

**UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA**  
**DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA**



**TESIS DOCTORAL**

**Análisis y desarrollo de tableros de caña común  
(Arundo donax L.) con cemento para su uso como  
material de construcción**

**Autora**

**Aránzazu Alejandra Ferrández García**

**Directores**

**Manuel Ferrández-Villena García**

**M<sup>a</sup> Teresa Ferrández García**

**Julio 2017**





D. Manuel Ferrández-Villena García, Dr. Ingeniero Industrial, Profesor Titular de Universidad del Área de Ingeniería Agroforestal del Departamento de Ingeniería de la Universidad Miguel Hernández y D<sup>ña</sup>. M<sup>a</sup> Teresa Ferrández García, Dra. Arquitecto, Profesora Contratado Doctor del Área de Ingeniería Agroforestal del Departamento de Ingeniería de la Universidad Miguel Hernández

## INFORMAN

Que la Tesis Doctoral que lleva por título “*Análisis y desarrollo de tableros de caña común (Arundo donax L.) con cemento para su uso como material de construcción*”, de la que es autora la Arquitecto D<sup>ña</sup>. Aránzazu Alejandra Ferrández García, ha sido realizada íntegramente bajo nuestra dirección y supervisión, en el Departamento de Ingeniería, en la Escuela Politécnica Superior de Orihuela perteneciente a la Universidad Miguel Hernández, durante el periodo comprendido entre los años 2014 y 2017.

Considerando que se trata de un trabajo original de investigación que reúne los requisitos establecidos en el R.D. 1393/2007, de 29 de octubre (B.O.E. de 30 de octubre de 2007), autorizamos su presentación ante la Secretaría de la Comisión de Doctorado de la Universidad Miguel Hernández.

Y para que conste a los efectos oportunos, expido el presente informe en Orihuela, a 24 de Julio de 2017.

Los Directores de la Tesis

Fdo: Manuel Ferrández-Villena García

Fdo: M<sup>a</sup> Teresa Ferrández García





D. José Ramón Díaz Sánchez, Dr. Ingeniero Agrónomo, Catedrático de Universidad y Director del Departamento de Tecnología Agroalimentaria de la Universidad Miguel Hernández,

## **INFORMA**

Que atendiendo al informe presentado por el Dr. Manuel Ferrández-Villena García, Ingeniero Industrial, Profesor Titular de Universidad del Área de Ingeniería Agroforestal del Departamento de Ingeniería de la Universidad Miguel Hernández y la Dra. M<sup>a</sup> Teresa Ferrández García, Arquitecto, Profesora Contratada Doctor del Área de Ingeniería Agroforestal del Departamento de Ingeniería de la Universidad Miguel Hernández, la Tesis Doctoral titulada “ANÁLISIS Y DESARROLLO DE TABLEROS DE CAÑA COMÚN (ARUNDO DONAX L.) CON CEMENTO PARA SU USO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN” de la que es autora la Arquitecto D<sup>ña</sup>. Aránzazu Alejandra Ferrández García y que ha sido realizada bajo la dirección de los Doctores citados, puede ser presentada para su correspondiente exposición pública.

Y para que conste a los efectos oportunos, firmo el presente informe en Orihuela, a 24 de Julio de 2017.

El Director del Departamento

Fdo: José Ramón Díaz Sánchez



# **Análisis y desarrollo de tableros de caña común (Arundo donax L.) con cemento para su uso como material de construcción**

Memoria que presenta la Arquitecto Dña. Aránzazu Alejandra Ferrández  
García para optar al grado de Doctor



Los Directores de la Tesis

Fdo: Manuel Ferrández-Villena García

Fdo: M<sup>a</sup> Teresa Ferrández García



## RESUMEN

La construcción de edificios ocasiona un gran impacto en el ambiente global a través de la energía utilizada en la edificación, en el uso y en la demolición, además del consumo energético de proveer a los edificios de los servicios necesarios y de la energía contenida en los materiales utilizados. La sociedad en general elige la opción aparentemente más fácil y más barata, como es la incineración o el vertido de los residuos, no teniendo en cuenta los problemas ambientales y costes reales a largo plazo. Esta tendencia está cambiando, siendo cada vez mayor la concienciación sobre la utilización de materiales reciclables y el uso de los residuos ya que existe una preocupación social por el cambio climático.

Por otro lado, la caña común es una planta salvaje que crece a lo largo de los cauces de agua y se la considera una especie invasora que constituye un problema ambiental. El uso de esta planta puede ser una solución doble, prevenir un problema ambiental y dar una respuesta a la demanda del mercado.

Por todo ello, se planteó utilizar residuos de caña común como material de construcción por lo que, para este trabajo de investigación, se elaboraron tableros de partículas de caña de tamaño 0,25 mm aglomeradas a base de cemento con adición de almidón. En concreto, se fabricaron 28 clases de tableros con combinaciones de diferentes proporciones de agua, almidón y cemento a igual temperatura y presión, pero con diferentes tiempos de prensado. Decir además que se confeccionaron con menor cantidad de cemento, menos tiempo y menor consumo de energía que los tableros industriales de madera-cemento.

La metodología seguida fue elaboración de los tableros mediante proceso seco, la realización de ensayos experimentales en laboratorio para averiguar sus propiedades y obtención de micrografías para analizar la adhesión entre las partículas. Posteriormente el análisis estadístico de los datos de los ensayos.

Los tableros de partículas obtenidos (usando residuos de cañas) eran sostenibles y de alta calidad, tableros de altas prestaciones estructurales. Las propiedades mecánicas se mejoraron aumentando el contenido de almidón y se obtuvo mayor resistencia al agua, aumentando el contenido de cemento. Todos los tableros presentaron una conductividad térmica muy baja y pueden considerarse aislantes térmicos.

Con partículas de caña se pueden elaborar compuestos cementosos que podrían utilizarse para la fabricación de diversos componentes de la construcción. Por lo tanto, la utilización de estos residuos en la fabricación de materiales de construcción ligados con cemento-almidón, ofrecen una alternativa atractiva.



## INDICE GENERAL

<b>1 – ANTECEDENTES</b> .....	1
1.1 – INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.1 – La construcción industrial .....	3
1.1.2 – Materiales compuestos .....	4
1.1.3 – Materiales reforzados con fibras vegetales .....	5
1.1.4 – Tableros de partículas .....	6
1.1.5 – Tableros de madera-cemento .....	6
1.2 – MATERIALES .....	10
1.2.1 – La caña común ( <i>Arundo donax</i> L.) .....	10
1.2.2 – Estructura de la célula de caña común .....	12
1.2.3 – El cemento y los aditivos orgánicos.....	13
1.2.4 – El almidón .....	15
1.3 – ESTADO DE LA TÉCNICA .....	16
1.3.1 – Los compuestos de biomasa vegetal y cemento.....	16
1.3.2 – Cemento y almidón .....	19
1.3.3 – Tableros de partículas de caña común ( <i>Arundo donax</i> L.)	19
1.4 – PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS .....	20
<b>2 – OBJETIVOS</b> .....	21
2.1 – OBJETIVO GENERAL .....	21
2.2 – OBJETIVOS CONCRETOS DE LA TESIS .....	21
<b>3 – MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	23
3.1 – MATERIALES .....	23
3.1.1 – Caña común ( <i>Arundo donax</i> L.).....	23
3.1.2 – Cemento Portland.....	24
3.1.3 – Agua .....	24
3.1.4 – Almidón de patata .....	24
3.2 – METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO.....	25
3.2.1 – Tamaño del experimento.....	25
3.2.2 – Clases y composición de los tableros caña-cemento .....	27
3.2.3 – Proceso de fabricación .....	28
3.2.4 – Ensayos experimentales .....	28

3.2.4.1 – Análisis de tableros usando microscopía electrónica de barrido (SEM) .....	31
3.2.4.2 – Densidad de los tableros .....	32
3.2.4.3 – Ensayo de humedad .....	33
3.2.4.4 – Ensayo a flexión.....	34
3.2.4.5 – Ensayo a tracción. Ensayo de cohesión interna ....	35
3.2.4.6 – Ensayo del hinchamiento en espesor .....	36
3.2.4.7 – Ensayo de absorción de agua.....	38
3.2.4.8 – Ensayo de determinación de la resistencia al arranque de tornillo.....	39
3.2.4.9 – Máquina de ensayos universal .....	41
3.2.4.10 – Determinación de la conductividad térmica .....	43
3.2.5 – Análisis estadístico de los datos según normas EN.....	44
3.2.6 – Influencia de las variables de fabricación.....	45
3.2.7 – Clasificación de los tableros de partículas.....	47
<b>4 – RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>49</b>
4.1 – FABRICACIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE TABLEROS .....	49
4.2 – ANÁLISIS DE LOS TABLEROS USANDO MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM).....	50
4.3 – RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DENSIDAD .....	57
4.3.1 – Análisis de la influencia del tipo de tablero en densidad..	59
4.3.2 – Análisis de la influencia del tiempo de exposición.....	61
4.4 – RESULTADOS DEL LOS ENSAYOS DE HUMEDAD .....	63
4.4.1 – Análisis de la influencia del tipo y tiempo de exposición en la prensa sobre el porcentaje de humedad del tablero...	64
4.5 – RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A FLEXIÓN .....	68
4.5.1 – Análisis de la influencia del tipo de tablero sobre la resistencia a flexión.....	70
4.5.2 – Análisis de la influencia del tiempo en la prensa sobre la resistencia a flexión.....	71
4.6 – MÓDULO DE ELASTICIDAD EN FLEXIÓN.....	75
4.6.1 – Análisis de la influencia de la clase de tablero sobre el módulo de elasticidad en flexión .....	76
4.6.2 – Análisis de la influencia del tiempo en prensa sobre el módulo de elasticidad .....	78

4.7 – RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A TRACCIÓN PERPENDICULAR A LAS CARAS. ENSAYO DE COHESIÓN INTERNA .....	82
4.7.1 – Análisis de la influencia del tipo de tablero sobre la resistencia a tracción. ....	84
4.7.2 – Análisis de la influencia del tiempo en prensa sobre la resistencia a tracción. ....	86
4.8 – RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE HINCHAMIENTO EN ESPESOR DESPUÉS DE INMERSIÓN EN AGUA.....	89
4.8.1 – Análisis de la influencia del tipo de tablero sobre el porcentaje de hinchamiento en espesor.....	90
4.8.2 – Análisis de la influencia del tiempo en prensa sobre el hinchamiento en espesor. ....	92
4.9 – RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ABSORCIÓN DE AGUA DESPUÉS DE INMERSIÓN.....	95
4.10 – RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ARRANQUE DE TORNILLO EN LA CARA.....	99
4.10.1 – Análisis de la influencia del tipo de tablero sobre la resistencia al arranque de tornillo en la cara del tablero..	101
4.10.2 – Análisis de la influencia del tiempo en la prensa sobre la resistencia al arranque de tornillo en la cara del tablero..	102
4.11 –RESULTADOS DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.....	105
4.11.1 – Análisis de la influencia del tipo de tablero sobre la conductividad térmica.....	106
4.11.2 – Análisis de la influencia del tiempo en la prensa sobre la conductividad térmica.....	107
4.11.3 – Análisis de la influencia del espesor sobre la conductividad térmica. ....	108
4.11.4 – Análisis de la influencia de la densidad sobre la conductividad térmica. ....	109
4.12 – COMPROBACIÓN DE LA DURABILIDAD DE LAS FIBRAS EN CEMENTO.....	110
4.13 – DISCUSIÓN.....	112
<b>5 – CONCLUSIONES .....</b>	<b>117</b>
<b>6 – BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>119</b>



## INDICE DE TABLAS

<b>Número</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pag.</b>
Tabla 3.1	Exigencias mecánicas y físicas .....	24
Tabla 3.2	Ensayo y número de probetas de cada tablero .....	27
Tabla 3.3	Clase de tableros fabricados.....	28
Tabla 3.4	Datos técnicos de la máquina de ensayos .....	42
Tabla 3.5	Requisitos de los tableros de partículas según la norma EN 312 (2010) .....	47
Tabla 4.1	Variables de fabricación de tableros .....	49
Tabla 4.2	Informe. Densidad respecto al tipo de tablero y tiempo en prensa .....	58
Tabla 4.3	Análisis de la varianza. Densidad *tipo de tablero .....	60
Tabla 4.4	Estadísticos de contraste. Densidad *tipo de tablero .....	60
Tabla 4.5	Valores medios. Densidad *tiempo en prensa .....	61
Tabla 4.6	ANOVA. Densidad *tiempo en prensa.....	61
Tabla 4.7	Estadístico de contraste. Densidad *tipo de tablero.....	61
Tabla 4.8	Correlaciones de muestras relacionadas. Densidad *tipo de tablero ....	62
Tabla 4.9	Informe. Humedad relativa del tablero *tipo de tablero .....	63
Tabla 4.10	Informe. Porcentaje de humedad del tablero *tipo de prensa .....	63
Tabla 4.11	ANOVA. Porcentaje de humedad del tablero *tipo de tablero.....	65
Tabla 4.12	Estadísticos de contraste. Porcentaje de humedad del tablero *tipo de tablero.....	65
Tabla 4.13	ANOVA. Porcentaje de humedad del tablero *tiempo en prensa.....	65
Tabla 4.14	Estadísticos de contraste. % de humedad *tiempo en prensa .....	66
Tabla 4.15	Correlaciones parciales. % de humedad *tipo tablero *tiempo en prensa .....	66
Tabla 4.16	Valores medios de la resistencia a flexión en función de la clase de tablero.....	69
Tabla 4.17	Valores medios de resistencia a flexión en función del tipo de tablero.....	70
Tabla 4.18	ANOVA. Resistencia a flexión en función del tipo de tablero.....	71
Tabla 4.19	Chi-cuadrado. Resistencia a flexión en función del tipo de tablero.....	71
Tabla 4.20	Informe. Tensión rotura a flexión *tiempo en prensa .....	72
Tabla 4.21	ANOVA. Tensión rotura a flexión *tiempo en prensa .....	72

<b>Número</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pag.</b>
Tabla 4.22	Estadístico de contraste. Tensión de rotura a flexión *tiempo en prensa .....	72
Tabla 4.23	Medidas de asociación .....	73
Tabla 4.24	Correlaciones. Tensión a flexión .....	73
Tabla 4.25	Informe. Módulo de elasticidad *tipo y tiempo de prensa.....	75
Tabla 4.26	Mensajes de la entidad Estación .....	77
Tabla 4.27	ANOVA. Módulo de elasticidad.....	77
Tabla 4.28	Prueba chi-cuadrado. Módulo de elasticidad *tipo tablero).....	78
Tabla 4.29	Informe. Módulo de elasticidad *tiempo de prensa.....	78
Tabla 4.30	ANOVA. Módulo de elasticidad *tiempo de prensa .....	79
Tabla 4.31	Chi-cuadrado. Módulo de elasticidad *tiempo en prensa.....	79
Tabla 4.32	Correlaciones. Módulo de elasticidad a flexión.....	79
Tabla 4.33	Valores de cohesión interna en función del tipo de tablero y tiempo en prensa .....	82
Tabla 4.34	Valores de resistencia a tracción en función del tipo de tablero.....	84
Tabla 4.35	ANOVA. Tracción perpendicular *tipo de tablero.....	85
Tabla 4.36	Medidas de asociación. Tracción perpendicular *tipo de tablero.....	85
Tabla 4.37	Prueba de contraste. Tracción *tipo de tablero.....	85
Tabla 4.38	Valores medios de resistencia a tracción en función del tiempo .....	86
Tabla 4.39	ANOVA. Resistencia tracción *tiempo en prensa.....	86
Tabla 4.40	Medidas de asociación .....	86
Tabla 4.41	Chi-cuadrado. Tracción *tiempo en prensa .....	86
Tabla 4.42	Correlaciones. Tracción *tiempo en prensa *tipo tablero .....	86
Tabla 4.43	Resultados medios del % de hinchamiento en espesor después de permanecer sumergido en agua en función del tipo y tiempo en la prensa de platos calientes.....	89
Tabla 4.44	ANOVA. % Hinchamiento en espesor *tipo de tablero .....	91
Tabla 4.45	Estadístico % Hinchamiento en espesor a las 2 h *tipo de tablero.....	92
Tabla 4.46	Estadístico % Hinchamiento en espesor a las 24 h *tipo de tablero.....	92
Tabla 4.47	ANOVA. % Hinchamiento en espesor *tiempo en prensa.....	93
Tabla 4.48	Correlaciones. % Hinchamiento 24 h *tipo de tablero *tiempo en prensa .....	94
Tabla 4.49	Informe. % de Absorción de agua de los tableros después de 2h y 4 h sumergidos. () Desviación estándar .....	95

<b>Número</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pag.</b>
Tabla 4.50	ANOVA. % Absorción de agua 2h y 24 h en agua *tipo de tablero.....	96
Tabla 4.51	Chi-cuadrado. % Absorción de agua 2h en agua *tipo de tablero .....	96
Tabla 4.52	Chi-cuadrado. % Absorción de agua 24 h en agua *tipo de tablero .....	96
Tabla 4.53	ANOVA. % Absorción de agua 2h y 24 h en agua *tiempo en prensa .....	97
Tabla 4.54	Correlación. % Absorción de agua 2h y 24 h en agua .....	97
Tabla 4.55	Valores medios de arranque de tornillo en la cara del tablero .....	99
Tabla 4.56	ANOVA. Resistencia al arranque de tornillo en la cara del tablero *tipo de tablero.....	101
Tabla 4.57	Medidas de asociación. Resistencia al arranque de tornillo *tipo de tablero.....	102
Tabla 4.58	Chi-cuadrado. Resistencia al arranque de tornillo *tipo de tablero .....	102
Tabla 4.59	ANOVA. Resistencia al arranque de tornillo *tiempo en prensa .....	103
Tabla 4.60	Correlaciones. Resistencia al arranque de tornillo en la cara .....	103
Tabla 4.61	Informe. Conductividad térmica .....	105
Tabla 4.62	ANOVA. Conductividad térmica en función del tipo de tablero.....	106
Tabla 4.63	Medidas de asociación. Conductividad térmica en función del tipo de tablero.....	107
Tabla 4.64	Estadísticos de contraste. Conductividad térmica en función del tipo de tablero.....	107
Tabla 4.65	ANOVA. Conductividad térmica en función del tiempo en prensa.....	107
Tabla 4.66	ANOVA. Conductividad térmica en función del espesor del tablero...	108
Tabla 4.67	ANOVA. Conductividad térmica en función de la densidad del tablero.....	109
Tabla 4.68	Resultados medios de las propiedades experimentales de los tableros y su clasificación según la norma EN 312 (2010). ( ) Desviación estándar.....	112



## INDICE DE FIGURAS

<b>Número</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pag.</b>
Figura 1.1	<i>Arundo donax</i> L. (caña común) en proceso vegetativo y antes de ser segada .....	11
Figura 1.2	Envoltura de la hoja.....	11
Figura 1.3	Rizoma.....	11
Figura 1.4	Fibras longitudinales (interior de caña).....	13
Figura 1.5	Sección transversal caña.....	13
Figura 3.1	Cañas utilizadas para la fabricación de tableros .....	24
Figura 3.2	Plano de corte para la elaboración de las probetas de ensayo de un tablero.....	26
Figura 3.3	Esquema de despiece del tablero.....	26
Figura 3.4	Desfibriladora de cuchillas.....	29
Figura 3.5	Cuchillas de la desfibriladora.....	29
Figura 3.6	Molde para formar la manta del tablero .....	29
Figura 3.7	Prensa de platos calientes.....	30
Figura 3.8	Cortadora mecánica.....	30
Figura 3.9	Punto de medida para determinación del espesor .....	33
Figura 3.10	Medidor de humedad de laboratorio .....	33
Figura 3.11	Ensayo normalizado (EN-310). Croquis de colocación de rodillos....	34
Figura 3.12	Probetas ensayo tracción perpendicular .....	36
Figura 3.13	Tacos de agarre de probetas .....	36
Figura 3.14	Cubeta para baño de agua con termostato.....	37
Figura 3.15	Algunas probetas en inmersión de agua.....	37
Figura 3.16	Algunas probetas después de inmersión de agua .....	38
Figura 3.17	Dispositivos mecánicos para arranque de tornillo en la cara .....	39
Figura 3.18	Taladro de las probetas para el ensayo de arranque de tornillo en la cara .....	40
Figura 3.19	Tornillo insertado en la probeta y el ensayo .....	40
Figura 3.20	Máquina de universal de ensayos.....	41
Figura 3.21	Equipo de conductividad térmica.....	44
Figura 4.1	Diferentes tableros de caña-cemento.....	50
Figura 4.2	Gránulos de cemento hidratados a 8 días de hidratación .....	51

<b>Número</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pag.</b>
Figura 4.3	Gel de almidón recubriendo los granos de cemento a 8 días de hidratación.....	51
Figura 4.4	Cubo de yeso rodeado de tobermorita gel a 8 días de hidratación.....	52
Figura 4.5	Tobermorita sobre un gel orgánico a 8 días de hidratación .....	52
Figura 4.6	Tobermorita gel.....	53
Figura 4.7	Tobermorita gel cristalizada a 8 días de hidratación.....	53
Figura 4.8	Belita a 8 días de hidratación .....	54
Figura 4.9	Tobermorita, alita y porlandita.....	54
Figura 4.10	Porlandita (SC3) sobre tobermorita .....	55
Figura 4.11	Fibras orgánicas de caña .....	55
Figura 4.12	Superficie del tablero a 8 días de hidratación .....	56
Figura 4.13	Superficie del tablero a 28 días de hidratación .....	57
Figura 4.14	Valor medio de densidad obtenido en cada tablero .....	59
Figura 4.15	Diagrama de barras de error de densidad en función de la clase de tablero.....	60
Figura 4.16	Diagrama de barras de error del % de humedad respecto a la clase de tablero.....	64
Figura 4.17	Diagrama de barras del % de humedad.....	67
Figura 4.18	Ejemplo de probetas para ensayos a flexión .....	68
Figura 4.19	Disposición de las probetas a flexión en la máquina de ensayos.....	68
Figura 4.20	Barras de error de la resistencia a flexión en función de la clase de tablero.....	74
Figura 4.21	Diagrama de barras del módulo de elasticidad en flexión en función de la clase de tablero.....	76
Figura 4.22	Diagrama de barras del módulo de elasticidad en función del tipo de adhesivo y el tiempo en prensa .....	80
Figura 4.23	Micrografía del tablero E2 a los 28 días de hidratación.	81
Figura 4.24	Cubos de yeso	81
Figura 4.25	Diagrama de barras de error de la resistencia a tracción y la clase de tablero.....	83
Figura 4.26	Diagrama de barras de la resistencia característica a tracción perpendicular en función del tipo y tiempo en prensa .....	88

<b>Número</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pag.</b>
Figura 4.27	Diagrama de barras de error del % de hinchamiento en espesor después de 2 h en agua en función del tipo de tablero .....	90
Figura 4.28	Diagrama de barras de error del % de hinchamiento en espesor después de 2 h en agua en función del tipo de tablero .....	91
Figura 4.29	Diagrama de barras de error del % de hinchamiento en espesor después de 24 h en agua en función del tiempo de prensa.....	93
Figura 4.30	Diagrama de barras del % hinchamiento en espesor a las 24 horas en función del tipo de tablero y tiempo.....	94
Figura 4.31	% Absorción de agua a las 2 h *tipo de tablero *tiempo en prensa....	98
Figura 4.32	% Absorción de agua a las 24 h *tipo de tablero *tiempo en prensa	98
Figura 4.33	Diagrama de barras de la resistencia al arranque de tornillo de cada tablero.....	101
Figura 4.34	Diagrama de barras de la resistencia al arranque de tornillo .....	104
Figura 4.35	Diagrama de barras de error conductividad térmica en función de la clase de tablero .....	106
Figura 4.36	Diagrama de la conductividad térmica en función de la clase de tablero.....	108
Figura 4.37	Diagrama de la conductividad térmica del tablero en función de la densidad y el tiempo.....	109
Figura 4.38	Resistencia a flexión de los tableros elaborados con cemento en función de la clase y el tiempo de fraguado .....	110
Figura 4.39	Módulo de elasticidad a flexión de los tableros elaborados con cemento en función de la clase y el tiempo de fraguado.....	111



## **1.- ANTECEDENTES.**

### **1.1. INTRODUCCIÓN.**

Actualmente existe una preocupación social por los temas ambientales, en particular, en lo que se refiere a cuestiones relacionadas con el cambio climático, la biodiversidad y el desarrollo sostenible. La importancia que se le da hoy en día a la sostenibilidad es visible en las investigaciones donde se fomenta el desarrollo de tecnologías y productos más respetuosos con el medio ambiente, el ahorro y la eficiencia energética, y el uso racional de los recursos naturales.

La construcción de edificios ocasiona un gran impacto en el ambiente global a través de la energía utilizada en la edificación, en el uso y en la demolición, además del consumo energético de proveer a los edificios de los servicios necesarios y de la energía contenida en los materiales utilizados. La preocupación por el medio ambiente y la eficiencia energética, así como la necesidad de una vivienda digna, ha adquirido gran fuerza dentro de la sociedad, dando paso a múltiples propuestas en el área de construcción, con el objetivo de satisfacer la demanda de los usuarios.

Existen nuevas acepciones sobre construcción bajo un mismo denominador común: "la reducción del impacto ambiental provocado por la construcción, ofreciendo importantes ventajas medioambientales y socioeconómicas". Los conceptos como Construcción Verde, Construcción Sostenible, Construcción Bioclimática, Construcción Ecológica, Arquitectura Pasiva, Arquitectura Solar (Pasiva y Activa), Edificación de Elevada Eficiencia Energética y Bioconstrucción están relacionados en mayor o menor medida con el compromiso existente entre Arquitectura y Medio Ambiente. Aunque estas ideas podrían entenderse como sinónimos, en realidad, definen un amplio abanico de conceptos que abarca desde la preocupación por la composición de los materiales, hasta proyectos alternativos de organización socioeconómica.

La sociedad en general elige la opción aparentemente más fácil y más barata, como es la incineración o el vertido de los residuos, no teniendo en cuenta los problemas ambientales y costes reales a largo plazo. Esta tendencia está cambiando, siendo cada vez mayor la concienciación sobre la utilización de materiales reciclables y el uso de los residuos.

En la investigación están tomando auge las iniciativas que promueven la eco-innovación o eco-eficiencia. Para promover que la edificación sea sostenible, se indica el empleo de nuevos materiales reciclables, elaborados con el mínimo gasto energético y optimizando su ciclo de vida.

Existe gran inquietud entre los investigadores por el reciclaje de materiales y la utilización de residuos, para evitar la contaminación ambiental. Esto ha dado mayor auge a la denominada “construcción verde” que se rige sobre la base de una serie de objetivos:

- ✓ Minimizar el consumo de recursos naturales a lo largo de todo el ciclo de vida del edificio.
- ✓ Minimizar la polución y las emisiones contaminantes durante el ciclo de vida de la obra.
- ✓ Proteger el ambiente natural.
- ✓ Crear un espacio confortable, saludable y benigno para quienes lo habiten.
- ✓ Incorporar calidad, funcionalidad y rendimiento en relación al objetivo del edificio.
- ✓ Realizar un balance entre la calidad ambiental que ofrece y su valor económico.

En la construcción verde se racionaliza el consumo de los recursos naturales, incrementando el uso de materiales de construcción a base de fibras vegetales, considerando que dichos productos son fácilmente reciclables y no son agresivos con el medio ambiente.

En los países en desarrollo el crecimiento de las industrias basadas en productos agroforestales ha acelerado la producción de residuos vegetales. Actualmente estos residuos son o bien quemados o enterrados en la tierra. Estos enfoques causan diversos problemas ambientales como la contaminación del aire, emisión de gases de efecto invernadero y la ocupación de tierras útiles. Los crecientes problemas que están causando el enterrado de dichos residuos debido a los lixiviados y contaminación de acuíferos, están agravando aún más el problema. También, la biodegradación de los residuos lignocelulósicos en los vertederos, emite metano que es un gas de efecto invernadero.

Además, estos métodos de eliminación son sin duda el desperdicio de un recurso natural. Utilizar en la producción de materiales de construcción fibras vegetales que actualmente se consideran residuos biológicos, contribuirá a una mejora en la utilización de los recursos naturales, como indica la construcción verde.

La política europea de medio ambiente, la Directiva marco sobre residuos, la Directiva Europea sobre incineración de residuos y la Directiva sobre vertederos, indican que la utilización de residuos en la elaboración de nuevos productos, no sólo evita la eliminación del residuo o incineración, sino también que producirán una mejora porque estos productos serán sumideros de carbono y retendrán el carbono absorbido de la atmósfera durante toda su vida útil. Luego los beneficios más importantes de la correcta gestión de los residuos biológicos, además de evitar las emisiones de gases de efecto invernadero, son la utilización eficiente de los recursos y el secuestro de carbono.

Teniendo en cuenta la necesidad de nuevos materiales de construcción no contaminantes, fácilmente reciclables y la utilización de residuos para su fabricación, en el presente trabajo, se investiga la manufactura y evaluación de un panel a partir de un residuo vegetal como es la caña común (*Arundo donax* L.). Para ello se realiza un estudio previo del estado de la técnica de la construcción industrial, los materiales compuestos, los materiales reforzados con fibras, los tableros de partículas y de maderamiento, biomasa vegetal con cemento y sobre los componentes del tablero propuesto (cemento, almidón y caña común).

### **1.1.1. LA CONSTRUCCIÓN INDUSTRIAL.**

A partir de 1950 comenzó en Europa la construcción de forma industrial. Se elaboraron paneles prefabricados de gran peso en las fábricas que posteriormente se montaban en obra. Debido a que estos primeros prefabricados necesitaban complejos mecanismos de transporte y montaje y no abarataban la obra, la construcción industrial decayó.

El desarrollo de este tipo de construcción se ha retrasado enormemente debido a la actual crisis económica y menor coste de la mano de obra. El uso de métodos industriales de fabricación se ha reducido a la prefabricación de paneles ligeros.

En las particiones interiores es donde la industrialización se ha desarrollado, ahorrando mucha mano de obra, elaborando paneles de yeso, componentes con núcleo de poliestireno de poco peso, placas de cartón yeso, paneles de cemento con fibra de vidrio y vermiculita, hormigón celular, paneles de partículas y revestimientos de contrachapado.

Con la fabricación de paneles prefabricados se pretende obtener no solo un menor coste, sino también que los prefabricados sean productos sostenibles y que produzcan un ahorro energético en su fabricación, durante la vida del edificio y en su deconstrucción.

La valoración del coste energético de los materiales prefabricados de construcción debe contemplar, (como para cualquier otro bien de consumo) los procesos de obtención de los componentes, la fabricación, el transporte, el uso adecuado, la reutilización y finalmente desecho según las distintas fases de su ciclo global.

Los nuevos materiales prefabricados deben ser eficientes energéticamente y tienen que cumplir con la función industrial que se requiera. Deben tener poco peso y disponer de altas prestaciones físicas, mecánicas y aislantes, tanto en su comportamiento frente a la climatología, como en su resistencia y reacción al fuego. Además deben de minimizar su impacto ambiental en el origen, en la extracción de los recursos naturales necesarios para su elaboración y en el proceso de fabricación.

### **1.1.2. MATERIALES COMPUESTOS.**

La mayor parte de los materiales avanzados actuales están constituidos por una mezcla de componentes que les proporcionan sus características físico-químicas y su aplicabilidad. La utilidad de estos materiales compuestos (composites) va ganando terreno en el mundo industrial y en la vida cotidiana.

Un material compuesto está formado por dos o más componentes y se caracteriza porque las propiedades del producto final son superiores a las que tienen los materiales constituyentes por separado.

Los materiales compuestos están formados por dos fases; una continua denominada matriz y otra dispersa denominada refuerzo. El refuerzo proporciona las propiedades mecánicas al material compuesto y la matriz la resistencia térmica y ambiental. La matriz y el refuerzo se encuentran separados por la interfase.

La matriz cumple varias funciones en el material compuesto:

- ✓ Su función principal es soportar la carga aplicada y transmitirla al refuerzo a través de la interfase. Para ello la matriz debe ser deformable.
- ✓ Proteger las fibras del medio externo y mantenerlas unidas. Esta función requiere una buena compatibilidad entre matriz y refuerzo.

El refuerzo tiene la función de resistir las cargas, por lo tanto define la mayor parte de las características mecánicas del material como la resistencia y la rigidez. Pueden suponer entre el 20 y 80% en volumen del material compuesto. Las fibras son el refuerzo más utilizado en los materiales compuestos de matriz polimérica.

Las fibras más usadas en los materiales son:

- ✓ Fibra de vidrio.
- ✓ Fibra de carbono.
- ✓ Fibras poliméricas (fibras de aramida y fibras de polietileno).

Las propiedades de los materiales compuestos dependen de una serie de factores:

- a) Propiedades de la matriz y del refuerzo
- b) Contenido de refuerzo
- c) Orientación del refuerzo
- d) Método de producción del material compuesto.

Los materiales compuestos se clasifican según la forma de los constituyentes en composites fibrosos, particulados y estructurales. Según el tamaño de la fase dispersa se clasifican en composites aglomerados, microcomposites y nanocomposites y según la naturaleza de los constituyentes en composites de matriz orgánica, de matriz metálica y de matriz mineral.

