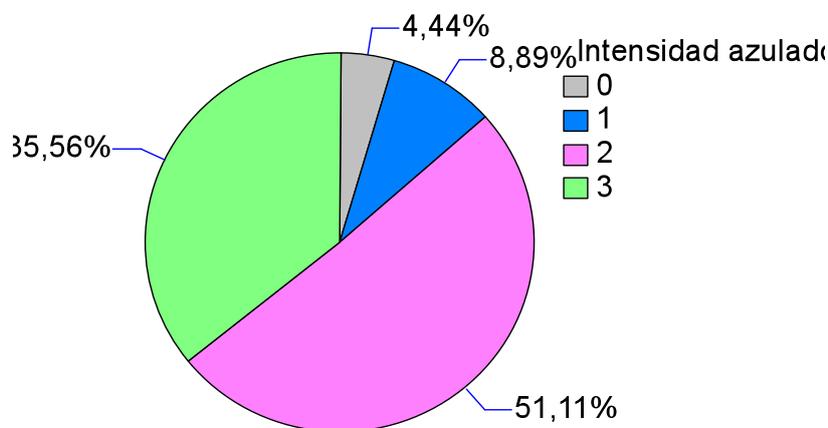


Figura 54. Gráfico de sectores para el nivel de intensidad de azulado en del grupo 1

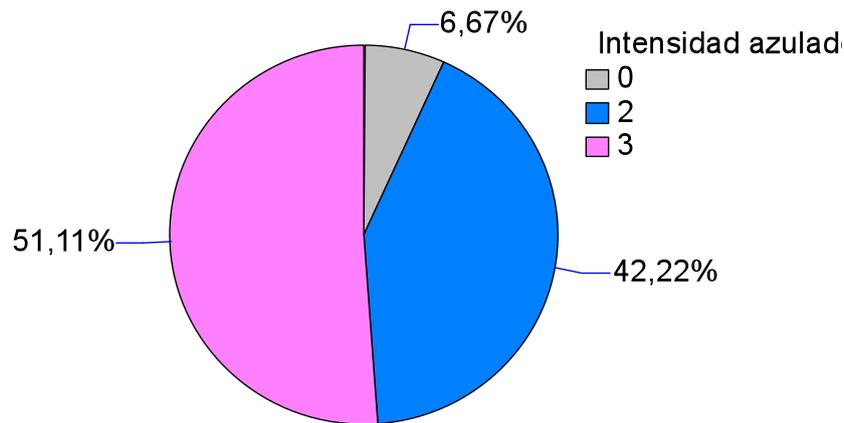


Figura 55. Gráfico de sectores para el nivel de intensidad de azulado en del grupo 2

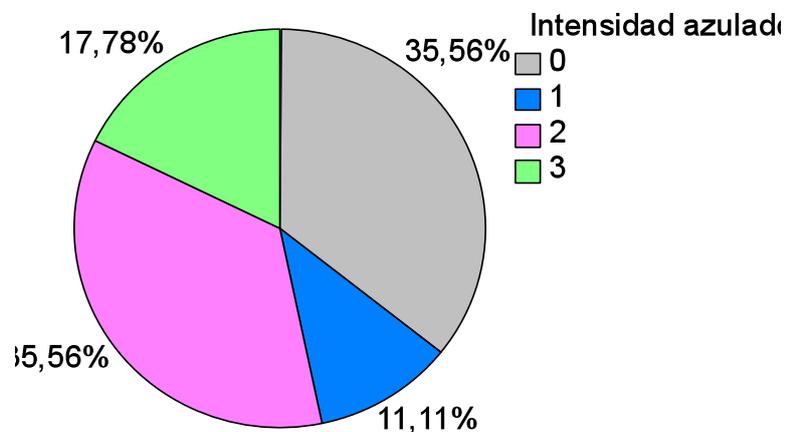


Figura 56. Gráfico de sectores para el nivel de intensidad de azulado en del grupo 3

5.1.7 Análisis descriptivo del porcentaje del ϕ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de las probetas iniciales.

Tabla 13 Porcentaje del ϕ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de las probetas iniciales

Variables	% del ϕ max de nudo de cara en el 1/3 central de la probeta		
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
Nº de datos	45	45	45
Media	17,4804	11,8509	26,4424
Coeficiente de Variación	146,67%	200,44%	106,65%
Mínimo	0	0	0
Máximo	75	100	100
Rango	75	100	100

A la vista de los resultados obtenidos, en cuanto a los valores medios del % de nudo máximo existente, se aprecia una media más elevada en las probetas del el grupo 3 que en las otras 2 categorías clasificatorias, igualmente se puede destacar que la variabilidad encontrada en los 3 grupos es muy elevada.

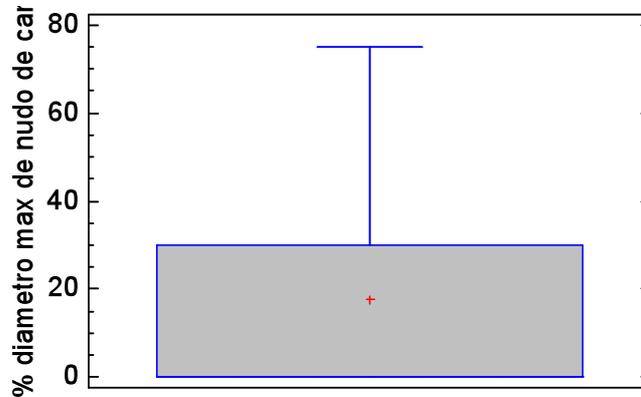


Figura 57. Gráfico de caja y bigotes del % del \square máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de las probetas del grupo 1

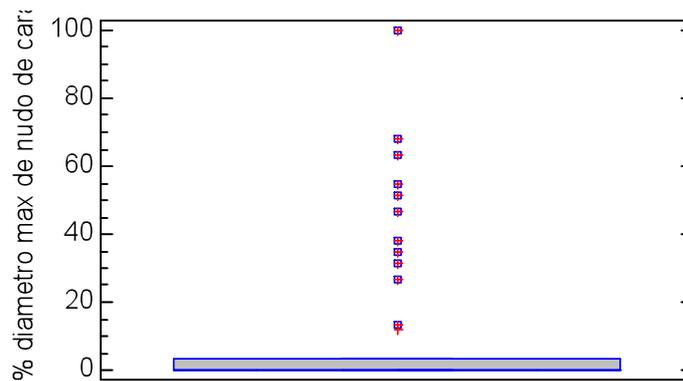


Figura 58. Gráfico de caja y bigotes del % del \square máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de las probetas del grupo 2

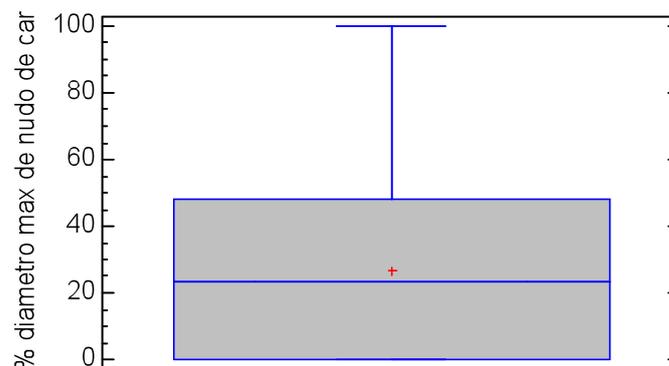


Figura 59. Gráfico de caja y bigotes del % del \square máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de las probetas del grupo 3

5.1.8 Análisis descriptivo del MOR, MOE y de la densidad en vigas macizas.

Tabla 14. MOR, MOE y densidad en vigas macizas

Variables	Vigas macizas		
	MOR	MOE	Densidad
Nº de datos	49	49	49
Media	38,4451	8279,86	570,48
Coefficiente de Variación	52,61%	47,38%	14,45%
Mínimo	10,138	2697,72	418,06
5º percentil	11,921	(3676,73)	437,14
Máximo	98,168	17059,3	749,51
Rango	88,03	14361,6	331,45

En la tabla anterior, a simple vista, se observa que los valores medios obtenidos son los habituales para la madera aserrada de esta especie y que los coeficientes de variación son altos, como cabe esperar por la variabilidad natural de la madera.

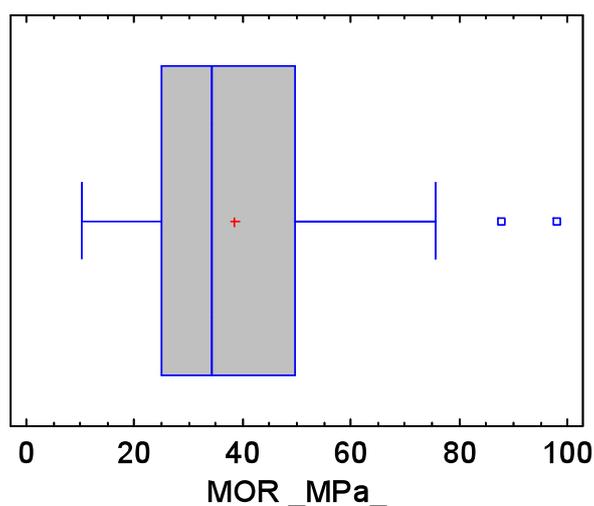


Figura 60. Gráfico de caja y bigotes del MOR para vigas macizas

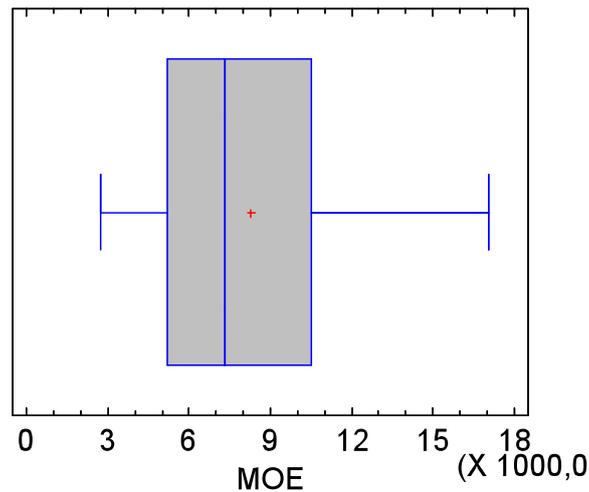


Figura 61. Gráfico de caja y bigotes del MOE para vigas macizas

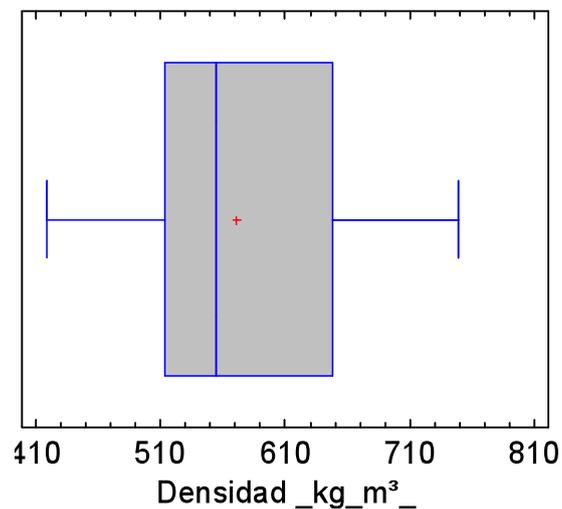


Figura 62. Gráfico de caja y bigotes para la densidad en vigas macizas

5.1.9 Análisis descriptivo del MOR, MOE y de la densidad en vigas trío.

Tabla 15. MOR, MOE y densidad en vigas trío

Variables	Vigas trío		
	MOR	MOE	Densidad
Nº de datos	45	45	45
Media	46,5739	7927,85	558,34
Coefficiente de Variación	16,01%	19,05%	6,18%
5º percentil	34,719	(5983,08)	506,881
Mínimo	29,019	4958,29	491,587
Máximo	62,228	10651,9	649,269
Rango	33,209	5693,61	157,682

Los resultados de los valores medios de MOR, MOE y densidad están dentro de los valores habituales encontrados en esta especie, siendo los coeficientes de variación significativamente pequeños respecto a los que se encuentran en lotes similares de madera maciza. Como los valores característicos del MOR y la densidad se corresponden con el valor del 5º percentil de la población, se observa que en el caso de las vigas trío este valor característico (34,719) es muy superior al que se consigue en las vigas macizas (11,921).

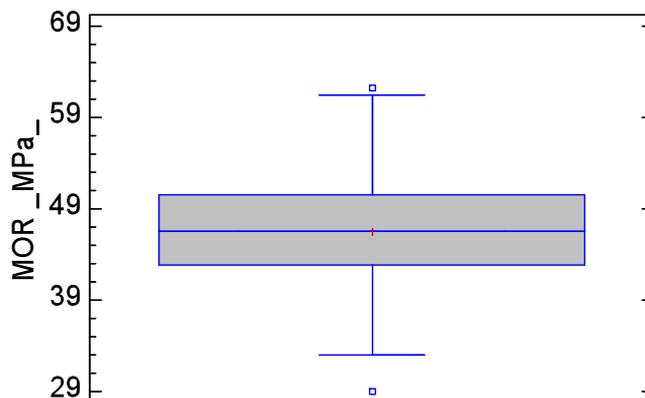


Figura 63. Gráfico de caja y bigotes del MOR para vigas trío

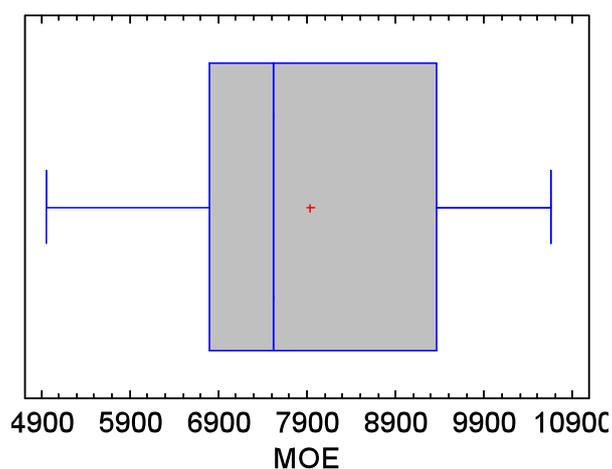


Figura 64. Gráfico de caja y bigotes del MOE para vigas trío

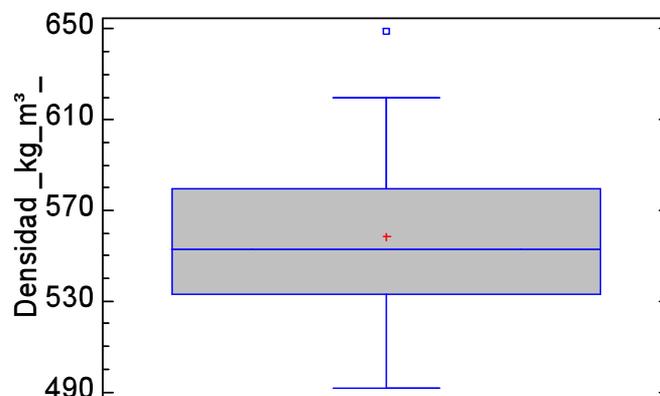


Figura 65. Gráfico de caja y bigotes para la densidad en vigas trío

5.1.10 Asignación de clases resistentes.

Para la asignación de clases resistentes al conjunto de las vigas macizas y al de las vigas trío reforzadas con fibra de vidrio, obtenidas para la realización de este estudio, atendemos a los valores característicos de las propiedades de resistencia a flexión (MOR), propiedades de rigidez (MOE) y densidad.