Los materiales compuestos de matriz orgánica (polimérica) se utilizan en la industria automovilística, naval, aeronáutica, aeroespacial, electrónica, de material deportivo y de la construcción, reemplazando a los metales y otros materiales en muchas aplicaciones.

El hormigón es un compuesto particulado en el que la matriz es el cemento y las partículas de refuerzo son grava y arena.

Su utilización como material de construcción se basa en su dureza, bajo coste y resistencia al fuego. Como inconveniente presenta una deficiente resistencia a la tracción, es muy frágil y presenta dilataciones y contracciones en función de los cambios de temperatura. El hormigón para que resista a flexión se refuerza con mallas, alambres o barras de acero y se le denomina hormigón armado.

### **1.1.3.- MATERIALES REFORZADOS CON FIBRAS VEGETALES.**

En los últimos años debido a los elevados costes de las fibras sintéticas de refuerzo en los composites y a su no biodegradabilidad, ha llevado a los investigadores a buscar un material de refuerzo renovable, barato y disponible en abundancia, por lo que ha dado lugar a un creciente interés por las fibras naturales. Estas fibras tienen gran valor como material de refuerzo para polímeros debido a que son fácilmente degradables en combinación con su bajo costo y algunas propiedades intrínsecas interesantes (densidad, relación de la forma y el comportamiento mecánico). Las fibras naturales están compuestas principalmente de fibrillas de celulosa incrustadas en una matriz de lignina.

La idea de reforzar con fibras tiene siglos de antigüedad, un ejemplo son los ladrillos de adobe fabricados con arcilla reforzados con paja para mejorar su resistencia.

Las fibras de yute, sisal y henequen han ganado interés como material de refuerzo en los materiales compuestos para producir nuevos materiales de construcción de bajo coste en viviendas. Las aplicaciones típicas incluyen: paneles de construcción, láminas para techos, tabiques, puertas y ventanas.

Existen estudios de fibras de yute con poliéster (Roe and Ansell 1985), fibras de sisal con resinas epoxy (Bisanda and Ansell 1991), fibras de sisal como refuerzo de poliéster (Singh et al. 1996), yute reforzando poliéster (Winfield et al. 1979), yute con plásticos (Pal and Ranganathan 1986), yute con resinas de epoxi (Gassan and Bledzki 1999). materiales de construcción de bajo costo basados en composites de henequén / palma / fibras de sisal y resina de poliéster (Belmares et al. 1981).

Mohanty et al. (2005), observaron que los materiales compuestos de yute presentaban el problema al absorber la humedad ambiente produciendo pérdida de adherencia en la interfase matriz refuerzo y además tenían limitada resistencia a los ataques biológicos. Para superar algunos de estos inconvenientes observados en los diferentes estudios, indicaron la necesidad de la modificación de la superficie de las fibras de yute para desarrollar nuevos productos.

Actualmente las investigaciones con fibras de yute, sisal y henequen se limitan sólo a productos de bajo valor. La aceptabilidad de estos elaborados requiere nuevos esfuerzos para que se ajusten a las especificaciones técnicas existentes y que cumplan con el requisito mínimo de rendimiento.

#### **1.1.4. TABLEROS DE PARTÍCULAS.**

Según la norma EN 309 tablero de partículas es el fabricado mediante aplicación de presión y calor sobre partículas de madera (serrín, virutas y similares) y/u otros materiales lignocelulósicos en forma de partículas (fibras de cáñamo, bagazo y similares) con adición de adhesivo.

La clasificación de tableros según su uso es la siguiente:

- ✓ -Tableros para usos generales.
- ✓ -Tableros para utilización interior en ambiente seco (incluyendo mobiliario).
- ✓ -Tableros estructurales para utilización en la construcción.
- ✓ -Tableros especiales:
  - a) Tableros estructurales de altas prestaciones.

- b) Tableros de resistencia mejorada frente a ataques biológicos.
- c) Tableros ignifugados.
- d) Tableros para aislamiento acústico.

Muchos de estos productos se han creado para aprovechar los residuos de la madera de los aserraderos, fábricas de cepillado y operaciones de cosecha, cuyo precio era nominal. Ahora, los residuos de la madera han adquirido un importante valor como combustible. Cada vez que aumentan los precios del petróleo se valorizan más los residuos de maderas, y su precio supera al que tienen como materia prima para paneles. Además, la obtención de suministros de este tipo conduce a una severa competencia entre consumidores.

Los adhesivos utilizados en los tableros de partículas son resinas sintéticas de fraguado térmico (urea-formaldehído, fenol-formaldehído y melamina-formaldehído).

La resina de urea-formaldehído es la de aplicación más general; es también la más económica, presenta un color claro y es adecuada para tableros de aplicación interior. Las resinas fenólicas y de melamina cuestan más, pero proporcionan una unión más resistente a una intensa exposición a la humedad y al calor, por consiguiente, tienen mayor duración y son las que se utilizan para obtener tableros estructurales.

Para el acabado se usa ante todo cera de parafina, que se disuelve en esencia mineral o se derrite y pulveriza sobre las partículas. Se utiliza en pequeñas cantidades (0,5 al 1 %) para aumentar la resistencia a la humedad, pero las propiedades resistentes del tablero terminado disminuyen al aumentar el contenido de esta sustancia.

Otro problema de los tableros de madera es el efecto de las alzas de los costes de colas y adhesivos. El petróleo y el gas natural constituyen el punto de partida de casi todos los adhesivos que se emplean hoy día en la industria de los paneles. Los productos aromáticos derivados del petróleo crudo, tales como el tolueno y el benceno, son la fuente de muchos materiales que se utilizan para fabricar resinas sintéticas.

Además las resinas de urea formaldehído (UF) que son las que generalmente se usan como adhesivos, en los últimos informes sobre los efectos del vapor de formaldehído en el desarrollo del cáncer nasal en ratas de laboratorio, demostraron que era cancerígeno. La exposición del consumidor al vapor de formaldehído, como consecuencia del empleo en la construcción de interiores de paneles derivados de la madera encolados con UF, ha

suscitado gran preocupación en la industria y en los consumidores y ha influido en la severidad de los reglamentos sobre su utilización.

Por lo que actualmente se buscan sustitutos a estos adhesivos y fibras vegetales no madereras para la fabricación de tableros de partículas.

#### **1.1.5. TABLEROS DE MADERA-CEMENTO.**

Los composites de fibra cemento son compuestos de cemento que se pueden encontrar en productos tales como extrusión sin presión de tuberías y en diferentes materiales de construcción. Se desarrollaron principalmente como sustitutos del amianto-cemento, y han sido promovidos en su mayoría en los últimos 25 años. Una evolución de los tableros de partículas de madera han sido los paneles de madera-cemento que se utilizan ampliamente como paneles estructurales debido a su buena estabilidad dimensional, resistencia al arranque de tornillo, aislamiento, durabilidad y resistencia al fuego, en comparación con los tableros de partículas de madera.

Las fibras de madera son un material de refuerzo y ofrecen numerosas ventajas al cemento: no son peligrosas, son renovables y de fácil disponibilidad, y con un coste relativamente bajo en comparación con otras fibras comerciales (Dewacker *et al.* 1996). Como resultado de las investigaciones, las fibras de madera en compuestos de cemento han encontrado aplicaciones prácticas en las últimas décadas en el mercado.

Los tableros de partículas con cemento se obtienen aplicando presión a partículas de madera o de otro material vegetal que han sido aglomeradas previamente con cemento.

Las primeras patentes de fabricación datan del año 1880, si bien entonces el aglomerante utilizado era el yeso. Posteriormente se empleó como aglomerante la magnesita y el cemento. Es a partir de 1930 cuando se produce la industrialización de tableros aglomerados de cemento con lanas de madera, siendo tableros de alta densidad aptos para su empleo como material de construcción. Los materiales compuestos de madera-cemento se están utilizando en la fabricación de materiales de construcción desde hace 60 años.

Los tableros de partículas aglomeradas con cemento están formados generalmente por partículas de madera, cemento Portland y aditivos químicos (normalmente resinas de formaldehído) cuya misión es acelerar el proceso de fraguado del cemento. En la elaboración de los tableros la proporción madera/cemento es 20/60 en volumen. Las

partículas se suelen obtener de madera de coníferas, de longitud entre 10 y 35 mm y espesor de 0,2 a 0,35 mm, según se utilicen en el centro o en las caras del tablero. Tras mezclarse las partículas de madera con cemento Portland y un 20% de agua, se añaden los aditivos químicos, la mezcla pasa a las formadoras (donde se forma una manta) y se introduce en la prensa, donde se aplican presiones de 2,4 a 3,0 MPa durante 2 o 3 minutos. Posteriormente se dejan en moldes presionados en un horno a 75-80° C de temperatura durante 8 horas. Se dejan curar durante 12-18 días y después pasan a la secadora a una temperatura de 90° durante 8 horas.

Se han realizado estudios sobre tableros de papel reciclado-plástico-cemento (Soroushian et al. 2003), madera-cemento (Soroushian et al. 2003), y madera-yeso-cemento (Bekhta and Dobrowolska, 2006)

El principal problema en el diseño de panel de madera-cemento es la compatibilidad entre estos dos materiales. La madera contiene compuestos de extracción que se disuelven en el agua de amasado y pueden inhibir el fraguado del cemento. El efecto de la madera en el fraguado del cemento depende de muchos factores y el impacto sobre el fraguado depende de las especies de madera y la temporada de la cosecha (Govin et al. 2006).

Los polisacáridos contenidos en extractos de madera son responsables de la inhibición de fraguado del cemento (Biblis and Chen Fan 1968, Defo et al. 2004, Peschard et al. 2004, 2006; Espinoza and Courtier 2008), ya que impiden la formación de uno de sus hidratos principal (CSH) (Thomas and Birchall 1983). Se ha encontrado que los materiales orgánicos inhiben el fraguado del cemento y reducen la resistencia del cemento.

Hachmi et al. (1990), describieron que la compatibilidad de madera-cemento generalmente disminuye a medida que aumenta el contenido de extractos. Los extractos inhibidores se componen en general de terpenos, ácidos grasos, taninos, carbohidratos y otros materiales inorgánicos (Ashori et al. 2012).

Singh (1976) indicó que los extractos solubles en agua de la madera retardan y a veces inhiben el fraguado del cemento además disminuyen las propiedades de resistencia en la producción de materiales compuestos de madera-cemento. Posteriormente varios investigadores (Monosi et al. 1982, Collepari et al. 1984, 1985; Garci and Jennings 2002; Peschard et al. 2004) demostraron que las hemicelulosas, almidón, azúcar, taninos, ciertos fenoles y lignina son responsables de este problema. Los ácidos orgánicos tales como ácido acético, ácido tánico y otros compuestos fenólicos no sólo

pueden inhibir la hidratación del cemento, sino que también pueden atacar y destruir lentamente el enlace con el cemento, resultando una reducción en los valores de resistencia del panel y afectar a sus propiedades físicas.

Hay pruebas específicas que se han desarrollado para cuantificar la compatibilidad de la madera y el cemento. La calorimetría permite la clasificación de las especies de madera como una función de su compatibilidad con el cemento (Maximilien et al. 1997, Sauvat et al. 1999, Tittlein et al. 2012). Parece que la mayoría de las especies de coníferas, por ejemplo, pino y abeto a menudo son más compatibles que otras especies de madera de por ejemplo, abedul, arce y haya. Un estudio de Defo et al. (2004) indicó que el *Pinus banksiana* presenta la mejor compatibilidad de las especies de maderas canadienses estudiadas.

También se observó que al poner un aditivo de aceleración (cloruros, sulfatos y aluminatos) en el agua de mezcla, mejoraba significativamente la compatibilidad (Moslemi et al. 1983; Zhengtian and Moslemi 1985), compensando el efecto inhibitorio de los extractos de madera. Silva et al. (2002) también evaluaron los efectos de los aditivos minerales en los tableros de madera-cemento.

## 1.2.- MATERIALES

### 1.2.1.- LA CAÑA COMÚN (*Arundo donax* L.)

La caña común es la mayor de las gramíneas de las regiones mediterráneas; es una planta salvaje en la que no se ha realizado selección de genotipos ni mejora genética. *Arundo donax* L. es una planta perenne que forma densos cañaverales, de ramas foliosas sin ramificar, como muestra la figura 1.1. El tallo es de color verde, liso, flexible, hueco y nudoso; con diámetros entre 2 y 4 cm, y se vuelve duro y leñoso en un año. De cada nudo salen las hojas envolventes de color purpúreo verdoso al principio y amarillas al madurar (figura 1.2). Estas hojas son alternas, lineales acintadas, ásperas y terminadas en punta; de 4 a 7 cm de ancho y hasta 65 cm de longitud. En el extremo del tallo está el meristemo apical que es la región activa de la división y diferenciación de las células y responsable del tamaño final de la planta.



Figura 1.1. *Arundo donax L.* (caña común) en proceso vegetativo y antes de ser segada.



Figura 1.2. Envoltura de la hoja

El sistema radicular es un rizoma grueso nudoso (figura 1.3), con raíces adventicias profundas (150 cm) y muy resistente y los vástagos son de crecimiento rápido.



Figura 1.3. Rizoma.

Florece una vez al año, desde finales de verano hasta principio de invierno. Las flores son hermafroditas, blancas plateadas, sin cáliz ni corola y forman grandes panojas o panículas (inflorescencias) en el extremo del tallo que son laxas y muy ramosas. Ciertos

genotipos crecidos salvajes alcanzan alturas superiores a los 6 m, con un crecimiento diario de 7 cm.

La caña común crece a lo largo de los cauces de agua y se multiplica mediante rizomas que son arrancados por la corriente y trasladados a otras zonas. Al ser una planta salvaje no se sabe mucho sobre sus mecanismos de propagación.

La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) describe las especies invasoras como "animales, plantas u otros organismos introducidos por el hombre en lugares fuera de su área de distribución natural, en el que se establecen y se dispersan, lo que genera un impacto negativo en el ecosistema local y especies". Según el último informe de la Agencia Europea de Medio Ambiente hay más de 10.000 especies exóticas en Europa, de las cuales al menos el 15% se consideran como invasoras, causando impactos ecológicos, económicos y sociales. *Arundo donax* L. está considerada una de las peores especies invasoras del mundo top 100 de acuerdo con la Base de Datos Mundial sobre Especies Invasoras UICN y también se incluye en el Catálogo Español de Especies Invasoras

El uso de esta planta puede ser una solución doble, prevenir un problema ambiental y dar una respuesta a la demanda del mercado. De hecho, tiene muchos posibles usos alternativos, lo que impediría la producción de residuos, mejoraría la eficacia del control de esta especie, crearía nuevas oportunidades económicas y sociales y tendría efectos secundarios positivos sobre el medio ambiente (reducción del consumo de energía, desarrollo de nuevos materiales respetuosos del medio ambiente y nuevos empleos en las zonas rurales).

### **1.2.2. ESTRUCTURA DE LA CÉLULA DE LA CAÑA COMÚN.**

La epidermis de la caña muestra un patrón regular de células epidérmicas normales pequeñas y emparedadas densamente, entremezcladas con células de forma ovalada. Varias capas de células del parénquima se encuentran inmediatamente debajo de la epidermis, en esta región las células del parénquima son relativamente pequeñas y emparedadas densamente en contraste con las células de paredes delgadas grandes del parénquima de la región interior.

Una pared de células de fibra está situada dentro del cilindro de las pequeñas células del parénquima. Esta pared de células de fibra es continua alrededor del tallo y separa los

tejidos finos externos de los tejidos finos internos. Con la maduración las paredes de las células del parénquima y de las células de fibra adquieren mayor grosor

Los paquetes vasculares se dispersan a través del tallo, los que se encuentran cerca de la superficie son muy pequeños y su tamaño va aumentando hacia el centro. Cada paquete vascular consiste en un anillo de células de fibra que rodean el xilema y el floema.

La envoltura del paquete vascular tiene células de paredes gruesas y las del parénquima células de paredes más finas. La envoltura del paquete vascular tiene las fibras a lo largo de la dirección longitudinal (figura 1.4) pudiéndose comparar la estructura de la caña común a un modelo de la fibra-espuma, según indica la figura 1.5.

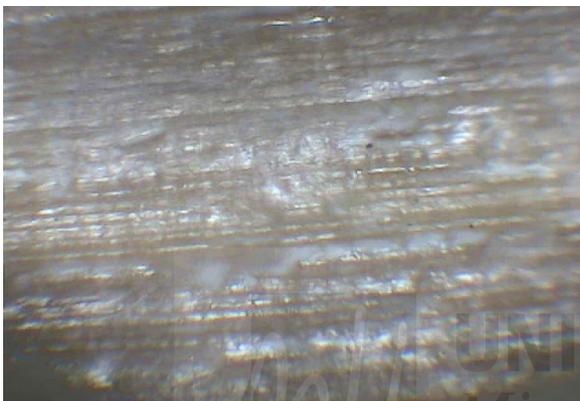


Figura 1.4. Fibras longitudinales (interior caña)

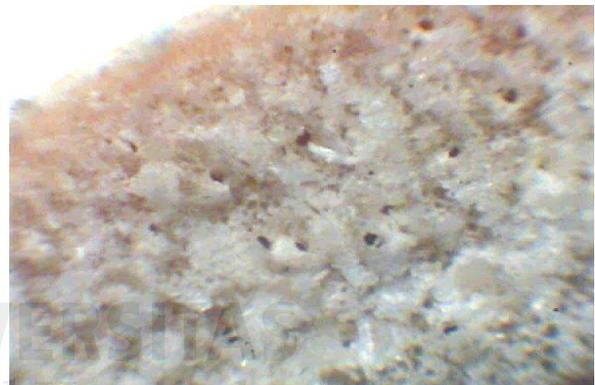


Figura. 1.5. Sección transversal caña.

Speck et al. (2000) analizaron la caña común concluyendo que su estructura y composición es similar a las maderas blandas.

### 1.2.3. EL CEMENTO Y LOS ADITIVOS ORGÁNICOS.

Los aditivos orgánicos han sido ampliamente utilizados en el hormigón y en el mortero de cemento durante varias décadas, proporcionando específicas y avanzadas propiedades necesarias durante la construcción.

El mercado de recubrimientos está cambiando los tipos de morteros para esta aplicación, ya que requiere un valor de retención de agua de al menos el 95%. Para obtener este valor se utilizan con frecuencia los polisacáridos, que pueden ser igualmente clasificados como agentes reductores de agua y retardantes del fraguado. Estos aditivos pueden ser biopolímeros nativos (por ejemplo, almidón) o polímeros sustituidos (por ejemplo, éteres de celulosa).

Hayakawa and Soshiroda (1985) informaron que los ésteres de celulosa mejoran la unión entre el cemento matriz y los agregados.

En el proceso del hormigón proyectado Ghio et al. (1994) demostraron que los hormigones formulados con los polisacáridos eran más fáciles de proyectar a altas velocidades. Por otra parte, el hormigón es más coherente y viscoso a bajas velocidades de cizallamiento.

Dewacker and Mcad (1996) sugirieron que una mezcla de polisacáridos tales como celulosa y almidón eran un buen agente de retención de agua. Estos aditivos son también agentes retardantes del fraguado, mejoran el tiempo de trabajabilidad y modifican la hidratación del cemento. Yamamuro (1999) mostró que un derivado de polisacárido que contiene un ión funcional y un grupo hidrófobo aumenta la viscosidad de las suspensiones de cemento.

Tanaka et al. (1996) patentaron un aditivo que contiene al menos un polisacárido sulfatado para mejorar la fluidez y facilidad de trabajo y que proporciona mayor resistencia a la compresión final.

Mayoría de las investigaciones sobre los aspectos físico-químicos, se restringen al efecto que producen los monosacáridos o ácidos de azúcar en la hidratación del cemento (Bruere 1966, Tenoutasseand and Singh 1978, Thomas and Birchall 1983, Luke and Luke 2000).

La influencia de estos aditivos en la fase de aluminato de calcio ( $C_3A$ ) fue estudiado por Young (1970) mostrando que la interacción de los azúcares en  $C_3A$  previene la formación rápida de la fase cúbica  $C_3AH_6$  y promueve la formación de la fase hexagonal  $C_4AH_{13}$ . Collepari et al. (1984, 1985) encontraron que la adición de glucosa, gluconato, o lignosulfonato, estabiliza la etringita, también se observaron que la glucosa retarda el consumo de yeso y la formación de etringita. Muchos estudios sobre la hidratación de la fase de silicato con la presencia de aditivos se dedicaron a la determinación de contenido de hidróxido de calcio. Milestone (1979), mediante examen en Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) y mostró que en presencia de estos aditivos, el calcio fase de silicato ( $C_3S$ ) está cubierto por las partículas de calcio escamosas de silicato (CSH) en lugar de los hidratos aciculares y el orden del efecto retardante es el siguiente: los ácidos de azúcar > azúcares > lignosulfonatos.

Bensted (1987) investigó el efecto de lignosulfonato en la hidratación del cemento y encontró que el retraso se debe o a una unión preferente con calcio y silicio, o a la introducción de aditivos orgánicos en una precipitación en gel. Esta última hipótesis postula que el efecto retardante vendría de la formación de un menor recubrimiento de gel permeable alrededor de los granos de cemento.

#### **1.2.4.- EL ALMIDÓN.**

El almidón es un biopolímero de amilosa y amilopectina; es el almacenamiento de los hidratos de carbono de las plantas. El almidón comercial se extrae de las semillas de cereales, raíces y tubérculos. Es insoluble en agua fría y se presenta en la naturaleza en forma de gránulos. Las capas externas están formadas por amilopectina y las capas internas por amilosa. En general la estructura del almidón está formada por una proporción del 20% de amilosa y 80% de amilopectina, aunque esta relación depende de la especie vegetal a la que pertenezca. El gránulo también contiene pequeñas cantidades de lípidos y fosfato (Kainuma 1988).

Tanto la amilosa como la amilopectina son macromoléculas formadas a su vez por gran cantidad de moléculas de glucosa que se repiten. Estas macromoléculas son polisacáridos formados únicamente por unidades glucosídicas. El almidón también se caracteriza por sus propiedades hidrofílicas que le confieren una buena afinidad con el agua. Esta propiedad se debe a la presencia de grupos hidroxilos en las moléculas de glucosa que pueden establecer enlaces de hidrógeno con las moléculas de agua.

El almidón de patata contiene típicamente grandes gránulos ovales o esféricos, cuyo tamaño oscila entre 10 y 100  $\mu\text{m}$ . Es muy refinado y contiene una cantidad mínima de proteína y grasa. Tiene aproximadamente 800 ppm de fosfato enlazado a él, una baja temperatura de gelatinización (aproximadamente 60°C) y un alto poder de hinchazón.

La diversidad de la composición del almidón y sus parámetros físicos da lugar a diversas propiedades de procesamiento y por lo tanto muchos usos finales. Además debido a su bajo coste y su gran disponibilidad, el almidón se ha incorporado a muchos productos industriales (Satterthwaite and Iwinski 1973; Harsch 1993).

El almidón no solo se utiliza en la industria agroalimentaria, también se usa en aplicaciones técnicas, como en el engrudo para paredes, la terminación y apresto de textiles, fabricación de papel couché, fabricación de paneles de yeso y como adhesivo de bolsas de papel y cinta engomada.

El almidón también ha sido investigado como adhesivo en los tableros de partículas. Amini et al. (2013) evaluaron las propiedades físicas y mecánicas de los paneles experimentales de tableros de partículas de madera de caucho (*Hevea brasiliensis*) utilizando almidón modificado como aglutinante. Los paneles se fabricaron con almidón de maíz al 15%, y obtuvieron buenas propiedades. Tondi et al. (2012) estudiaron formulaciones de almidón y azúcar a base de 100% de partículas vegetales y midieron como afecta la temperatura y el tiempo de gelificación. Moubarik et al. (2013) evaluación de propiedades mecánicas y físicas de tableros de partículas industriales unidos a un adhesivo de harina de maíz-urea-formaldehído. En general obtuvieron tableros para uso interior.

### **1.3. ESTADO DE LA TÉCNICA.**

#### **1.3.1. LOS COMPUESTOS DE BIOMASA VEGETAL Y CEMENTO.**

Actualmente los estudios se orientan hacia una nueva generación de tableros compuestos con residuos lignocelulósicos de origen agrícola. El desarrollo de estas aplicaciones como materiales bio-renovables para su uso con cemento proporciona un nuevo atractivo y un valor añadido para el mercado de residuos agrícolas. Las principales ventajas de la utilización de materiales lignocelulósicos como refuerzo en cemento son su baja densidad, bajo costo, biodegradabilidad, disponibilidad de grandes variedades de fibras en todo el mundo, y la generación de una nueva economía agrícola (Karade, 2010; Ashori et al., 2011)

Los compuestos de biomasa vegetal y cemento son materiales livianos producidos con materias primas renovables y disponibles localmente. En muchas aplicaciones estos compuestos pueden desempeñar un papel importante en la sustitución de materiales convencionales normalmente empleados en la construcción.

Al igual que diversos productos a base de cemento, se pueden fabricar de las dos maneras clásicas:

- ✓ Moldeo (deposición de la mezcla en moldes sin presión)
- ✓ Por compactación (mediante presión o extrusión).

La eficiencia de los procesos está fuertemente correlacionada con las características propias de las partículas vegetales (distribución de tamaño y morfología de las

partículas) y, evidentemente, de las proporciones entre sus constituyentes (sobre todo la razón agua/materiales secos).

Las partículas vegetales pueden ser añadidas a la pasta (o al mortero) de cemento, previamente homogeneizadas. La introducción de la mezcla en los moldes se debe hacer rápidamente para evitar el secado prematuro, ocasionado por la pérdida del agua en el medio ambiente, o por una excesiva absorción de agua por las partículas vegetales.

El tiempo para desmoldeo normalmente es mucho más largo del que sería necesario en el caso de la fabricación de productos convencionales a base de cemento.

Con matriz de cemento las dos fibras más estudiadas han sido el sisal y el coco. El bambú, yute, cáñamo, y diferentes plantas también se han estudiado para la fabricación de hormigón con fibras y materiales laminados (Swamy 1988). El cemento con fibras de sisal para fabricación de tejas en el sur de África fue estudiado por Gram (1983), concluyendo que no eran adecuadas para la vivienda rural.

Se han realizado diferentes estudios con fibras vegetales con cementos: rotén (Olorunnisola and Adefisan 2002), bambú (Sudin and Swamy 2006), cáscara de arroz (Torkaman et al. 2014), sisal (Wei and Meyer, 2014), coco (Aggarwal 1992; Savastano et al. 2003; Asasutjarit et al. 2007; Silva et al. 2010; Wang and Chouw 2017; Da Silva et al. 2017, Sathiparan et al. 2017).), bagazo de caña de azúcar (Aggarwal, 1995; Bilba et al. 2003), coco-bambú-cemento (Almeida et al. 2002), pulpa de banano (Savastano et al. 2003), fibras de coco y abaca (Cabalo 2015), palmera de aceite (Basri et al. 1999; Hermawan et al. 2001, Mannan et al. 2006), tallo Arhar (Aggarwal et al. 2008), agave lechuguilla (Juárez et al. 2007), palmera datilera (Kriker et al. 2008), cáñamo (Sedan et al. 2008; Diquélou et al. 2015), kenaf (Mahjoub et al. 2014), Arundo donax (Ferrández-García et al. 2015), cáscara de avellana molida, residuos de madera y té (Demirbas and Aslan 1998), corcho (Karade et al. 2002, 2006)

Los compuestos con fibras naturales absorben gran cantidad de agua y debido al hinchamiento de las fibras tienden a agrietarse, por lo que existen investigaciones para modificar la superficie (Zadorecki and Flodin 1985; Bilba and Arsene 2008; Kriker et al. 2008; Chakraborty et al. 2013; Mahjoub et al. 2014). Las propiedades de estos compuestos están limitadas ya que dependen de una combinación de factores como son su heterogeneidad, humectabilidad y la compatibilidad química entre las fibras naturales y el cemento.

Aunque el curado de los compuestos de biomasa vegetal y cemento es más complicado al inicio, pues la pérdida de agua es más acentuada debido a que la absorben las fibras,

después ocurre una forma de curado interno porque las partículas vegetales liberan parte del agua para el cemento. Aparentemente los compuestos de fibras naturales con cemento son más susceptibles a la falta que al exceso de agua. Valores elevados de agua provocan la segregación de la mezcla, y el empleo de cantidades reducidas dificulta la compactación de la mezcla y propicia la presencia de heterogeneidades.

Ferrández-García et al. (2015) en ensayos de caña común con morteros de cemento, observaron que las fibras no se degradaban y que la caña tolera la alcalinidad del cemento.

Karade (2010) en la revisión realizada sobre las fibras vegetales con cemento, llegó a la conclusión que estos residuos vegetales pueden ser utilizados en la fabricación de materiales compuestos cementosos y que se pueden utilizar para la fabricación de diversos componentes de construcción. Sin embargo, en unos pocos casos se requiere pre-tratamiento de estos residuos o el uso de aceleradores químicos. Aunque deben llevarse a cabo nuevas investigaciones con respecto a los problemas de compatibilidad y durabilidad de las fibras vegetales, y mejorar los métodos de producción de los compuestos.

Yan et al. (2016) dedujeron en una revisión sobre las recientes investigaciones del uso de fibras vegetales en materiales compuestos de cemento, que los elementos celulósicos presentan una gran variabilidad en las propiedades mecánicas, debido a que se degradan principalmente por la degradación alcalina (hidrólisis) y por la mineralización de las fibras. Estos mecanismos producen cambios en la composición química de las fibras que provocan una disminución en su resistencia, una degradación de la matriz polimérica y una degradación en el enlace interfacial de la matriz de fibra / polímero.

Varios componentes de la biomasa, como los azúcares solubles o las hemicelulosas de baja masa molar, tienen efectos adversos sobre la preparación y las prestaciones del hormigón (Vo and Navard 2016), por lo que seleccionar fuentes de biomasa con bajo contenido en estos compuestos, minimizaría estos inconvenientes.

Se necesitan más estudios para evaluar los efectos de los métodos de pretratamiento de fibras y métodos de curado alternativos en el rendimiento a largo plazo de los compuestos. También se requieren estudios de investigación detallados sobre el efecto de las fibras vegetales, estructura de poros de la matriz de cemento, permeabilidad al agua y al cloruro (Onuaguluchi, and Banthia 2016).

### **1.3.2. CEMENTO Y ALMIDÓN.**

El almidón se ha estudiado para obtener hormigón aligerado. El hormigón ligero es importante comercialmente debido a su buena conductividad térmica y acústica. Glenn (1998, 1999) mostró que el hormigón ligero basado en la mezcla con almidones era más económico que los hormigones de similar densidad que usaron perlita como agregados. Igualmente Glenn et al. (1998) demostraron que el almidón de trigo, con un alto contenido en amilosa podría procesarse en un gel firme y durable que podría incorporarse en una mezcla de hormigón durante el proceso de mezclado. Este gel se encajonó dentro de la matriz del hormigón y comprobaron que la densidad del hormigón disminuyó durante el curado y secado. Posteriormente el agua retenida por el gel emigró al exterior del hormigón donde se evaporó. También encontraron que la fuerza de compresión era menor con la adición de gel de almidón que con perlita.

El almidón ha sido utilizado por otros autores. Peschard et al. (2004, 2006), analizaron el efecto de los polisacáridos en el cemento. Dewacker y Mcad, (1996), utilizaron el almidón como retardante del fraguado del cemento. Zhang et al. (2007), realizaron un estudio sobre el mecanismo de dispersión del almidón sulfonado como agente reductor del agua para el cemento. Ferrández-García et al. (2016), estudiaron placas de cemento con distintas proporciones de almidón, concluyendo que tenían propiedades de tableros estructurales.

### **1.3.3. TABLEROS DE PARTÍCULAS DE CAÑA COMÚN (*Arundo donax L.*).**

La caña ha sido utilizada en varias investigaciones para obtener tableros de partículas con diferentes adhesivos y tipologías, lo que indica que la caña puede ser buen material. Ferrández García, (2008) realizó un estudio sobre paneles multicapa de virutas orientadas y partículas de caña común, concluyendo que dichos tableros presentan propiedades resistentes y se pueden clasificar como tableros estructurales. Garcia Ortuño et al., (2011) evaluaron tableros de partículas de caña con UF concluyendo que se pueden obtener tableros comerciales con buenas propiedades. Ferrández García et al., (2012) obtuvieron tableros de partículas de caña común con almidones sin modificar. Los tableros presentaron buenas propiedades mecánicas mediante un proceso cíclico de humectación, calor y presión. Los paneles que mejores propiedades obtuvieron fueron los que usaron como adhesivo almidón de patata.

#### 1.4. PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS.

- Las Directivas europeas indican que la utilización de residuos en la elaboración de nuevos productos, no sólo evita la eliminación del residuo o incineración, sino también que producirán una mejora, porque estos productos serán sumideros de carbono durante toda su vida útil.
- En los últimos años debido a los elevados costes de las fibras sintéticas de refuerzo en los composites y a que no son biodegradables, ha llevado a los investigadores a buscar un material de refuerzo renovable, barato y disponible en abundancia, como son los residuos agroindustriales.
- Varias investigaciones indican que las fibras vegetales en contacto con cemento se degradan, además, debido a los extractos solubles de estas fibras, se retrasa la hidratación del cemento; seguramente porque hay menor calor de hidratación. La caña ha sido investigada en contacto con el cemento y parece que tolera la alcalinidad.
- Otros investigadores observaron que el almidón añadido al cemento Portland eran un buen agente de retención del agua.
- Tableros de partículas de caña con almidón obtuvieron buenas propiedades de resistencia a flexión.
- En la elaboración de los tableros de madera-cemento se somete a la masa a una temperatura de 75° a 80° C durante 8 horas, además se utiliza una dosificación en peso de madera 1 a 5,60 de cemento.

Por ello se planteó que se podrían usar residuos de caña común en la elaboración de tableros de partículas aglomeradas con cemento con adición de almidón. Elevando la temperatura a 100° C, con menor contenido de cemento y en la mitad de tiempo, estos tableros tendrían menor coste energético y serían productos más sostenibles. Además contribuirían a la gestión y control de los residuos de cañas.

## **2.- OBJETIVOS.**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL.**

Se trata de potenciar el desarrollo de opciones alternativas para recuperar o reutilizar la biomasa de caña, hacer después un uso de ella y trabajar hacia el objetivo de la Directiva marco de residuos. Los citados residuos dejarían de serlo a través de la validación de la aplicación de *Arundo donax* L. en la construcción, desarrollando una solución para el problema ambiental, teniendo en cuenta las siguientes premisas:

- ✓ Utilizar caña común que actualmente es un residuo de difícil eliminación y gestión.
- ✓ Evitar la producción de residuos biológicos, su vertido e incineración.
- ✓ Obtener un material de construcción verde utilizando caña común.
- ✓ Elaborar un nuevo tipo de tablero de caña común con cemento, con mayor beneficio ambiental que los tableros de madera-cemento existentes en la actualidad y menor consumo de energía.

### **2.2. OBJETIVOS CONCRETOS DE LA TESIS.**

1.- Usar caña común como materia prima para la fabricación de tableros sustituyendo a la madera, lo que se puede considerar como desarrollo sostenible, sin repercusión en el medioambiente. De esta manera se posibilitaría el control de una mala hierba y la obtención de un producto de elevada demanda en el mercado, como es el tablero de madera-cemento.

2.- Emplear como aditivo almidón de patata que es un producto natural en sustitución de urea formaldehído que es un producto sintético derivado del petróleo y contaminante.

3.- Utilizar menor cantidad de cemento que los tableros de madera cemento para que sea un material de construcción verde.

4.- Analizar las proporciones de los distintos componentes de los tableros (partículas de caña, cemento, almidón) con los que se obtengan las propiedades necesarias para la utilización de los tableros como material de construcción.

5. Utilizar mayor temperatura (100°C) y menor tiempo en la elaboración de los tableros con partículas de caña que en los tableros industriales de madera-cemento y evaluar su influencia.

6.- Calcular las propiedades de los tableros fabricados conforme a las normas EN de los tableros de partículas.

6.- Valorar las propiedades de los diferentes tipos de tableros diseñados, para obtener un nuevo material con las propiedades adecuadas para la fabricación industrial de tableros de caña-cemento.



### 3.- MATERIALES Y MÉTODOS.

#### 3.1.-MATERIALES.

Los materiales utilizados para la fabricación de tableros de partículas han sido:

- Partículas de caña común (*Arundo donax L.*) con un tamaño menor a 0,25 mm.
- Adhesivo aglomerante constituido por:
  - Cemento portland.
  - Agua.
  - Almidón de patata.

##### 3.1.1.- CAÑA COMÚN (*Arundo donax L.*).

La caña común utilizada para el desarrollo de esta tesis en la fabricación de tableros, se adquirió con un 15% de humedad a una empresa que se dedica a su comercialización.

Posteriormente se secaron al aire durante 6 meses, hasta una humedad relativa del 8 %.

La caña utilizada se observa en la figura 3.1.



*Figura 3.1. Cañas utilizadas para la fabricación de tableros.*

Posteriormente se procedió al desfibrado de las cañas en una desfibradora de cuchillas obteniendo distintos tamaños de partículas clasificadas en función del tamiz en el que habían sido retenidas. Para el desarrollo de este trabajo se han utilizado las partículas que pasaron el tamiz de 0,25 mm.

### 3.1.2.- CEMENTO PORTLAND.

Se ha utilizado cemento Portland con caliza tipo CEM II/B-LL 32,5N cuyas exigencias mecánicas y físicas se indican en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Exigencias mecánicas y físicas del cemento Portland.

Clase de resistencia	Resistencia a compresión MPa		Tiempo de principio de fraguado min	Expansión mm	
	Resistencia inicial	Resistencia normal			
	7 días	28 días			
32,5 N	≥ 16	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	10

El tipo CEM II/B-LL es un cemento Portland con caliza cuya composición (proporción en masa como suma de los componentes principales) es la siguiente:

- ✓ Clinker (K) 65-79
- ✓ Caliza (LL) 21-35
- ✓ Componentes minoritarios 0-5

El clinker de cemento Portland (K) es un material inorgánico que está constituido al menos por 2/3 de su masa de silicatos de calcio [(CaO)<sub>3</sub>. SiO<sub>2</sub>] y [(CaO)<sub>2</sub>. SiO<sub>2</sub>], conteniendo el resto de combinaciones de óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y otros óxidos. La relación (CaO)/(SiO<sub>2</sub>) no será menor de 2,0. El contenido de óxido de magnesio (MgO) no excede del 5% en masa.

### 3.1.3.- AGUA

El agua utilizada en la mezcla para la elaboración de los tableros fue tomada directamente de la red de agua potable. Se utilizó una proporción del 10% de agua en peso respecto al peso de las partículas de caña en todas las dosificaciones.

### 3.1.4.- ALMIDÓN DE PATATA.

El almidón o fécula de patata es el producto obtenido mediante la extracción del carbohidrato de la patata, en el cual se elimina la fibra mediante lavados con agua, posteriormente se aplica un secado cuidadoso, que le permite mantener sus propiedades funcionales.

Se utilizó almidón de patata de la industria alimentaria con un grado de pureza del 90%. El almidón de patata contiene típicamente grandes gránulos ovales y gelifica a una temperatura de 58-65°C.

### 3.2.- METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO.

Antes de fabricar los tableros se realizaron ensayos previos para obtener composiciones adecuadas en la fabricación de tableros caña-cemento.

La metodología seguida fue obtención del tamaño del experimento, elaboración de los tableros mediante proceso seco, la realización de ensayos experimentales en laboratorio para obtener las propiedades de los tableros fabricados y análisis microscópicos para analizar la adhesión entre las partículas. Posteriormente el análisis estadístico de los datos obtenidos.

#### 3.2.1.- TAMAÑO DEL EXPERIMENTO.

Para obtener el tamaño del experimento se optó por aplicar la ecuación simplificada de Cochran y Cox y la norma EN 326-1 (1995).

El número de tableros necesarios de cada clase fabricado se obtuvo de los ensayos previos mediante la ecuación simplificada de Cochran y Cox, para que el experimento tenga una probabilidad del 95 % de ser significativo.

$$r = \frac{4 \cdot \sigma^2}{\delta^2} \quad (3.1)$$

Siendo:  $r$ , número de tableros necesarios para los ensayos.

$\sigma$ , desviación típica de los datos de la variable.

$\delta$ , error que se tolera respecto al valor medio de la variable (10 %).

En los ensayos previos del módulo de ruptura en flexión se obtuvo:

$$r = \frac{4 \cdot \sigma^2}{\delta^2} = \frac{4 \cdot 2,85^2}{10} = 3,25 \approx 4 \quad (3.2)$$

Luego se fabricaron 4 tableros iguales para cada una de las diferentes clases.

En la industria del tablero el muestreo de las probetas de cada tablero debe estar de acuerdo con la norma EN 326-1 (1995). La norma establece el número de probetas necesarias en función de las dimensiones del tablero (como indica la figura 3.2). Siendo las dimensiones de cada probeta las indicadas para cada ensayo según la norma EN 325 (1995) (determinación de las dimensiones de las probetas).

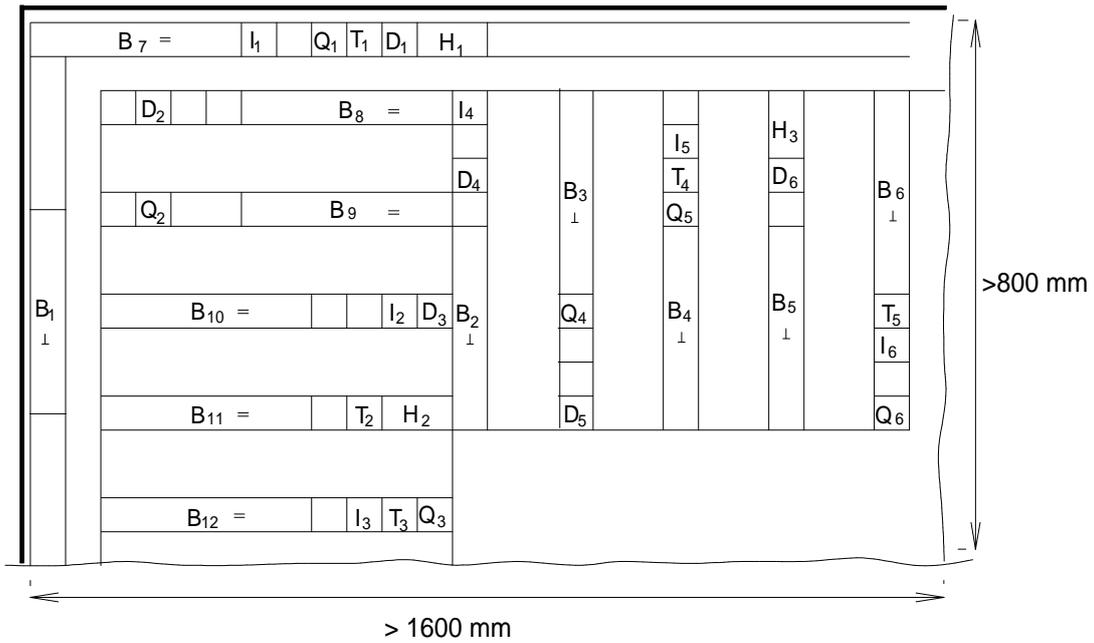


Figura 3.2. Plano de corte para la elaboración de las probetas de ensayo de un tablero.

Los tableros fabricados tenían una superficie 600 x 400 mm debido a las dimensiones de la prensa, por tanto el esquema de corte adaptado a la norma considerando el tamaño de las probetas, el número correspondiente a cada probeta y los ensayos necesarios, fue el que indica la figura 3.3 y la tabla 3.2.

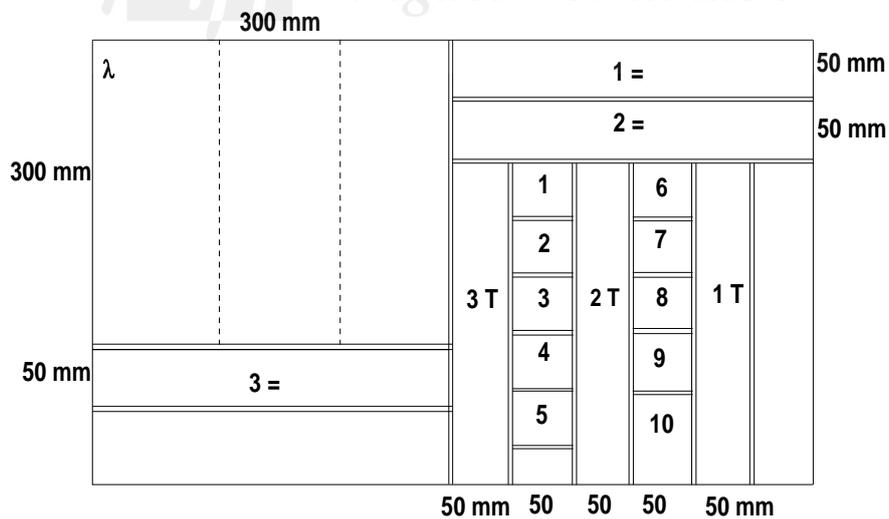


Figura 3.3. Esquema de despiece del tablero.

Debido a las dimensiones del tablero se adoptó, como se indica en la tabla 3.2, que el número de probetas para cada ensayo fuese la mitad de las indicadas en los tableros industriales, salvo en el ensayo de densidad debido a que no es destructivo.

Tabla 3.2.- Ensayo y número de probeta de cada tablero.

Ensayo	Prototipos fabricados 600 x 400 mm. Nº de probeta	Tableros industriales 2400 x1200 mm. Nº de probeta
Flexión:		
- Transversal	B 1 $\perp$ , B 2 $\perp$ y B 3 $\perp$	B 1 $\perp$ a B 6 $\perp$
- Longitudinal	B 4 $=$ , B 5 $=$ y B 6 $=$	B 7 $=$ a B 12 $=$
Humedad	10	H1, H2 y H3
Densidad	1, 3, 4, 5, 6 y 8	D1 a D6
Hinchamiento en espesor	3, 7 y 9	Q 1 a Q 6
Cohesión interna. Tracción	5, 6 y 8	I 1 a I 6
Arranque de tornillo	1, 2 y 4	T 1 a T 6
Conductividad térmica	Conductividad	

### 3.2.2. CLASES Y COMPOSICIÓN DE LOS TABLEROS DE CAÑA-CEMENTO

Antes de fabricar los tableros se realizaron ensayos previos para obtener composiciones adecuadas en la fabricación de tableros caña-cemento. Los tableros con un exceso de agua se hinchaban y si el agua no era suficiente no se realizaba bien la mezcla y el cemento no fraguaba, por lo que la proporción de agua que se debía añadir fue uno de los condicionantes previos para la fabricación de los tableros.

Para el desarrollo de esta tesis doctoral se ha optado por fabricar tableros utilizando una presión de 2,6 MPa y una temperatura de 100°C.

Se utilizaron partículas de caña de tamaño menor que 0,25 mm, con diferentes proporciones de adhesivo consistente en un 10% de agua y distintas proporciones (0%, 5% y 10%) de almidón de patata y (0%, 5% y 10%) de cemento portland con sus combinaciones. Los tableros permanecieron presionados 1, 2, 3 y 4 horas.

Se obtuvieron 28 clases de tableros. Las diferentes dosificaciones y variables de fabricación se indican en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Clase de tableros fabricados.

Clase	Tiempo (h)	Nº de tableros	Tipo	% Almidón de patata	% Cemento Portland
A1	1	4	A	10	20
A2	2	4	A	10	20
A3	3	4	A	10	20
A4	4	4	A	10	20
B1	1	4	B	5	20
B2	2	4	B	5	20
B3	3	4	B	5	20
B4	4	4	B	5	20
C1	1	4	C	10	10
C2	2	4	C	10	10
C3	3	4	C	10	10
C4	4	4	C	10	10
D1	1	4	D	0	10
D2	2	4	D	0	10
D3	3	4	D	0	10
D4	4	4	D	0	10
E1	1	4	E	0	20
E2	2	4	E	0	20
E3	3	4	E	0	20
E4	4	4	E	0	20
F1	1	4	F	5	0
F2	2	4	F	5	0
F3	3	4	F	5	0
F4	4	4	F	5	0
G1	1	4	G	10	0
G2	2	4	G	10	0
G3	3	4	G	10	0
G4	4	4	G	10	0

### 3.2.3.- PROCESO DE FABRICACIÓN.

El proceso de fabricación seguido consistió en las siguientes actividades:

- a) Deshojado y corte de la caña en longitudes de 0,5 m para facilitar su introducción en la desfibradora.
- b) Desfibrado de los trozos de caña mediante una desfibradora de cuchillas de eje horizontal (figura 3.4), con una separación de cuchillas entre 1,7 y 2,07 mm, como se puede observar en la figura 3.5.



Figura. 3.4. Desfibradora de cuchillas.

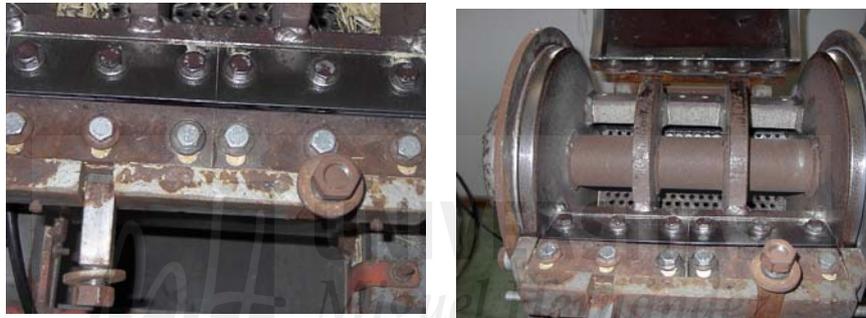


Figura. 3.5. Cuchillas de la desfibradora.

- c) Tamizado de las partículas de caña obtenidas en la desfibradora, clasificándose según el tamiz en el que son retenidas. Para el tamizado se ha utilizado una tamizadora vibratoria con tamices homologados.
- d) Mezclado manual de partículas de caña común con tamaño menor de 0,25 mm y distintas proporciones de cemento y de almidón de patata.
- e) Formado de la manta del tablero en un molde de dimensiones 400 x 600 mm con un tratamiento previo de protección del molde con film de polietileno de alta temperatura para facilitar el desmoldeo (figura 3.6).



Figura. 3.6. Molde para formar la manta del tablero.

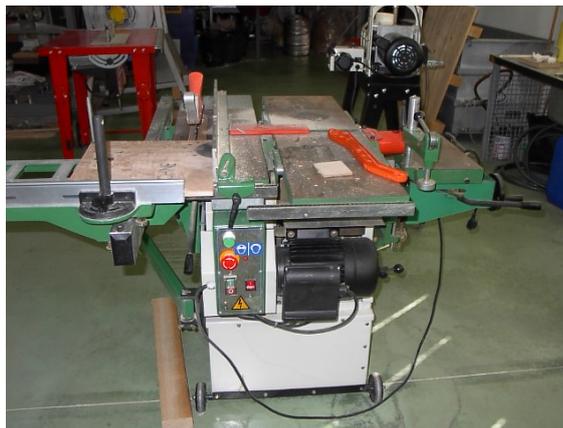
- f) Adición de forma pulverizada de un 10% de agua en función del peso de las partículas de caña.
- g) Prensado en prensa de platos calientes durante tiempos diferentes a una presión de 2,6 MPa y 100°C de temperatura. La prensa utilizada se puede observar en la figura 3.7.



*Figura. 3.7. Prensa de platos calientes.*

Enfriado de los tableros al aire a una temperatura de 20° C, y humedad ambiente de 65 %, apilados en posición vertical. Posteriormente se cortaron para obtener las probetas de ensayo.

- h) Corte de las probetas mediante una cortadora mecánica (figura 3.8).



*Figura 3.8. Cortadora mecánica.*

En el laboratorio de ensayos se mantuvo el entorno de humedad del 65% y temperatura de 20° C mediante climatización. Aunque el laboratorio no tiene las condiciones ambientales necesarias, se fabricaron los tableros y se realizaron los ensayos cuando se

alcanzaban las condiciones de humedad y temperatura adecuadas exigibles en cada ensayo.

### **3.2.4.-ENSAYOS EXPERIMENTALES.**

Los ensayos experimentales para evaluar los tableros han consistido en:

- Microscopía electrónica de barrido (SEM).
- Densidad.
- Humedad de los tableros.
- Determinación del Módulo de Elasticidad a flexión y de la resistencia característica a flexión.
- Resistencia a tracción perpendicular o cohesión interna.
- Hinchamiento en espesor después de 2 y 24 horas de inmersión en agua.
- Absorción de agua después de 2 y 24 horas de inmersión en agua.
- Resistencia al arranque de tornillo en la cara del tablero.
- Determinación de la conductividad.
- Ensayo de inflamabilidad.

#### **3.2.4.1.- ANÁLISIS DE LOS TABLEROS USANDO MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)**

Las aplicaciones de la microscopía electrónica de barrido son muy numerosas tanto en Ciencia de Materiales, como en Ciencia Biomédica. Dentro de la Ciencia de Materiales destacan las aplicaciones en metalurgia, petrología y mineralogía, materiales de construcción, materiales cerámicos y estudio de superficies y composición elemental de sólidos en general

La técnica consiste, principalmente, en enviar un haz de electrones sobre la muestra y mediante un detector apropiado registrar el resultado de esta interacción. El haz se desplaza sobre la muestra realizando un barrido en las direcciones X e Y de tal modo que la posición en la que se encuentra el haz en cada momento coincide con la aparición de brillo, proporcionalmente a la señal emitida, en un determinado punto de una pantalla.

Las imágenes que se obtienen en el microscopio electrónico de barrido corresponden a electrones secundarios o electrones retrodispersados emitidos tras la interacción con la muestra de un haz incidente de entre 5 y 30 KeV.

La señal de electrones secundarios se forma en una delgada capa superficial, del orden de 50 a 100 Å. Al ser grande el número de electrones emitido se puede establecer un buen contraste. Por otra parte, al ser electrones de baja energía, menos de 50 eV, pueden ser desviados fácilmente de su trayectoria emergente inicial, y se puede obtener información de zonas que no están a la vista del detector. Esta particularidad es fundamental para otorgar a esta señal la posibilidad de aportar información “en relieve”. La apariencia de la imagen es la que tendría una muestra que hubiese sido iluminada desde el detector y se estuviese observando desde el cañón de electrones.

En cuanto a la señal de electrones retrodispersados, su principal utilidad reside en que su emisión, se debe a choques de tipo elástico y por tanto con energía del mismo orden que la de los electrones incidentes, depende fuertemente del número atómico de la muestra. Esto implica que dos partes de la muestra que tengan distinta composición se revelan con distinta intensidad, aunque no exista ninguna diferencia de topografía entre ellas. Los electrones retrodispersados salen de la muestra en mayor cantidad en las direcciones próximas a las de incidencia, por lo que su detección se hace mejor en las proximidades del eje de incidencia.

#### **3.2.4.2.- DENSIDAD DE LOS TABLEROS.**

Se siguió para la obtención de la densidad de los tableros el procedimiento que indica la norma EN 323 (1993). “Tableros derivados de la madera. Determinación de la densidad”.

Como instrumento de medida se utilizó un micrómetro con precisión de 0,01 mm, un calibre de precisión 0,1 mm y una balanza de 0,01g que están integrados en la máquina de ensayos universal.

Las probetas se cortaron en dimensiones de 50 x50 mm de lado y se mantuvieron las condiciones del laboratorio a una humedad relativa de  $65 \pm 5\%$  y una temperatura de  $20 \pm 2^\circ$  C. El espesor  $t$ , se midió en el punto de intersección de las diagonales como indica la figura 3.14.

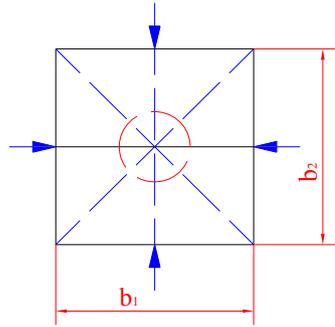


Figura 3.9. Punto de medida para determinación del espesor.

Se midió además del espesor  $t$ , los valores de  $b_1$  y de  $b_2$ , tal y como lo indican las flechas en la figura 3.9 en mm y se pesaron las probetas siendo  $m$  el peso en gramos.

La densidad de cada probeta en  $\text{kg/m}^3$ , se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{b_1 \cdot b_2 \cdot t} \times 10^6 \quad (3.3)$$

### 3.2.4.3.- ENSAYO DE HUMEDAD.

Para la determinación del contenido de humedad de los tableros se aplicó la norma EN 322 (1993). La norma se fundamenta en la determinación por pesada de la pérdida de masa en la probeta, entre su estado en el momento del muestreo y después de secar hasta masa constante a  $(103 \pm 2)^\circ \text{C}$ .

Los aparatos utilizados han sido una balanza graduada en 0,01 g, y un medidor de humedad de laboratorio con microprocesador con precisión  $\pm 0.01$  como indica la figura 3.10. Las probetas usadas fueron de dimensiones rectangulares y de una masa inicial de  $(20 \pm 1)$  g.



Figura 3.10. Medidor de humedad de laboratorio

Se calcula la humedad  $H$  de cada probeta, como tanto por ciento de la masa, con una aproximación del 0,1%, mediante la siguiente fórmula:

$$H = \frac{m_H - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (3.4)$$

donde

$m_H$  es la masa inicial de la probeta en gramos;

$m_0$  es la masa de la probeta después del secado en gramos.

### 3.2.4.4.- ENSAYO A FLEXIÓN.

El ensayo a flexión se realizó de acuerdo con el procedimiento estipulado en la norma EN 310 (1993) “Tableros derivados de madera. Determinación del Módulo de Elasticidad en flexión y de la resistencia a la flexión”.

En función del espesor del tablero  $t$ , se fijan las medidas de apoyos de los rodillos así como la del vuelo que tiene que tener el tablero. Es decir:  $L_1 = 20 \cdot t$  y  $L_2 = L_1 + 50$ .

Medidas en mm.

Teniendo en cuenta que los diámetros de los cilindros de carga están normalizados, las probetas se definen pues en función del espesor con un ancho fijo de 50 mm. El largo se cortó en función de la dimensión  $L_2$  que define la norma y los apoyos se regulan en base a  $L_1$ , y  $L_{1/2}$  (figura 3.11).

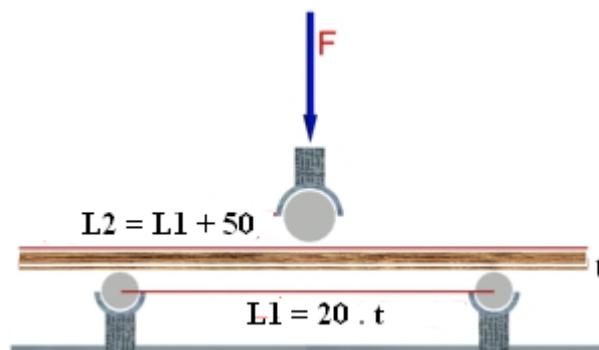


Figura 3.11. Ensayo normalizado (EN-310). Croquis de colocación de rodillos.

La resistencia a flexión  $f_m$  (en  $N/mm^2$ ), de cada probeta, se calculó de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$f_m = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot L_1}{2 \cdot b \cdot t^2} \quad (3.5)$$

donde:

- $F_{max.}$  es la carga máxima en Newton.  
 $L_l$  es la distancia entre los ejes de apoyo en mm.  
 $b$  es la anchura de la probeta en mm.  
 $t$  es el espesor de la probeta en mm.

El módulo de elasticidad a flexión  $E_m$  en  $N/mm^2$ , de acuerdo con la norma EN para el ensayo de flexión de cada probeta, se define como indica la siguiente ecuación:

$$E_m = \frac{[L_1^3 \cdot (F_2 - F_1)]}{[4 \cdot b \cdot t^3 (a_2 - a_1)]} \quad (3.6)$$

Siendo:

$F_1$  el valor de la carga correspondiente a aproximadamente un 10% del valor de la carga máxima en Newton que corresponde a un valor de  $a_1$  de deformación en mm.

$F_2$ , corresponde a aproximadamente un 40% del valor de la carga máxima;  $a_2$ , es el valor de la deformación en dicho punto.

### 3.2.4.5.- ENSAYO A TRACCIÓN. ENSAYO DE COHESIÓN INTERNA.

Para determinar la resistencia a tracción perpendicular a las caras (cohesión interna) de los tableros se siguió lo indicado en la norma EN 319 (1993).

El fundamento de dicho ensayo consiste en determinar la carga máxima aplicada en relación con la superficie de la probeta.

Los aparatos utilizados fueron un calibre de acuerdo con la norma EN 325 (1995) y una máquina de ensayo capaz de aplicar una fuerza de tracción perpendicular a las caras de la probeta, por medio de tacos de agarre (bloques metálicos) y medir esta fuerza con una precisión del 1%.

Las probetas fueron de dimensiones cuadradas y tienen  $(50 \pm 1)$  mm de lado, con cantos rectos y limpios.

Las probetas y los bloques metálicos se acondicionaron hasta masa constante en una atmósfera de humedad media relativa  $(65 \pm 5)$  % y temperatura de  $(20 \pm 2)^\circ C$ .

Las probetas se encolaron posteriormente sobre el bloque metálico mediante colas termofusibles (figura 3.12) y se mantuvieron durante 24 horas en condiciones ambientales controladas antes de ensayarlas. Seguidamente se colocaron el conjunto bloque probeta en los tacos de agarre (figura 3.13) y se aplicó el esfuerzo de tracción hasta rotura.

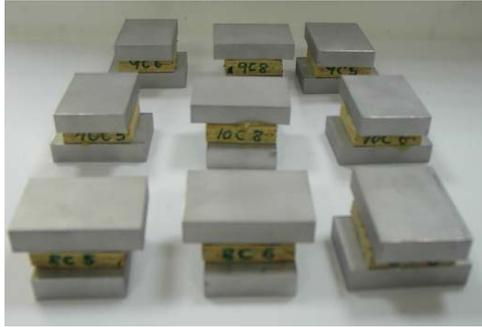


Figura 3.12. Probetas ensayo tracción perpendicular.



Figura 3.13. Tacos de agarre de probetas.

La carga se aplicó a velocidad constante durante todo el ensayo de forma que se alcanzase la carga máxima en  $(60 \pm 30)$  segundos.

La expresión de los resultados con dos decimales expresada en  $\text{N/mm}^2$  de cada ensayo a tracción sobre cada probeta se obtuvo según la fórmula:

$$f_{t\perp} = \frac{F_{\text{máx.}}}{a \cdot b} \quad (3.7)$$

Donde:

$F_{\text{máx.}}$ , es la carga de rotura, en Newton.

$a$  y  $b$ , son la longitud y ancho de la probeta en milímetros.

La resistencia a la tracción perpendicular de cada tablero se tomó como la media aritmética del conjunto de los resultados obtenidos sobre todas las probetas muestreadas de ese tablero.

#### 3.2.4.6.- ENSAYO DEL HINCHAMIENTO EN ESPESOR.

Para determinar la hinchazón en espesor después de inmersión en agua se aplicó la norma EN 317 (1993).

Los aparatos utilizados fueron un micrómetro que cumplía la norma EN 325 (1995) y una cubeta para baño de agua provista de termostato capaz de mantener la temperatura constante a  $(20 \pm 1)^\circ \text{C}$  (figura 3.14).



Figura 3.14. Cubeta para baño de agua con termostato.

Las probetas eran de forma cuadrada de  $(50 \pm 1)$  mm de lado y se acondicionaron hasta masa constante en una atmósfera relativa media que estaba entre  $(65 \pm 5)$  % y la temperatura de  $(20 \pm 2)$  °C. Se consideró que estaban a masa constante cuando dos pesadas consecutivas, realizadas en un intervalo de 24 h, no diferían en más del 0,1% de la masa de la probeta.

Procedimiento operatorio:

- Medición del espesor: Se midió el espesor de cada probeta en el punto de intersección de las diagonales con una precisión de 0,01 mm,
- Inmersión: Se sumergieron las probetas en posición vertical, en agua limpia, en reposo y con un pH de  $7 \pm 1$  y una temperatura de  $(20 \pm 1)$ ° C. La temperatura se mantuvo durante el ensayo. Las probetas estaban separadas entre sí, así como del fondo y las paredes de la cubeta (figura 3.15). Durante el ensayo los cantos superiores de las probetas quedaron sumergidos a  $(25 \pm 5)$  mm. El tiempo de inmersión fue de 24 h.



Figura 3.15. Algunas probetas en inmersión en agua.

- Medición del espesor después de inmersión: Una vez finalizado el tiempo de inmersión se sacaron las probetas del baño, se eliminó el exceso de agua (figura 3.16) y se midió el espesor de cada probeta.



Figura 3.16. Algunas probetas después de inmersión en agua.

Finalmente se calculó la hinchazón en espesor de cada probeta  $Gt$ , expresada en tanto por ciento sobre su espesor inicial, mediante la fórmula:

$$Gt = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \cdot 100 \quad (3.8)$$

donde:

$t_1$  es el espesor de la probeta antes de inmersión, en mm.

$t_2$  es el espesor de la probeta después de inmersión, en mm.

La hinchazón en espesor para un tablero se consideró la media aritmética de los resultados de todas las probetas tomadas de cada tablero.

#### 3.2.4.7.- ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA.

El transporte de agua dentro de los materiales es estudiado habitualmente por métodos de absorción. Una muestra es expuesta a la humedad en unas condiciones controladas de temperatura, humedad relativa y presión de vapor. El cambio en la masa de la muestra, como resultado de los procesos de absorción de agua después de inmersión en agua puede servir para estudiar su comportamiento frente a la humedad.

La ganancia de masa de agua después de inmersión al cabo de un tiempo se calcula mediante la ecuación

$$M_t(\%) = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad \frac{(\text{masa de agua})}{(\text{masa de la muestra})} \quad (3.9)$$

donde

$M_t$  : ganancia de masa (agua) al cabo de un tiempo  $t$ .

$m$ : masa de la muestra tras un tiempo  $t$ .

$m_0$ : masa inicial de la muestra seca.