Los valores característicos de estas tres variables coinciden con el valor del 5º percentil en el caso del MOR y la densidad y con el valor medio en el caso del MOE, como nos indica la norma UNE EN 338 (2003), ver antecedentes 2.2.2.

A continuación se muestra una tabla, donde se pueden observar los valores característicos y los valores medios para el MOR, MOE y densidad, que presentan las vigas macizas y las vigas trío. Los dos primeros se encuentran expresados en MPa, mientras que la densidad se refleja en Kg/ m³.

Tabla 16. Valores característicos y medios para MOR, MOE y densidad en vigas macizas y vigas trío

	Vigas macizas			Vigas trío		
	MOR	MOE	Densidad	MOR	MOE	Densidad
Valor característico	11,921	8279,86	437,14	34,719	7927,85	506,881
Media	38,445	8279,86	570,48	46,574	7927,85	558,34

En el caso de las vigas macizas, observando la tabla 16 y el valor de MOR (11,921 MPa), podemos comprobar que no está dentro de los valores característicos pertenecientes a la resistencia por flexión, por lo tanto no tiene clasificación resistente. Por lo tanto, las vigas macizas analizadas, se consideran como una partida de madera no estructural.

En el caso de las vigas trío reforzadas con tiras de fibra de vidrio, observando en primer lugar en el valor de MOR (34,719 MPa) podríamos asignarles una clase resistente de C-30. En segundo lugar comprobamos el valor de MOE (7927,87 MPa), que lo podemos considerar como 8000 MPa, y le asignamos una clase resistente de C-16. Por último comprobamos el valor de la densidad (506,881 Kg/m³) y le asignamos una clase resistente de C-50. Como nos tenemos que ajustar a la exigencia más restrictiva, podemos afirmar que las vigas trío serán un población de madera estructural C-16.

5.2 Estadística comparativa.

Se realizan comparaciones entre variables pertenecientes a las poblaciones de vigas trío reforzadas y vigas macizas. Se realizan análisis de varianza por comparación de medias, utilizados para contrastar diferencias entre las poblaciones, en torno a sus medias y varianzas. Estos análisis se utilizan para comparar si los valores de un conjunto de datos numéricos son significativamente diferentes, a los valores de otro o más conjunto de datos.

5.2.1 Comparación del valor de la densidad entre las poblaciones de vigas trío y de vigas macizas.

Tabla 17. Comparación de la densidad entre poblaciones de vigas trío y macizas

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-f	P-Valor
Entre grupos	3456,99	1	3456,99	0,84	0,3616
Intra grupos	378361	92	4112,62		
Total (Corr.)	381818	93			

En la tabla anterior, observando el p-valor que hemos obtenido (0,3616), podemos afirmar que no existen diferencias significativas entre las dos poblaciones estudiadas, ya que el resultados es muy superior a 0,05.

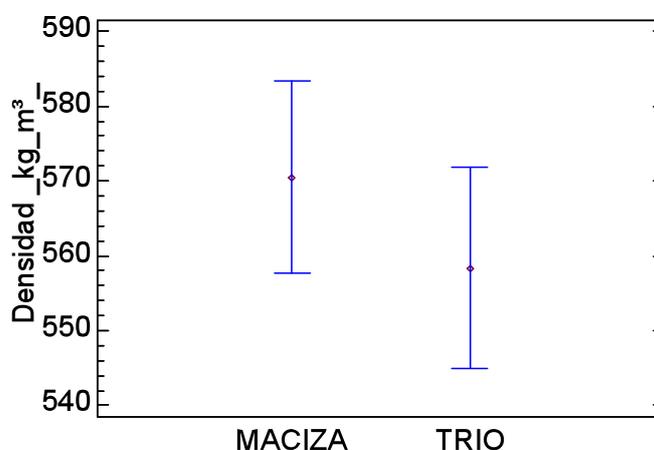


Figura 66. Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para comparar las densidades de las poblaciones de vigas trío y vigas macizas

Estos intervalos se construyen de tal manera que uno puede escoger un solo par de muestras y declarar que sus medias son significativamente diferentes si los intervalos no se solapan en dirección vertical.

5.2.2 Comparación de MOR entre las poblaciones de vigas trío y de vigas macizas.

Tabla 18 Comparación de MOR entre poblaciones de vigas trío y macizas.

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	P-Valor
Entre grupos	1549,99	1	1549,99	6,46	0,0127
Intra grupos	22083	92	240,032		
Total (Corr.)	23633	93			

En la tabla anterior, observando el p-valor que hemos obtenido (0,0127), podemos afirmar que existen diferencias estadísticas significativas entre el MOR de las dos poblaciones estudiadas, ya que el resultados es inferior a 0,05.

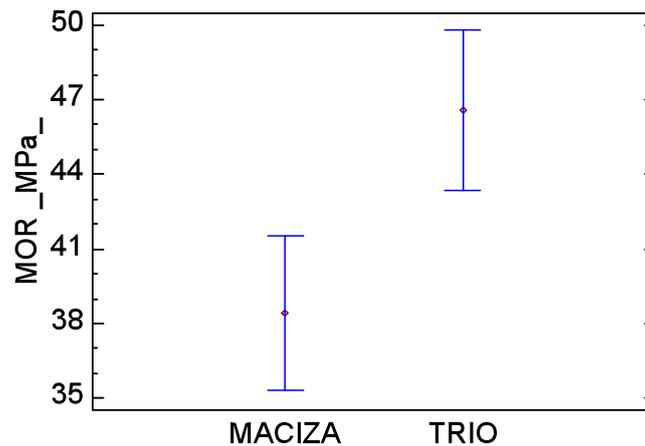


Figura 67. Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para comparar el MOR de las poblaciones de vigas trío y vigas macizas

5.2.3 Comparación de MOE entre las poblaciones de vigas trío y de vigas macizas.

Tabla 19. Comparación de MOE entre poblaciones de vigas trío y macizas

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	P-Valor
Entre grupos	2,91E+06	1	2,91E+06	0,32	0,5738
Intra grupos	8,39E+08	92	9,12E+06		
Total (Corr.)	8,42E+08	93			

En la tabla anterior, observando el p-valor que hemos obtenido (0,5738), podemos afirmar que no existen diferencias estadísticas significativas entre el MOE de las dos poblaciones estudiadas, ya que el resultados es muy superior a 0,05.

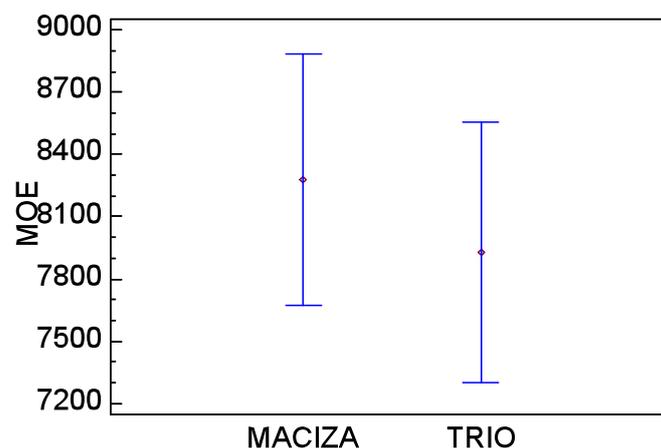


Figura 68. Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD para comparar el MOE de las poblaciones de vigas trío y vigas macizas

5.3 Estadística predictiva.

5.3.1 Introducción.

En este apartado se realizan regresiones lineales, que relacionan diferentes variables y obtenemos las funciones que las relacionan.

Dado un conjunto de datos, con una variable de respuesta y una o más variables conocidas, el objetivo del análisis de regresión es construir un modelo que:

1. Describa las relaciones existentes entre las variables, de tal forma que permita que Y sea bien predicha, dados los valores conocidos de las X.

2. No contenga más variables X que las necesarias para generar una buena predicción.

Analizamos la causa-efecto que existe entre una variable dependiente y otra o más variables independientes, ajustando sus ecuaciones por mínimos cuadrados. Se establece una relación que podemos cuantificar numéricamente.

Las funciones más válidas, son las que describen una variable dependiente con la menor diferencia entre los valores observados y los predichos.

5.3.2 Análisis de correlaciones.

5.3.2.1 Análisis de correlaciones de las variables existentes en vigas trío.

A continuación se presenta en la tabla 20, las correlaciones existentes entre MOR y MOE y todas las demás variables medidas en este estudio, que puedan presentar relación estadística significativa con cualquiera de las dos primeras, que son las que verdaderamente me interesan.

Tabla 20. Correlaciones en vigas trío

Var		MOR	MOE	Densidad	Veloc.1	Veloc.2	Veloc.3
MOR	C. correlación		0,4952	0,0728	0,4002	0,3794	0,0338
	Nº datos		45	45	45	45	45
	P-valor		0,0005	0,6345	0,0065	0,0102	0,8255
MOE	C. correlación	0,4952		0,6016	0,5765	0,2839	0,0993
	Nº datos	-45		45	45	45	45
	P-valor	0,0005		0	0	0,0587	0,5162

Tabla 20. Continuación

Var		% ϕ max nudo cara 1	% ϕ max nudo cara 1	% ϕ max nudo cara 1
MOR	C.correlación	-0,108	0,0206	-0,3509
	Nº datos	45	45	45
	P-valor	0,4802	0,8932	0,0181
MOE	C.correlación	0,0575	0,2136	-0,0646
	Nº datos	45	45	45
	P-valor	0,7075	0,1589	0,6733

Tabla 20. Continuación

Var		Azulado 1	Azulado 2	Azulado 3	Intens. 1	Intens. 2	Intens. 3
MOR	C. correlación	0,2481	-0,1087	0,1841	0,0171	-0,0291	0,0283
	Nº datos	45	45	45	45	45	45
	P-valor	0,1003	0,4773	0,2259	0,9111	0,8494	0,8535
MOE	C. correlación	0,2316	-0,2057	0,0478	0,2088	-0,0797	-0,0953
	Nº datos	45	45	45	45	45	45
	P-valor	0,1258	0,1751	0,755	0,1686	0,6027	0,5337

Tabla 20. Continuación

Var		Rect. 1	Rect. 2	Rect. 3	Nudos. T 1	Nudos. T 2	Nudos. T 3
MOR	C. correlación	0,2996	-0,1516	0,2321	0,0316	-0,0864	-0,2481
	Nº datos	45	45	45	45	45	45
	P-valor	0,0456	0,3203	0,1249	0,837	0,5726	0,1003
MOE	C. correlación	0,2783	-0,0847	0,2172	0,1737	0,0993	0,0259
	Nº datos	45	45	45	45	45	45
	P-valor	0,0641	0,58	0,1517	0,2537	0,5162	0,866

Como podemos observar en la tabla 20 de correlaciones, para el MOR, las variables que presentan un p-valor < 0,05 y por lo tanto interesante, ya que nos indica que presentan una relación estadística significativa, son las velocidades de onda ultrasónica de las probetas de los grupos 1 y 2, la rectitud de las probetas pertenecientes al grupo 1 y el porcentaje del diámetro máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de las probetas del grupo 1.

Para el MOE, las variables que presentan un p-valor < 0,05 y por lo tanto interesante, ya que nos indica que presentan una relación estadística significativa son las velocidades de onda ultrasónica de las probetas de los grupos 1 y 2 y la densidad de las vigas trío obtenidas.

5.3.3 Regresiones lineales simples.

Sólo se maneja una variable independiente, por lo que sólo cuenta con dos parámetros.

5.3.3.1 Regresión simple que describe la relación entre MOR y la densidad de la población de vigas macizas.

Realizaremos un análisis de varianzas, para describir la relación entre MOR y la densidad de la población de vigas macizas.

Tabla 21. Análisis de varianza del modelo MOR vs densidad en vigas macizas

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-Valor
Modelo	2540,91	1	2540,91	6,99	0,0111
Residuo	17095,9	47	363,742		
Total (Corr.)	19636,8	48			

Tabla 22. Principales valores estadísticos del modelo MOR vs densidad en vigas macizas

Coefficiente de Correlación	0,359716
R-cuadrado (ajustado para g.l.)	11,09%

En la tabla 21 podemos observar un p-valor de 0,0111, menor que 0,05, con lo que podemos afirmar que existe una relación estadística significativa entre las variables MOR y densidad de las vigas macizas, con un nivel de confianza del 95%.

Comprobamos de la misma manera en la tabla 22, que el coeficiente de correlación tiene un valor de 0,3597, cercano al 0, que nos indica poca correlación entre las dos variables estudiadas.

El valor del R-cuadrado es de 11,09%, un valor relativamente pequeño, que nos indica que el modelo ajustado no explica en demasía la variabilidad del MOR (solo el 11,09%).