### 3.2.4.8.- ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL ARRANQUE DE TORNILLOS.

Para determinar la resistencia al arranque de tornillos de los tableros se siguió lo indicado en la norma EN 320 (1993). En la norma se establece el método de ensayo para calcular dicha resistencia. Se determinó la resistencia al arranque de tornillos sobre la cara midiendo la fuerza requerida para arrancar un tornillo normalizado de la probeta.

Los aparatos necesarios fueron una máquina de ensayos y un dispositivo metálico.

a) Máquina de ensayos: máquina de carga capaz de aplicar una fuerza axial progresiva en la parte interna de la cabeza del tornillo a través de un dispositivo, que al mismo tiempo impide el movimiento de la probeta. La carga máxima se midió con una precisión de un 1 %.

b) Dispositivo metálico (figura 3.17) para el ensayo de resistencia al arranque de tornillos sobre la cara de probetas con un espesor inferior a 15 mm: se utilizó un útil que tenía un orificio central que a su vez impedía el movimiento de la probeta.



Figura 3.17. Dispositivos mecánicos para arranque de tornillo en la cara.

Las probetas eran cuadradas con un lado de  $(50 \pm 1)$  mm. Las probetas se acondicionaron hasta una masa constante a una humedad relativa de  $(65 \pm 5)$  % y a una temperatura de  $(20 \pm 2)$  °C. Se consideró que se ha alcanzado masa constante cuando dos pesadas consecutivas, realizadas en un intervalo de tiempo de 24 horas, no diferían en más de un 0,1 % de la masa de la probeta.

Después del acondicionamiento de las probetas, se taladraron perpendicularmente a la superficie en el punto central de la cara y de los bordes adyacentes (figura 3.18), se insertaron los tornillos en los orificios pretaladrados. Estos orificios tenían un diámetro de  $(2,7 \pm 0,1)$  mm y una profundidad de  $(19 \pm 1)$  mm.



Figura 3.18. Taladro de las probetas para el ensayo de arranque de tornillo en la cara.

Para el ensayo se utilizó un tirafondos de acero con unas dimensiones nominales de 4,2 x 38 mm, con una rosca N ST 4,2 y con un paso de rosca de 1,4 mm. Los tornillos se insertaron en la probeta de tal forma que estaban embebidos completamente. Para el ensayo sobre la cara en probetas con un espesor menor de 15 mm, el tornillo se insertó de tal forma que su punta sobresalía por la parte opuesta (figura 3.19).



Figura 3.19. Tornillo insertado en la probeta y el ensayo.

*Procedimiento operatorio:*

a) Colocación de las probetas:

La probeta se colocó en el dispositivo metálico de tal forma que el tornillo estaba colocado en el orificio central y quedó bien sujeta.

b) Aplicación de la carga:

La fuerza axial ejercida sobre la parte interior de la cabeza del tornillo se fue incrementando a través del dispositivo. El dispositivo tenía las placas paralelas con el ancho suficiente para alojar fácilmente el cuerpo del tornillo. La carga axial se aplicó en la parte inferior de la cabeza del tornillo con una velocidad constante de  $(10 \pm 1)$  mm/min, hasta que se alcanzó la carga máxima.

*Expresión de los resultados:*

a) Para cada probeta.

Se registró la fuerza de arranque sobre la cara de la probeta redondeados a la cifra más cercana a 10 N. Siendo la resistencia la fuerza máxima en función del espesor de la probeta

$$\frac{F_{max}}{t} \left( \frac{N}{mm} \right) \quad (3.10)$$

b) Para cada tablero:

Los valores de resistencia al arranque de tornillos sobre las caras se calcula como la media aritmética de los resultados de todas las probetas del tablero.

### 3.2.4.9.- MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSAL.

Para todos los ensayos mecánicos se utilizó la máquina de ensayos universal de la figura 3.20.



*Figura 3. 20. Máquina universal de ensayos.*

Esta máquina se diseñó para ejecutar pruebas de laboratorio con muestras de tableros aglomerados de madera, MDF, OSB y materiales asimilados.

Las pruebas ejecutables en el equipo conforme a las normas europeas EN son:

- Dimensiones (EN 325, 1995)
- Densidad (EN 323, 1995)
- Resistencia a flexión y módulo de elasticidad (EN 310, 1994)
- Resistencia a tracción interna (EN 319, 1993)
- Resistencia al arranque de arranque de tornillo (EN 320, 1993)

Los datos técnicos de la máquina de ensayos son los que figuran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Datos técnicos de la máquina de ensayos.

Espesor mínimo muestras	2	mm
Espesor máximo de muestras medido en la columna de análisis dimensional	150	mm
Espesor máximo de muestras para ejecución de pruebas mecánicas	50	mm
Velocidad mínima de avance	0,001	mm/min
Velocidad máxima de avance	999	mm/min
Flecha máxima de flexión	50	mm
Distancia máxima de soportes de flexión	1100	mm
Precisión medidor dimensional	1/100	mm
Precisión balanza	1/100	mm
Calibración célula de carga bidireccional	± 9800	N
Presión de aire comprimido	3	bar
Precisión	± 0,1	%
Potencia instalada	1	kW
Tensión de alimentación/ frecuencia	120/60 220/50	V/Hz V/Hz

La máquina está programada para utilizar automáticamente las siguientes fórmulas de velocidad, cuando efectúa las pruebas de tracción y flexión según las normas EN.

Tracción

$$V = 0,08 \cdot t \quad (3.11)$$

donde:

$V$ , velocidad de la prueba.

$t$ , espesor de la muestra

Flexión

$$V = \frac{0,005 \cdot L^2}{t} \quad (3.12)$$

donde:

$V$ , velocidad de la prueba.

$L$ , distancia entre apoyos

$t$ , espesor de la muestra

Para el ensayo de arranque de tornillo está programada para una velocidad de 10 mm/min

### 3.2.4.10.- DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.

La baja conductividad térmica es lo que caracteriza a los materiales aislantes térmicos. El procedimiento de ensayo para determinar la conductividad y la resistencia térmica en los materiales de construcción se encuentra recogido fundamentalmente en la norma EN 12667 (2001). Esta norma es aplicable para todos aquellos productos con una resistencia térmica esperada igual o mayor a  $0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ , siendo el límite para considerar a un material como aislante térmico que tenga una conductividad térmica igual o menor a  $0,06 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$  esta técnica es válida para determinar la conductividad térmica en toda la gama de espesores dentro del aislamiento térmico.

En la norma de ensayo se recogen dos posibles métodos: el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Ambos métodos son igualmente válidos, siendo el hecho diferencial entre ellos que el primero es un método absoluto y el segundo un método relativo, es decir, esta basado en una calibración previa del equipo realizada con un material cuya conductividad térmica es conocida y está certificada.

El método más implantado actualmente es el método del equipo medidor de flujo de calor, debido fundamentalmente, a la rapidez con la que se realizan las medidas. Dentro del método del medidor de flujo de calor existen 3 posibles variantes del equipo a utilizar: simétrico de una muestra, simétrico de dos muestras y asimétrico de una muestra, así como equipos dobles, siendo posible en todas estas variantes tanto la orientación vertical como la horizontal.

Se determina la conductividad térmica en el estado estacionario del material empleando la siguiente ecuación:

$$\frac{dQ}{\Delta T} = \frac{\lambda}{e} = \frac{1}{R} \quad (3.13)$$

donde:

$dQ$  es el flujo de calor, obtenido a partir de las constantes de calibración de los medidores de flujo de calor y de la señal eléctrica que proporcionan ( $W/m^2$ ).

$\Delta T$  es la diferencia de temperatura establecida entre los dos lados de la muestra (K).

$\lambda$  es la conductividad térmica de la muestra ( $W/m \cdot K$ ).

$e$  es el espesor de la muestra (en metros).

$R$  es la resistencia térmica de la muestra ( $m^2 \cdot K/W$ )

$A$  , es la sección de la base de la probeta en milímetros.

La conductividad se determinó mediante el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor (EN 12667). Los ensayos térmicos se realizaron en un medidor de flujo de calor marca NETZSCH instruments, Inc, USA., como se observa en la figura 3.21.

En este ensayo se utilizó una probeta de cada tablero con dimensiones de 300 x 300 mm.



Figura 3.21. Equipo de conductividad térmica.

### 3.2.5.- ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS SEGÚN NORMAS EN.

Siguiendo la norma EN 1058 (1996). Tableros Derivados de la madera. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y de la densidad.

Se deben utilizar de manera general las siguientes ecuaciones para cada tablero y para cada tipo de tablero.

- o El valor medio aritmético:

$$m(x) = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.14)$$

siendo:

$x$  variable

$n$  número de resultados de ensayos

$m(x)$  valor medio de los datos de la variable.

- o La desviación típica :

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m(x))^2}{n-1}} \quad (3.15)$$

Siendo  $s(x)$ , la desviación típica de los datos de la variable

- o El coeficiente de variación:

$$\delta(x) = \frac{s(x)}{m(x)} \quad (3.16)$$

### 3.2.6.- INFLUENCIA DE VARIABLES DE FABRICACIÓN EN LAS PROPIEDADES DE LOS TABLEROS.

Para medir la influencia de cada variable (tipo de tablero y tiempo en la prensa de platos calientes) en las propiedades del tablero, se obtienen los diagramas de barras de error para cada variable. Las barras permiten identificar la variabilidad de la medida empleada como función de resumen (la media y la desviación estándar).

Se realiza el análisis de la varianza para averiguar cuáles son las variables independientes y cuáles son las combinaciones de las mismas que producen diferencias en la conducta observada (registrada como variable cuantitativa) respecto del factor considerado.

El Análisis de la Varianza (ANOVA) fue diseñado por Sir Ronald A. Fisher y se ha utilizado en todos los campos de investigación en los que los datos se miden cuantitativamente (Fisher 1958). Es la herramienta fundamental para el estudio de una variable de interés a partir de observaciones que dependen de varios factores, porque permite descomponer la variabilidad de un experimento en componentes independientes a las que pueden asignarse diferentes causas. Se define también como el proceso aritmético que descompone una suma total de cuadrados en componentes asociados con fuentes de varianza reconocidas (Steel et al. 1985).

El Análisis de la Varianza de medidas repetidas, se caracteriza por el hecho de que las observaciones o respuestas diferentes registradas para cada elemento, no son el

resultado de valorar variables diferentes, sino el resultado de valorar un mismo aspecto distintas ocasiones.

En el análisis de la varianza, el valor que sirve de referencia a la hora de aceptar o rechazar la hipótesis nula, es el nivel de significación. Si el nivel de significación del estadístico de contraste  $F$ , es mayor que 0,05 aceptamos la hipótesis nula de independencia de variables (no existen efectos diferenciales entre los tratamientos). Si el nivel de significación es menor que 0,05 rechazamos la hipótesis nula y aceptamos que existe una relación de dependencia entre las variables y en este caso podremos decir que los niveles del factor sí influyen sobre los valores de la variable cuantitativa. Con el análisis de la varianza se llega a la conclusión de rechazar o no la hipótesis nula de igualdad de medias en los ensayos. En caso de rechazarla se sabe que al menos existe una diferencia significativa entre algún par de medias por lo que se puede recurrir a otros procedimientos como los métodos de comparaciones múltiples en el caso de querer mantener la hipótesis. Si los valores medios eran significativos asintóticamente, se comprobó la presencia del valor más indicativo, así como las diferencias entre ellos y se realizaron las pruebas de significación basadas en el error experimental. Para comprobar que los datos son adecuados al modelo y conocer si la muestra es representativa de la población de estudio, se realiza como prueba de significación la prueba Chi-cuadrado, que es una prueba de bondad de ajuste basada en el análisis de residuos, para detectar la falta de normalidad.

Seguidamente para obtener la función lineal entre las variables que permitan explicar o predecir la variable independiente, se analizó el modelo de regresión mediante el coeficiente de correlación de Pearson para estimar el grado de asociación, obteniendo la regresión lineal de cada conjunto representativo de los ensayos. Si  $R^2 > 0,5$  existe una correlación lineal entre las variables.

Finalmente se tuvieron en consideración pruebas de autocorrelación. Se utilizó esta prueba para determinar si los resultados de cada una de las variables son independientes entre sí. La prueba se basa en las correlaciones lineales entre la secuencia observada de valores  $x_i$  y las secuencias retardadas 1, 2, 3,...  $k$  posiciones. El estadístico al ser las observaciones independientes es de Box-Ljung para cada coeficiente de la función de autocorrelación que sigue una distribución Chi-cuadrado. Se debe observar que el valor de la probabilidad no sea menor del 0,05 así los valores se encuentran dentro de los intervalos de confianza establecidos para los valores de la muestra. Para saber cual es el orden de autocorrelación se analizó el comportamiento de los coeficientes de

autocorrelación parcial. En este caso el orden de autocorrelación es el primer coeficiente que se encuentre fuera de las bandas de confianza.

Para realizar el análisis estadístico de los datos obtenidos en los ensayos experimentales, se utilizó el programa estadístico SPSS 21.0 para Windows.

### 3.2.7.- CLASIFICACIÓN DE LOS TABLEROS DE PARTÍCULAS.

La norma EN 312 (2010) establece que los tableros de partículas se clasifican en 7 tipos según las propiedades que presenten de resistencia a flexión, módulo de elasticidad en flexión, cohesión interna, resistencia al arranque de tornillo e hinchazón en grosor durante 24 horas en agua. Para evaluar los tableros fabricados se realizó una comparación con lo indicado en la norma. Clasificación de los tableros:

- P1 Tableros para utilización general en ambiente seco
- P2 Tableros para aplicación interior (incluyendo mobiliario) en ambiente seco.
- P3 Tableros no estructurales para utilización en ambiente húmedo.
- P4 Tableros estructurales para utilización en ambiente seco.
- P5 Tableros estructurales para utilización en ambiente húmedo.
- P6 Tableros estructurales de alta prestación para utilización en ambiente seco.
- P7 Tableros estructurales de alta prestación para utilización en ambiente húmedo.

Los requisitos que debe cumplir cada tablero de partículas, para un espesor entre 6 y 13 mm, son las que figuran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Requisitos de los tableros de partículas según la norma EN 312 (2010)

Propiedad	Norma	Unidades	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5	Tipo 6	Tipo 7
Resistencia a flexión	EN 310	N/mm <sup>2</sup>	12,5	13	15	16	18	20	22
Módulo elasticidad en flexión	EN 310	N/mm <sup>2</sup>	-	1800	2050	2300	2550	3150	3350
Cohesión interna. Tracción perpendicular	EN 319	N/mm <sup>2</sup>	0,28	0,40	0,45	0,40	0,50	0,60	0,75
Hinchazón en grosor 24 horas	EN 317	%	-	-	14	16	11	14	9
Arranque de tornillo cara	EN 311	N/mm	-	-	-	70	70	70	70



## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. FABRICACIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE TABLEROS

Se confeccionaron 112 tableros de partículas de caña usando un molde de 400 x 600 mm y como adhesivo se utilizó cemento y almidón con diferentes porcentajes en peso respecto al peso de las partículas de caña. Las variables del proceso de fabricación de cada uno de las clases de tableros se indican en la tabla 4.1. La temperatura de la prensa de platos calientes fue de 100°C y la presión de 2,6 MPa. El tiempo de exposición en la prensa fue de 1, 2, 3 y 4 horas.

Tabla 4.1. Variables de fabricación de los tableros.

Clase	Tipo	Tiempo (h)	Nº Tableros	% Almidon de patata	% Cemento Portland	% Agua
A1	A	1	4	10	20	25
A2	A	2	4	10	20	25
A3	A	3	4	10	20	25
A4	A	4	4	10	20	25
B1	B	1	4	5	20	25
B2	B	2	4	5	20	25
B3	B	3	4	5	20	25
B4	B	4	4	5	20	25
C1	C	1	4	10	10	25
C2	C	2	4	10	10	25
C3	C	3	4	10	10	25
C4	C	4	4	10	10	25
D1	D	1	4	0	10	25
D2	D	2	4	0	10	25
D3	D	3	4	0	10	25
D4	D	4	4	0	10	25
E1	E	1	4	0	20	25
E2	E	2	4	0	20	25
E3	E	3	4	0	20	25
E4	E	4	4	0	20	25
F1	F	1	4	5	0	25
F2	F	2	4	5	0	25
F3	F	3	4	5	0	25
F4	F	4	4	5	0	25
G1	G	1	4	10	0	25
G2	G	2	4	10	0	25
G3	G	3	4	10	0	25
G4	G	4	4	10	0	25

Algunos de los tableros fabricados se pueden observar en la figura 4.1.



Figura 4.1. Diferentes tableros de caña- cemento.

Cuando los tableros de sacaron de la prensa se dejaron enfriar al aire en posición vertical. Posteriormente se cortaron las diferentes probetas con las dimensiones y características señaladas para cada ensayo. En el laboratorio de ensayos se mantuvo el entorno de humedad del 65% y la temperatura de 20° C mediante climatización.

#### **4.2. ANÁLISIS DE LOS TABLEROS USANDO MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM)**

Los tableros se fabricaron con fibras de caña, almidón y cemento. Existen varios problemas que afectan a los tableros de fibras vegetales con cemento: la degradación de las fibras vegetales y el retardo en la hidratación del cemento. (Savastano et al., 2003; Yan et al., 2016). Se realizaron observaciones con el microscopio electrónico de barrido para investigar la interacción entre los tres componentes de los tableros.

Para analizar en los tableros la evolución mineralógica del cemento Portland durante la hidratación, se utilizó el método seguido por Giraldo and Tobón (2006). Se obtuvieron micrografías a los 8 días de elaboración de los tableros de la clase A2 (que contenían un 20% de cemento y un 10% de almidón y estuvieron presionados 2 horas). Las muestras para SEM se pulieron y se metalizaron con oro y se procedió a su observación.

Se puede considerar la hidratación del cemento Portland como un proceso en el cual se produce una disolución con reacción de los componentes primarios con el agua, seguida de una difusión y precipitación de los componentes.

Las primeras reacciones de la hidratación se producen en la superficie de los granos de cemento. El primer componente que reacciona con el agua es el C3S (silicato

tricálcico). Para evitar un fraguado muy rápido y hacer la mezcla trabajable se añade al clinker yeso dihidratado que disminuye la solubilidad del aluminato.

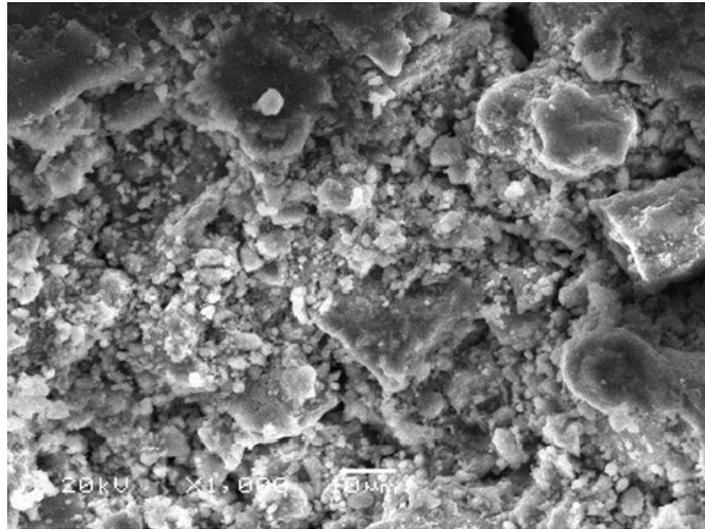


Figura 4.2. Gránulos de cemento hidratados a 8 días de hidratación

Como se distingue en la figura 4.2, en la micrografía, los granos de cemento están hidratándose y aparecen cristales de otros componentes y silicatos hidratados. También se observan fisuras de hidratación.

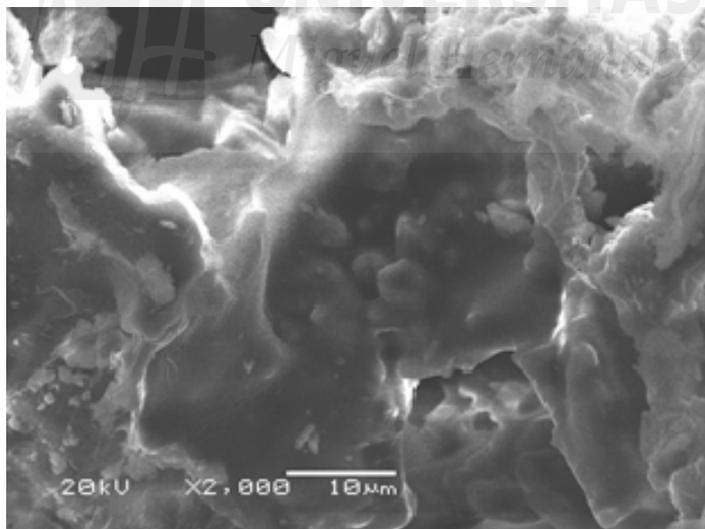


Figura 4.3. Gel de almidón recubriendo los granos de cemento a 8 días de hidratación.

Se puede observar en la figura 4.3, almidón gelificado envolviendo a los granos de cemento en proceso de hidratación.

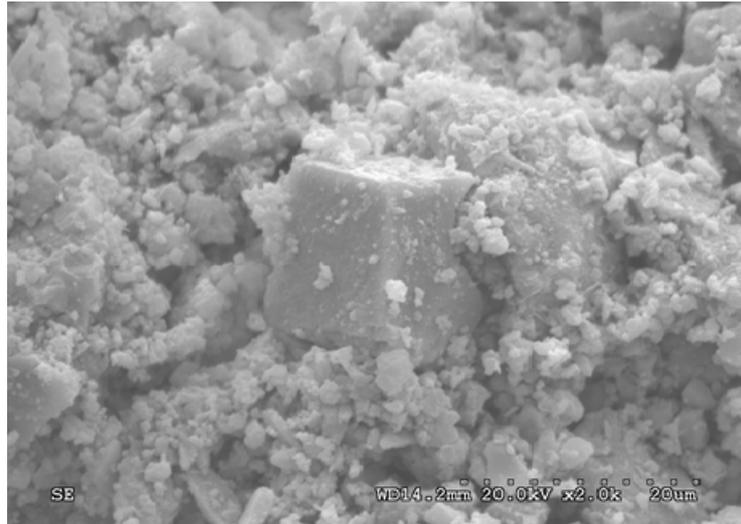


Figura 4.4. Cubo de yeso rodeado de tobermorita gel a 8 días de hidratación.

En la figura 4.4, aparece un cubo de sulfato cálcico (yeso) que se añadió al clinker del cemento Portland para disminuir la solubilidad del aluminato. El yeso y el aluminato reaccionarán posteriormente para formar sulfo-aluminato de calcio hidratado. El cubo está rodeado de cristales de C3S convertidos en tobermorita gel ( $C_3S_2H_3$ ), cuyos granos comienzan a unirse (producto intermedio de hidratación).

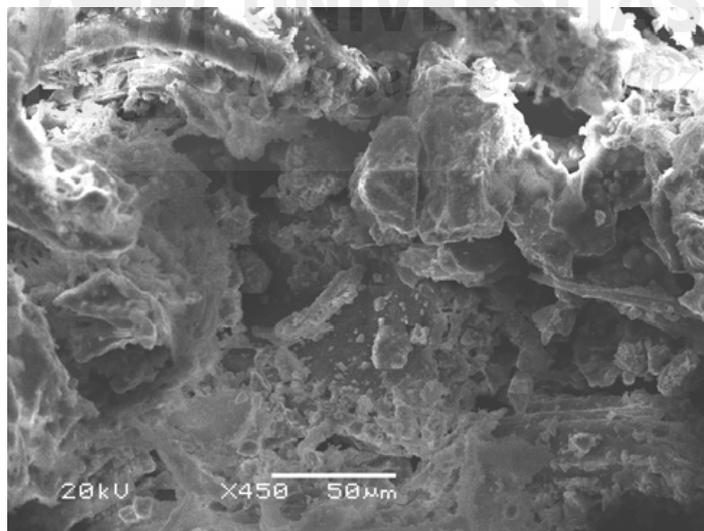


Figura 4.5. Tobermorita sobre un gel orgánico a 8 días de hidratación.

En la figura 4.5, se observa tobermorita sobre un gel orgánico, lo que indica que el almidón ha gelificado. También aparecen otros componentes intermedios de la hidratación del cemento que se analizan en las siguientes micrografías.

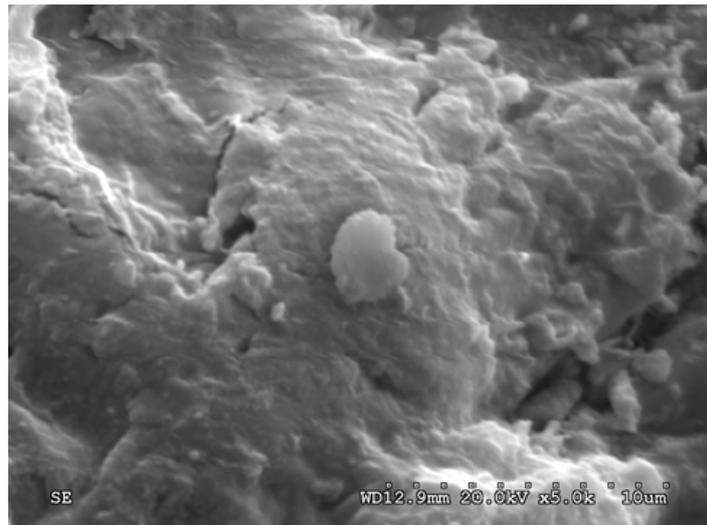


Figura 4.6. Tobermorita gel.

En la figura 4.6, se observa tobermorita gel que se unido formando una matriz continua.

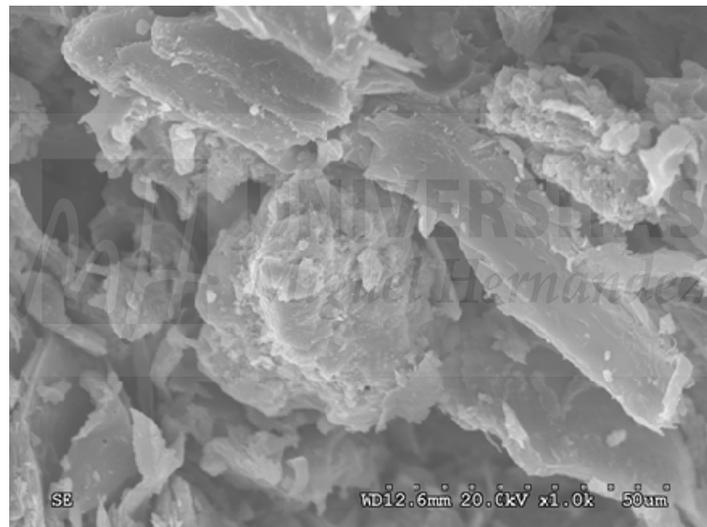


Figura 4.7. Tobermorita y portlandita cristalizada a 8 días de hidratación.

En la figura 4.7, se observa que algunos granos de tobermorita se han unido formando una matriz continua en capas. También hay algunas placas hexagonales delgadas, lo que indica presencia de portlandita  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ . El análisis indicó la existencia de cristales de Silicio, Calcio, Magnesio y Aluminio.

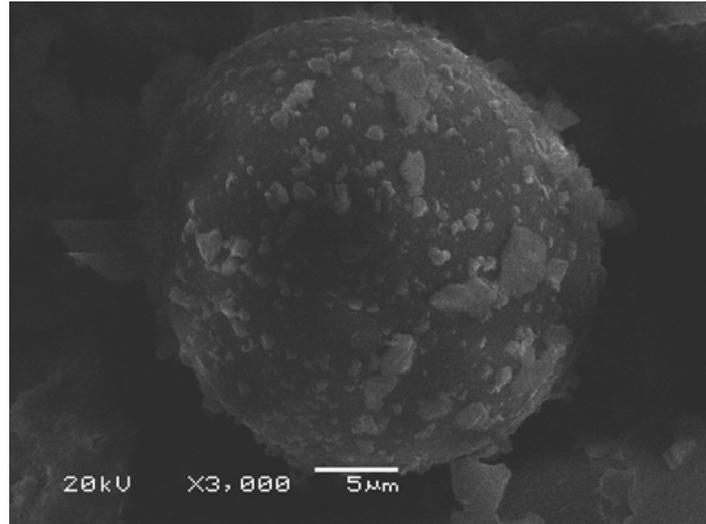


Figura 4.8. Belita (C2S) a 8 días de hidratación.

En la figura 4.8, se observa la aureola de reacción de la belita (silicato bicálcico y aluminato tricálcico). El análisis del espectro indica la existencia de Silicio, Calcio y Aluminio. En la figura 4.9, se ven cristales de tobermorita, alita (silicato tricálcico) y porlandita en proceso de hidratación.

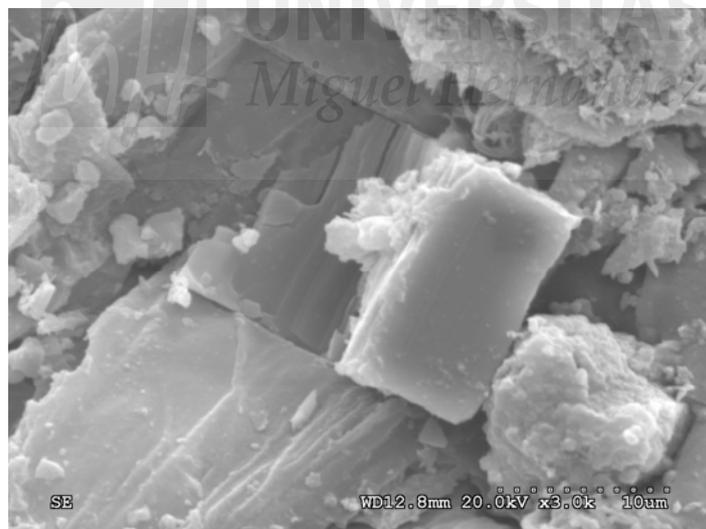


Figura 4.9. Tobermorita, alita y porlandita.

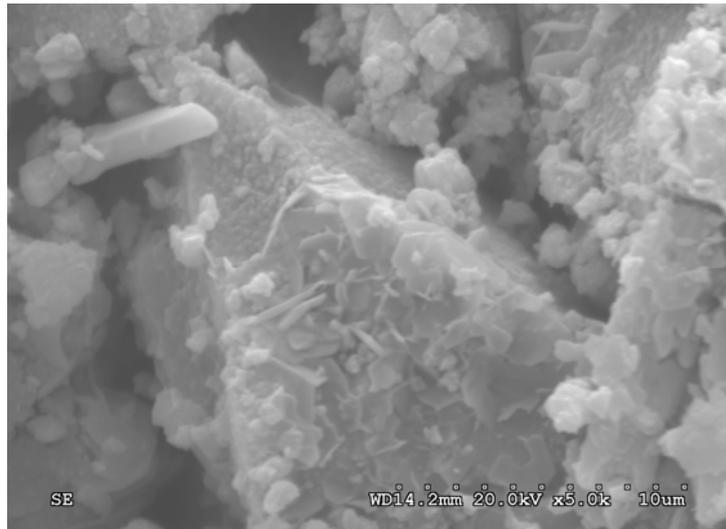


Figura 4.10. Portlandita (SC3) sobre tobermorita.

En la figura 4.10, se observa portlandita (hidróxido de calcio) sobre tobermorita (silicatos de calcio hidratado). En ninguna búsqueda a lo largo de las muestras del material para realizar las micrografías se ha encontrado etringita, siendo algo beneficioso pues la etringita tiene efectos nocivos en el fraguado del cemento por generar expansión y ruptura.



Figura 4.11. Fibras orgánicas de caña común.

En la figura 4.11, se ve como las pequeñas fibras de caña quedan unidas al conjunto conglomerante del tablero y no se detecta degradación.

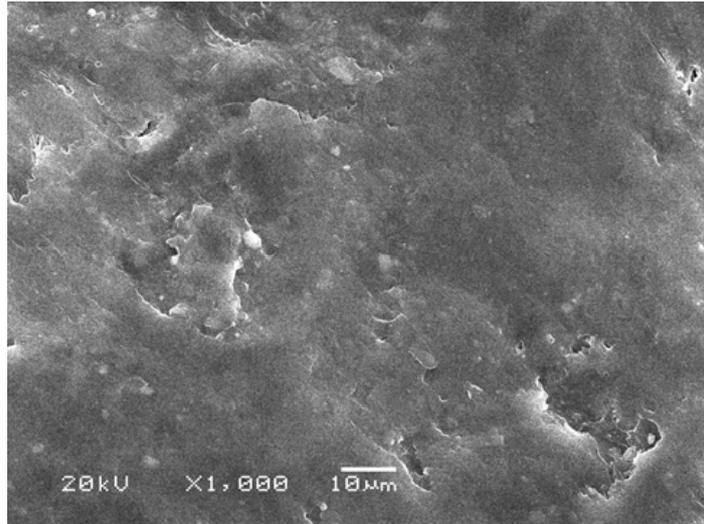
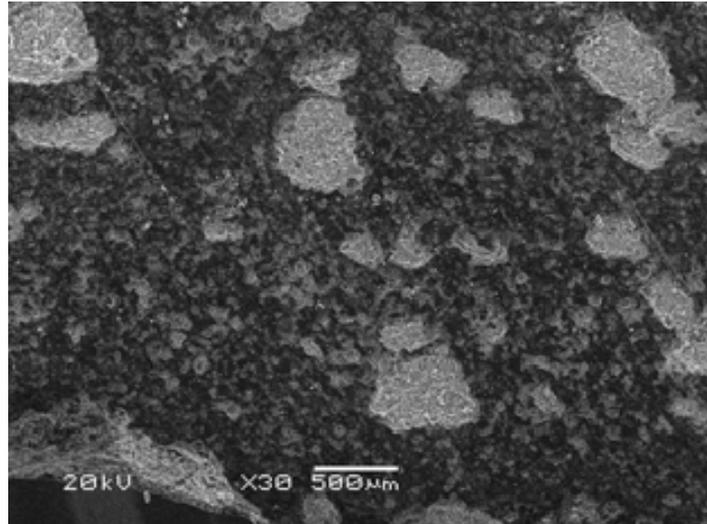


Figura 4.12. Superficie del tablero a 8 días de hidratación.

Como se observa en la figura 4.12, en la superficie del tablero no se aprecian microfisuras. El análisis del espectro indica que contiene los siguientes elementos, indicadas las proporciones en peso: C (56,37%), Mg (1,28%), Al (2,02%), Si (7,59%), S (1,85%), K (0,92%), Ca (28,55%) y Fe (1,42%).

La hidratación del cemento Portland en los tableros de partículas de caña con cemento y almidón coincide con la descrita por Giraldo and Tobón (2006) en cementos sin fibras vegetales a los 7 días.

Yan et al. (2016) indicaron que las fibras vegetales se degradan en contacto con el cemento por hidrólisis alcalina. En este estudio no se observó a los 8 días ningún tipo de degradación de las fibras de caña. Savastano et al. (2003) concluyeron que la disminución de la resistencia a la flexión y del módulo de elasticidad en flexión, después de la exposición durante un año de compuestos de fibras vegetales con cemento, podrían atribuirse a la carbonatación de la matriz seguida de lixiviación y microfisuración progresiva. En las micrografías de las figura 4.12 y 4.13 correspondientes a la superficie del tablero realizadas a los 8 y 28 días de hidratación, no se observa microfisuras. En este trabajo se incluye un apartado donde se comprueba que la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad a flexión mejoran en los tableros al año de fabricación. Por lo que aparentemente no hay incompatibilidad entre los tres componentes de los tableros.



*Figura 4.13. Superficie del tablero a 28 días de hidratación.*

El análisis realizado indica que el cemento se mineraliza en los tableros elaborados en contacto con el almidón y las partículas de caña, siguiendo las mismas pautas de hidratación que el cemento sin fibras ni aditivos orgánicos, y que las fibras de caña toleran la alcalinidad del cemento.



### 4.3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DENSIDAD.

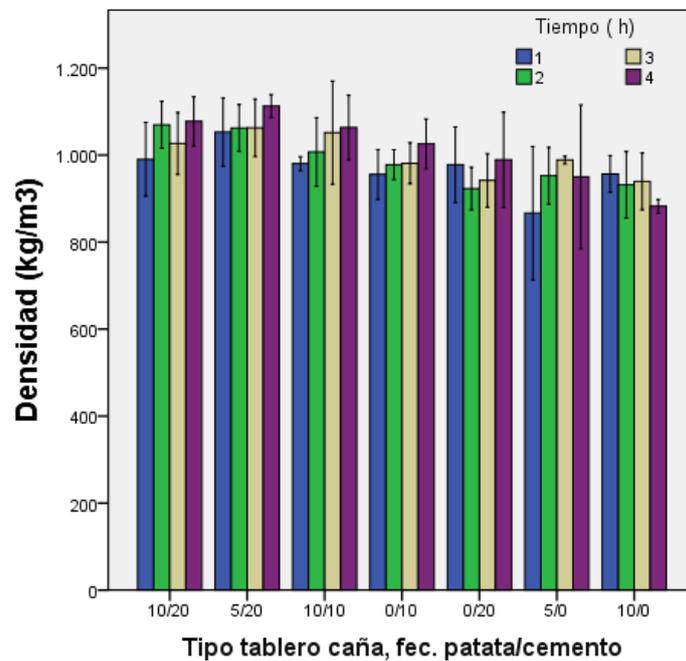
Se cortaron de cada tablero 6 probetas rectangulares de dimensiones 50 x 50 mm que posteriormente fueron utilizadas en otros ensayos, luego el número de probetas ensayadas fueron un total de N= 672.

Siguiendo el proceso que indica la norma EN 323 (1993), se midieron los lados y el espesor de cada probeta, se pesaron y se obtuvieron 6 medidas de densidad para cada tablero. Los valores medios obtenidos de densidad se indican en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Informe. Densidad respecto al tipo de tablero y tiempo en prensa.

Tipo	Tiempo (h)	Densidad media (Kg/m <sup>3</sup> )	Nº de ensayos	Desv. estándar
A	1	990,30	24	84,857
A	2	1069,71	24	53,929
A	3	1052,86	24	90,601
A	4	1081,12	24	52,451
A	Media	1050,57	96	75,345
B	1	1052,94	24	78,521
B	2	1062,30	24	53,978
B	3	1062,63	24	66,150
B	4	1116,34	24	31,223
B	Media	1069,73	96	60,092
C	1	1001,33	24	37,892
C	2	1007,01	24	79,018
C	3	1018,77	24	107,265
C	4	1063,32	24	74,222
C	Media	1026,48	96	76,852
D	1	974,52	24	60,243
D	2	978,12	24	34,248
D	3	981,11	24	47,400
D	4	1025,90	24	57,307
D	Media	987,97	96	48,862
E	1	956,24	24	92,073
E	2	922,99	24	49,075
E	3	941,91	24	61,506
E	4	989,25	24	109,665
E	Media	950,52	96	74,923
F	1	871,12	24	18,222
F	2	942,43	24	22,995
F	3	968,64	24	19,318
F	4	1020,99	24	65,033
F	Media	950,79	96	64,133
G	1	956,60	24	42,426
G	2	911,80	24	19,749
G	3	939,61	24	65,266
G	4	897,26	24	37,059
G	Media	926,32	96	41,613

El valor medio de la densidad de los tableros obtenida en función del tipo y tiempo en la prensa de platos calientes es el que se indica en la figura 4.13.



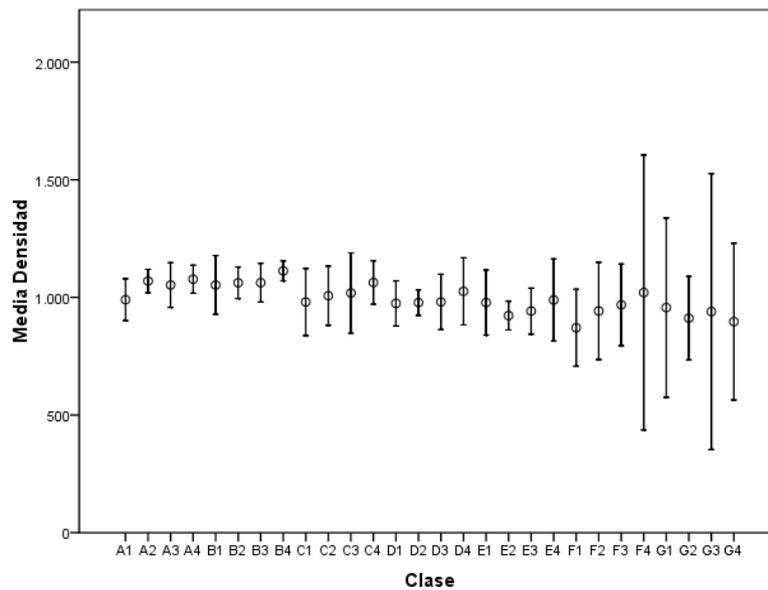
Barras de error: +/- 1 DT

Figura 4.14. Valor medio de densidad obtenido en cada tablero.

Se observa en el diagrama de barras de la figura 4.14 una variación de valores de densidad entre unos tableros y otros. Todos los tableros tienen una densidad menor que los tableros de madera-cemento que oscila en  $1200 \text{ kg/m}^3$ . Como se variaron los parámetros de tiempo en prensa y composición (tipo de tablero), se realizó el análisis estadístico para averiguar cuál es la influencia de dichas variables.

#### 4.3.1. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE TABLERO SOBRE LA DENSIDAD.

Los valores de densidad que se obtuvieron parecen indicar que la densidad depende del tiempo y tipo de tablero, lo que denominamos clase, por lo que se realizó el análisis estadístico obteniendo las barras de error para un índice de certeza del 95%, como indica la figura 4.15.



Barras de error: 95% IC

Figura 4.15. Diagrama de barras de error de densidad en función de la clase de tablero

Las barras de error no son significativas ya que unos valores solapan a otros teniendo medias iguales, parece que no hay diferencias entre unas clases de tableros y otros. Para averiguar si existe dependencia entre el tipo de tablero y la densidad, se realizó el análisis de la varianza como indican la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Análisis de la varianza. Densidad \*tipo de tablero.

		Suma de	gl	Media	F	Sig.
		cuadrados		cuadrática		
Densidad * Tipo	Inter- grupos	(Combinadas) 255208,899	6	42534,817	9,379	,000
	Intra-grupos	444444,088	665	4535,144		
	Total	699652,987	671			

El análisis de la varianza señaló que la densidad depende del tipo de tablero porque el estadístico de contraste  $F(6.665) = 9,379$  tiene una significación igual a 0,000 menor que 0,05. Para confirmar esta apreciación se realizó la prueba de residuos chi-cuadrado, como indica la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Estadísticos de contraste. Densidad \*tipo de tablero

	Densidad	Tipo
Chi-cuadrado	,000 <sup>a</sup>	15,067 <sup>b</sup>
gl	665	6
Sig. asintót.	1,000	,020

a. 105 casillas (100,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 1,0.

b. 0 casillas (0,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 15,0.

La prueba confirmó que la densidad de los tableros depende del tipo de tablero, pues existe una relación entre ambos factores con una significación asintótica igual a 0,02 menor que 0,05.

#### 4.3.2. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN EN LA PRENSA RESPECTO A LA DENSIDAD.

Al realizar el análisis de la varianza respecto al tiempo en la prensa como indica la tabla 4.5 y 4.6.

Tabla 4.5. Valores medios. Densidad \* tiempo en prensa.

Tiempo (h)	Media (kg/m <sup>3</sup> )	N	Desviación estandar.
1	982,49	168	77,207
2	1002,18	168	77,723
3	1008,95	168	83,202
4	1042,48	168	83,184
Media	1009,34	672	82,021

Los valores medios son muy similares indicando que son tableros de alta densidad y que va aumentando conforme aumenta el tiempo en prensa.

Tabla 4.6. ANOVA. Densidad \* tiempo en prensa.

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Densidad	Inter- grupos (Combinadas)	47352,608	3	15784,203	2,444	,048
*	Intra-grupos	652300,379	668	6458,420		
Tiempo	Total	699652,987	671			

El análisis de la varianza señaló que la densidad depende del tipo de tablero porque el estadístico de contraste  $F(3,668) = 2,444$  tiene una significación igual a 0,048 menor que 0,05. Para confirmar que no se debe al error experimental se realizó la prueba chi-cuadrado como indica la tabla 4.7

Tabla 4.7. Estadístico de contraste. Densidad \* tipo de tablero.

	Densidad	Tiempo
Chi-cuadrado	,000 <sup>a</sup>	,486 <sup>b</sup>
gl	668	3
Sig. asintót.	1,000	,922

a. 105 casillas (100,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 1,0.

b. 0 casillas (0,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 26,3.

La prueba confirmó que la densidad de los tableros no depende del tiempo en prensa, pues existe una relación entre ambos factores con una significación asintótica igual a 0,922 mayor que 0,05.

Para saber cuál es el orden de correlación y averiguar a influencia del tipo de tablero sobre la densidad se analizó el comportamiento de los coeficientes de autocorrelación parcial en la tabla 4.8.

Tabla 4.8. Correlaciones de muestras relacionadas. Densidad\* tipo de tablero

		Tipo
	Correlación de Pearson	-,571**
Densidad	Sig. (bilateral)	,000
	N	672

\*\* . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

La tabla indica que la variable tipo de tablero influye con una certeza del 99% en la densidad del tablero, o sea que la densidad depende del % de fécula de patata y cemento utilizado como aglomerante.

Todos los tableros son de alta densidad, aunque menor de 1200 kg/m<sup>3</sup>. Los tableros que usaron mezclas de cemento y almidón tienen mayor densidad que los tableros que usaron cada uno de estos adhesivos por separado. Los tableros de mayor densidad son los tableros clase B4, que tenían un 5% de almidón de patata y 20% de cemento, y estuvieron en la prensa de platos calientes durante 4 horas, alcanzando una densidad media de 1116 kg/m<sup>3</sup>.

#### 4.4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE HUMEDAD

De cada tablero se cortó una probeta rectangular con una masa aproximada de 20 g. Una vez anotado el peso de cada probeta se introdujeron las probetas en medidor de humedad y se anotó para cada una el % de humedad. Para la realización del ensayo se procedió como indica la norma EN 322 (1993).

Los valores del % de humedad en función del tipo de tablero y el tiempo en prensa se indican en la tabla 4.9 y 4.10.

*Tabla 4.9. Informe. Humedad relativa del tablero \*tipo de tablero.*

Tipo tablero	Media. % RH	N	Desviación estándar
A	1,6746	16	,48572
B	1,6588	16	,37143
C	1,2569	16	,44155
D	2,2529	16	,13781
E	2,2750	16	,51020
F	1,7765	16	,42382
G	1,6413	16	,25125
Media	1,7822	112	,52808

Se observa que los tableros que se unieron solo con cemento como son los tipo D y E son los que mayor % de humedad tenían, seguidos de los que usaron solo fécula de patata, tipos F y G.

*Tabla 4.10. Informe. Porcentaje de humedad del tablero \*tiempo en prensa*

Tiempo (h)	Media. % RH	N	Desviación estándar
1	2,0534	28	,27450
2	1,9069	28	,52352
3	1,6265	28	,51025
4	1,5485	28	,59394
Media	1,7822	112	,52808

El tiempo en prensa parece que influye en el porcentaje de humedad pues conforme aumenta el tiempo disminuyen el porcentaje de humedad.

Las tablas indican que el % de humedad de los tableros es muy bajo. La humedad relativa de los tableros varía desde un 1,54 hasta un 2,27%, estos datos son buenos

indicativos sobre este tipo de tableros, ya que los tableros deben tener un porcentaje de humedad menor del 8% que es el porcentaje de humedad mayor admitido en los tableros aglomerados de madera.

Para averiguar que variables de fabricación intervienen en el porcentaje de humedad se realizó el análisis estadístico.

#### 4.4.1. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TIPO Y TIEMPO DE EXPOSICIÓN EN LA PRENSA SOBRE EL PORCENTAJE DE HUMEDAD DEL TABLERO.

Para averiguar la dependencia de ambos factores se obtuvo el diagrama de barras de error con un índice de certeza del 95% representado en la figura 4.16.

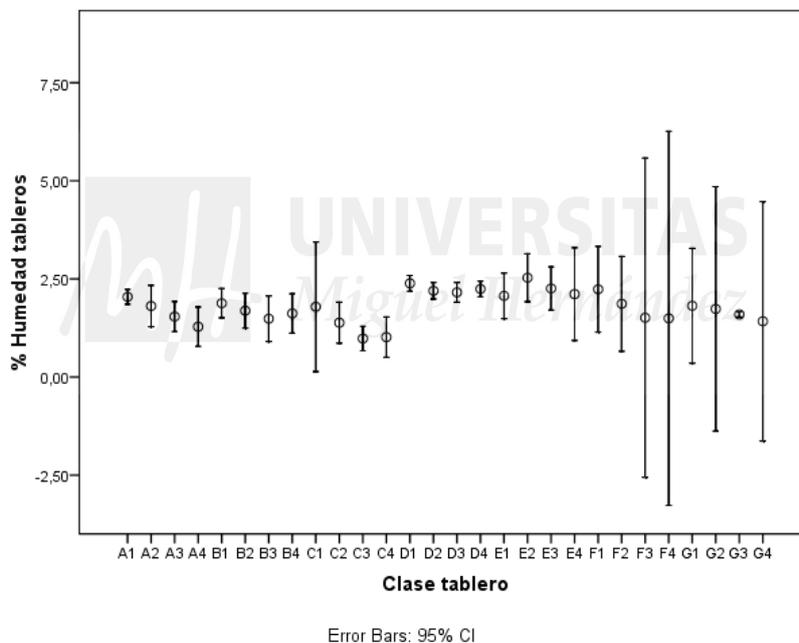


Figura 4.16. Diagrama de barras de error del % de humedad respecto a la clase de tablero.

Las barras de error muestran valores similares de medias, además unos se interpolan con otros, por tanto parece mostrar que no hay dependencia entre la densidad y el tipo de tablero para ambos factores. Para la evaluación se realiza el análisis de la varianza como indican la tabla 4.11.

Tabla 4.11. ANOVA. Porcentaje de humedad del tablero \*tipo de tablero.

			Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Humedad *	Inter-grupos	(Combinadas)	12,121	6	2,020	11,728	,000
Tipo	Intra-grupos			105	,172		
	Total			111			

El análisis de la varianza muestra que no hay igualdad de medias del % de humedad del tablero respecto al tamaño de partícula, pues el estadístico de contraste  $F(6,105) = 11,728$  tiene una significación  $= 0,000 < 0,05$ .

La prueba indica que son factores dependientes, por tanto se puede afirmar que el tipo de tablero influye en el porcentaje de humedad del tablero. Para averiguar si este resultado se debe al error experimental se obtuvo el estadístico de contraste con la prueba chi-cuadrado, como indica la tabla 4.12.

Tabla 4.12. Estadísticos de contraste. % de humedad del tablero \*tipo de tablero.

	Humedad	Tipo
Chi-cuadrado	23,333 <sup>a</sup>	15,067 <sup>b</sup>
gl	105	6
Sig. asintót.	1,000	,020

a. 112 casillas (100,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 1,4.

b. 0 casillas (100,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 15,0.

La prueba tiene una significación asintótica igual a 0,020 menor que 0,05, lo que indica que la humedad depende del tipo de tablero.

Como se utilizaron en la fabricación de los tableros tiempos diferentes, para evaluar la influencia sobre el porcentaje de humedad final del tablero, se realizó el análisis de la varianza, como indican las tablas 4.13.

Tabla 4.13. ANOVA. Porcentaje de humedad del tablero \* tiempo en prensa

			Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Humedad	Inter-grupos	(Combinadas)	4,267	3	1,422	5,807	,001
* Tiempo	Intra-grupos			108	,245		
	Total			111			

El estadístico de contraste  $F(3.108) = 5,807$  tiene una significación igual a 0,001 que es menor que 0,05, luego no hay igualdad de medias, lo que indica que hay dependencia entre el porcentaje de humedad y el tiempo.

También se realizó el análisis de residuos mediante la prueba de contraste chi-cuadrado como muestran las tablas 4.14 para averiguar si los datos son adecuados a la prueba.

Tabla 4.14. Estadísticos de contraste. % de humedad \*tiempo en prensa.

	Humedad	Tiempo
Chi-cuadrado	23,333 <sup>a</sup>	,486 <sup>b</sup>
gl	108	3
Sig. asintót.	1,000	,022

<sup>a</sup>. 112 casillas (100,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 1,4.

<sup>b</sup>. 0 casillas (100,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 26,3

El estadístico de contraste indica que el porcentaje de humedad depende del tiempo que estuvo el tablero en la prensa de platos calientes.

Para averiguar cuál de las dos variables tipo y tiempo influye más, se realizó la prueba de correlaciones de Pearson como se indica en la tabla 4.15.

Tabla 4.15. Correlaciones parciales. % de humedad \*tipo tablero \*tiempo en prensa.

		Humedad	Tipo	Tiempo
Humedad	Pearson Correlation	1	,239*	-,375**
	Sig. (2-tailed)		,014	,000
	N	112	112	112
Tipo	Pearson Correlation	,239*	1	-,004
	Sig. (2-tailed)	,014		,965
	N	105	105	105
Tiempo	Pearson Correlation	-,375**	-,004	1
	Sig. (2-tailed)	,000	,965	
	N	108	108	108

\*. Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

\*\*. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

La prueba indica que la humedad relativa depende con un 99% de probabilidad del tiempo en prensa y con un 95% de probabilidad del tipo de tablero, luego la variable más influyente es el tiempo en prensa.

Los resultados medios del % de humedad en función del tipo de tablero y tiempo en prensa, son los que se observan en el diagrama de barras de la figura 4.16.

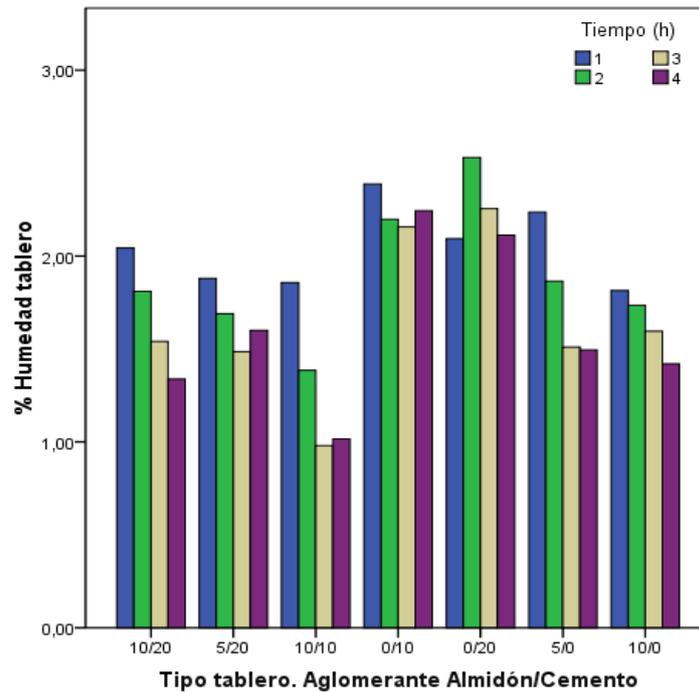


Figura 4.17. Diagrama de barras del % de humedad.

Como se observa en el diagrama 4.17 los tableros en los que el aditivo era una mezcla de cemento y almidón de patata tenían una humedad relativa menor que los que en los que se usaron o cemento o almidón solo como adhesivo. Los tableros con menor humedad relativa eran aquellos cuya mezcla de adhesivo era de un 10% de almidón de patata y un 10% de cemento. Teniendo los tableros cuatro horas en la prensa de platos calientes se disminuyó en todos los tipos de tableros la humedad relativa. Los tableros con adhesivo 10% almidón y 10% cemento que estuvieron 4 horas en la prensa tienen la menor humedad relativa con un valor de 1,1%.

#### 4.5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A FLEXIÓN.

Se cortaron las probetas de cada tablero como indican las normas, tres probetas en sentido longitudinal y otras tres en sentido transversal, como muestra la figura 4.18 y se procedió a realizar el ensayo a flexión como indica la norma EN 310 (1993).



*Figura 4.18. Ejemplo de probetas para ensayos a flexión.*

La disposición de las probetas del ensayo a flexión en la máquina universal de ensayos, fue como se indica en la figura 4.19.



*Figura 4.19. Disposición de las probetas a flexión en la máquina de ensayos.*

En el ensayo de cada probeta se tomaron más de 15 puntos instantáneos de tensión a flexión-flecha tanto para el ensayo en las probetas cortadas en sentido longitudinal y transversal, Para cada tablero se usó para el análisis estadístico el valor medio de la tensión de rotura de los valores obtenidos en las 6 probetas.

Los valores medios medidos en cada tablero en el ensayo a flexión en función del tipo y tiempo en la prensa de platos calientes son los que figuran en la tabla 4.16.

Tabla 4.16. Valores medios de la resistencia a flexión en función de la clase de tablero.

Tipo	Tiempo (h)	Media (N/mm <sup>2</sup> )	N	Desviación estándar
A	1	12,8885	4	1,44070
	2	15,9775	4	1,19616
	3	19,7888	4	3,06328
	4	26,1112	4	2,28409
	Media	18,8725	16	5,44988
B	1	13,3325	4	1,13600
	2	14,1920	4	1,63232
	3	16,9340	4	1,49473
	4	19,8797	4	,91822
	Media	15,8000	16	2,72486
C	1	12,5567	4	6,07859
	2	20,7564	4	2,51371
	3	21,5909	4	1,60386
	4	27,2561	4	3,29771
	Media	21,4587	16	6,06576
D	1	11,4025	4	,81851
	2	12,7150	4	,46522
	3	13,8167	4	1,44659
	4	18,0367	4	,35076
	Media	13,7164	16	2,60978
E	1	6,2133	4	,22121
	2	6,3980	4	,23700
	3	8,7025	4	,34856
	4	8,4500	4	1,02173
	Media	7,4525	16	1,27057
F	1	9,8984	4	,30890
	2	7,8950	4	,47376
	3	9,4600	4	,43841
	4	12,0550	4	,28991
	Media	9,8271	16	1,61550
G	1	13,0000	4	,07071
	2	14,0400	4	,26870
	3	15,6327	4	,48460
	4	18,5329	4	,69711
	Media	15,3014	16	2,25763

Como indica la tabla 4.16 hay una gran dispersión de valores desde una resistencia de 26,11 N/mm<sup>2</sup> hasta 6,21 N/mm<sup>2</sup>, siendo unos tableros de alta resistencia y otros tableros con muy poca, por lo que para averiguar que variables de fabricación son las que influyen se procedió a realizar el análisis estadístico de los datos obtenidos en los ensayos. Se obtuvo el

diagrama de las barras de error en función de las clases de tableros fabricados, como indica la figura 4.20.

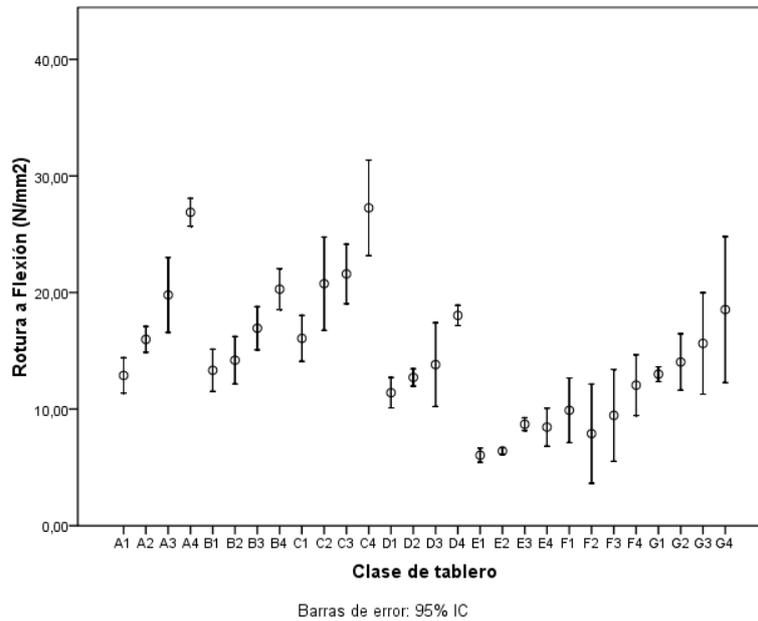


Figura 4.20. Barras de error de la resistencia a flexión en función de la clase de tablero.

Las barras de la figura 4.20 indican que hay diferencia entre los tipos de tablero y el tiempo que estuvieron en la prensa de platos calientes en todos los tipos, por lo que se analizó la influencia de cada una de las variables.

#### 4.5.1. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE TABLERO TIEMPO EN SOBRE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN.

Los tableros se fabricaron con 7 proporciones de adhesivos diferentes, por lo que se estudió la resistencia característica a flexión de los tableros en función del tipo de tablero. Los valores medios de resistencia a flexión se indican en la tabla 4.17.

Tabla 4.17. Valores medios de resistencia a flexión en función del tipo de tablero.

Tipo	Media (N/mm <sup>2</sup> )	N	Desviación estándar
A	18,8725	16	5,44988
B	15,8000	16	2,72486
C	21,4587	16	6,06576
D	13,7164	16	2,60978
E	7,4525	16	1,27057
F	9,8271	16	1,61550
G	15,3014	16	2,25763

En la tabla 4.17 se observa que unos tipos de tableros tienen una gran resistencia a flexión en cambio en otros su resistencia es muy pequeña, por lo que se realizó el análisis de la varianza como indica la tabla 4.18 para averiguar si son variables dependientes.

Tabla 4.18. ANOVA. Resistencia a flexión en función del tipo de tablero.

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Resistencia	Inter-grupos (Combinadas)	2202,342	6	367,05	22,768	,000
Flexión *	Intra-grupos		105	16,12		
Tipo tablero	Total		111			

El análisis de la varianza con un estadístico de contraste F (6.105) = 22,768 tiene una significación igual a 0,00 menor que 0,01, lo que indica con un índice de certeza del 99% que las variables son dependientes. El tipo de tablero influye en el valor de la resistencia a flexión que se obtiene.

Para averiguar si los datos obtenidos son indicativos y la muestra es representativa de la población de estudio, se utilizó la prueba de contraste chi-cuadrado, como se observa en la tabla 4.19.

Tabla 4.19. Chi-cuadrado. Resistencia a flexión en función del tipo de tablero.

	Tipo	Resistencia a flexión
Chi-cuadrado	15,067 <sup>a</sup>	,981 <sup>b</sup>
gl	6	105
Sig. asintót.	,020	1,000

a. 0 casillas (,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 15,0.

b. 111 casillas (100,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 1,0.

La prueba chi-cuadrado con una significación asintótica 0,20 confirma que la resistencia a flexión depende del tipo de tablero fabricado.

#### 4.5.2. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TIEMPO EN LA PRENSA SOBRE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN.

Se realizó también el análisis estadístico para evaluar si el valor de resistencia a flexión dependía del tiempo que estuvieron en la prensa de platos calientes.

Se obtuvo el valor medio de la resistencia a flexión de los tableros en función del tiempo en la prensa de platos calientes, como indica la tabla 4.20. En los valores medios obtenidos se observa que va aumentando la resistencia a flexión conforme aumenta el tiempo en prensa. Por lo que para evaluar dicha dependencia se realizó el análisis de la varianza como indica la tabla 4.21.

Tabla 4.20. Informe. Tensión rotura a flexión \*tiempo en prensa

Tiempo (h)	Media Flexión		
	(N/mm <sup>2</sup> )	N	Std. Deviation
1	11,5991	28	3,03591
2	13,5361	28	4,68044
3	16,0081	28	4,88754
4	20,2994	28	7,15138
Total	15,3802	112	6,03059

Tabla 4.21. ANOVA. Tensión rotura a flexión \*tiempo en prensa

		Suma de	gl	Media	F	Sig.
		cuadrados		cuadrática		
Resistencia	Inter-grupos (Combinadas)	1081,151	3	360,384	13,475	,000
Flexión *	Intra-grupos		108	26,744		
Tiempo en prensa	Total		111			

El análisis tiene un estadístico de contraste  $F(3.108) = 13,475$  tiene una significación igual a 0,000 menor que 0,01, lo que indica que las dos variables son dependientes. Para averiguar si el ensayo ha sido bien realizado se realizó la prueba se realizó el análisis de residuos mediante la prueba de contraste chi-cuadrado basada en el error experimental, como se observa en la tabla 4.22.

Tabla 4.22. Estadístico de contraste. Tensión rotura a flexión \*tiempo en prensa

	Resistencia Flexión	Tiempo
Chi-cuadrado	,981 <sup>a</sup>	,486 <sup>b</sup>
gl	108	3
Sig. asintót.	1,000	,022

<sup>a</sup>. 108 casillas (100,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 1,0.1,0.

<sup>b</sup>. 0 casillas (0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 26,3.

Como la resistencia a flexión depende de las dos variables de fabricación de los tableros, se obtuvieron las medidas de asociación como indica la tabla 4.23, para averiguar si hay una relación lineal entre las variables.

Tabla 4.23. Medidas de asociación.

	R	R cuadrado	Eta	Eta cuadrado
Flexión *Tipo	-,496	,246	,763	,582
Flexión *Tiempo	,525	,276	,535	,286

La recta de regresión tiene un  $R^2 < 0,5$ , para el tipo de tablero y tiempo en prensa, luego la relación no es lineal, los valores dependen del tipo y tiempo pero no es proporcional.

Para evaluar que variables son las más influyentes se realizó la prueba T de muestras relacionadas como indica la tabla 4.24.

Tabla 4.24. Correlaciones. Tensión a flexión.

	Tensión a flexión	Tiempo	Tipo
Tensión a flexión	1	,525**	-,496**
Correlación de Pearson			
Sig. (bilateral)		,000	,000
N	112	112	112

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Como indica el análisis existe un índice de confianza mayor del 99% de la dependencia de la resistencia a flexión de dichas variables, siendo la variable más influyente el tiempo en prensa con una correlación de 0,525.

En el diagrama de la figura 4.20 se indican los valores obtenidos de la resistencia a flexión en función del tipo y tiempo en prensa.