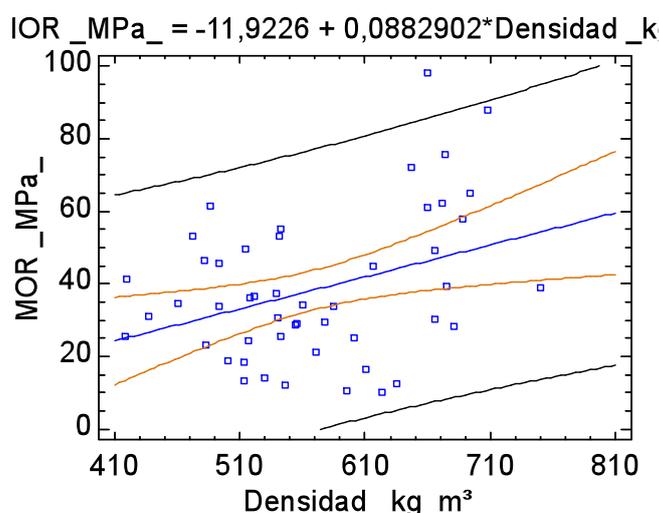


Figura 69. Gráfico del modelo ajustado para MOR vs densidad en vigas macizas

El gráfico muestra la línea de regresión de mínimos cuadrados y dos grupos de límites. Los límites internos proveen intervalos de confianza del 95% para el valor de la media de MOR en cualquier densidad seleccionada. Esto indica que tan bien ha sido estimada la posición de la línea, dado que la relación es lineal. Cuanto más grande sea la muestra, más estrechos serán los límites. Las líneas externas son los límites de predicción del 95% para las nuevas observaciones. Se estima que el 95% de las observaciones adicionales, similares a las de la muestra, caerán dentro de esos límites.

5.3.3.2 Regresión simple que describe la relación entre MOR y la densidad de la población de vigas trío.

Realizaremos un análisis de varianzas, para describir la relación entre MOR y la densidad de la población de vigas trío.

Tabla 23. Análisis de varianza del modelo MOR vs densidad en vigas trío

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	P-Valor
Modelo	1,30E+01	1	1,30E+01	0,23	0,6345
Residuo	2,43E+03	43	5,66E+01		
Total (Corr.)	2,45E+03	44			

Tabla 24. Principales valores estadísticos del modelo MOR vs densidad en vigas trío

Coefficiente de correlación	0,0728325
R-cuadrado (ajustado para g.l.)	-1,78%

En la tabla 23 podemos observar un p-valor de 0,6345, con lo que podemos afirmar, que no hay una relación estadística significativa entre las variables MOR y densidad, siendo esta última de escasa utilidad para predecir la primera.

$$R_MPa_ = 37,7877 + 0,0157362 * Densidad_kg$$

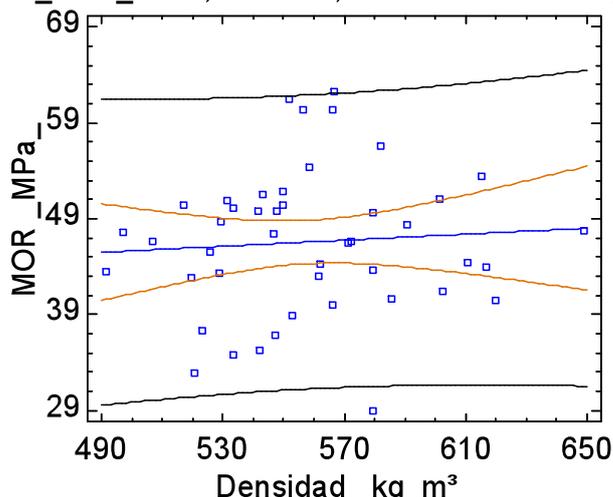


Figura 70. Gráfico del modelo ajustado para MOR vs densidad en vigas trío

5.3.3.3 Regresión simple que describe la relación entre MOE y la densidad de la población de vigas macizas.

Realizamos un análisis de varianzas, para describir la relación entre MOE y la densidad de la población de vigas macizas.

Tabla 25. Análisis de varianza del modelo MOE vs densidad en vigas macizas

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-Valor
Modelo	2,40E+08	1	2,40E+08	24,63	0,0000
Residuo	4,48E+08	46	9,73E+06		
Total (Corr.)	6,87E+08	47			

Tabla 26. Principales valores estadísticos del modelo MOE vs densidad en vigas macizas

Coefficiente de Correlación	0,590506
R-cuadrado (ajustado para g.l.)	33,45%

En la tabla 25 podemos observar un p-valor de 0, menor que 0,05, con lo que podemos afirmar que existe una relación estadística significativa alta entre las variables MOE y densidad, de las vigas macizas, con un nivel de confianza del 95%, siendo esta última de mucha utilidad para predecir la primera.

Comprobamos de la misma manera, en la tabla 26, que el coeficiente de correlación tiene un valor de 0,5905, lo que nos indica relativa correlación entre las dos variables estudiadas.

El valor del R-cuadrado es de 33,45%, lo que nos indica que la densidad explica en un 33,45% el valor de MOE. Existe relativa relación entre las dos variables.

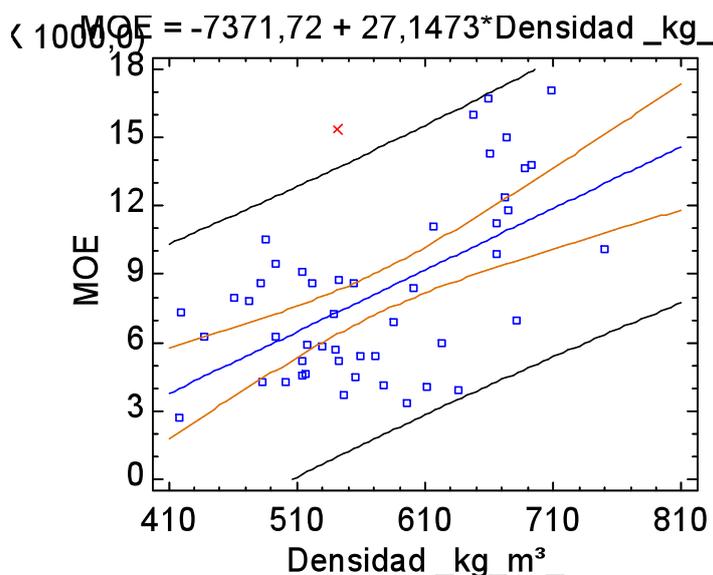


Figura 71. Gráfico del modelo ajustado para MOE vs densidad en vigas macizas

5.3.3.4 Regresión simple que describe la relación entre MOE y la densidad de la población de vigas trío.

Realizaremos un análisis de varianzas, para describir la relación entre MOE y la densidad de la población de vigas trío.

Tabla 27. Análisis de varianza del modelo MOE vs densidad en vigas trío

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-Valor
Modelo	4,35E+07	1	4,35E+07	35,6	0,0000
Residuo	5,01E+07	41	1,22E+06		
Total (Corr.)	9,37E+07	42			

Tabla 28. Principales valores estadísticos del modelo MOE vs densidad en vigas trío

Coefficiente de Correlación	0,68171
R-cuadrado (ajustado para g.l.)	45,1673%

En la tabla 27 podemos observar un p-valor de 0, menor que 0,05, con lo que podemos afirmar que existe una relación estadística significativa alta entre las variables MOE y densidad, de las vigas trío, con un nivel de confianza del 95%, siendo esta última de suficiente utilidad para predecir la primera.

Comprobamos de la misma manera en la tabla 28, que el coeficiente de correlación tiene un valor de 0,6817, lo que nos indica una correlación alta entre las dos variables estudiadas.

El valor del R-cuadrado es de 45,1673%, un valor relativamente alto, que nos indica que la densidad explica en un 45,1673% el valor de MOE, siendo el porcentaje restante explicado por otras variables o factores. Existe una buena relación entre las dos variables.

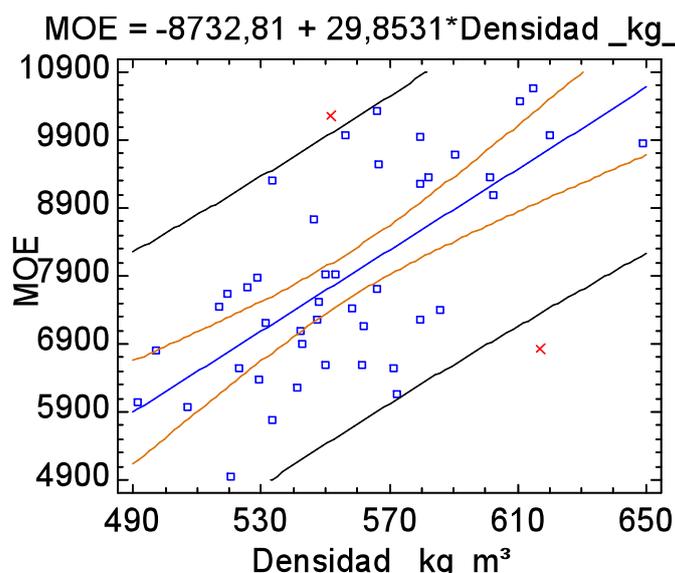


Figura 72. Gráfico del modelo ajustado para MOE vs densidad en vigas trío

5.3.4 Modelo general lineal para vigas trío.

Intentamos obtener para MOR y MOE de la muestra de vigas trío, un modelo ajustado con más precisión. Para conseguirlo, se utilizan las variables que resultaron significativas en el análisis de correlaciones.

5.3.4.1 Modelo general lineal que describe la relación entre MOR y las variables que presentan una relación estadística significativa con este.

Utilizamos 4 variables (velocidad de las ondas ultrasónicas de las probetas de los grupos 1 y 2, la rectitud de las probetas pertenecientes al grupo 1 y el porcentaje de diámetro máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de las de las probetas del grupo 3).

Tabla 29. Análisis de varianza del modelo MOR vs variables que presentan una relación estadística significativa con este

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	P-Valor
Modelo	900,34	4	225,085	5,82	0,0009
Residuo	1545,83	40	38,6458		
Total (Corr.)	2446,17	44			

En la tabla 29 podemos observar un p-valor de 0,0009, menor que 0,05, con lo que podemos afirmar que existe una relación estadística significativa entre la variable MOR y las variables utilizadas, para las vigas trío, con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 30. Suma de Cuadrados Tipo III modelo MOR vs variables que presentan una relación estadística significativa con este

Fuente	Suma Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Velocidad 1	122,599	1	122,599	3,17	0,0825
Velocidad 2	223,927	1	223,927	5,79	0,0208
% ϕ max nudo de cara 3	178,303	1	178,303	4,61	0,0378
Rectitud 1	81,3218	1	81,3218	2,1	0,1547
Residuo	1545,83	40	38,6458		
Total (corregido)	2446,17	44			

El valor estadístico obtenido de R- Cuadrado ajustado resulta ser para este modelo del 30, 4867%, lo que nos indica que estas variables explican en un 30,4867% el valor de MOR. En la tabla 30 podemos observar que de las variables utilizadas, podría ser eliminada "Rectitud 1", ya que su p-valor supera ampliamente el valor de 0,05.

5.3.4.2 Modelo general lineal que describe la relación entre MOE y las variables que presentan una relación estadística significativa con este.

Utilizaremos 3 variables (densidad de las vigas trío y velocidad de las ondas ultrasónicas de las probetas pertenecientes a los grupos 1 y 2).

Tabla 31. Análisis de varianza del modelo MOE vs variables que presentan una relación estadística significativa con este

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	P-Valor
Modelo	6,04E+07	3	2,01E+07	20,63	0,0000
Residuo	4,00E+07	41	975675		
Total (Corr.)	1,00E+08	44			

En la tabla 31 de varianzas podemos observar un p-valor de 0, menor que 0,05, con lo que podemos afirmar que existe una relación estadística significativa alta entre la variable MOE y las demás variables utilizadas para las vigas trío, con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 32. Suma de Cuadrados Tipo III modelo MOE vs variables que presentan una relación estadística significativa con este

Fuente	Suma Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	P-Valor
Densidad (kg/m ³)	2,33E+07	1	2,33E+07	23,87	0,0000
Velocidad 1 (m/s)	7,17E+06	1	7,17E+06	7,35	0,0098
Velocidad 2 (m/s)	1,05E+07	1	1,05E+07	10,78	0,0021
Residuo	4,00E+07	41	975675		
Total (corregido)	1,00E+08	44			

El valor estadístico obtenido de R- Cuadrado ajustado, resulta ser para este modelo del 57,2362%, lo que nos indica que estas variables explican en un 57,2362% el valor de MOE.

6. CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES.

A continuación se exponen las conclusiones finales, obtenidas a partir de los resultados alcanzados después los diferentes ensayos y clasificaciones realizadas sobre el lote de probetas con las que conformamos las 45 vigas trío reforzadas con fibra de vidrio, los ensayos realizados sobre estas últimas y el análisis de todas las variables medidas que afectan a sus características elastomecánicas, así como la comparación entre una muestra de 49 vigas macizas (material original) y la población de vigas trío reforzadas obtenidas, procedentes ambas, de madera de *Pinus pinaster* Ait. (región de procedencia Meseta Castellana) de baja calidad.

Es conveniente considerar, que los datos obtenidos han de tenerse en cuenta de una manera general y con precaución, ya que el estudio se ha realizado con el material del que se disponía en el Laboratorio de Tecnología de la Madera de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia (Universidad de Valladolid) y además de no ser demasiado homogéneo, durante el proceso de encolado y conformación de las vigas trío reforzadas, se han presentado algunos problemas, como el desplazamiento de las tiras de fibra de vidrio al hacer presión con los sargentos, difícil de solucionar con los medios disponibles, que han podido influir de alguna manera en los resultados finales obtenidos.

En cuanto a los objetivos que se planteaban en este estudio, las conclusiones obtenidas para cada uno de ellos serían las siguientes:

De forma general podemos destacar, que en el análisis de correlaciones efectuado entre los diferentes defectos medidos (rectitud, azulado, intensidad de azulado, nº total de nudos y % de diámetro máximo de nudo de cara en el 1/3 central de la probeta) y nuestras variables elastomecánicas, no se obtienen relaciones significativas en ninguno de los casos, a excepción de la rectitud de las probetas del grupo 1 y el % de diámetro máximo de nudo de cara en el 1/3 central de las probetas del grupo 1 que tienen una relación significativa con el MOR.

Para el primer y segundo objetivo, que de forma general es la determinación de las propiedades elastomecánicas de las vigas trío reforzadas y la comparación de estas con las vigas macizas, en los resultados obtenidos podemos ver:

- Para la población de vigas macizas el valor medio de MOR es de 38,45 MPa, el MOE es de 8279,86 MPa y la densidad es de 570,48 Kg/m³.
- Para la población de vigas trío reforzadas el valor medio de MOR es de 46,574 MPa, el MOE es de 7927,85 MPa y la densidad es de 558,34 Kg/m³.

Se puede comprobar que los valores medios obtenidos para las vigas macizas, son los habituales para la madera aserrada de esta especie y para las vigas trío reforzadas, se puede decir lo mismo. Realizando comparaciones entre estas variables pertenecientes a las dos poblaciones, mediante análisis de varianza por comparación de medias, podemos afirmar que para MOE y densidad no existen diferencias

significativas entre las poblaciones de vigas trío y vigas macizas estudiadas y que para MOR si habría diferencias significativas entre ambas poblaciones.