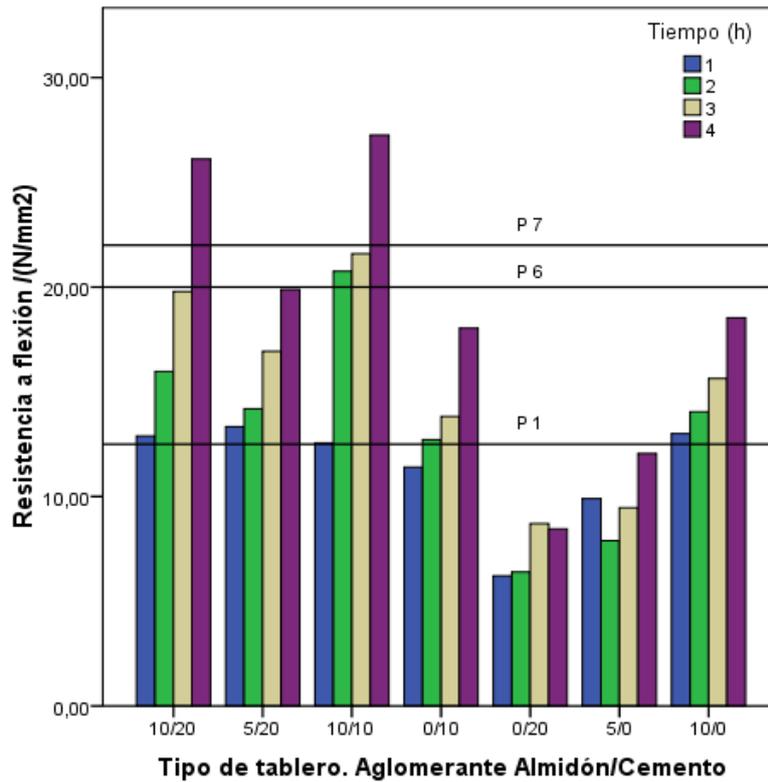


Figura 4.20. Resistencia a flexión en función del tipo de tablero y tiempo en prensa.

Las mayores resistencias a flexión se obtuvieron con adhesivo el 10% de almidón y 10% de cemento durante 4 horas en prensa. Se observa en el diagrama de la figura 4.19 que los tableros que usaron como adhesivo almidón y cemento y estuvieron en la prensa de platos calientes se obtuvieron tableros estructurales tipo P7 y si el tiempo en prensa era de 1 hora se obtenían tableros tipo P1.

#### 4.6. MÓDULO DE ELASTICIDAD EN FLEXIÓN

Una vez realizados los ensayos a flexión se calculó el módulo de elasticidad en flexión. El valor medio obtenido para cada clase de tablero es el que se indica en la tabla 4.25.

Tabla 4.25. Informe. Módulo de elasticidad \*tipo y tiempo en prensa.

Tipo	Tiempo	Mean	N	Std. Deviation
A	1	1846,0417	4	668,28769
	2	2083,5007	4	335,15030
	3	2636,8687	4	721,43518
	4	3759,7536	4	777,99675
	Media	2607,7016	16	976,54382
B	1	2130,7750	4	604,21256
	2	2610,0080	4	920,34687
	3	2392,6340	4	488,00107
	4	3076,9267	4	831,62410
	Media	2515,7112	16	727,87965
C	1	2021,8900	4	761,00451
	2	3058,5537	4	389,95353
	3	3104,6819	4	541,19111
	4	4287,4430	4	554,31691
	Media	3259,7392	16	961,17775
D	1	2325,8700	4	211,76193
	2	2426,5950	4	356,39394
	3	2519,4800	4	198,45320
	4	3080,1167	4	126,14364
	Media	2557,7607	16	365,11805
E	1	1234,7700	4	331,71393
	2	1426,8880	4	267,46871
	3	1713,7425	4	111,04985
	4	1865,4200	4	64,53529
	Media	1572,2125	16	308,42836
F	1	1958,1550	4	71,76427
	2	1663,2900	4	1,38593
	3	1784,0250	4	37,78072
	4	2443,8650	4	51,51273
	Media	1962,3338	16	319,69962
G	1	2148,2500	4	70,71068
	2	2192,8450	4	95,94732
	3	2211,7550	4	119,56469
	4	2763,6786	4	72,18341
	Media	2329,1322	16	278,13491

Se observa en los valores obtenidos que existe gran diferencia entre unos y otros. Para evaluar los tableros, se analizó la influencia de las variables de fabricación: tipo de tablero y tiempo en la prensa de platos calientes.

#### 4.6.1. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA CLASE DE TABLERO SOBRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN FLEXIÓN

Se obtuvo el diagrama de barras de la figura 4.21 donde se observa el módulo de elasticidad en función de la clase de tablero

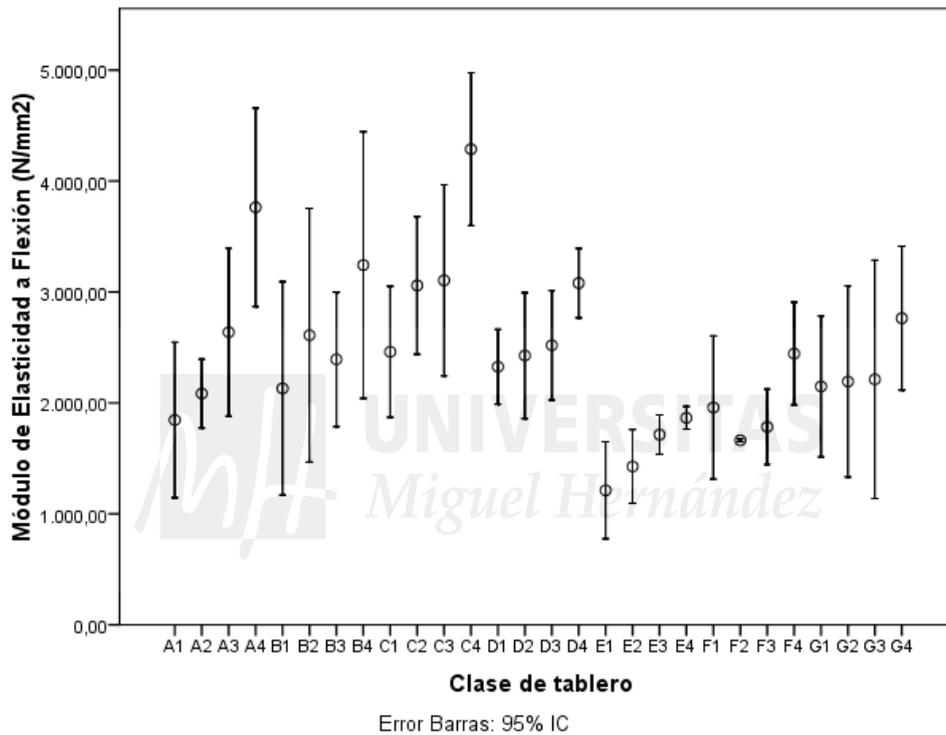


Figura 4.21. Diagrama de barras del módulo de elasticidad en flexión en función de la clase de tablero

El diagrama muestra que existe diferencia no sólo entre el tipo de tablero sino también respecto al tiempo en la prensa de platos calientes.

Para evaluar la influencia del tipo de tablero sobre el valor del módulo de elasticidad en flexión, se obtuvo el valor medio del Módulo de Elasticidad en función del tipo de tablero y el análisis de la varianza como indican las tablas 4.26 y 4.27.

Tabla 4.26. Informe. Módulo de Elasticidad\* tipo de tablero.

Tipo	Media (N/mm <sup>2</sup> )	N	Desviación estándar
A	2607,7016	16	976,54382
B	2515,7112	16	727,87965
C	3259,7392	16	961,17775
D	2557,7607	16	365,11805
E	1572,2125	16	308,42836
F	1962,3338	16	319,69962
G	2329,1322	16	278,13491
Media	2457,3232	112	856,58174

Se observa que los tableros tipo C (aglomerante 10% almidón de patata/ 10% cemento) son los que tienen mayor valor de módulo de elasticidad, seguidos de los tableros tipo A (aglomerante 10% fécula de patata/ 20% cemento) y con los que se obtienen menor valor son con los tableros tipo E (0% fécula de patata/ 20% cemento).

Tabla 4.27. ANOVA. Módulo de Elasticidad\* tipo de tablero

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Módulo Elasticidad *	Inter-grupos (Combinadas)	2,572E7	6	4285899,469	8,302	,000
	Linealidad	6880823,59	1	6880823,598	13,328	,000
	Desviación de Linealidad	1,883E7	5	3766914,643	7,297	,000
Tipo de tablero	Intra-grupos	5,059E7	105	516252,662		
	Total	7,631E7	111			

El análisis de la varianza indicó que existe dependencia entre el módulo de elasticidad y el tipo de tablero porque el estadístico de contraste F (6,105) = 8,3 tiene una significación igual a  $0,000 < 0,05$ . Además la prueba indica que la dependencia no es lineal ya que tiene un significación de 0,000.

Como existe una gran desviación típica entre los valores se realizó la prueba de contraste chi-cuadrado basada en las pruebas de error, y así poder averiguar si los datos son representativos del ensayo realizado, como indica la tabla 4.28

Tabla 4.28. Prueba chi-cuadrado. Módulo Elasticidad \*tipo tablero

	Módulo Elasticidad	Tipo tablero
Chi-cuadrado <sup>(a,b)</sup>	,000 <sup>a</sup>	15,067 <sup>b</sup>
gl	104	6
Sig. asintót.	1,000	,020

a. 108 casillas (100,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 1,0.

b. 0 casillas (,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 15.

Como puede observarse los datos son adecuados ya que tiene una significación asintótica igual a  $0,020 < 0,05$ . Esto indicó que el módulo de elasticidad depende del tipo de tablero, o sea del tipo de adhesivo que se ha utilizado.

#### 4.6.2. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TIEMPO EN PRENSA SOBRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD.

Los tableros se fabricaron permaneciendo en prensa desde 1 a 4 h. En la tabla 4.29 se indican los valores medios obtenidos en función del tiempo en la prensa de platos calientes.

Tabla 4.29. Informe. Módulo elasticidad\* tiempo en prensa.

Tiempo (h)	Media (N/mm <sup>2</sup> )	N	Desviación estándar
1	1953,5675	28	561,07581
2	2221,4431	28	677,05995
3	2408,0031	28	621,06274
4	3234,7457	28	961,41289
Media	2457,3232	112	856,58174

Se observa en la tabla 4.29 que conforme aumenta el tiempo en prensa, mayor es el módulo de elasticidad de los tableros, los datos muestran que tienen medias superiores a  $1800 \text{ N/mm}^2$ , por lo que todos serían válidos llegando incluso a valores de  $3200 \text{ N/mm}^2$  que haría que se clasificasen como tableros tipo P7 (tableros estructurales de alta resistencia para ambiente húmedo). Como las desviaciones estándar son muy altas se realiza el análisis estadístico.

Tabla 4.30. ANOVA. Módulo elasticidad\* tiempo en prensa.

			Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Módulo Elasticidad *	Inter-grupos	(Combinadas)	2,348E7	3	7827096,962	14,965	,000
		Linealidad	2,079E7	1	2,079E7	39,758	,000
		Desviación de Linealidad	2686471,69	2	1343235,847	2,568	,082
Tiempo en prensa	Intra-grupos			108	523038,285		
Total				111			

Como puede apreciarse no existe igualdad de medias porque el estadístico de contraste  $F(3,108) = 14,96$  tiene una significación igual a  $0,000 < 0,05$ . El análisis indicó que existe relación de dependencia entre variables. También el análisis muestra que la relación no es lineal, pues tiene una desviación igual a  $0,082 > 0,05$ .

Para evaluar si los datos obtenidos se correspondían al ensayo o había algún error, se realizó la prueba chi-cuadrado basada en las pruebas de error, como indica la tabla 4.31.

Tabla 4.31. Chi-cuadrado. Módulo elasticidad \*tiempo en prensa.

	Módulo de elasticidad	Tiempo
Chi-cuadrado <sup>(a,b)</sup>	,000 <sup>a</sup>	,486 <sup>b</sup>
gl	108	3
Sig. asintót.	1,000	,022

a. 108 casillas (100,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 1,0.

b. 0 casillas (,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 26,3.

La prueba chi-cuadrado con una significación asintótica de 0,022 menor que 0,05 indica que la prueba es adecuada al ensayo. En los análisis realizados se encontró que el módulo de elasticidad a flexión dependía del tipo de tablero y del tiempo en la prensa de platos calientes. Para evaluar cual de las dos variables es la más influyente se realizó la prueba T de muestras relacionadas como indica la tabla 4.32.

Tabla 4.32. Correlaciones. Módulo de elasticidad a flexión.

		Tipo	Tiempo
Módulo Elasticidad	Correlación de Pearson	-,300**	,522**
	Sig. (bilateral)	,002	,000
	N	112	112

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Como indica la tabla anterior, la variable que más influye con un certidumbre del 99%, es el tiempo en prensa, pues tiene una correlación de Pearson de 0,522, y después el tipo de tablero con una correlación de -0,300.

Para averiguar cuál es el tipo de tablero y el tiempo en prensa más adecuado para obtener altos valores de módulo de elasticidad a flexión, se realizó el diagrama de barras de la figura 4.22.

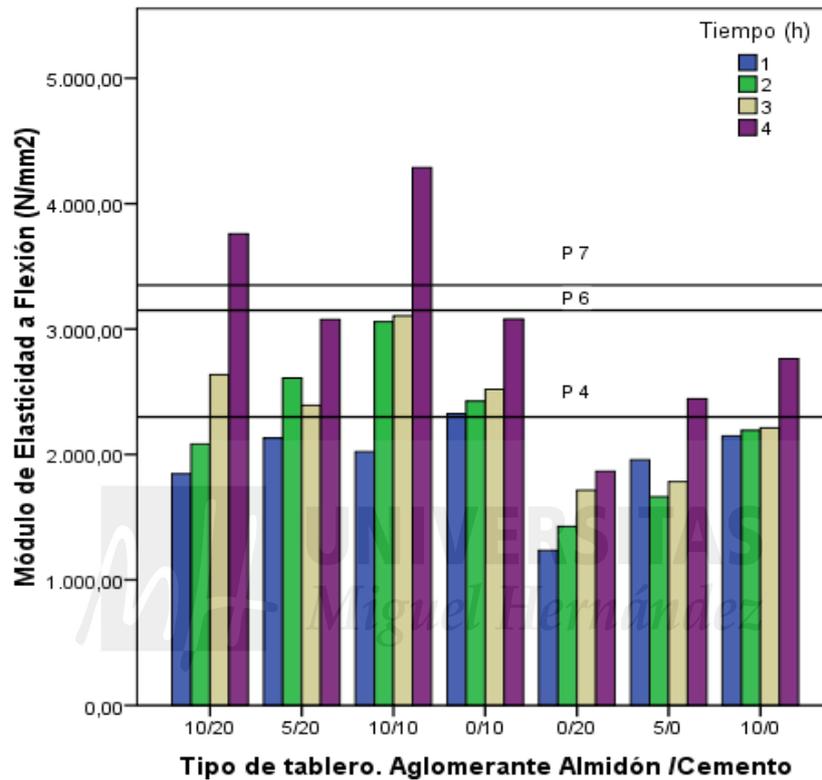


Figura 4.22. Diagrama de barras del módulo de elasticidad en función del tipo de adhesivo y el tiempo en prensa

Se observó que con el tipo A (adhesivo 10% fécula de patata y 20% cemento) y tipo C (adhesivo 10% fécula de patata y 10% cemento) durante 4, horas en la prensa se obtienen valores del módulo de elasticidad correspondientes a tableros P7. Con el resto de tipos excepto con el tipo E (0% fécula de patata y 20% cemento) se pueden obtener tableros tipo P4 en función del tiempo en la prensa de platos calientes. Esto indica que son en general tableros con buenas propiedades.

Para comprobar por que los tableros con un 10% de cemento tenían mejores propiedades que los tableros con un 20% de cemento, se realizaron micrografías SEM de un tablero clase E2 a los 28 días de fraguado cuyo aglomerante era un 20% de cemento y había estado 2 h en prensa, como se observa en la figura 4.23.

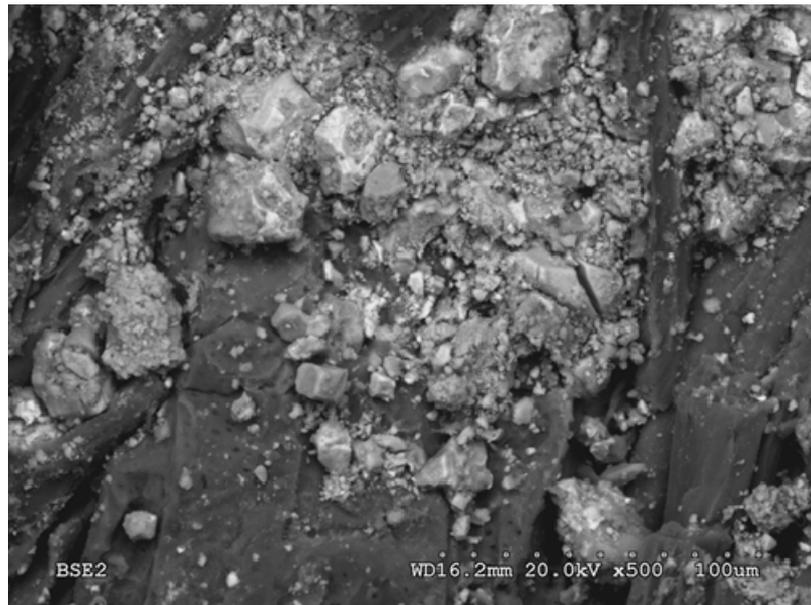


Figura 4.23. Micrografía del tablero E2 a los 28 días de hidratación.

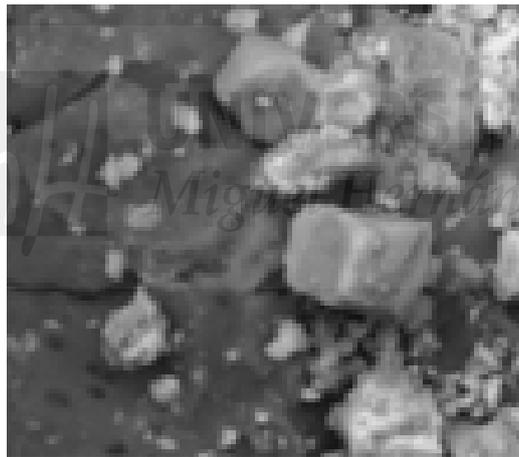


Figura 4.24. Cubos de yeso

Como se distingue en las figuras 4.23 y 4.24, la hidratación del cemento no ha sido adecuada, existiendo muchos componentes del cemento Portland sin hidratar. Esto puede ser porque ha faltado agua. Se puede atribuir a que ha sido absorbida por las partículas de caña y al someter la manta a presión y calor, el agua se ha evaporado. En cambio los tableros que contenían almidón, podría el almidón haber retenido el agua y posteriormente cederla para hidratar al cemento.

#### 4.7.- RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A TRACCIÓN PERPENDICULAR A LAS CARAS. ENSAYO DE COHESIÓN INTERNA.

Se realizó el ensayo de tracción perpendicular o ensayo de cohesión interna, en tres probetas de cada tablero, los resultados obtenidos de resistencia a tracción de cada tablero son los que indica la tabla 4.33.

Tabla 4.33. Valores de cohesión interna en función del tipo de tablero y tiempo en prensa

Tipo	Tiempo (h)	Media (N/mm <sup>2</sup> )	Desviación estándar
A	1	,4110	,13060
	2	,5298	,22691
	3	,6620	,47264
	4	,7550	,40788
	Media	,5935	,34341
B	1	,3351	,15253
	2	,4180	,23136
	3	,7863	,31152
	4	,7382	,14257
	Media	,5633	,29232
C	1	,5403	,29483
	2	,7014	,09517
	3	,8361	,24286
	4	,8919	,43081
	Media	,7644	,30428
D	1	,3050	,01732
	2	,3075	,04113
	3	,3333	,03786
	4	,3567	,10017
	Media	,3229	,05180
E	1	,1530	,11042
	2	,1612	,06058
	3	,3267	,10774
	4	,2049	,09609
	Media	,2120	,10886

Tipo	Tiempo	Media	Desviación estándar
F	1	,2650	,00707
	2	,2833	,02361
	3	,2031	,00981
	4	,2650	,00707
	Media	,2541	,03411
G	1	,2986	,00000
	2	,2800	,01414
	3	,2790	,00707
	4	,2850	,00707
	Media	,2846	,01145

Como se observa la resistencia a tracción varió mucho entre unos tableros y otros, siendo tableros no válidos aquellos con una resistencia menor que  $0,28 \text{ N/mm}^2$ .

Para averiguar que variables de fabricación son las que influyen en las propiedades a tracción se realizó el análisis estadístico, comenzando con obtener las barras de error respecto a la clase de tablero como indica la figura 4.25.

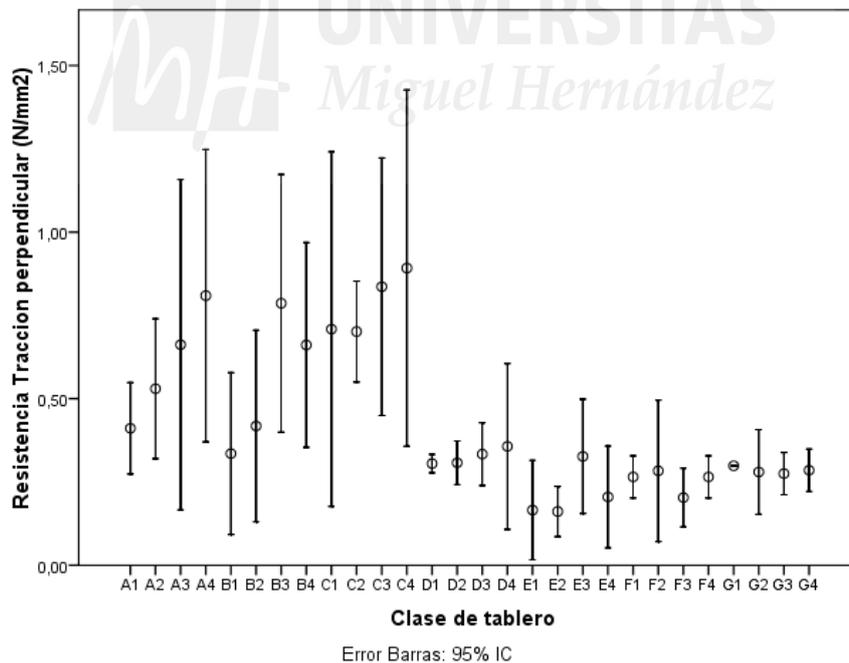


Figura 4.25. Diagrama de barras de error de la resistencia a tracción y la clase de tablero.

Las barras parece indicar que hay dos clases diferentes de tableros, los que llevan mezcla de almidón y cemento y los que no. Para averiguar que variable es la que influye se realizó el análisis estadístico.

#### 4.7.1. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE TABLERO SOBRE LA RESISTENCIA A TRACCIÓN.

Se obtuvo el valor medio de la resistencia a tracción perpendicular en función del tipo de tablero como indica la tabla 4.34

Tabla 4.34. Valores de resistencia a tracción en función del tipo de tablero.

Tipo de tablero	Media Tracción (N/mm <sup>2</sup> )	N	Desviación estándar
A	,5935	16	,34341
B	,5633	16	,29232
C	,7644	16	,30428
D	,3229	16	,05180
E	,2120	16	,10886
F	,2541	16	,03411
G	,2846	16	,01145
Media	,4710	112	,30812

Hay una gran diferencia entre los valores de resistencia a tracción entre los diferentes tipos de tablero siendo unos tipo P7 tableros estructurales y otros no alcanza los valores necesarios.

Para comenzar el análisis de la influencia del tipo de tablero sobre la resistencia a tracción perpendicular de los tableros, se realizó el análisis de la varianza como muestra la tabla 4.35.

En la tabla se encontró que el estadístico de contraste  $F(6.105) = 10,88$  tiene una significación igual a 0,000 siendo menor que 0,05 por lo cual no hay igualdad de medias, las variables son dependientes lo que indica que hay influencia entre el tipo de tablero y la resistencia a tracción.

Tabla 4.35. ANOVA. Tracción perpendicular \*tipo de tablero.

			Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Tracción *	Inter-grupos	(Combinadas)	3,947	6	,658	10,880	,000
Tipo de tablero		Linealidad	2,235	1	2,235	36,968	,000
		Desviacion de Linealidad	1,712	5	,342	5,662	,000
	Intra-grupos		5,926	105	,060		
	Total		9,873	111			

Para averiguar si la asociación entre las variables es de tipo lineal, se realizó la prueba de las medidas de asociación como indica la tabla 4.36.

Tabla 4.36. Medidas de asociación. Tracción perpendicular \*tipo de tablero.

	R	R Cuadrado	Eta	Eta Cuadrado
Tracción * Tipo tablero	-,476	,226	,632	,400

Se observa que  $R^2 = 0,226 < 0,5$  por tanto la relación entre el tipo de tablero y la resistencia a tracción no es lineal.

Para evaluar si realmente existe dependencia o los valores hallados se deben al error experimental, se realizó la prueba Chi-cuadrado como indica la tabla 4.37.

Tabla 4.37. Prueba de contraste. Tracción \*tipo de tablero

	Tracción	Tipo
Chi-cuadrado <sup>(a,b)</sup>	29,771 <sup>a</sup>	15,067 <sup>b</sup>
gl	105	6
Sig. asintót.	1,000	,020

<sup>a</sup>. 105 casillas (100,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 1,0.

<sup>b</sup>. 0 casillas (,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 15,0.

La prueba tiene una significación igual a  $0,020 < 0,05$ , lo que indica que la resistencia a tracción depende del tipo de tablero.

#### 4.7.2. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TIEMPO EN PRENSA SOBRE LA RESISTENCIA A TRACCIÓN.

Se fabricaron los tableros variando el tiempo en la prensa de platos calientes, por tanto, se comenzó el análisis de la influencia de esta variable obteniendo los valores medios en función del tiempo en prensa como indica la tabla 4.38.

Tabla 4.38. Valores medios de resistencia a tracción en función del tiempo.

Tiempo (h)	Media tracción (N/mm <sup>2</sup> )	Desviación estándar
1	,3431	,16540
2	,4057	,22583
3	,5581	,35397
4	,5749	,38414
Media	,4710	,30812

Hay diferente resistencia entre unos tiempos y otros, conforme aumenta el tiempo en prensa aumenta la resistencia a tracción. Además hay una gran desviación estándar. Para comprobar si hay dependencia de esta variable, se realizó el análisis de la varianza como indica la tabla 4.39.

Tabla 4.39. ANOVA Resistencia a tracción \*tiempo en prensa.

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.	
Tracción *	Inter-grupos (Combinadas)	,995	3	,332	3,771	,013	
	Tiempo	Linealidad	,914	1	,914	10,392	,002
		Desviación de Linealidad	,081	2	,041	,461	,632
	Intra-grupos		108	,088			
	Total		111				

Como se aprecia en la tabla no existe igualdad de medias porque el estadístico de contraste  $F(3,108) = 3,77$  tiene una significación igual a  $0,013 < 0,05$ . El análisis indicó que existe relación de dependencia entre variables. También el análisis muestra que la relación no es lineal, pues tiene una desviación igual a 0,632.

Para evaluar si era cierta la apreciación de relación no lineal se realizó la prueba de medidas de asociación, como indica la tabla 4.40.

Tabla 4.40. Medidas de asociación

	R	R cuadrado	Eta	Eta cuadrado
Tracción * Tiempo	,304	,093	,317	,101

En la prueba se obtiene un  $R^2 = 0,093 > 0,5$ , lo que confirma que la relación no es lineal. Para evaluar si los datos obtenidos se correspondían al ensayo se realizó la prueba chi-cuadrado basada en las pruebas de error, como indica la tabla 4.41.

Tabla 4.41. Chi-cuadrado. Tracción \*tiempo en prensa

	Tracción	Tiempo
Chi-cuadrado <sup>(a,b)</sup>	29,771 <sup>a</sup>	,486 <sup>b</sup>
gl	108	3
Sig. asintót.	1,000	,022

<sup>a</sup>. 108 casillas (100,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 1,0.

<sup>b</sup>. 0 casillas (,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 26,3.

La prueba indica con una significación asintótica igual a 0,022 que la resistencia a tracción perpendicular depende del tiempo en la prensa de platos calientes de los tableros.

Se comprobó que la resistencia a tracción perpendicular dependía de las dos variables de fabricación y para averiguar que variable es la que más influye, se realizó la prueba de correlaciones parciales como indica la tabla 4.42.

Tabla 4.42. Correlaciones. Tracción \*tiempo en prensa \*tipo tablero

		Tracción	Tipo	Tiempo
Tracción	Correlación de Pearson	1	-,476**	,304**
	Sig. (bilateral)		,000	,002
	N	105	105	105
Tipo	Correlación de Pearson	-,476**	1	-,004
	Sig. (bilateral)	,000		,965
	N	105	105	105
Tiempo	Correlación de Pearson	,304**	-,004	1
	Sig. (bilateral)	,002	,965	
	N	105	105	105

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Como indica la tabla anterior la variable que más influye con un certidumbre del 99%, es el tipo de tablero, pues tiene una correlación de Pearson de -0,476, y después el tiempo en prensa con una correlación de -0,304.

Para averiguar de los tableros fabricados cuales son las variables para las que se obtienen las mayores valores de cohesión interna se obtuvo el diagrama de barras de la figura 4.26 de los valores medios de resistencia a tracción perpendicular en función del tipo de tablero (depende del tipo de adhesivo utilizado) y del tiempo en la prensa de platos calientes.

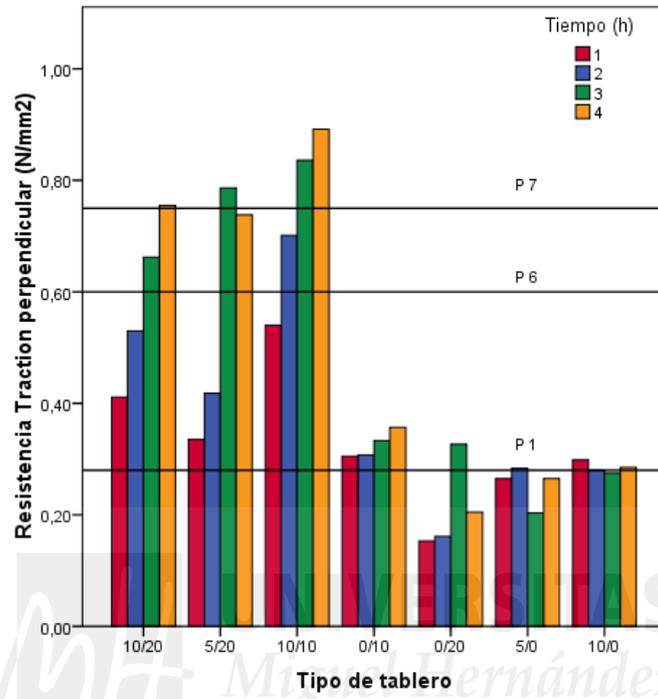


Figura 4.26. Diagrama de barras de la resistencia característica a tracción perpendicular en función del tipo y tiempo en prensa.

Como se observa en el diagrama con los tableros tipo A, B y C que tienen como adhesivo almidón y cemento, se pueden obtener tableros tipo P7, o sea tableros estructurales de alta prestación, en cambio utilizados por separado solo almidón o solo cemento solo se pueden obtener tableros tipo P1, tableros para utilización general en ambiente seco.

Los tableros que mayores resistencias a tracción tienen son los de clase C4, usando como adhesivo un 10% de almidón y 10% de cemento que han estado en la prensa de platos calientes durante 4 h. También se observa que los tableros tipo D con un 20% de cemento que no contenían almidón, tenían los peores resultados y variación. Para evaluar mejor estos tableros habría que realizar nuevas investigaciones añadiendo más agua a la mezcla.

#### 4.8.- RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE HINCHAMIENTO EN ESPESOR DESPUES DE INMERSIÓN EN AGUA.

Se realizó la prueba de hinchamiento en espesor después de inmersión en agua, a tres probetas de cada tablero en atmósfera controlada en el laboratorio. El agua se mantuvo a una temperatura de 20 °C. El espesor de las probetas se midió antes de la inmersión en el punto medio y después de inmersión a las 2 y 24 horas. También se midió el peso de las probetas antes y después obteniendo el porcentaje de absorción de agua. Los resultados del % de hinchamiento en espesor de cada tablero se calcularon como la media aritmética de los ensayos de sus tres probetas. Luego el número total de probetas fueron 336, los valores medios son los que muestra la tabla 4.43.

Tabla 4.43. Resultados medios del % de hinchamiento en espesor después de permanecer sumergido en agua en función del tipo y tiempo en la prensa de platos calientes.( ) Desviación estándar.

Tipo	Tiempo (h)	% Hinchamiento después de 2h	% Hinchamiento después de 24h
A	1	6,5116 (1,834)	15,5445 (3,375)
A	2	4,6434 (1,278)	11,1281(2,855)
A	3	4,9228 (1,602)	13,3300(2,086)
A	4	5,6082 (1,682)	12,3895 (1,350)
A	Media	5,3987 (1,906)	12,9950 (2,040)
B	1	5,6670 (1,637)	13,9625 (2,300)
B	2	4,5080 (0,9119)	13,4800 (3,283)
B	3	7,3484 (3,128)	15,2580 (3,771)
B	4	6,0735 (0,719)	13,4967 (1,598)
B	Media	5,8924 (2,302)	14,1194 (3,131)
C	1	12,8200 (3,230)	24,2233 (4,186)
C	2	7,5441 (1,874)	16,8334 (3,097)
C	3	9,4759 (2,378)	16,9542 (2,751)
C	4	7,6973 (3,129)	14,2440 (1,035)
C	Media	9,0642 (4,744)	17,4400 (5,500)
D	1	33,1675 (3,520)	58,500 (14,513)
D	2	28,2692 (6,015)	49,426 (15,392)
D	3	25,9878 (4,330)	44,833 (16,685)
D	4	24,4122 (3,313)	50,413 (11,640)
D	Media	28,3533 (5,272)	51,246 (14,409)
E	1	33,7433( 2,033)	42,247 (1,5767)
E	2	26,2373 (9,003)	36,7987 (3,707)
E	3	22,9208 (5,560)	37,7925 (7,154)
E	4	16,4825 (4,031)	26,7392 (6,597)
E	Media	24,3769 (4,782)	35,5540 (7,380)

Tipo	Tiempo	% Hinchamiento después de 2h	% Hinchamiento después de 24h
F	1	29,5620 (3,009)	37,2867 (0,853)
F	2	36,1912 (4,480)	39,8942 (0,672)
F	3	42,6267 (1,414)	49,1167 (0,707)
F	4	45,1200 (4,242)	56,3433 (0,707)
F	Media	38,3750 (6,981)	45,6602 (8,115)
G	1	35,8400 (3,535)	41,4100 (1,414)
G	2	30,573 3 (0,919)	43,4450 (1,591)
G	3	39,8067 (2,003)	48,4900 (1,527)
G	4	41,2400 (0,023)	46,1834 (2,281)
G	Media	36,8650 (4,693)	44,8821 (3,156)

Se observa en la tabla que los tableros con adhesivos con mezcla de almidón de patata y cemento se obtienen menores valores del % de hinchamiento en espesor que los tableros que usaron solo o cemento o almidón de patata. Como hay tableros con valores de hinchamiento en espesor del 58% y otros con un 12% se analizó la influencia de las dos variables de fabricación (el tipo de tablero y el tiempo en la prensa de platos calientes).

#### 4.8.1. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE TABLERO SOBRE EL PORCENTAJE DE HINCHAMIENTO EN ESPESOR.

Para evaluar la influencia del tipo de tablero y el tiempo en prensa se realizó el análisis estadístico obteniendo las barras de error para inmersión durante 2 horas y 24 horas con un intervalo de confianza del 95%, como indican las figuras 4.27 y 4.28.

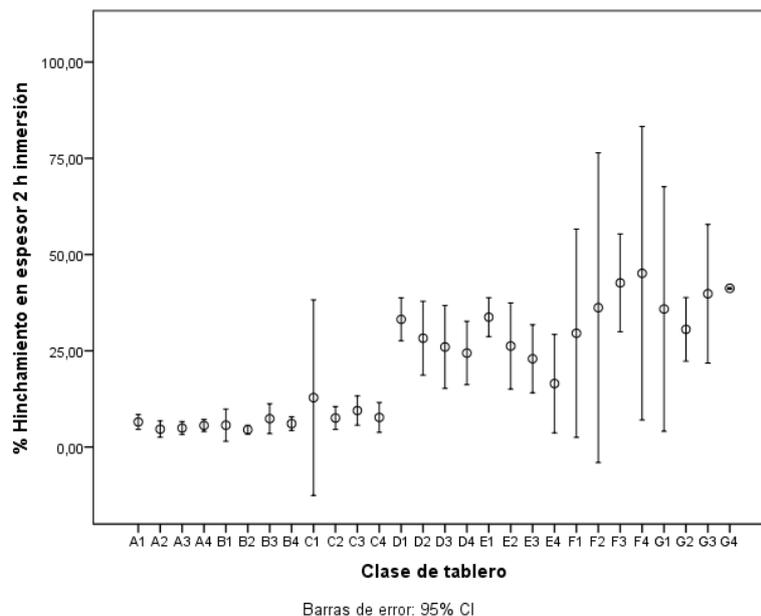


Figura 4.27. Diagrama de barras de error del % de hinchamiento en espesor después de 2h en agua en función de la clase de tablero.

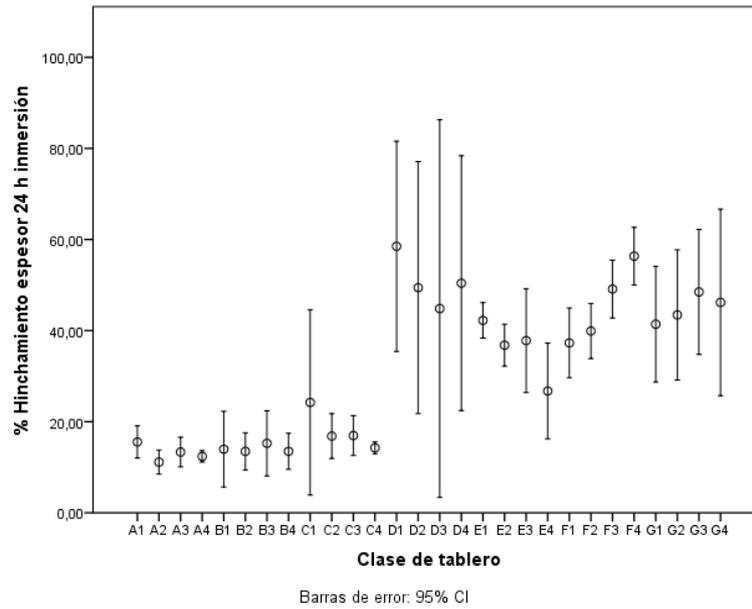


Figura 4.28. Diagrama de barras de error del % de hinchamiento en espesor después de 24h en agua en función de la clase de tablero.

Las barras parecen indicar que las variables son dependientes y que el porcentaje de hinchamiento a las 2h y a las 24 en agua depende del tipo de tablero. Para confirmar esta apreciación se realizó el análisis de la varianza como indican las tablas 4.44.

Tabla 4.44. ANOVA % Hinchamiento en espesor \*tipo de tablero.

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Hinchamiento 2h * Tipo	Inter-grupos (Combinadas)	16090,663	6	2681,777	103,996	,000
	Linealidad	14078,614	1	14078,614	545,950	,000
	Desviación de Linealidad	2012,049	5	402,410	15,605	,000
	Intra-grupos		105	25,787		
Total			111			
Hinchamiento 24h * Tipo	Inter-grupos (Combinadas)	24117,087	6	4019,514	79,859	,000
	Linealidad	16998,497	1	16998,497	337,722	,000
	Desviación de Linealidad	7118,589	5	1423,718	28,286	,000
	Intra-grupos		105	50,333		
Total			111			

En el análisis de la varianza realizado se obtuvo un estadístico de contraste  $F(6.105) = 79,859$  con una significación igual a  $0,000 < 0,05$  lo que indica que las variables son dependientes. Por tanto el porcentaje de hinchamiento en espesor depende del tipo de

tablero. Además en la prueba se observa que la relación entre ambas variables no es lineal.

Para evaluar si los datos obtenidos se correspondían al ensayo se realizó la prueba chi-cuadrado basada en las pruebas de error, como indican las tablas 4.45 y 4.46.

*Tabla 4.45. Estadístico % Hinchamiento en espesor a las 2h \*tipo de tablero*

	% Hinchamiento 2h	Tipo tablero
Chi-cuadrado <sup>(a,b)</sup>	,981 <sup>a</sup>	15,067 <sup>b</sup>
gl	105	6
Sig. asintót.	1,000	,020

<sup>a</sup>. 105 casillas (100,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 1,0.

<sup>b</sup>. 0 casillas (,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 15,0.

*Tabla 4.46. Estadístico % Hinchamiento en espesor a las 24h \*tipo de tablero*

	% Hinchamiento 24 h	Tipo tablero
Chi-cuadrado <sup>(a,b)</sup>	1,924 <sup>a</sup>	15,067 <sup>b</sup>
gl	105	6
Sig. asintót.	1,000	,020

<sup>a</sup>. 105 casillas (100,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 1,0.

<sup>b</sup>. 0 casillas (,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 15,0.

La prueba para 2h y 24 horas en agua tiene una significación igual a  $0,020 < 0,05$ , lo que indica que el % de hinchamiento en espesor depende del tipo de tablero fabricado.

#### **4.8.2. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TIEMPO EN PRENSA SOBRE EL HINCHAMIENTO EN ESPESOR.**

Para empezar el análisis de la influencia del tiempo en prensa sobre el hinchamiento de los tableros se obtuvo el diagrama de barras de error de la figura 4.29.

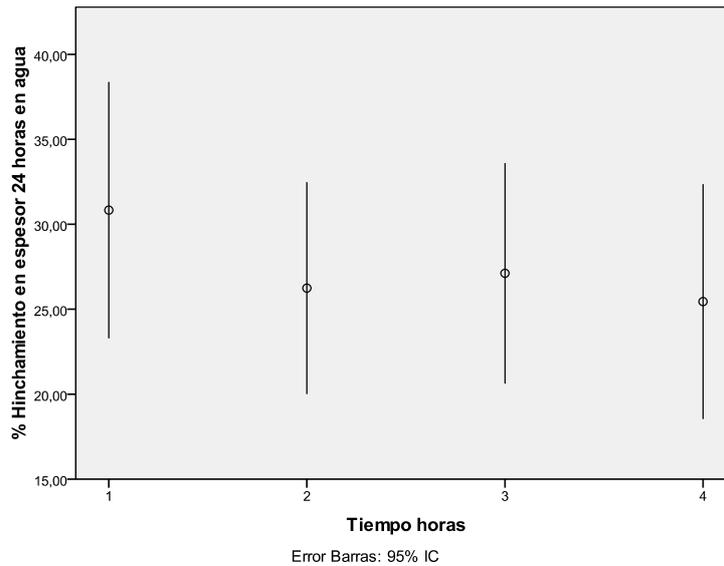


Figura 4.29. Diagrama de barras de error del hinchamiento en espesor a las 24 h. en agua en función del tiempo en la prensa.

Las barras de error mostraron que hay solape entre valores, lo que parecía indicar que las variables son independientes. Para confirmar esta primera apreciación se realizó el análisis de la varianza como muestra la tabla 4.47.

Tabla 4.47. ANOVA. % Hinchamiento en espesor \* tiempo en prensa.

			Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Hinchamiento 2h * Tiempo en prensa	Inter-grupos	(Combinadas)	210,130	3	70,043	,384	,765
		Linealidad	120,016	1	120,016	,659	,419
		Desviación de Linealidad	90,114	2	45,057	,247	,781
	Intra-grupos			108	182,254		
Total				111			
Hinchamiento 24h * Tiempo en prensa	Inter-grupos	(Combinadas)	421,488	3	140,496	,496	,686
		Linealidad	275,077	1	275,077	,970	,327
		Desviación de Linealidad	146,411	2	73,205	,258	,773
	Intra-grupos			108	283,448		
Total				111			

Como se aprecia en la tabla existe igualdad de medias porque el estadístico de contraste a las 2 horas  $F(3.108) = 0,765$  a las 24 horas  $F(3.108) = 0,496$  tienen una significación mayor que 0,05, por tanto, el análisis indicó que no existe dependencia entre variables.

Se comprobó que el hinchamiento en espesor de los tableros después de 2 h y 24 horas sumergidos en agua dependía del tipo de tablero y para averiguar con certeza su influencia se realizó la prueba de correlaciones parciales, como indica la tabla 4.48.

Tabla 4.48. Correlaciones. % Hinchamiento 24 h \*tipo de tablero \*tiempo en prensa.

	Hinch24	Tipo	Tiempo
Hinch24 Pearson Correlation	1	,765**	-,097
Sig. (2-tailed)		,000	,323
N	108	108	108

\*\* . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Como indicó la tabla el tipo de tablero con una correlación de Pearson de  $0,765 > 0,05$  influye con un índice de certeza del 99% en el porcentaje de hinchamiento en espesor de los tableros y el tiempo en prensa no tiene ninguna influencia. El diagrama de barras de la figura 4.30 indica los valores del % de hinchamiento en espesor de cada clase de tablero después de inmersión en agua durante 24 horas.

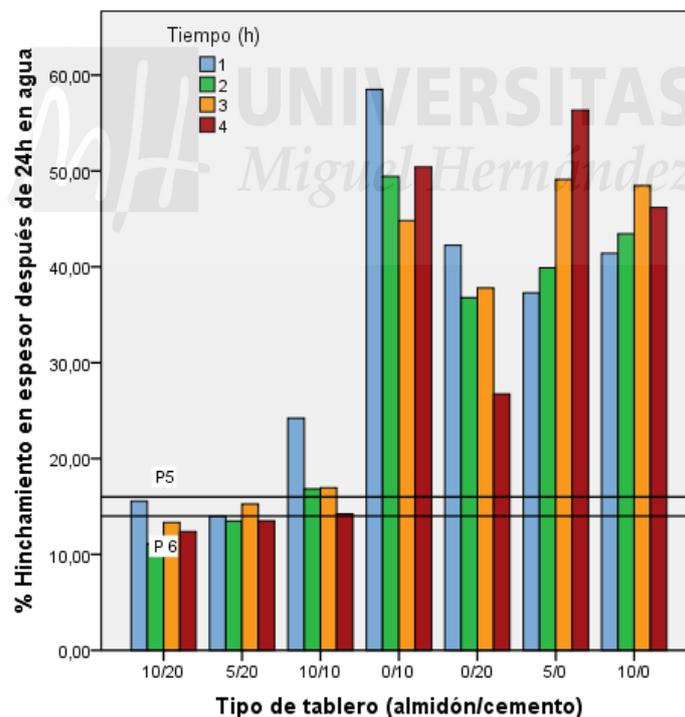


Figura 4.30. Diagrama de barras del % hinchamiento en espesor a las 24 horas en función del tipo de tablero y tiempo.

Los tableros tipo compuestos con almidón y cemento tienen porcentajes de hinchamiento en espesor bajos y pueden clasificar como tableros tipo P6, “Tableros estructurales de alta prestación para utilización en ambiente seco” ó tableros P5 “Tableros estructurales para utilización en ambiente húmedo”.

#### 4.9. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ABSORCIÓN DE AGUA DESPUÉS DE INMERSIÓN.

Se obtuvo el valor medio del porcentaje de absorción de agua de los tableros después de inmersión en agua durante 2 y 24 horas, como indica la tabla 4.49.

Tabla 4.49. Informe. % Absorción de agua de los tableros después 2h y 24 h sumergidos.  
( ) Desviación estándar.

Tipo	Tiempo (h)	% Absorción agua 2h	% Absorción agua 24h
A	1	28,7550 (15,59)	50,0333 (16,08)
A	2	26,7071 (18,48)	42,4257 (18,23)
A	3	28,9333 (17,34)	48,6011 (17,71)
A	4	29,0448 (17,82)	47,4381 (15,44)
A	Media	28,3228 (16,37)	46,9559 (16,13)
B	1	23,590 (10,22)	43,8550 (14,52)
B	2	18,3847 (9,09)	37,2747 (10,03)
B	3	24,492 (15,44)	43,6533 (16,40)
B	4	16,6544 (4,31)	36,2667 (6,43)
B	Media	21,1006 (10,64)	40,5212 (12,3)
C	1	36,7944 (12,79)	61,1578 (13,70)
C	2	37,0242 (15,60)	57,9425 (16,65)
C	3	35,9266 (17,21)	53,3158 (18,79)
C	4	30,3873 (18,05)	52,5933 (21,83)
C	Media	34,6327 (17,55)	55,7171 (19,44)
D	1	48,4283 (15,52)	76,5867 (6,28)
D	2	44,1783 (7,04)	65,8713 (6,39)
D	3	43,600 (10,62)	65,5167 (9,57)
D	4	37,7933 (1,45)	67,0422 (8,47)
D	Media	43,9005 (9,98)	69,1078 (8,25)
E	1	52,1078 (20,86)	74,904 (17,44)
E	2	59,170 (18,04)	73,2413 (16,15)
E	3	54,471 (15,49)	71,2908 (14,68)
E	4	35,310 (18,88)	51,2425 (14,57)
E	Media	50,7063 (19,78)	67,5658 (17,08)
F	1	91,5070 (7,47)	106,200 (12,60)
F	2	81,349 (14,99)	93,3673 (4,49)
F	3	77,855 (13,10)	88,5717 (5,27)
F	4	82,8334 (6,06)	90,8217 (2,09)
F	Media	83,3862 (9,93)	94,7402 (9,13)
G	1	63,7600(0,02)	87,3700 (0,24)
G	2	54,2384 (0,33)	90,8666 (3,01)
G	3	73,7800 (0,02)	95,8867 (2,55)
G	4	75,5866 (2,52)	93,0700 (1,42)
G	Media	66,8412 (9,19)	91,7983 (3,68)

Los tableros que más agua absorbieron fueron los tipo F y G, cuyo aglomerante era solo almidón. Para evaluar si existe dependencia del % de absorción de agua con el tipo de tablero, se realizó el análisis de la varianza como indica la tabla 4.50.

Tabla 4.50. ANOVA. % Absorción de agua 2h y 24 h en agua \*tipo de tablero.

			Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
% Absorción de agua 2h * Tipo	Inter-grupos (Combinadas)		32891,459	6	5481,910	24,883	,000
	Intra-grupos		21590,026	105	220,306		
	Total		54481,485	111			
% Absorción de agua 24h * Tipo	Inter-grupos (Combinadas)		30972,016	6	5162,003	24,673	,000
	Intra-grupos			105	209,215		
	Total			111			

El estadístico de contraste  $F(6,105) = 24,883$  tiene una significación igual a  $0,000 < 0,05$  lo que indica que no hay igualdad de medias lo que indica que las variables son dependientes, o sea que el % de absorción de agua depende del tipo de tablero.

Se realizó la prueba de residuos para averiguar si los datos corresponden a los ensayos realizados, como indican las tablas 4.51 y 4.52.

Tabla 4.51. Chi-cuadrado. % Absorción de agua 2 h inmersión \*tipo de tablero.

	% Absorción agua 2h	Tipo tablero
Chi-Cuadrado	4,524 <sup>a</sup>	15,067 <sup>b</sup>
gl	105	6
Sig. Asintótica	1,000	,020

<sup>a</sup>. 105 casillas (100,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 1,1.

<sup>b</sup>. 0 casillas (,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 15,0.

Tabla 4.52. Chi-cuadrado. % Absorción de agua 24 h inmersión \*tipo de tablero.

	% Absorción agua 24h	Tipo tablero
Chi-Cuadrado	4,524 <sup>a</sup>	,486 <sup>b</sup>
gl	105	3
Sig. Asintótica	1,000	,022

<sup>a</sup>. 105 casillas (100,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 1,1.

<sup>b</sup>. 0 casillas (,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 26,3.

La prueba chi-cuadrado tiene para ambos ensayos una significación igual a 0,020 y 0,022 que son menores que 0,05 lo que indica que el % de absorción de agua depende del tipo de tablero.

Para evaluar si la absorción de agua depende del tiempo que estuvieron los tableros en la prensa de platos calientes se realizó el análisis de la varianza como indica la tabla 4.53.

Tabla 4.53. ANOVA. % Absorción de agua 2h y 24 h en agua \*tiempo en prensa.

			Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
% Absorción de agua 2h * Tiempo	Inter-grupos (Combinadas)		457,194	3	152,398	,285	,836
	Intra-grupos			108	534,894		
	Total			111			
% Absorción de agua 24h * Tiempo	Inter-grupos (Combinadas)		1060,883	3	353,628	,708	,549
	Intra-grupos			108	499,150		
	Total			111			

Como se observa en la tabla 4.53 con una significación de 0,836 y 0,549 mayores que 0,05 indican que el % absorción de agua no depende del tiempo en prensa de los tableros. Para evaluar el índice de certeza de la relación entre variables se realizó la prueba de correlación de Pearson como se observa en la tabla 4.54.

Tabla 4.54. Correlación. % Absorción de agua 2h y 24 h en agua.

		Tipo	Tiempo
% Absorción de agua 2h	Pearson Correlation	,696**	-,073
	Sig. (2-tailed)	,000	,457
	N	112	112
% Absorción de agua 24h	Pearson Correlation	,719**	-,122
	Sig. (2-tailed)	,000	,217
	N	112	112

\*\* . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

La correlación indica con un 99% de certeza que el % de absorción de agua depende del tipo de tablero y no depende del tiempo en prensa de platos calientes.

En el diagrama de la figura 4.31 y 4.32 se indican los valores del % de absorción de agua a las 2 y 24 horas en función del tipo de tablero y tiempo en prensa.

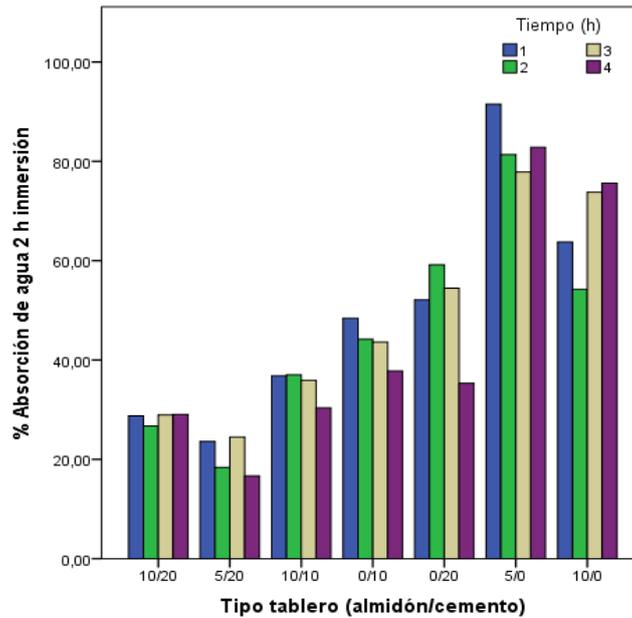


Figura 4.31. % Absorción de agua a las 2 h \*tipo de tablero \*tiempo en prensa.

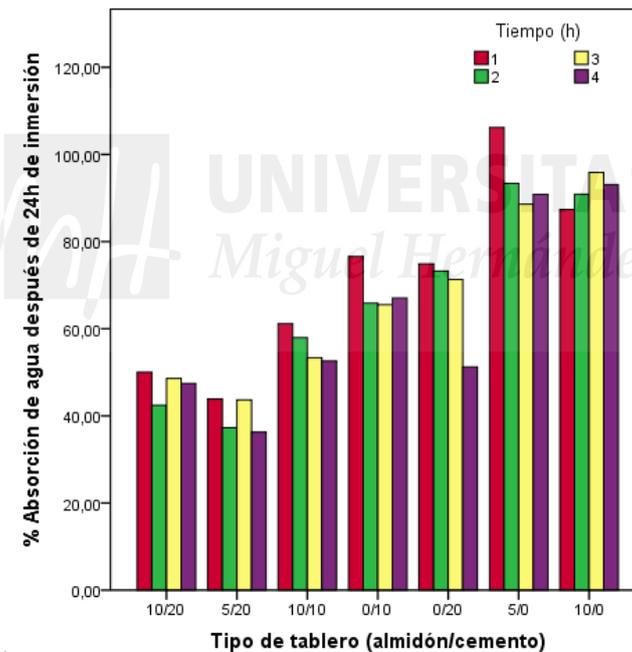


Figura 4.32. % Absorción de agua a las 24 h \*tipo de tablero \*tiempo en prensa.

El comportamiento de absorción de agua es similar a las 2 h y a las 24 h. En las dos primeras horas se absorbe más del 60% de agua en todos los tipos de tablero.

Como se observa en la figura 4.31 y 4.32 el tipo de tablero con menor % de absorción de agua es el tipo B, aquel que usó como adhesivo un 5% de almidón y un 20 % de cemento. Los tableros con adhesivo mezcla de almidón y cemento fueron los que menos agua absorbieron y los de mayor absorción fueron los que solo usaron almidón con un porcentaje de absorción de agua casi el doble.

#### 4.10. RESULTADOS ENSAYO ARRANQUE DE TORNILLO EN LA CARA.

Una de las pruebas necesarias para evaluar un tablero es la resistencia al arranque de tornillo en las caras. Para la realización del ensayo se procedió como indica la norma EN 320 (1993). Los ensayos se realizaron sobre tres probetas de cada tablero obteniendo la fuerza de arranque de tornillo en cada una, siendo la fuerza de arranque de tornillo del tablero la media aritmética de las tres probetas ensayadas. La resistencia de arranque de tornillo en la cara del tablero se define como la fuerza realizada en función del espesor del tablero ( $F/t$ ). Los valores obtenidos de resistencia de los tableros en función del tipo de tablero y tiempo en prensa son los que se indican en la tabla 4.55.

Tabla 4.55. Valores medios de arranque de tornillo en la cara del tablero

Tipo	Tiempo (h)	Media resistencia arranque de tornillo (N/mm)	Desviación estándar
A	1	69,4752	16,25717
	2	85,5827	14,09924
	3	69,6597	17,15547
	4	70,2526	26,55154
	Media	73,6022	19,60919
B	1	47,4640	13,29519
	2	59,4630	24,85078
	3	46,2282	8,32386
	4	71,8478	23,82576
	Media	54,9327	19,32609
C	1	63,6541	27,41097
	2	69,9615	22,30466
	3	114,6170	30,51352
	4	95,5123	14,59148
	Media	88,4274	34,16406
D	1	69,0561	14,33969
	2	57,0552	23,88338
	3	55,5514	31,01418
	4	89,4528	12,32664
	Media	67,1041	22,99453

Tipo	Tiempo (h)	Media resistencia arranque de tornillo (N/mm)	Std. Deviation
E	1	46,2324	37,64092
	2	24,8130	7,59145
	3	39,6500	10,29296
	4	59,4630	20,91506
	Media	39,4509	20,76634
F	1	25,5630	,61797
	2	24,6577	,03159
	3	24,4718	6,89929
	4	24,9749	6,18789
	Media	24,9168	3,53847
G	1	63,7600	,00290
	2	34,0000	,53000
	3	28,6663	,42941
	4	33,2320	6,88628
	Media	39,9146	15,10505

Para que un tablero pueda ser considerado estructural la resistencia al arranque de tornillo en la cara de un tablero tiene que ser mayor a 70 N/mm, para el resto de tableros no es obligado ningún valor.

Se observó en la tabla que existe una gran dispersión de valores. Para evaluar esa dispersión se obtuvo el diagrama de barras de error de la figura 4.33.

Como se observa en la figura hay una gran desviación estándar, por lo que se procedió a analizar la influencia de las variables que se han introducido en la elaboración de los tableros.

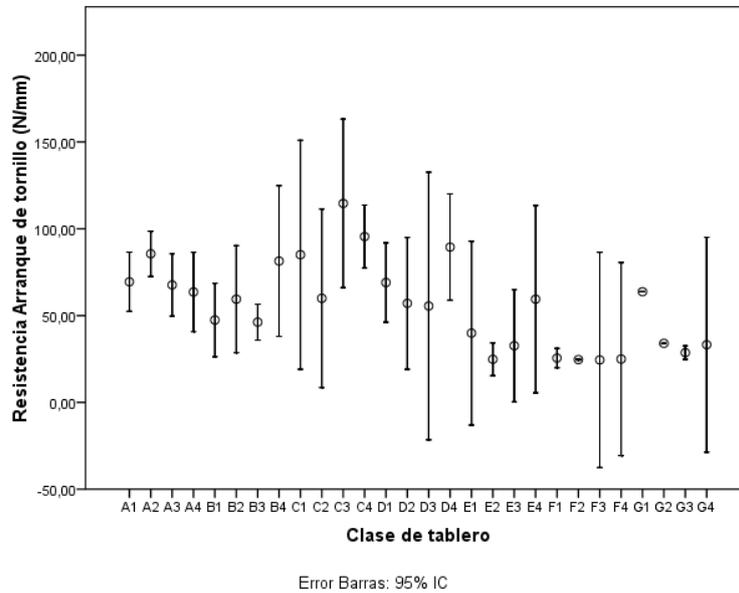


Figura 4.33. Diagrama de barras de la resistencia al arranque de tornillo de cada tablero.

#### 4.10.1. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE TABLERO SOBRE LA RESISTENCIA AL ARRANQUE DE TORNILLO EN LA CARA DEL TABLERO.

Para averiguar si había dependencia se realizó el análisis de la varianza, como indica la tabla 4.56.

Tabla 4.56. ANOVA. Resistencia al arranque de tornillo en la cara del tablero \*tipo de tablero

			Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
R. Arranque tornillo *	Inter-grupos	(Combinadas)	36128,534	6	6021,422	11,261	,000
		Linealidad	18277,357	1	18277,357	34,182	,000
		Desviación de Linealidad	17851,177	5	3570,235	6,677	,000
Intra-grupos			52401,794	105	534,712		
Total			88530,328	111			

El análisis mostró un estadístico de contraste  $F(6.105) = 11,261$  con una significación igual a  $0,000 < 0,05$  que indicó que no hay igualdad de medias, luego las variables son dependientes. Se podía decir que hay influencia entre el tipo de tablero y la resistencia al arranque de tornillo.

Para averiguar si la relación entre variables es lineal se realizó prueba de las medidas de asociación como se observa en la tabla 4.57.

Tabla 4.57. Medidas de asociación. Resistencia al arranque de tornillo \*tipo de tablero.

	R	R cuadrado	Eta	Eta cuadrado
Resistencia Arranque * Tipo	-,454	,206	,639	,408

La R cuadrado es igual a  $0,206 < 0,5$  lo que indica que la relación entre la resistencia al arranque de tornillo y el tipo de tablero no es lineal.

Para evaluar si realmente había influencia entre las variables y los datos obtenidos no se debían al error experimental, se realizó el análisis de residuos mediante la prueba de contraste chi-cuadrado, como muestra la tabla 4.58.

Tabla 4.58. Chi-cuadrado. Resistencia al arranque de tornillo \*tipo de tablero

	Resistencia	Arranque tornillo	Tipo tablero
Chi-cuadrado <sup>(a,b)</sup>		17,905 <sup>a</sup>	15,067 <sup>b</sup>
gl		105	6
Sig. asintót.		1,000	,020

<sup>a</sup>. 105 casillas (100,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 1,2.

<sup>b</sup>. 0 casillas (,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 15,0.

La prueba de contraste indica que la resistencia al arranque de tornillo en la cara del tablero para el tipo de tablero tiene una significación asintótica igual a  $0,020 < 0,05$  esto indicó que hay influencia entre variables, luego la resistencia al arranque de tornillo de la cara del tablero depende del tipo de tablero fabricado.

#### 4.10.2. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TIEMPO EN LA PRENSA SOBRE LA RESISTENCIA AL ARRANQUE DE TORNILLO EN LA CARA DEL TABLERO.

Para evaluar la influencia del tiempo se realizó el análisis de la varianza que indica la tabla 4.59.

Tabla 4.59. ANOVA. Resistencia al arranque de tornillo \*tiempo en prensa.

			Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
R. Arranque tornillo * Tiempo	Inter-grupos	(Combinadas)	3218,205	3	1072,735	1,270	,289
		Linealidad	1832,613	1	1832,613	2,170	,144
		Desviacion de Linealidad	1385,592	2	692,796	,820	,443
Intra-grupos				108	844,674		
Total				111			

El análisis de la varianza mostró un estadístico de contraste  $F(3.108) = 1,270$  con una significación igual a  $0,289 > 0,05$  por tanto indicó que había igualdad de medias, luego no había influencia entre variables, son independientes. El tiempo en prensa no influye en la resistencia al arranque de tornillos en las caras del tablero.

Se comprobó que la resistencia al arranque de tornillos dependía del tipo de tablero y no del tiempo en la prensa. Para evaluar el índice de certeza de esta dependencia en la resistencia al arranque de tornillo, se obtuvieron las correlaciones parciales entre las variables, como indica la tabla 4.60.

Tabla 4.60. Correlaciones. Resistencia al arranque de tornillo en la cara

		Arranque	Tipo	Tiempo
Resisten.	Correlación de Pearson	1	-,454**	,144
Arranque	Sig. (bilateral)		,000	,143
tornillo	N	112	112	112

\*\* La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Con una correlación de Pearson de -0,454 indica que el tipo de tablero con un índice de certeza del 99% influye en la resistencia en el arranque de tornillo.

Los valores de resistencia al arranque de tornillo en función del tipo de tablero y el tiempo en prensa influye en la resistencia al arranque de tornillo se indica en la figura 4.34.