Por lo tanto, a la vista de los valores obtenidos podemos concluir que, esencialmente se produce una mejora considerable de la variable MOR en vigas trío reforzadas, con respecto a la madera maciza original.

Para el tercer y cuarto objetivo, que de forma general es la obtención de vigas trío de uso estructural y la determinación de homogeneidad en los resultados, podemos decir que para la asignación de clases resistentes al conjunto de las vigas macizas y al de las vigas trío reforzadas con fibra de vidrio, atenderemos a los valores característicos de las propiedades de resistencia a flexión (MOR), propiedades de rigidez (MOE) y densidad. A través de los datos obtenidos podemos ver:

- Para la población de vigas macizas, el valor característico de MOR es de 11,921 MPa, el MOE es de 8279,86 MPa y la densidad es de 437,14 Kg/m³.
- Para la población de vigas trío reforzadas, el valor característico de MOR es de 34,719 MPa, el MOE es de 7927,85 MPa y la densidad es de 506,881 Kg/m³.

En el caso de las vigas macizas, observando el valor de MOR (11,921 MPa), podemos comprobar que no está dentro de los valores característicos pertenecientes a la resistencia por flexión, por lo tanto no tiene clasificación resistente. Las vigas macizas analizadas se consideran como una partida de madera no estructural.

Para las vigas trío reforzadas con tiras de fibra de vidrio, observando en primer lugar en el valor de MOR (34,719 MPa) podríamos asignarles una clase resistente de C-30. En segundo lugar comprobando el valor de MOE (7927,87 MPa), muy cercano a 8000 MPa, le podemos asignar una clase resistente de C-16. Por último comprobando el valor de la densidad (506,881 Kg/m³) le podemos asignar una clase resistente de C-50. Como tenemos que ajustar a la exigencia más restrictiva, afirmamos que las vigas trío serán un población de madera estructural C-16.

Hay que mencionar que esta clasificación es muy conservadora, ya que siempre se selecciona la clase resistente inferior, según los valores característicos obtenidos de MOR, MOE y densidad y una vez que tengamos las 3 condiciones para determinar la clase resistente, también seleccionaremos la clase resistente inferior.

En cuanto a la homogeneidad de los resultados obtenidos durante los ensayos, analizando la variabilidad de estos resultados, se observa como para las vigas macizas los coeficientes de variación para MOR, MOE y densidad son 52,61%, 47,38% y 14,45% respectivamente, altos como cabe esperar por la heterogeneidad y variabilidad natural de la madera. La población de vigas macizas es heterogénea. Sin embargo para las vigas trío reforzadas, los coeficientes de variación para MOR, MOE y densidad son 16,01%, 19,05% y 6,18% respectivamente, mucho menores, lo que nos indica que la población de vigas trío reforzadas con fibra de vidrio se comporta de forma mucho más homogénea, resultado que era de esperar atendiendo a la forma de elaborar las piezas trío.

7. BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

1. BIBLIOGRAFÍA.

AITIM (2.011). "Generalidades de la madera". AITIM. Madrid

ARGÜELLES, R., ARRIAGA F., MARTINEZ J.J. (2000). "Estructuras de Madera. Diseño y cálculo". Editorial AITIM, (ISBN:84-87381-17-0), 712 pp.

ARGÜELLES R., ARRIAGA F., MARTINEZ J.J. (2000). "Estructuras de Madera. Diseño y cálculo" AITIM (ISBN: 84-87381-17-0).

ARRIAGA, F.; GONZÁLEZ, M.A.; MEDINA, G.; ORTIZ, J.; PERAZA, F.; PERAZA, J.E. & TOUZA, M. (1994). Guía de la madera para la construcción, el diseño y la decoración. Editorial AITIM. 572 pp. ISBN: 84-87381-07-3.

ARRIAGA F., PERAZA F., ESTEBAN M. (2003). "Madera Aserrada Estructural". Editorial AITIM, (ISBN: 84-87381-25-1).

CAPUZ LLADRÓ R. (2.005). "Materiales orgánicos. MADERA". Editorial Universidad Politécnica de Valencia. pp. 30 y pp. 139-159.

DÍEZ R. Y FERNÁNDEZ-GOLFÍN J.I. (1998). "Influencia de diversos factores en la calidad de la madera de uso estructural de *P. sylvestris* L." Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales, vol.7, no. 1, 2, pp. 41-52.

FERNÁNDEZ-GOLFÍN J.I., DÍEZ R. Y HERMOSO E. (2003). "Relaciones entre las variables clasificadoras de la madera estructural de los pinos silvestre y laricio de procedencia española". Materiales de Construcción, vol. 53, no. 270, pp. 45-55.

FERNÁNDEZ-GOLFÍN SECO, J. L. et al. (2000). La madera de la Construcción, Cap. 1 "Propiedades elastomecánicas de la madera", pp. 5-45. Instituto Tecnológico Agrario y Agroalimentario.

GLOS P., RICHTER C. (2002). Rissbildung in Kantholzern. Abschlussbericht Nr. 01508, Holzfurchung München de Technischen Universität München.

HERMOSO E. (2001). "Caracterización mecánica de la madera estructural de *P. Sylvestris* L.". Tesis doctoral presenta en la Universidad Politécnica de Madrid. ETSI MONTES.

HERMOSO E., FERNÁNDEZ-GOLFÍN J.I. Y DÍEZ R. (2002). "Madera estructural de pino silvestre: caracterización mecánica", Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales, vol.11, no.2, pp. 425-440.

JIMENEZ F.J. (1999). "La madera: propiedades básicas". Editorial GET Grupo de Estudios Tecnológicos, 154 pp.

LOPEZ GONZALES G.A. (2001). "Los árboles y arbustos de la Península Ibérica e Islas Baleares". Editorial Mundi-Prensa, (CSIC), pp. 298-300.

PELLERIN R.F. Y ROSS J.R. (2002). "Transverse vibration and longitudinal stress wave-non destructive evaluation methods". Forest Products Society. Nondestructive Evaluation of Wood, pp. 13-40

Caracterización elastomecánica de vigas trío reforzadas con fibras artificiales, de *P. pinaster* Ait. (región de procedencia Meseta Castellana)

Bibliografía

VIGNOTE S., JIMENEZ F.J. (1999). "Tecnología de la madera". Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). (ISBN:84-491-0293-6).

VIGNOTE S. Y MARTINEZ I. (2006). "Tecnología de la madera" Editorial Mundi-Prensa, 687 pp.

UNE-EN 338. "Madera estructural. Clases resistentes".

UNE-EN 384. "Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad".

UNE-EN 408. "Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas".

UNE-EN 56544. "Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural. Madera de coníferas".

8. ANEJOS

ANEJOS

1. ANEJOS.

1.1 Resultados obtenidos.

1.1.1 Vigas trío reforzadas con fibra de vidrio.

Tabla 33. Resultados de los ensayos en vigas trío

Viga Nº	Tipo	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	V 1 (m/s)	V 2 (m/s)	V 3 (m/s)
1	TRIO	79	4	147	5486	4715	3661
2	TRIO	100	48	142	5233	4730	3862
3	TRIO	104	47	135	5089	4513	4168
4	TRIO	76	73	134	4986	4583	4458
5	TRIO	14	69	133	4969	4640	4379
6	TRIO	9	63	122	5142	4569	3862
7	TRIO	105	61	127	5406	4854	3707
8	TRIO	108	128	10	5037	4715	4340
9	TRIO	114	129	125	5124	4626	3988
10	TRIO	117	132	81	5488	4745	4277
11	TRIO	107	109	78	5486	4540	4240
12	TRIO	94	110	103	5347	4870	4020
13	TRIO	11	112	28	5160	4870	4472
14	TRIO	95	7	46	4903	4776	4156
15	TRIO	3	124	150	5160	4670	4020
16	TRIO	29	148	8	5309	4791	4366
17	TRIO	30	137	102	4936	4554	4418
18	TRIO	13	136	101	4986	4700	4087
19	TRIO	27	145	97	5721	4760	4327
20	TRIO	24	1	96	5426	4499	4458
21	TRIO	23	26	116	5548	4776	4485
22	TRIO	18	25	115	5142	4499	4156
23	TRIO	17	22	111	5160	4807	3977
24	TRIO	42	144	71	5020	4745	4240
25	TRIO	40	113	74	5106	4569	4366
26	TRIO	34	118	75	5569	4776	4277
27	TRIO	33	119	43	4886	4760	3793
28	TRIO	32	120	44	5020	4640	3924
29	TRIO	90	31	106	5367	4583	3735
30	TRIO	65	36	131	4986	4700	4353
31	TRIO	72	5	6	5655	4823	4240

32	TRIO	45	16	2	5406	4854	4145
33	TRIO	49	19	67	5089	4611	3852
34	TRIO	53	20	68	5071	4640	4353
35	TRIO	56	21	70	5002	4597	4405
36	TRIO	123	91	15	5002	4526	4366
37	TRIO	126	92	41	4870	4854	3966
38	TRIO	130	93	39	4936	4730	4122
39	TRIO	121	88	66	4903	4807	4216
40	TRIO	143	86	38	5037	4870	3862
41	TRIO	89	50	83	4952	4870	3852
42	TRIO	139	54	62	5486	4776	4192
43	TRIO	140	85	57	4986	4730	4458
44	TRIO	146	98	55	5252	4838	4485
45	TRIO	12	51	64	5037	4569	4327

Tabla 33. Continuación

Viga N°	Tipo	Rectitud 1	Rectitud 2	Rectitud 3	Azulado 1	Azulado 2	Azulado 3
1	TRIO	5	2	1	5	2	1
2	TRIO	5	3	2	4	4	1
3	TRIO	5	5	3	1	4	1
4	TRIO	4	5	4	2	0	5
5	TRIO	4	4	3	2	3	1
6	TRIO	5	4	3	5	3	1
7	TRIO	5	4	3	4	1	0
8	TRIO	4	3	5	4	0	4
9	TRIO	5	2	1	5	1	2
10	TRIO	5	2	5	5	0	1
11	TRIO	5	3	4	4	1	0
12	TRIO	5	4	4	5	2	0
13	TRIO	5	4	4	4	4	3
14	TRIO	4	5	4	3	5	0
15	TRIO	5	4	3	5	4	1
16	TRIO	4	4	3	2	5	1
17	TRIO	5	5	3	1	5	1
18	TRIO	5	4	2	4	3	1
19	TRIO	5	5	5	2	5	0
20	TRIO	4	5	4	2	2	1
21	TRIO	5	4	2	3	5	4
22	TRIO	4	1	4	4	1	0
23	TRIO	5	4	3	4	4	3
24	TRIO	5	5	5	1	3	0
25	TRIO	4	3	4	1	4	4

26	TRIO	5	3	5	4	4	0
27	TRIO	4	5	1	1	5	0
28	TRIO	5	4	1	3	5	0
29	TRIO	3	5	4	2	5	1
30	TRIO	5	5	4	1	5	4
31	TRIO	5	5	5	4	2	0
32	TRIO	5	4	5	1	5	5
33	TRIO	4	3	4	5	4	1
34	TRIO	4	2	4	5	4	1
35	TRIO	5	4	3	5	5	2
36	TRIO	4	4	4	1	4	1
37	TRIO	4	3	4	0	4	0
38	TRIO	1	5	1	0	3	0
39	TRIO	4	4	3	1	1	0
40	TRIO	4	4	4	5	2	0
41	TRIO	4	4	2	4	3	0
42	TRIO	4	4	5	5	5	2
43	TRIO	3	5	5	3	3	5
44	TRIO	4	4	5	4	5	2
45	TRIO	5	4	4	5	5	2

Tabla 33. Continuación

Viga Nº	Tipo	Int. Azulado1	Int. Azulado2	Int. Azulado3	Nudos 1	Nudos 2	Nudos 3
1	TRIO	3	3	1	1	3	2
2	TRIO	3	3	2	2	0	2
3	TRIO	1	3	2	0	0	1
4	TRIO	2	0	2	1	3	0
5	TRIO	3	2	2	2	2	1
6	TRIO	2	3	2	0	2	3
7	TRIO	3	2	0	3	1	5
8	TRIO	2	0	2	1	2	0
9	TRIO	3	2	2	0	5	3
10	TRIO	2	0	1	1	2	1
11	TRIO	2	2	0	0	2	3
12	TRIO	2	3	0	2	0	2
13	TRIO	2	3	2	0	0	2
14	TRIO	2	2	0	1	2	1
15	TRIO	2	2	1	1	2	1
16	TRIO	2	2	2	2	1	3
17	TRIO	2	3	1	1	0	2
18	TRIO	3	3	2	0	3	4
19	TRIO	2	3	0	0	1	2

20	TRIO	2	2	1	2	5	0
21	TRIO	2	3	2	1	0	1
22	TRIO	3	2	0	2	1	3
23	TRIO	3	3	3	0	2	4
24	TRIO	1	3	0	2	0	3
25	TRIO	1	3	3	1	3	0
26	TRIO	2	2	0	2	2	4
27	TRIO	1	3	0	0	0	2
28	TRIO	2	2	0	0	2	1
29	TRIO	2	2	2	1	0	3
30	TRIO	2	2	2	1	0	3
31	TRIO	2	3	0	0	2	2
32	TRIO	2	2	2	1	0	0
33	TRIO	3	2	2	0	2	3
34	TRIO	2	3	3	0	0	2
35	TRIO	3	3	3	0	1	2
36	TRIO	3	2	3	2	0	3
37	TRIO	0	3	0	3	1	3
38	TRIO	0	3	0	2	2	3
39	TRIO	2	2	0	3	2	3
40	TRIO	3	2	0	1	1	2
41	TRIO	3	3	0	1	0	1
42	TRIO	2	3	3	0	0	3
43	TRIO	3	3	3	2	2	2
44	TRIO	3	3	3	2	0	1
45	TRIO	3	2	2	0	1	1

Tabla 33. Continuación

Viga N°	Tipo	% ϕ max de nudo1	Norma 1	% ϕ max de nudo2	Norma 2	% ϕ max de nudo3	Norma 3
1	TRIO	0	CARA	55	CANTO	58,33	CANTO
2	TRIO	0	CARA	0	0 NUDOS	0	CANTO
3	TRIO	0	0 NUDOS	0	0 NUDOS	0	CANTO
4	TRIO	45	CANTO	51,66	CANTO	0	0 NUDOS
5	TRIO	25	CANTO	0	CANTO	0	CANTO
6	TRIO	0	0 NUDOS	31,66	CANTO	100	CANTO
7	TRIO	28,33	CANTO	0	CANTO	38,33	CANTO
8	TRIO	66,66	CANTO	0	CARA	0	0 NUDOS
9	TRIO	0	0 NUDOS	100	CANTO	75	CANTO
10	TRIO	0	CARA	68,33	CANTO	23,33	CANTO
11	TRIO	0	0 NUDOS	35	CANTO	33,33	CANTO
12	TRIO	0	CANTO	0	0 NUDOS	0	CANTO

13	TRIO	0	0 NUDOS	0	0 NUDOS	0	CANTO
14	TRIO	0	CANTO	0	CANTO	0	CARA
15	TRIO	75	CANTO	26,66	CANTO	56,66	CARA
16	TRIO	71,66	CANTO	0	CANTO	23,33	CANTO
17	TRIO	0	CARA	0	0 NUDOS	0	CANTO
18	TRIO	0	0 NUDOS	38,33	CANTO	28,33	CANTO
19	TRIO	0	0 NUDOS	0	CANTO	0	CARA
20	TRIO	43,33	CANTO	63,33	CARA	0	0 NUDOS
21	TRIO	36,66	CARA	0	0 NUDOS	51,66	CARA
22	TRIO	13,33	CANTO	0	CARA	23,33	CANTO
23	TRIO	0	0 NUDOS	0	CANTO	28,33	CANTO
24	TRIO	0	CANTO	0	0 NUDOS	61,66	CANTO
25	TRIO	0	CANTO	13,33	CANTO	0	0 NUDOS
26	TRIO	30	CANTO	0	CANTO	30	CANTO
27	TRIO	0	0 NUDOS	0	0 NUDOS	63,33	CANTO
28	TRIO	0	0 NUDOS	0	CANTO	41,66	CANTO
29	TRIO	48,33	CARA	0	0 NUDOS	25	CANTO
30	TRIO	0	CANTO	0	0 NUDOS	0	CANTO
31	TRIO	0	0 NUDOS	46,66	CANTO	0	CANTO
32	TRIO	63,33	CARA	0	0 NUDOS	0	0 NUDOS
33	TRIO	0	0 NUDOS	0	CARA	48,33	CANTO
34	TRIO	0	0 NUDOS	0	0 NUDOS	31,66	CANTO
35	TRIO	0	0 NUDOS	0	CANTO	31,66	CARA
36	TRIO	40	CANTO	0	0 NUDOS	90	CANTO
37	TRIO	30	CANTO	0	CARA	0	CANTO
38	TRIO	75	CANTO	0	CANTO	56,66	CANTO
39	TRIO	0	CANTO	3,33	CANTO	50	CANTO
40	TRIO	0	CANTO	0	CANTO	38,33	CANTO
41	TRIO	66,66	CARA	0	0 NUDOS	70	CANTO
42	TRIO	0	0 NUDOS	0	0 NUDOS	0	CANTO
43	TRIO	0	CANTO	0	CANTO	11,66	CARA
44	TRIO	28,33	CANTO	0	0 NUDOS	0	CANTO
45	TRIO	0	0 NUDOS	0	CANTO	0	CANTO

Tabla 33. Continuación

Viga N°	Tipo	Norma1	Norma2	Norma3	A (cm)	L (cm)	E (cm)	Peso (g)	Vol (cm ³)
1	TRIO	ME1	RECHAZO	RECHAZO	5,1	119,8	3,9	1465,7	2382,82
2	TRIO	RECHAZO	ME1	RECHAZO	5,8	119,6	3,9	1437,9	2705,35
3	TRIO	ME1	ME1	RECHAZO	5,9	119,6	3,7	1323,4	2610,87
4	TRIO	ME2	RECHAZO	ME1	5,2	119,8	4,0	1399,1	2491,84
5	TRIO	RECHAZO	RECHAZO	RECHAZO	5,6	119,5	3,8	1380,7	2542,96

6	TRIO	ME1	RECHAZO	RECHAZO	5,7	119,8	4,1	1539,9	2799,73
7	TRIO	RECHAZO	RECHAZO	RECHAZO	5,5	119,7	3,9	1543,7	2567,57
8	TRIO	RECHAZO	RECHAZO	ME1	5,4	119,7	4,1	1479,9	2650,16
9	TRIO	ME1	RECHAZO	RECHAZO	5,5	119,8	4,1	1478,3	2701,49
10	TRIO	RECHAZO	RECHAZO	RECHAZO	5,6	119,9	3,8	1419,6	2551,47
11	TRIO	ME1	RECHAZO	RECHAZO	5,1	119,8	3,9	1477,3	2382,82
12	TRIO	RECHAZO	ME1	RECHAZO	5,5	119,9	3,9	1419,0	2571,86
13	TRIO	ME1	ME1	RECHAZO	5,8	119,7	3,8	1406,9	2638,19
14	TRIO	RECHAZO	RECHAZO	ME2	5,9	119,7	3,8	1334,6	2683,67
15	TRIO	RECHAZO	RECHAZO	RECHAZO	5,8	119,6	4,0	1516,4	2774,72
16	TRIO	RECHAZO	RECHAZO	RECHAZO	5,5	119,7	3,9	1547,0	2567,57
17	TRIO	ME1	ME1	ME2	5,8	119,9	4,0	1484,4	2781,68
18	TRIO	ME1	RECHAZO	RECHAZO	5,9	119,5	3,8	1384,8	2679,19
19	TRIO	ME1	RECHAZO	ME1	5,5	119,7	4,1	1528,1	2699,24
20	TRIO	RECHAZO	RECHAZO	ME2	5,1	119,7	3,9	1545,8	2380,83
21	TRIO	ME2	ME1	RECHAZO	5,4	119,8	4,0	1466,9	2587,68
22	TRIO	RECHAZO	ME2	RECHAZO	5,8	119,7	4,0	1560,3	2777,04
23	TRIO	ME1	RECHAZO	RECHAZO	5,6	119,7	3,8	1476,6	2547,22
24	TRIO	RECHAZO	ME1	RECHAZO	5,7	119,8	4,1	1585,4	2799,73
25	TRIO	RECHAZO	RECHAZO	ME1	5,1	119,6	4,0	1394,3	2439,84
26	TRIO	RECHAZO	RECHAZO	ME2	5,9	119,6	4,0	1561,2	2822,56
27	TRIO	ME1	ME1	RECHAZO	5,7	119,6	4,0	1340,5	2726,88
28	TRIO	ME1	RECHAZO	RECHAZO	5,8	119,6	3,8	1372,2	2635,98
29	TRIO	ME2	ME1	RECHAZO	5,7	119,6	3,9	1557,0	2658,71
30	TRIO	RECHAZO	ME1	RECHAZO	5,6	119,7	3,8	1339,3	2547,22
31	TRIO	ME1	RECHAZO	RECHAZO	5,9	119,5	4,1	1528,2	2890,71
32	TRIO	RECHAZO	ME1	ME1	4,8	119,8	3,9	1305,5	2242,66
33	TRIO	ME1	ME1	RECHAZO	5,5	119,6	3,9	1582,9	2565,42
34	TRIO	ME1	ME1	RECHAZO	5,6	119,6	4,1	1571,7	2746,02
35	TRIO	ME1	RECHAZO	ME2	5,8	119,7	3,9	1433,3	2707,61
36	TRIO	RECHAZO	ME1	RECHAZO	6,0	119,7	4,1	1706,9	2944,62
37	TRIO	RECHAZO	ME2	RECHAZO	5,8	119,7	4,1	1565,2	2846,47
38	TRIO	RECHAZO	RECHAZO	RECHAZO	5,4	119,7	3,9	1366,6	2520,88
39	TRIO	RECHAZO	RECHAZO	RECHAZO	5,6	119,7	3,9	1544,0	2614,25
40	TRIO	RECHAZO	RECHAZO	RECHAZO	5,5	120,5	4,0	1452,4	2651,00
41	TRIO	RECHAZO	ME1	ME2	5,8	119,8	3,9	1417,7	2709,88
42	TRIO	ME1	ME1	RECHAZO	5,7	119,5	3,9	1438,3	2656,49
43	TRIO	RECHAZO	RECHAZO	ME1	5,6	120,0	4,0	1396,4	2688,00
44	TRIO	RECHAZO	ME1	RECHAZO	5,4	119,7	4,0	1498,7	2585,52
45	TRIO	ME1	RECHAZO	RECHAZO	5,5	119,8	4,2	1689,9	2767,38

Tabla 33. Continuación

Viga Nº	Tipo	D (g/cm ³)	Peso (kg)	Vol (m ³)	D (kg/m ³)	MOEG (MPa)	MOR (MPa)	MOE (Mpa)
1	TRIO	0,61511099	1,466	0,00238282	615,111	10263,0	53,425	10651,9
2	TRIO	0,531502	1,438	0,00270535	531,502	7620,5	50,887	7216,65
3	TRIO	0,50688124	1,323	0,00261087	506,881	6671,6	46,606	5983,08
4	TRIO	0,56147265	1,399	0,00249184	561,473	7144,3	43,024	6597,59
5	TRIO	0,54294995	1,381	0,00254296	542,950	7379,8	51,547	6903,74
6	TRIO	0,55001811	1,540	0,00279973	550,018	8167,5	50,438	7927,75
7	TRIO	0,60123113	1,544	0,00256757	601,231	9265,4	51,108	9355,02
8	TRIO	0,55841954	1,480	0,00265016	558,420	7776,8	54,385	7419,84
9	TRIO	0,54721654	1,478	0,00270149	547,217	7659,4	36,777	7267,22
10	TRIO	0,55638471	1,420	0,00255147	556,385	9740,0	60,357	9972
11	TRIO	0,61997917	1,477	0,00238282	619,979	9733,8	40,500	9963,94
12	TRIO	0,55174184	1,419	0,00257186	551,742	9963,8	61,428	10262,94
13	TRIO	0,53328269	1,407	0,00263819	533,283	923,3	50,121	9310,69
14	TRIO	0,49730332	1,335	0,00268367	497,303	7303,6	47,653	6804,68
15	TRIO	0,54650559	1,516	0,00277472	546,506	8784,8	47,456	8730,24
16	TRIO	0,60251639	1,547	0,00256757	602,516	9062,1	41,410	9090,73
17	TRIO	0,53363435	1,484	0,00278168	533,634	6511,2	34,719	5774,56
18	TRIO	0,51687264	1,385	0,00267919	516,873	7801,7	50,493	7452,21
19	TRIO	0,56612336	1,528	0,00269924	566,123	10005,0	60,399	10316,5
20	TRIO	0,64926855	1,546	0,00238083	649,269	9655,8	47,717	9862,54
21	TRIO	0,56687844	1,467	0,00258768	566,878	9413,9	62,228	9548,07
22	TRIO	0,56185723	1,560	0,00277704	561,857	7586,2	44,190	7172,06
23	TRIO	0,57969171	1,477	0,00254722	579,692	9192,3	43,692	9259,99
24	TRIO	0,5662697	1,585	0,00279973	566,270	7996,5	39,997	7705,45
25	TRIO	0,5714719	1,394	0,00243984	571,472	7106,2	46,430	6548,06
26	TRIO	0,5531149	1,561	0,00282256	553,115	8163,0	38,971	7921,9
27	TRIO	0,49158746	1,341	0,00272688	491,587	6717,7	43,535	6043,01
28	TRIO	0,52056462	1,372	0,00263598	520,565	5883,3	32,962	4958,29
29	TRIO	0,58562279	1,557	0,00265871	585,623	7755,3	40,559	7391,89
30	TRIO	0,52578972	1,339	0,00254722	525,790	8017,0	45,538	7732,1
31	TRIO	0,52865996	1,528	0,00289071	528,660	8135,4	43,255	7886,02
32	TRIO	0,58212227	1,306	0,00224266	582,122	9269,4	56,555	9360,22
33	TRIO	0,61701398	1,583	0,00256542	617,014	7318,7	44,025	6824,31
34	TRIO	0,57235646	1,572	0,00274602	572,356	6811,6	46,606	6165,08
35	TRIO	0,52935906	1,433	0,00270761	529,359	6968,6	48,702	6369,18
36	TRIO	0,57966733	1,707	0,00294462	579,667	7659,2	29,019	7266,96
37	TRIO	0,54987483	1,565	0,00284647	549,875	7138,7	51,833	6590,31
38	TRIO	0,54211185	1,367	0,00252088	542,112	7521,4	35,279	7087,82

39	TRIO	0,59060961	1,544	0,00261425	590,610	9520,4	48,318	9686,52
40	TRIO	0,54786873	1,452	0,002651	547,869	7851,1	49,715	7516,43
41	TRIO	0,52316047	1,418	0,00270988	523,160	7108,9	37,317	6551,57
42	TRIO	0,54142975	1,438	0,00265649	541,430	6889,9	49,798	6266,87
43	TRIO	0,51949405	1,396	0,002688	519,494	7937,7	42,808	7629,01
44	TRIO	0,57965129	1,499	0,00258552	579,651	9712,1	49,594	9935,73
45	TRIO	0,61064978	1,690	0,00276738	610,650	10125,0	44,448	10472,5

1.1.2 Vigas macizas (material original)

Tabla 34. Resultados de los ensayos en vigas trío

Viga N°	Tipo	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOEG (MPa)	Densidad (kg/m³)
1	MACIZA	25,536	5164,99	6042,3	543,02
2	MACIZA	107,78	18059,3	15961	708,33
3	MACIZA	72,023	17021,9	15163	647,45
4	MACIZA	53,277	17397,6	15452	541,67
5	MACIZA	30,332	9871,9	9663	665,55
6	MACIZA	38,919	10071,84	9816,8	749,51
7	MACIZA	75,511	15006,9	13613	673,61
8	MACIZA	57,876	13635,4	12558	687,50
9	MACIZA	45,818	9465,52	9350,4	493,06
10	MACIZA	18,771	5267,56	6121,2	500,83
11	MACIZA	36,283	5867,25	6582,5	518,54
13	MACIZA	62,121	12408,2	11614	671,93
14	MACIZA	28,481	6993,18	7448,6	680,96
15	MACIZA	29,223	5451,64	6262,8	555,56
16	MACIZA	61,296	10495,9	10143	486,11
17	MACIZA	13,426	5167,33	6044,1	513,89
18	MACIZA	31,074	6224,36	6857,2	437,14
19	MACIZA	16,56	4023,07	5163,9	611,11
20	MACIZA	44,695	11123,8	10626	677,00
21	MACIZA	55,114	8780,81	8823,7	543,02
22	MACIZA	98,168	16719	14930	659,72
23	MACIZA	46,635	8604,27	8687,9	481,57
24	MACIZA	18,491	4552,3	5571	513,89
25	MACIZA	30,832	5699,81	6453,7	540,32
26	MACIZA	33,715	6272,72	6894,4	493,06
27	MACIZA	24,406	4605,6	5612	517,24
28	MACIZA	37,286	7239,01	7637,7	538,81
29	MACIZA	14,136	5805,11	6534,7	529,22
30	MACIZA	49,714	9098,92	9068,4	514,75

31	MACIZA	23,09	4291,78	5370,6	483,26
32	MACIZA	61,049	14340	13100	660,27
33	MACIZA	34,51	7985,86	8212,2	460,58
34	MACIZA	41,425	7338,85	7714,5	419,83
35	MACIZA	36,473	8589,58	8676,6	521,70
36	MACIZA	11,921	4176,73	5282,1	596,70
37	MACIZA	10,468	5311,76	6155,2	595,21
38	MACIZA	49,295	11212,2	10694	665,56
39	MACIZA	29,335	4124,86	5242,2	577,35
40	MACIZA	12,36	3883,71	5056,7	635,59
41	MACIZA	34,362	5374,94	6203,8	659,72
42	MACIZA	33,781	6929,61	7399,7	675,30
43	MACIZA	25,152	8399,52	8530,4	520,83
44	MACIZA	39,356	11802,4	11148	675,30
45	MACIZA	25,449	2697,72	4144,4	418,06
46	MACIZA	28,772	8609,08	8691,6	554,17
47	MACIZA	21,065	5427,33	6244,1	570,87
48	MACIZA	10,138	5993,22	6679,4	622,92
49	MACIZA	53,188	7846,37	8104,9	472,62
50	MACIZA	65,123	13782,3	12671	693,29

1.2 Estadística Descriptiva.

1.2.1 Análisis descriptivo de la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas.

1.2.1.1 Velocidad de ondas ultrasónicas en probetas del grupo 1.

- Sesgo y curtosis

Tabla 35. Sesgo y curtosis de velocidades de ondas ultrasónicas en probetas del grupo 1

Sesgo Estandarizado	1,93463
Curtosis Estandarizada	-0,876038

- **Grafico de Probabilidad Normal**

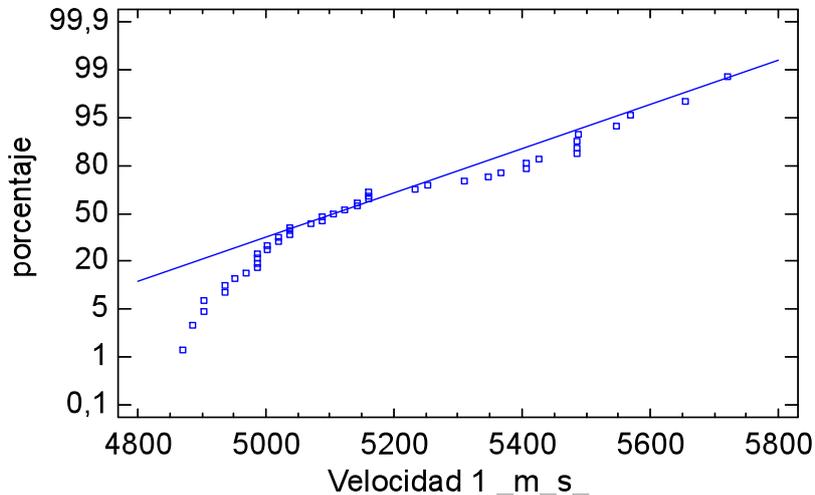


Figura 73. Grafico de P. Normal de velocidades de onda ultrasónica en probetas del grupo 1

- **Grafico de Dispersión.**

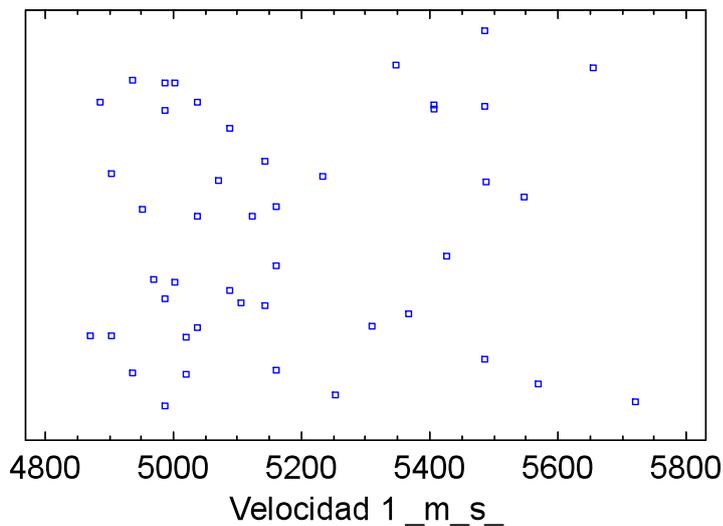


Figura 74. Grafico de Dispersión de velocidades de ondas ultrasónicas en probetas del grupo 1

1.2.1.2 Velocidad de ondas ultrasónicas en probetas del grupo 2.

- **Sesgo y curtosis.**

Tabla 36. Sesgo y curtosis de velocidades de ondas ultrasónicas en probetas del grupo 2

Sesgo Estandarizado	-0,581249
Curtosis Estandarizada	-1,62831

- **Grafico de Probabilidad Normal**

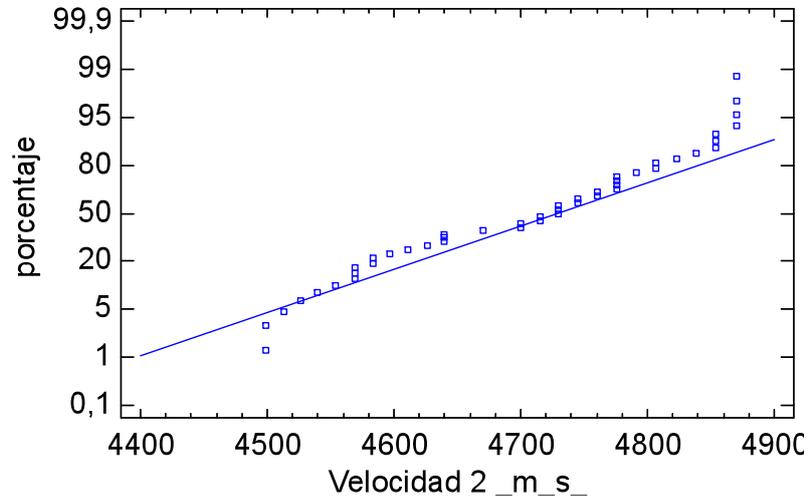


Figura 75. Grafico de P. Normal de velocidades de ondas ultrasónicas en probetas del grupo 2

- **Grafico de Dispersión.**

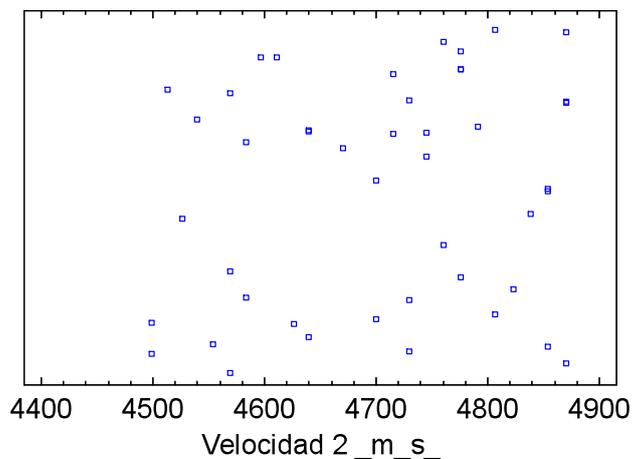


Figura 76. Grafico de Dispersión de velocidades de ondas ultrasónicas en probetas del grupo 2

1.2.1.3 Velocidad de ondas ultrasónicas en probetas del grupo 3.

- **Sesgo y curtosis.**

Tabla 37. Sesgo y curtosis de velocidades de ondas ultrasónicas en probetas del grupo 3

Sesgo Estandarizado	-1,29961
Curtosis Estandarizada	-1,29036

- **Grafico de Probabilidad Normal**

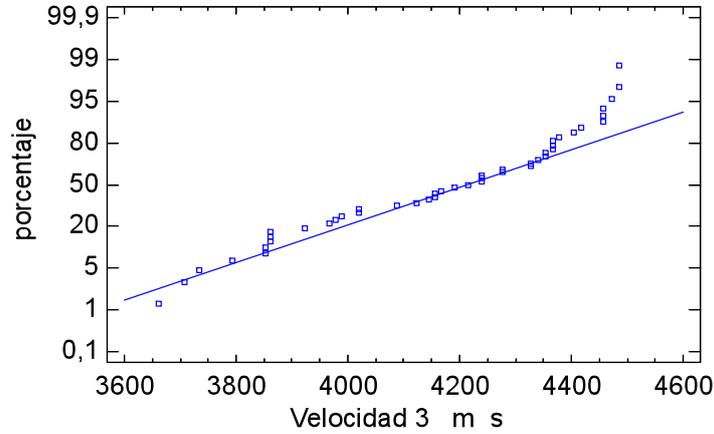


Figura 77. Grafico de P. Normal de velocidades de ondas ultrasónicas en probetas del grupo 3

- **Grafico de Dispersión.**

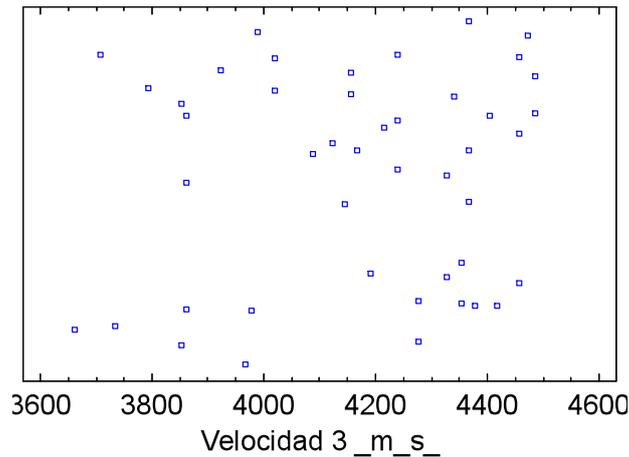


Figura 78. Grafico de Dispersión de velocidades de ondas ultrasónicas en probetas del grupo 3

1.2.2 Análisis descriptivo del porcentaje del ϕ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de la tabla.

1.2.2.1 Porcentaje de ϕ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central del probetas del grupo 1.

- **Sesgo y curtosis**

Tabla 38. Sesgo y curtosis del porcentaje del ϕ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de probetas del grupo 1

Sesgo Estandarizado	3,15824
Curtosis Estandarizada	-0,140533

- **Grafico de Probabilidad Normal**

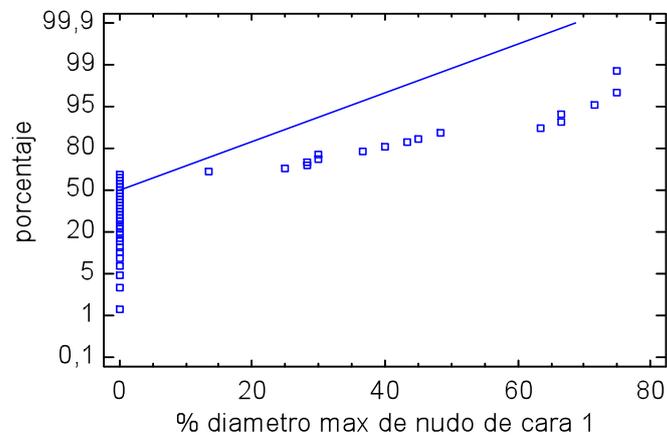


Figura 79. Grafico de P. Normal del porcentaje del ϕ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de probetas del grupo 1

- **Grafico de Dispersión.**

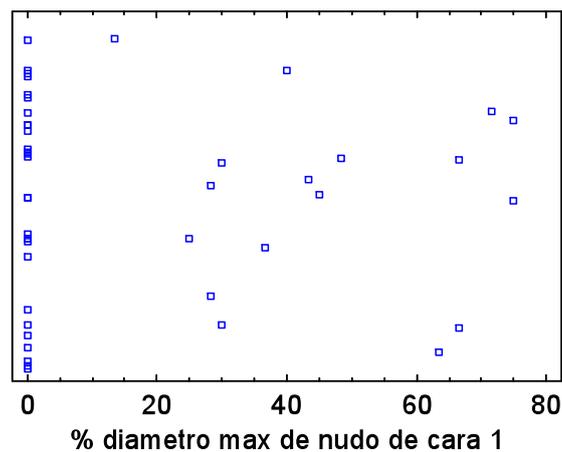


Figura 80. Grafico de Dispersión del porcentaje del ϕ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de probetas del grupo 1

1.2.2.2 Porcentaje de ϕ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central del probetas del grupo 2.

- **Sesgo y curtosis**

Tabla 39. Sesgo y curtosis del porcentaje del ϕ máximo de un nudo de car presente en el 1/3 central de probetas del grupo 2

Sesgo Estandarizado	5,70343
Curtosis Estandarizada	5,30549

- **Grafico de Probabilidad Normal**

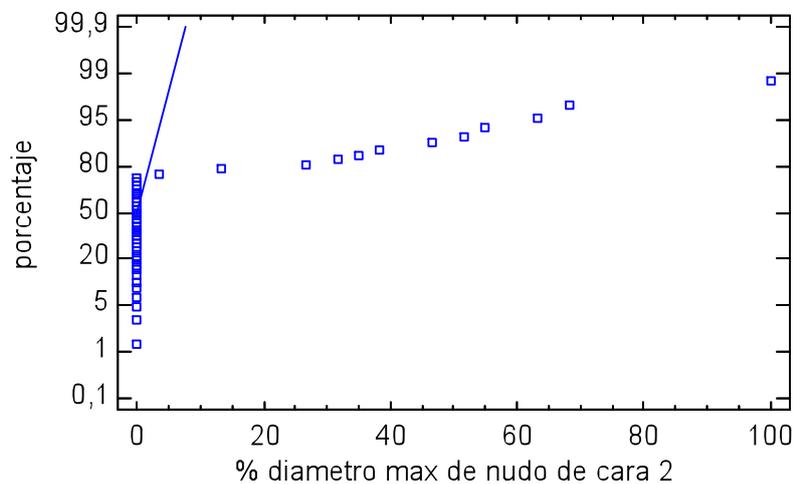


Figura 81. Grafico de P. Normal del porcentaje del ϕ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de probetas del grupo 2

- **Grafico de Dispersión.**

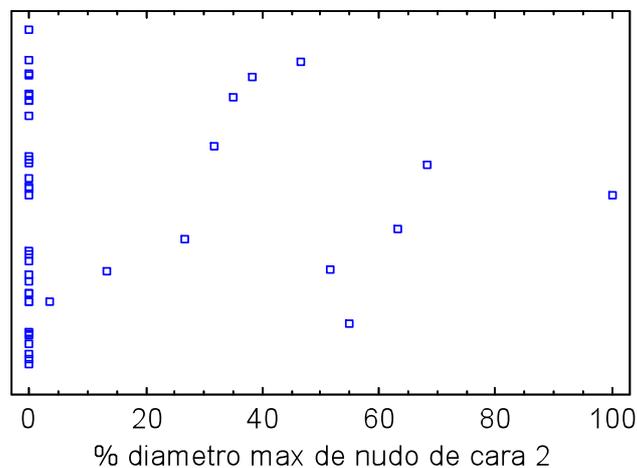


Figura 82. Grafico de Dispersión del porcentaje del ϕ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de probetas del grupo 2

1.2.2.3 Porcentaje de ϕ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de probetas del grupo 3.

- **Sesgo y curtosis**

Tabla 40. Sesgo y curtosis del porcentaje del ϕ máximo de un nudo de car presente en el 1/3 central de probetas del grupo 3

Sesgo Estandarizado	2,10845
Curtosis Estandarizada	-0,386362

- **Grafico de Probabilidad Normal**

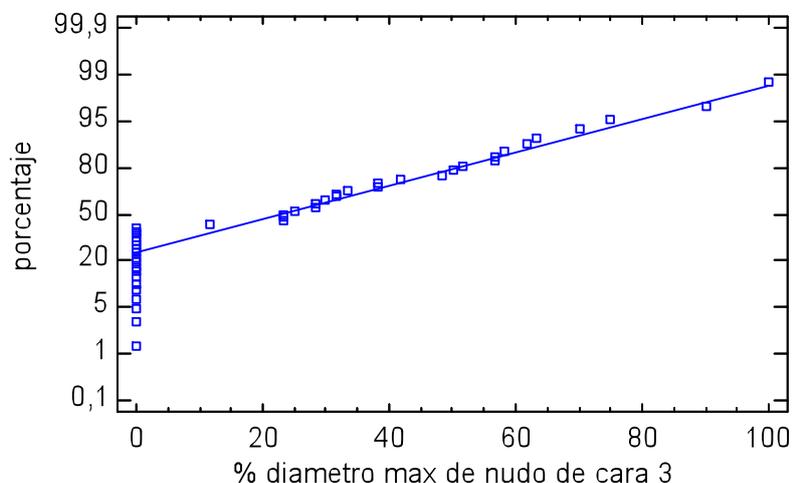


Figura 83. Grafico de P. Normal del porcentaje del □ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de probetas del grupo 3

- **Grafico de Dispersión.**

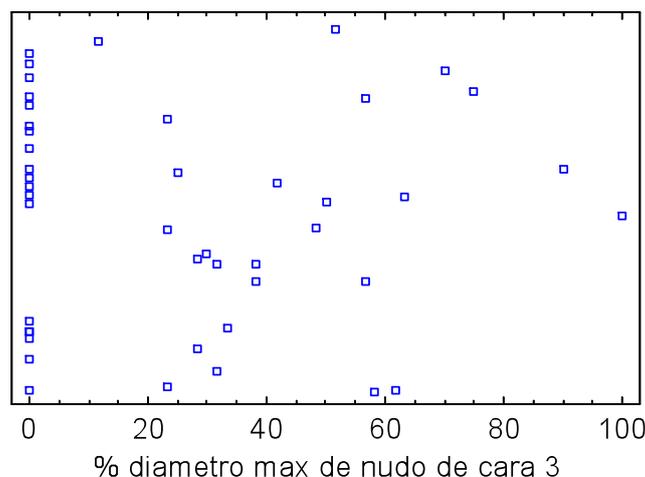


Figura 84. Grafico de Dispersión del porcentaje del □ máximo de un nudo de cara presente en el 1/3 central de probetas del grupo 3

1.2.3 Análisis descriptivo del MOR, MOE y de la densidad en vigas macizas.

1.2.3.1 MOR.

- **Sesgo y curtosis**

Tabla 41. Sesgo y curtosis para MOR en vigas macizas

Sesgo Estandarizado	2,54614
Curtosis Estandarizada	0,939134

- **Grafico de Probabilidad Normal**

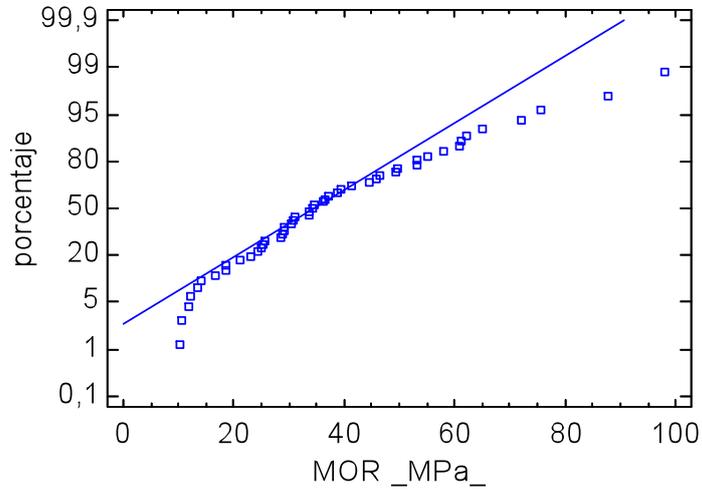


Figura 85. Grafico de P. Normal del MOR para vigas macizas

- **Grafico de Dispersión.**

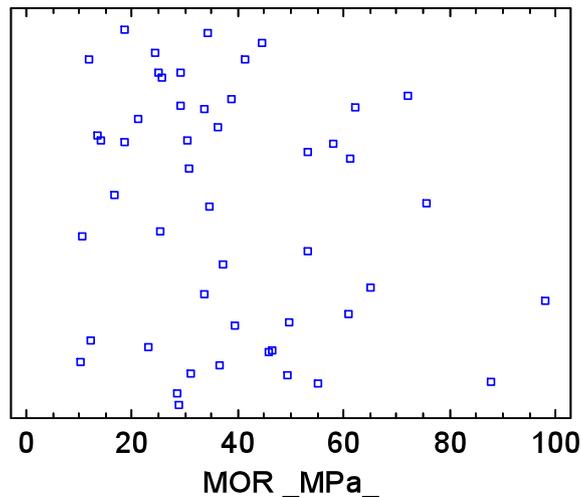


Figura 86. Grafico de Dispersión del MOR para vigas macizas

1.2.3.2 MOE.

- **Sesgo y curtosis**

Tabla 42 Sesgo y curtosis para MOE en vigas macizas.

Sesgo Estandarizado	2,08814
Curtosis Estandarizada	-0,641805

- **Grafico de Probabilidad Normal**

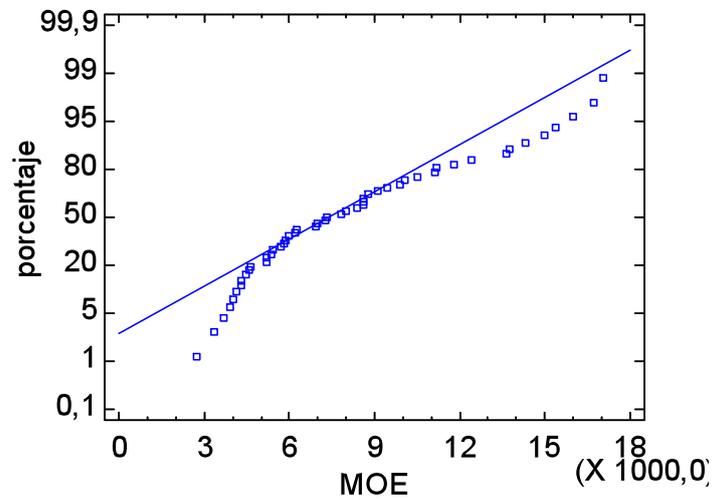


Figura 87. Grafico de P. Normal del MOE para vigas macizas

- **Grafico de Dispersión.**

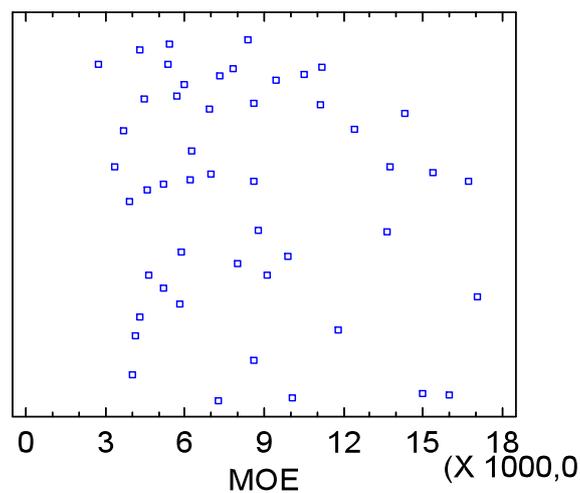


Figura 88. Grafico de Dispersión del MOE para vigas macizas

1.2.3.3 Densidad.

- **Sesgo y curtosis**

Tabla 43 Sesgo y curtosis para densidad en vigas macizas.

Sesgo Estandarizado	0,522424
Curtosis Estandarizada	-1,21322

- **Grafico de Probabilidad Normal**

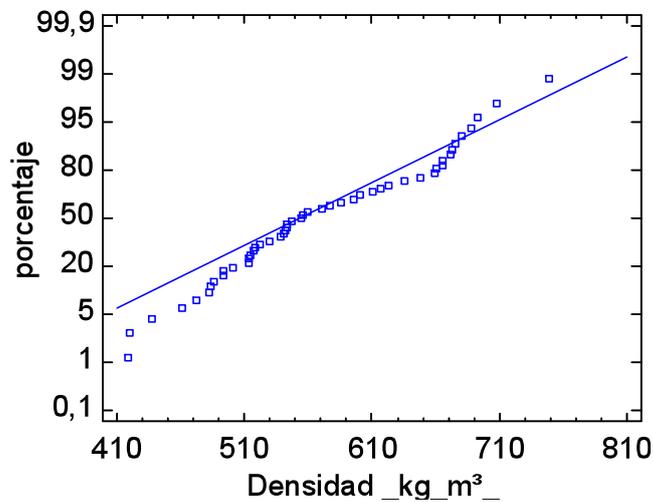


Figura 89. Grafico de P. Normal de la densidad para vigas macizas

- **Grafico de Dispersión.**

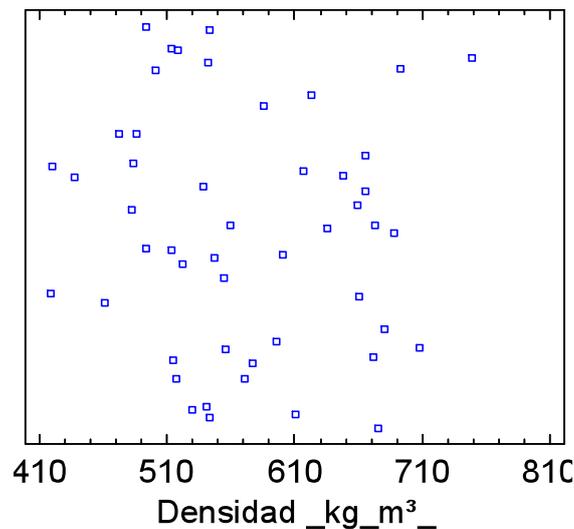


Figura 90. Grafico de Dispersión de la densidad para vigas macizas

1.2.4 Análisis descriptivo del MOR, MOE y de la densidad en vigas trío.

1.2.4.1 MOR.

- **Sesgo y curtosis**

Tabla 44 Sesgo y curtosis para MOR en vigas trío.

Sesgo Estandarizado	0,0909039
---------------------	-----------

Curtosis Estandarizada	0,114545
-------------------------------	----------

- **Gráfico de Probabilidad Normal**

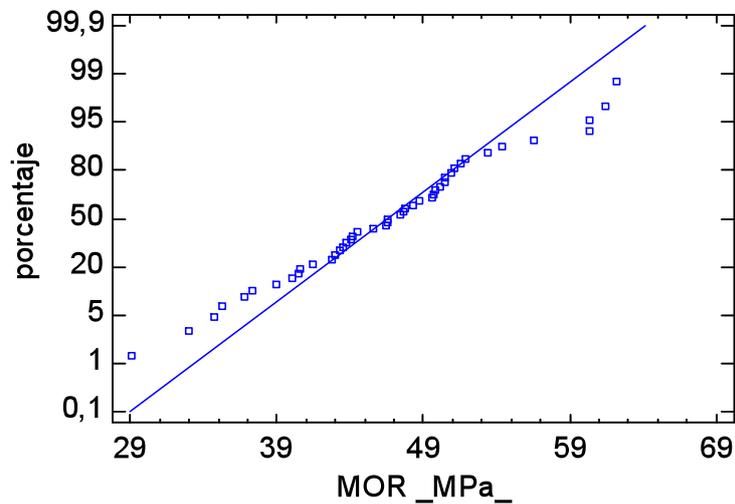


Figura 91. Gráfico de P. Normal del MOR para vigas trío

- **Gráfico de Dispersión.**

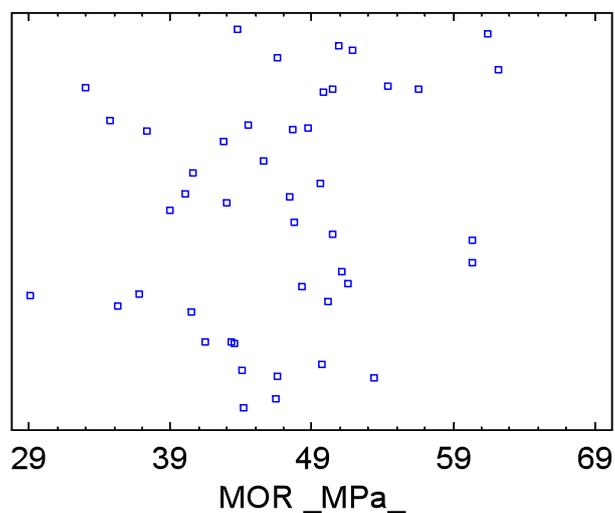


Figura 92. Gráfico de Dispersión del MOR para vigas trío

1.2.4.2 MOE.

- **Sesgo y curtosis**

Tabla 45 Sesgo y curtosis para MOE en vigas trío.

Sesgo Estandarizado	0,7117
Curtosis Estandarizada	-1,47881

- **Grafico de Probabilidad Normal**

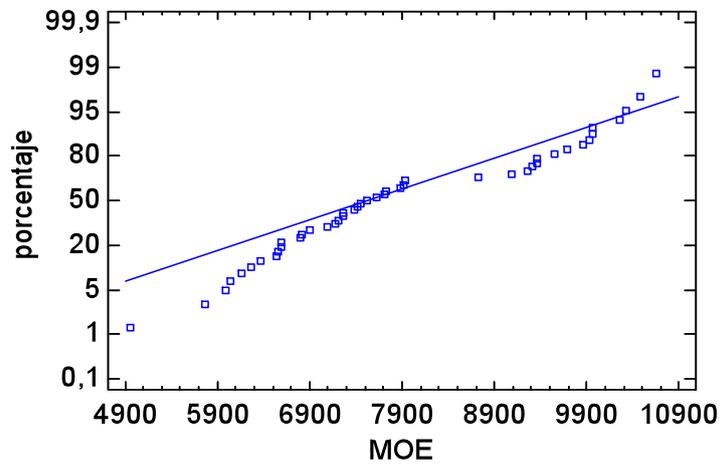


Figura 93. Grafico de P. Normal del MOE para vigas trío

- **Grafico de Dispersión.**

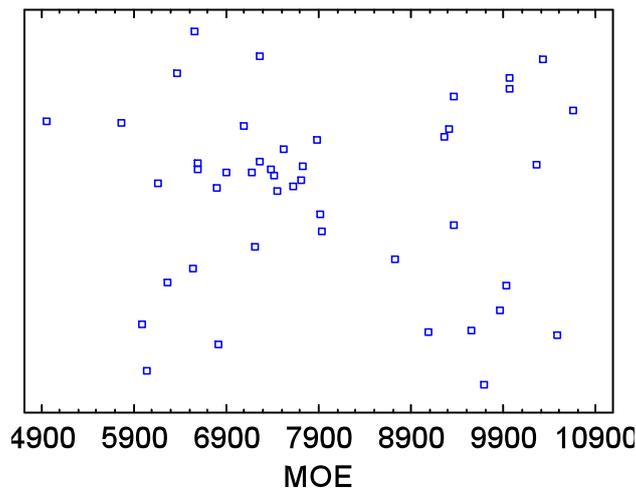


Figura 94. Grafico de Dispersión del MOE para vigas trío

1.2.4.3 Densidad.

- **Sesgo y curtosis**

Tabla 46. Sesgo y curtosis para densidad en vigas trío

Sesgo Estandarizado	1,1732
Curtosis Estandarizada	0,0247806

- **Grafico de Probabilidad Normal**

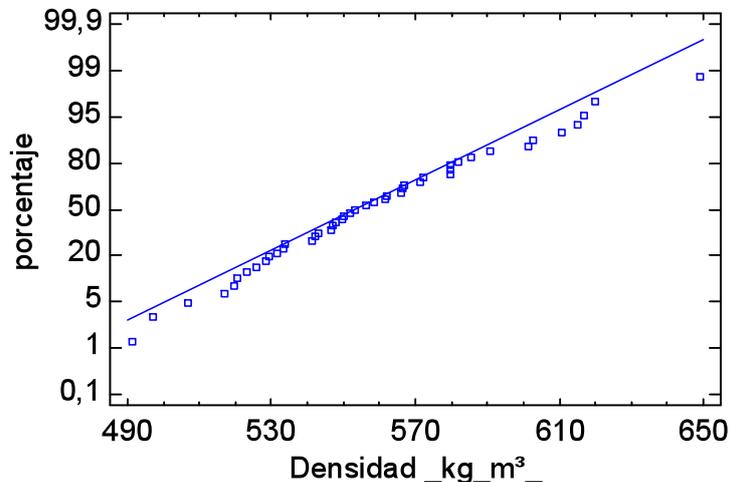


Figura 95. Grafico de P. Normal de la densidad para vigas trío

- **Grafico de Dispersión.**

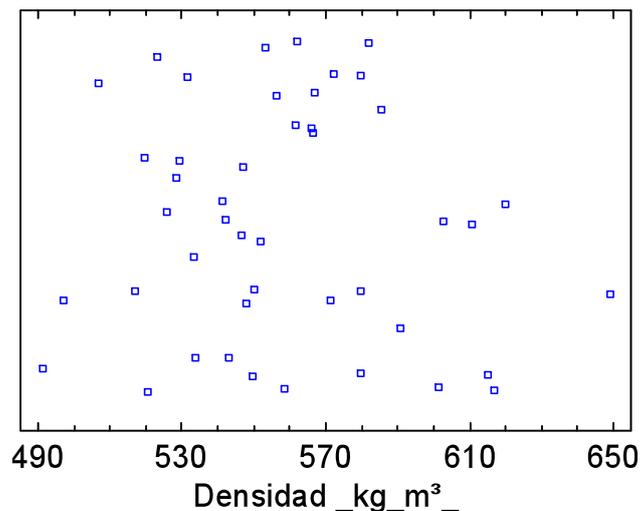


Figura 96. Grafico de Dispersión de la densidad para vigas trío

1.3 Estadística Predictiva.

1.3.1 Regresiones lineales simples. Análisis residuales.

1.3.1.1 MOR vs densidad en vigas macizas.

- **Sesgo y curtosis**

Tabla 47. Sesgo y curtosis del análisis de residuales de MOR vs densidad en vigas macizas

Sesgo Estandarizado	-0,290583
Curtosis Estandarizada	0,0471136

- **Grafico de Probabilidad Normal**

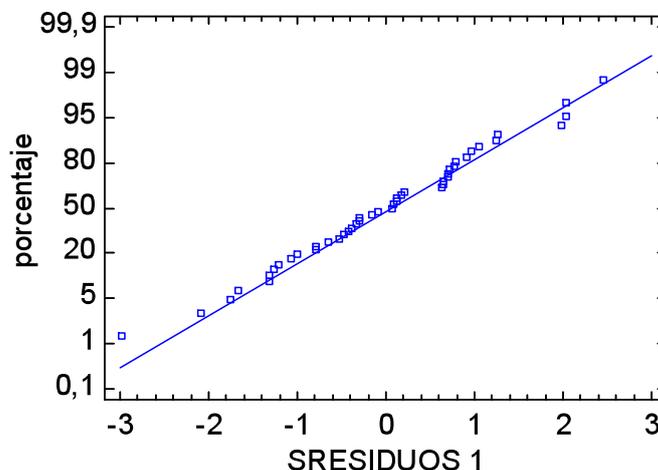


Figura 97. Grafico de P. Normal del análisis de residuos de MOR vs densidad en vigas macizas

- **Grafico de Densidad Suavizada.**

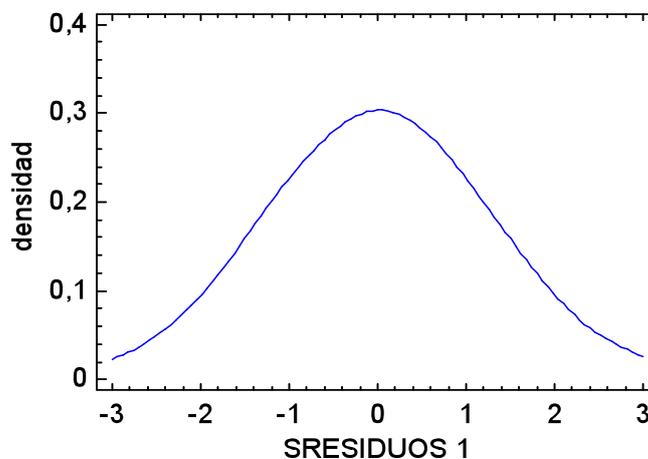


Figura 98. Grafico de Densidad Suavizada del análisis de residuos de MOR vs densidad en vigas macizas

- **Prueba de Normalidad.**

Tabla 48. Prueba de Normalidad para Sresiduos1 de MOR vs densidad en vigas macizas

Prueba de Normalidad	Estadístico	P-Valor
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,986331	0,93151

En la tabla anterior podemos observar que el p-valor es mucho mayor que 0,05, por lo tanto no podemos rechazar que Sresiduos1 provenga de una distribución normal con un 95% de confianza.

1.3.1.2 MOE vs densidad en vigas macizas.

- Sesgo y curtosis

Tabla 49. Sesgo y curtosis del análisis de residuales de MOE vs densidad en vigas macizas

Sesgo Estandarizado	0,780401
Curtosis Estandarizada	-0,483042

- Grafico de Probabilidad Normal

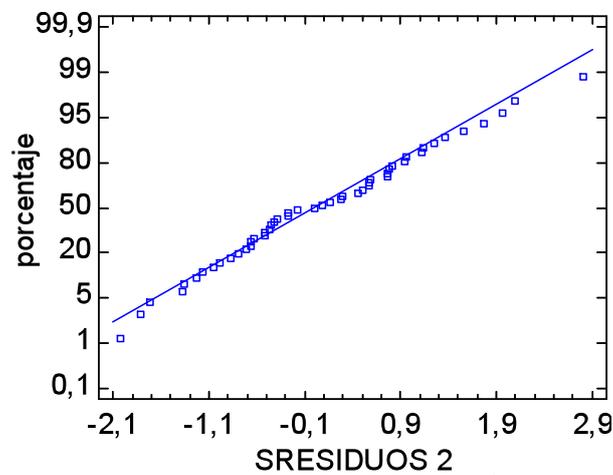


Figura 99. Grafico de P. Normal del análisis de residuales de MOE vs densidad en vigas macizas

- Grafico de Densidad Suavizada.

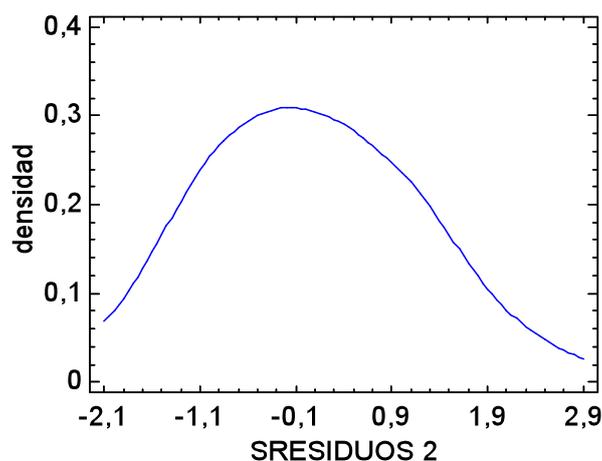


Figura 100. Grafico de Densidad Suavizada del análisis de residuales de MOE vs densidad en vigas macizas

- Prueba de Normalidad.

Tabla 50 Prueba de Normalidad para Sresiduos2 de MOE vs densidad en vigas macizas.

Prueba de Normalidad	Estadístico	P-Valor
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,980618	0,755816

En la tabla anterior podemos observar que el p-valor es mucho mayor que 0,05, por lo tanto no podemos rechazar que Sresiduos2 provenga de una distribución normal con un 95% de confianza.

1.3.1.3 MOE vs densidad en vigas trío.

- Sesgo y curtosis

Tabla 51. Sesgo y curtosis del análisis de residuales de MOE vs densidad en vigas trío

Sesgo Estandarizado	-0,290583
Curtosis Estandarizada	0,0471136

- Grafico de Probabilidad Normal

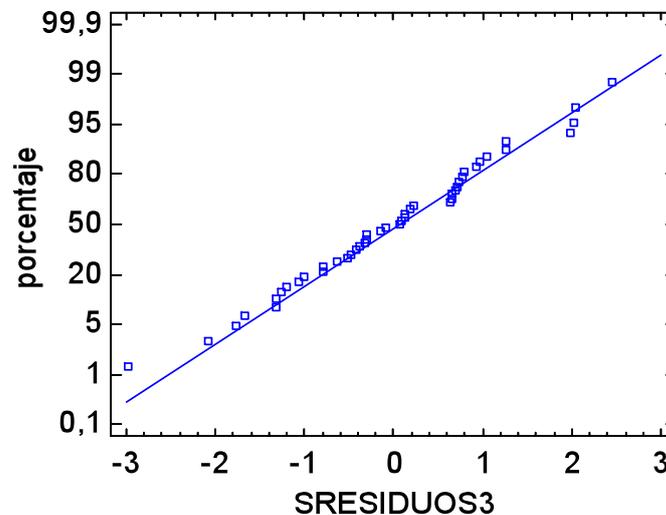


Figura 101. Grafico de P. Normal del análisis de residuales de MOE vs densidad en vigas trío

- **Grafico de Densidad Suavizada.**

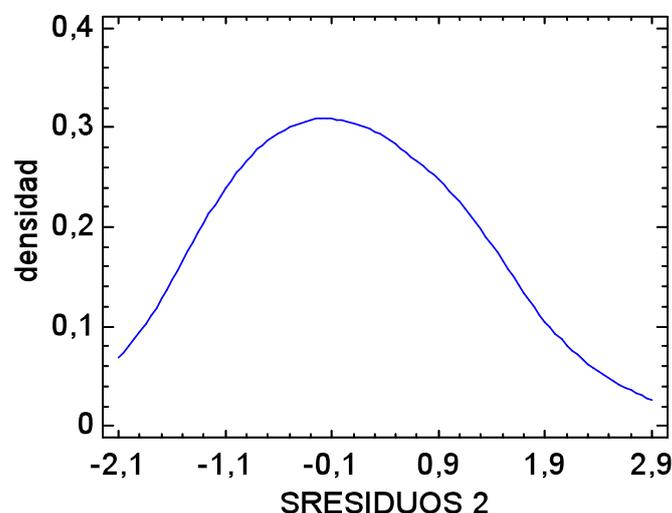


Figura 102. Grafico de Densidad Suavizada del análisis de residuales de MOE vs densidad en vigas trío

- **Prueba de Normalidad.**

Tabla 52. Prueba de Normalidad para Sresiduos3 de MOE vs densidad en vigas trío

Prueba de Normalidad	Estadístico	P-Valor
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,986331	0,93151

En la tabla anterior podemos observar que el p-valor es mucho mayor que 0,05, por lo tanto no podemos rechazar que Sresiduos3 provenga de una distribución normal con un 95% de confianza.