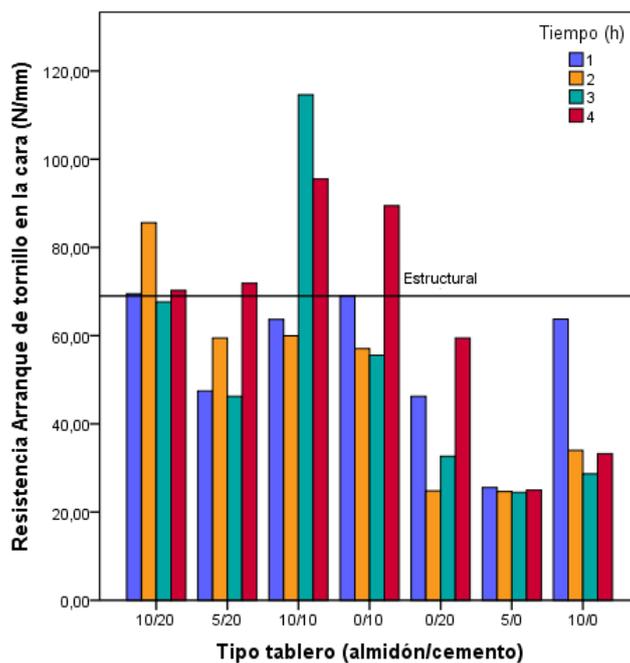


Figura 4.34. Diagrama de barras de la resistencia al arranque de tornillo.

Como indicó la tabla, el tipo de tablero que más resistencia presentó al arranque de tornillo es el tipo C, con un 10% de fécula de patata y 10% de cemento que ha permanecido en la prensa durante 3 o 4 horas.

#### 4.11. RESULTADOS DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.

Para la realización del ensayo se procedió como indica la norma EN 12667 (2002). Los resultados medios obtenidos en función del tipo de tablero y el tiempo en la prensa se indican en la tabla 4.61.

Tabla 4.61. Informe. Conductividad térmica ( $\lambda$ )

Tipo tablero	Tiempo (h)	Media $\lambda$ (W/m·K)	Desviación típica
A	1	,064315	,0045614
	2	,062968	,0055031
	3	,063578	,0079259
	4	,056379	,0073223
	Media	,061646	,0069083
B	1	,064540	,0012343
	2	,063144	,0026770
	3	,062950	,0029753
	4	,061943	,0017575
	Media	,063203	,0023328
C	1	,061776	,0019421
	2	,055441	,0058817
	3	,055275	,0084200
	4	,053653	,0065938
	Media	,056028	,0064751
D	1	,053606	,0106215
	2	,057299	,0108402
	3	,048007	,0016285
	4	,053575	,0080305
	Media	,053455	,0086538
E	1	,058390	,0022058
	2	,064256	,0046133
	3	,064264	,0093843
	4	,058221	,0072527
	Media	,061649	,0066185
F	1	,063736	,0014764
	2	,057723	,0011667
	3	,058048	,0007071
	4	,063825	,0006746
	Media	,060833	,0032538
G	1	,064996	,0050622
	2	,066259	,0003224
	3	,065337	,0040949
	4	,058319	,0012997
	Media	,063728	,0042073

Para evaluar la influencia de las variables de fabricación se obtuvo el diagrama de barras de error de la figura 4.35.

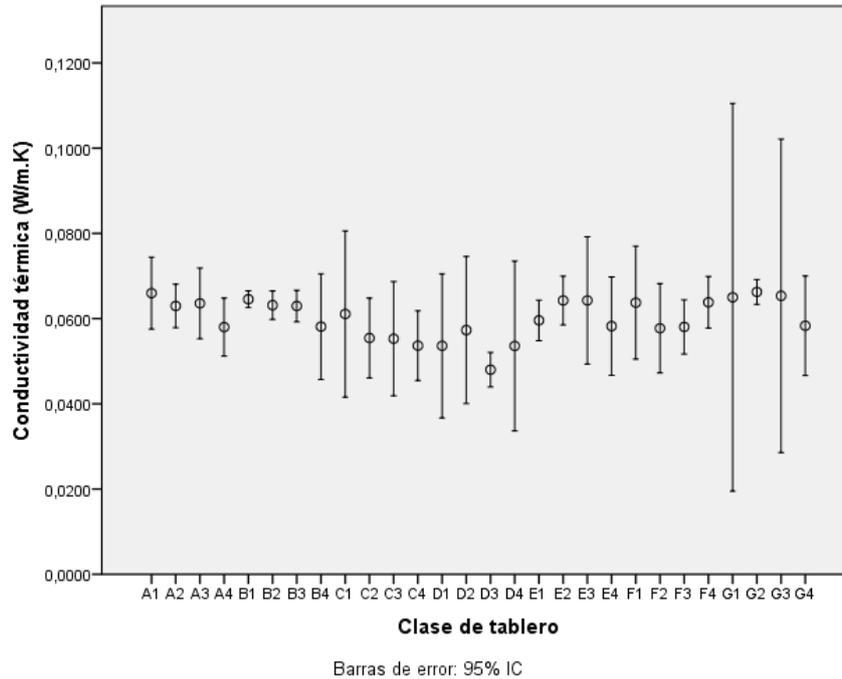


Figura 4.35. Diagrama de barras de error conductividad térmica en función de la clase del tablero.

Las barras de error no son indicativas ya que hay unos valores que se solapan, por lo que se evaluaron las distintas variables de fabricación

#### 4.11.1. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TIPO DE TABLERO SOBRE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.

Se realizó el análisis de la varianza en función del tipo de tablero como indica la tabla 4.62.

Tabla 4.62. ANOVA. Conductividad térmica en función del tipo de tablero.

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Conductividad * Tipo tablero	Inter-grupos (Combinadas)	,001	6	,000	5,245	,000
	Intra-grupos	,004	98	,000		
	Total	,005	104			

El análisis mostró un estadístico de contraste  $F(6,98) = 5,245$  con una significación igual a  $0,000 < 0,05$  que indicó que no hay igualdad de medias, luego las variables son dependientes. Se puede decir que hay influencia entre el tipo de tablero y la conductividad térmica. Para ver si existe una dependencia lineal se realizó la medidas de asociación que indica la tabla 4.63.

Tabla 4.63. Medidas de asociación. Conductividad térmica en función del tipo de tablero.

	R	R cuadrado	Eta	Eta cuadrado
Conductividad * Tipo tablero	-,045	,002	,493	,243

R cuadrado es igual a  $0,002 < 0,5$  lo que indica que la relación entre la conductividad térmica y el tipo de tablero no es lineal.

Para evaluar si realmente había influencia entre las variables y los datos obtenidos no se debían al error experimental, se realizó el análisis de residuos mediante la prueba de contraste chi-cuadrado, como muestra la tabla 4.64.

Tabla 4.64. Estadísticos de contraste. Conductividad térmica en función del tipo de tablero.

	Conductividad	Tipo
Chi-cuadrado	14,362 <sup>a</sup>	15,067 <sup>b</sup>
gl	82	6
Sig. asintót.	1,000	,020

<sup>a</sup> 83 casillas (100,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 1,3.

<sup>b</sup> 0 casillas (0,0%) tienen frecuencias esperadas menores que 5. La frecuencia de casilla esperada mínima es 15,0.

La prueba de contraste para el tipo de tablero tiene una significación asintótica igual a  $0,020 < 0,05$  esto mostró que hay influencia entre variables, luego la conductividad térmica depende del tipo de tablero.

#### 4.11.2. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TIEMPO EN LA PRENSA SOBRE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.

Para evaluar la influencia del tiempo en la prensa de platos calientes se realizó el análisis de la varianza que indica la tabla 4.65.

Tabla 4.65. ANOVA. Conductividad térmica en función del tiempo en prensa.

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Conductividad * Tiempo	Inter-grupos (Combinadas)	,000	3	,000	2,316	,080
	Intra-grupos	,005	101	,000		
	Total	,005	104			

El análisis mostró un estadístico de contraste  $F(3,101) = 2,316$  con una significación igual a  $0,080 > 0,05$  que indicó que hay igualdad de medias, luego las variables son

independientes. Se puede decir que el tiempo que estuvo el tablero en la prensa no influye en la conductividad térmica.

Los valores medios de conductividad térmica obtenidos para cada clase de tablero de observan en la figura 4.36.

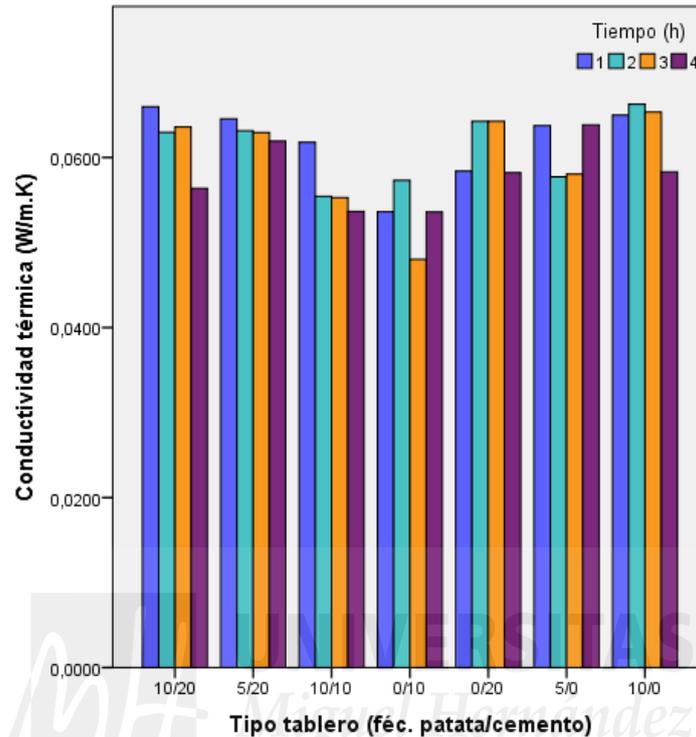


Figura 4.36. Diagrama de la conductividad térmica en función de la clase del tablero

En los materiales aislantes hay que considerar otras variables, como son el espesor y la densidad. Por lo que se procedió al análisis de su influencia.

#### 4.11.3. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL ESPESOR SOBRE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.

El análisis de la varianza se muestra en la tabla 4.66:

Tabla 4.66. ANOVA. Conductividad térmica en función del espesor del tablero.

		Suma de	gl	Media	F	Sig.
		cuadrados		cuadrática		
Conductividad * Espesor	Inter-grupos (Combinadas)	,004	73	,000	1,679	,055
	Intra-grupos	,001	31	,000		
	Total	,005	104			

El análisis indicó un estadístico de contraste  $F(73.101) = 1,679$  con una significación igual a  $0,055 > 0,05$  luego hay igualdad de medias, las variables son independientes. Se

puede decir que el espesor del tablero no influye en la conductividad térmica de estos tableros.

#### 4.11.4. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA DENSIDAD SOBRE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.

En la figura 4.37 se indican los valores medios obtenidos en los ensayos de conductividad térmica en función de la densidad media de los tableros y el tiempo que estuvieron en la prensa. Como se observa hay una gran dispersión los valores.

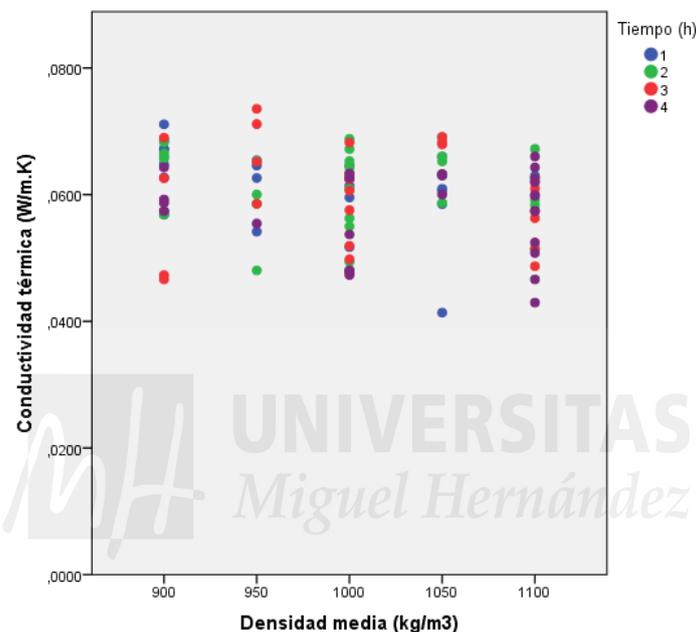


Figura 4.37. Diagrama de la conductividad térmica del tablero en función de la densidad y el tiempo

Por lo que se procedió a realizar el análisis de la varianza de la tabla 4.67.

Tabla 4.67. ANOVA Conductividad térmica en función de la densidad del tablero.

			Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Conductividad	Inter-grupos	(Combinadas)	,001	5	,000	2,312	,050
* Densidad	Intra-grupos		,004	99	,000		
media	Total		,005	104			

El estadístico de contraste  $F(5,99) = 2,312$  con una significación igual a  $0,050 = 0,05$  indica que las variables son independientes. Se puede decir que la densidad del tablero no influye en la conductividad térmica. Luego la única variable que influye en la conductividad térmica es el tipo de tablero.

Para que un material se considere aislante térmico tiene que tener una  $\lambda \leq 0,06$  W/m·K, estos tableros obtuvieron unos valores medios desde 0,054 hasta 0,064 W/m·K, lo que indica que son buenos aislantes térmicos.

#### 4.12. COMPROBACIÓN DE LA DURABILIDAD DE LAS FIBRAS EN EL CEMENTO.

Para comprobar si las fibras de caña se degradaban en contacto con el cemento, se elaboraron 2 tableros de las clases A2, B2, C2, D2 y E2, que son los que contenían cemento y estuvieron 2 horas en la prensa de platos calientes. Se cortaron las probetas para el ensayo a flexión y se realizó el ensayo a los 365 días.

Los resultados obtenidos de rotura a flexión obtenidas a los 28 y 365 días se observan en la figura 4.38 y el módulo de elasticidad a flexión en la figura 4.39.

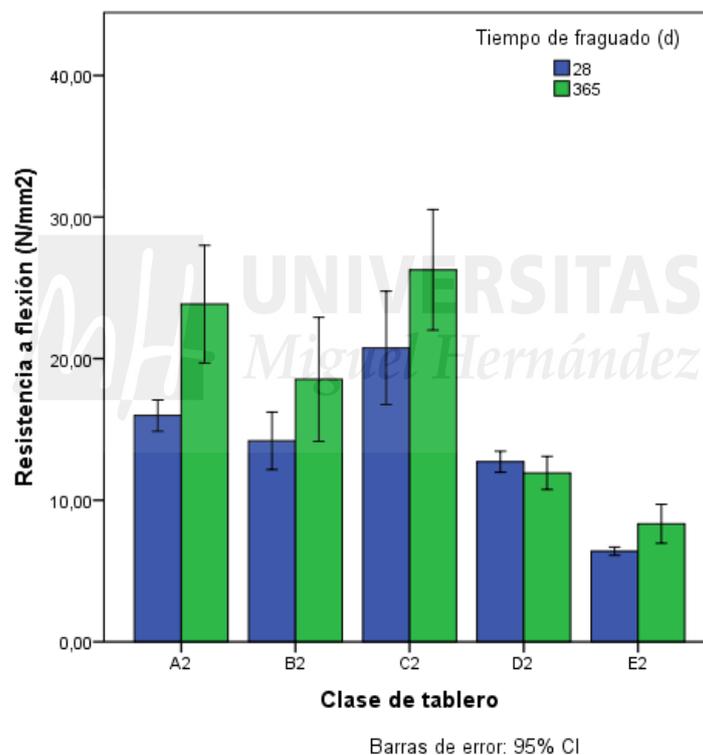


Fig. 4.38. Resistencia a flexión de tableros elaborados con cemento en función de la clase y el tiempo de fraguado.

Como se observa en la figura 4.38, los valores del ensayo a flexión aumentaron desde los 28 días a los 365 días de fraguado, especialmente en los tableros que contenían un 10% de almidón (clases A2 y C2). Los tableros que tenían como aglomerante solo cemento, con un 20% (clase E2) también aumentaron la resistencia a flexión y con un 10% (clase D2) tuvieron valores similares.

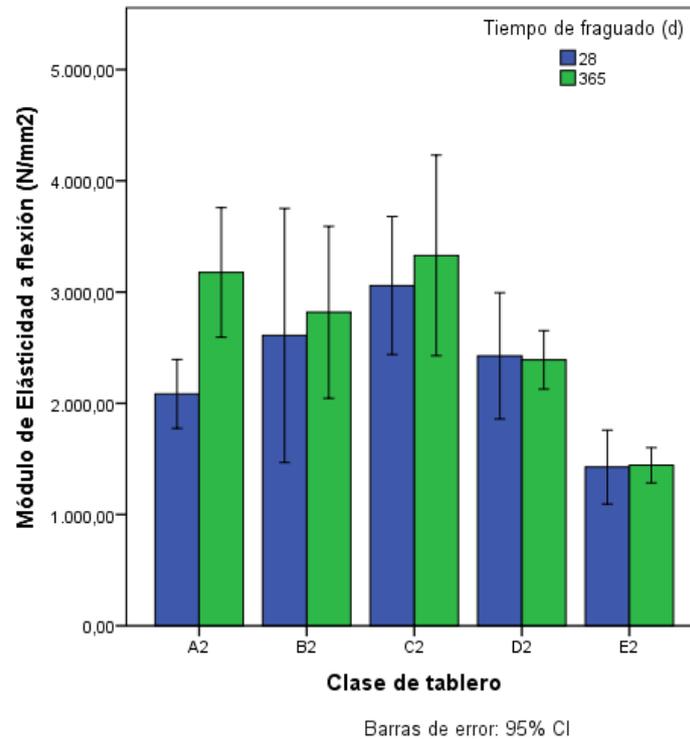


Fig. 4.39. Módulo de elasticidad a flexión de tableros elaborados con cemento en función de la clase y el tiempo de fraguado.

En la figura 4.39 se ve que en los tableros que se elaboraron con almidón y cemento (clases A2, B2 y C2), aumentó el módulo de elasticidad a flexión a los 365 días de fraguado. Los tableros que solo contenían cemento (clases D2 y E2) presentaron unos valores similares. Esto demuestra que las partículas de caña toleran la alcalinidad del cemento, al no observarse deterioro de las propiedades.

Los resultados de los tableros con cemento-almidón aumentaron sus valores a lo largo del tiempo, por tanto, el almidón podría ejercer un efecto beneficioso en el fraguado del cemento. Posiblemente, el agua absorbida por el almidón, posteriormente (cuando gelifica), la va cediendo al cemento para su hidratación.

### 4.13. DISCUSIÓN

Los tableros de partículas se clasifican en función de sus propiedades mecánicas y de estabilidad dimensional. La norma europea EN 312 (2010) establece los requisitos mínimos de dichas propiedades clasificándolos desde grado P1 (usos generales) hasta P7 (tableros estructurales de altas prestaciones para usos en el exterior). A los tableros de este trabajo no se les puede aplicar la normativa de los tableros de madera/cemento (EN 633, 1995) debido a que tienen un aditivo orgánico, como es el almidón y queda especificado en dicha norma.

En la tabla 4.68 se expone el conjunto de resultados obtenidos en este estudio por clase de tablero y su grado atendiendo a los requisitos de la citada norma EN.

Tabla 4.68. Resultados medios de las propiedades experimentales de los tableros y su clasificación según la norma EN 312 (2010). ( ) Desviación estándar.

Clase tablero	Clasificación EN 312	Flexión (N/mm <sup>2</sup> )	Módulo Elasticidad (N/mm <sup>2</sup> )	Tracción (N/mm <sup>2</sup> )	Hinchamiento 24 h (%)
A1	P1	12,89 (1,44)	1846,04 (368,20)	0,41 (0,13)	15,54 (3,37)
A2	P4	15,98 (1,19)	2083,50 (335,15)	0,53 (0,22)	11,12 (2,85)
A3	P5	19,79 (3,06)	2636,88 (521,43)	0,66 (0,27)	13,33 (3,08)
A4	P6	26,11 (2,28)	3759,76 (377,99)	0,76 (0,21)	12,38 (1,35)
B1	P2	13,33 (1,13)	2130,78 (304,21)	0,34 (0,15)	13,96 (5,22)
B2	P2	14,19 (1,63)	2610,01 (520,34)	0,42 (0,23)	13,48 (3,28)
B3	P4	16,94 (1,49)	2392,63 (488,00)	0,79 (0,21)	15,25 (5,77)
B4	P4	19,88 (0,91)	3076,93 (431,62)	0,74 (0,14)	13,49 (1,59)
C1	P1	12,56 (6,07)	2021,89 (461,01)	0,54 (0,19)	24,22 (8,13)
C2	P2	20,76 (2,51)	3058,56 (389,95)	0,71 (0,09)	16,83 (3,09)
C3	P2	21,60 (1,60)	3104,68 (541,19)	0,84 (0,24)	16,95 (2,75)
C4	P6	27,26 (3,29)	4287,44 (554,31)	0,95 (0,33)	14,04 (1,03)
D1		11,41 (0,81)	2325,87 (211,76)	0,31 (0,01)	58,50 (14,5)
D2	P1	12,72 (0,46)	2426,60 (356,39)	0,31 (0,04)	49,42 (0,17)
D3	P1	13,82 (1,44)	2519,48 (198,45)	0,34 (0,03)	44,83 (16,6)
D4	P1	18,04 (0,35)	3080,12 (126,14)	0,36 (0,10)	50,41 (11,2)
E1		6,22 (0,22)	1234,77(131,71)	0,16 (0,11)	42,24 (1,56)
E2		6,40 (0,24)	1426,89 (167,47)	0,16 (0,06)	36,79 (3,71)
E3		8,71 (0,34)	1713,74 (11,04)	0,33 (0,10)	37,79 (7,15)
E4		9,45 (1,02)	1865,42 (64,53)	0,21 (0,09)	26,73 (6,59)
F1		9,90 (0,30)	1958,16 (71,76)	0,27 (0,01)	37,28 (1,85)
F2		7,90 (0,47)	1663,29 (1,38)	0,28 (0,02)	39,89 (0,67)

Clase tablero	Clasificación EN 312	Flexión (N/mm <sup>2</sup> )	Módulo Elasticidad (N/mm <sup>2</sup> )	Tracción (N/mm <sup>2</sup> )	Hinchamiento 24 h (%)
F3		9,46 (0,43)	1784,03 (37,78)	0,21 (0,01)	49,11 (0,71)
F4		12,06 (0,29)	2443,87 (51,51)	0,27 (0,01)	56,34 (0,71)
G1	P1	13,00 (0,07)	2148,25 (70,71)	0,30 (0,01)	41,41 (1,41)
G2	P1	14,04 (0,27)	2192,85 (95,95)	0,28 (0,01)	43,44 (1,59)
G3	P1	15,63 (0,48)	2211,76 (119,5)	0,28 (0,01)	48,49 (1,52)
G4	P1	18,53 (0,69)	2763,68 (72,18)	0,29 (0,01)	46,18 (2,28)

Como se desprende de la tabla 4.68 los tableros clase A4 y C4 son tableros de grado P6, tableros de altas prestaciones estructurales para ambiente seco. Los tableros con mejores propiedades eran aquellos cuyo aglomerante estaba constituido por almidón y cemento. Con mayor proporción de cemento se obtiene menor porcentaje de hinchamiento en espesor y con mayor proporción de almidón mejores propiedades mecánicas.

Los tableros clase E cuyo aglomerante fue un 20% de cemento, mostraron las peores propiedades mecánicas. Todo parece indicar que no se realizó bien la hidratación del cemento, pudiera ser porque el agua necesaria era retenida por las partículas de caña y se evaporó al someter la mezcla a 100° C de temperatura. En el caso de los paneles que contenían cemento y almidón es posible que el agua al principio estuviera retenida por almidón y que posteriormente la cediera al cemento consiguiendo mejores propiedades. Esto confirmaría lo que sugirieron Dewacker and Mcad (1996) que añadir al cemento una mezcla de polisacáridos tales como celulosa y almidón eran un buen agente de retención del agua.

Los tableros con un 10% de almidón alcanzaron buenas propiedades mecánicas pero eran los que más se hinchan en inmersión en agua, por lo que no se pueden clasificar con mayor grado que P1.

Las dos variables de fabricación fueron el tipo de aglomerante y el tiempo en la prensa de platos calientes. El tipo de aglomerante es la variable más influyente, ya que todas las propiedades físicas y mecánicas dependieron del aglomerante que se utilizó (densidad, % de humedad, resistencia a flexión y módulo de elasticidad a flexión, resistencia a tracción interna, % de hinchamiento en espesor, % de absorción de agua, resistencia al arranque de tornillo y conductividad térmica). La otra variable utilizada, el tiempo que los tableros

estuvieron en la prensa, influye en la mitad de las propiedades ensayadas (% humedad, resistencia a flexión, módulo de elasticidad a flexión y resistencia a tracción interna).

La conductividad térmica de los tableros experimentales varió de 0,054 a 0,062 W/m·K son tableros que conducen mal el calor, incluso la mayoría de las clases de tableros podrían clasificarse como aislantes térmico, ya que tienen un valor de  $\lambda < 0,06$  W/m·K. En la norma EN 13986 (2006) se especifica que para una densidad  $< 1200$  kg/m<sup>3</sup> y 18 mm de espesor, los tableros de madera-cemento tienen un coeficiente de conductividad térmica de 0,23 W/m·K, y en este trabajo se han obtenido valores muy bajos en todas las clases de tableros. Coincidiendo con Khedari et al. (2005) en su estudio de cemento reforzado con fibra de coco, obtuvieron una conductividad térmica reducida, con lo que utilizando este material se conservaba la energía en los edificios.

Los tableros investigados en este trabajo tenían un porcentaje de humedad muy bajo, con un valor medio menor del 2%. Onuaguluchi and Banthia, (2016) indicaron que el contenido de humedad tiene un efecto significativo en la resistencia mecánica de los compuestos de cemento reforzados con fibra natural a base de plantas, por lo que el bajo contenido de humedad de los tableros puede haber contribuido a la mejora de sus propiedades mecánicas. Algunos investigadores observaron que durante el tiempo de fraguado de los materiales compuestos de cemento con fibras vegetales, se producía una disminución de la temperatura de hidratación del cemento y un retraso en la formación de productos de hidratación (Bilba et al., 2003; Sudin and Swamy, 2006; Fan et al., 2012), atribuyéndolo a distintos componentes de las fibras, especialmente los azúcares. Sedan et al. (2008) concluyeron que las pectinas contenidas en las fibras de yute funcionaron como un inhibidor del crecimiento del hidrato de silicato cálcico (CSH).

En las micrográficas SEM se observaron compuestos de calcio a los 8 días de fraguado y parecía que el proceso de hidratación no se había retrasado. Además, en las micrográficas se distinguía como el almidón gelificado envolvía a los granos de cemento, lo que dificultaría que los componentes de la caña se diluyeran e interaccionaran con el cemento.

En la revisión realizada sobre los compuestos de fibras vegetales con cemento, Onuaguluchi and Banthia, (2016) indicaron que se mejoraría al principio la hidratación del cemento aumentando la temperatura de curado y utilizando materiales vegetales que tuviesen un área superficial alta. Posiblemente debido a que se utilizó una temperatura en la

prensa de 100° C, no se produjo disminución del calor de hidratación, especialmente en los tableros que estuvieron en la prensa de platos calientes durante 4 horas, que mejoraron sus propiedades mecánicas y tuvieron menor % de hinchamiento en espesor. También se utilizó un tamaño de partícula de caña menor de 0,25 mm que tenían mayor área superficial, lo que pudo contribuir a que se obtuviesen mejores propiedades.

Los tableros de este trabajo se elaboraron con muy poca cantidad de cemento, tenían una relación en peso de partículas de caña/cemento de 1/0,2 y los tableros industriales la relación madera/cemento es 1/5,62. El tiempo de elaboración fue en la prensa como máximo 4 horas a 100°C y los de madera cemento el tiempo de prensado 8 horas a 75° C y en el tiempo de secado 8 horas a 90°C. Luego los tableros experimentales se elaboraron con muy poca cantidad de cemento, menos tiempo y menor consumo de energía, por lo que son tableros de menor coste energético que los tableros industriales de madera-cemento.





## 5. CONCLUSIONES

Se investigaron los efectos del aglomerante (almidón–cemento) sobre las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de tableros de partículas elaborados con partículas de caña común mediante un proceso de presión y calor.

Se obtuvieron tableros de partículas sostenibles de alta calidad (tableros de altas prestaciones estructurales) usando residuos de cañas. Las propiedades mecánicas se mejoraron aumentando el contenido de almidón y se obtuvo mayor resistencia al agua, aumentando el contenido de cemento.

Todos los tableros presentaron una conductividad térmica muy baja y pueden considerarse aislantes térmicos.

El tiempo de permanencia de los tableros en la prensa de platos calientes (100°C de temperatura) también ejerció una gran influencia. Con mayor tiempo, aumentaban las propiedades de resistencia a flexión, módulo de elasticidad a flexión y resistencia a la tracción interna. La temperatura y duración óptima del proceso de prensado, se determinarán en un futuro estudio.

El cemento se mineraliza en los tableros de partículas de caña, almidón y cemento, siguiendo las mismas pautas de hidratación que el cemento sin fibras ni aditivos.

Las partículas de caña parece que toleran la alcalinidad del cemento, pues no se observó la degradación de sus fibras y en los tableros aumentó la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad a los 365 días de fraguado.

Con partículas de caña se pueden elaborar compuestos cementosos que podrían utilizarse para la fabricación de diversos componentes de la construcción. Por lo tanto, la utilización de estos residuos en la fabricación de materiales de construcción ligados con cemento-almidón, ofrecen una alternativa atractiva.

La incorporación de partículas de caña en materiales prefabricados no sólo es factible, sino que también puede reducir los costes de elaboración y aislamiento de los edificios. El aumento de la eficiencia energética reduciría la demanda de energía, los costes de calefacción y los impactos ambientales asociados con la producción de energía.



## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Aggarwal, L.K. (1992). Studies on cement bonded coir fibre boards. *Cement and Concrete Composites*, 14, 63–69
2. Aggarwal, L.K. (1995). Bagasse-reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 17, 107–112.
3. Aggarwal, L.K., Agrawal, SP., Thapliyal, P., and Karade, SR. (2008). Studies on the use of arhar stalks for making cement-bonded composite boards. *Cement and Concrete Composites*, 30, 44–51.
4. Almeida, R. R., Del Menezzi, C. H. S., and Teixeira, D. E. (2002). Utilization of the coconut shell of babaçu (*Orbignya sp.*) to produce cement-bonded particleboard. *Bioresource Technology*, 85(2), 159-163.
5. Amini, M.H.M., Hashim, R., Hiziroglu, S., Sulaiman, N.S., and Sulaiman, O. (2013). Properties of particleboard made from rubberwood using modified starch as binder. *Composites Part B: Engineering*, 50, 259-264.
6. Asasutjarit, C., Hirunlabh, J., Khedari, J., Charoenvai, S., Zeghmami, B., and Cheul Shin, U. (2007). Development of coconut coir-based lightweight cement board. *Construction and Building Materials*, 21, 277–288
7. Ashori, A., Tabarsa, T., and Valizadeh, I. (2011). Fiber reinforced cement boards made from recycled newsprint paper. *Materials Science and Engineering: A*, 528(25), 7801-7804.
8. Ashori, A., Tabarsa, T., and Amosi, F. (2012). Evaluation of using waste timber railway sleepers in wood-cement composite materials. *Construction and Building Materials*, 27(1), 126-129.
9. Base de Datos Mundial sobre Especies Invasoras UICN (<http://www.issg.org>)
10. Basri, H.B., Mannan, M.A. and Zain, M.F.M. (1999). Concrete using waste oil palm shells as aggregate. *Cement and Concrete Research*, 29, 619–622.
11. Bekhta, P., and Dobrowolska, E. (2006). Thermal properties of wood-gypsum boards. *European Journal of Wood and Wood Products*, 64(5), 427-428.

12. Belmares, H., Barrera, A., Castillo, E., Verheugen, E., Monjaras, M., Patfoort, G. A., and Bucquoye, M. E. (1981). New composite materials from natural hard fibers. *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development*, 20(3), 555-561.
13. Bensted, J. (1987). Some applications of conduction calorimetry to cement hydration. *Advances in Cement Research*, 1(1), 35-44.
14. Biblis, E.J., and Chen Fan, L. (1968). Sugar and other wood extractives – Effect of the setting of southern pine–cement mixture. *Forest Products Journal*, 18(8), 28–34.
15. Bilba, K., Arsène, M.A., and Ouensanga, A. (2003). Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites. Part I. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite. *Cement and Concrete Composites*, 25, 91–96.
16. Bilba, K., and Arsene. M. A. (2008). Silane treatment of bagasse fiber for reinforcement of cementitious composites. *Composites Part A*, 39:1488-95.
17. Bisanda, E. T. N., and Ansell, M. P. (1991). The effect of silane treatment on the mechanical and physical properties of sisal-epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 41(2), 165-178.
18. Bruere, G. M. (1966). Set retarding effects of sugars in Portland cement pastes. *Nature*, 212, 502–503.
19. Cabalo, V. B. (2015). Utilization of Coconut Coir and Abaca Stripping Waste Fibers for Cement Bonded Board. *Journal of Science, Engineering and Technology*, 3, 183-188.
20. Chakraborty, S., Kundu, S.P., Roy, A., Adhikari, B., and Majumder, S.B. (2013). Polymer modified jute fibre as reinforcing agent controlling the physical and mechanical characteristics of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 49: 214-222.
21. Colleparidi, M., Monosi, S., Moriconi, G., and Pauri, M. (1984). Influence of gluconate, lignosulfonate or glucose on the C3A hydration in the presence of gypsum with or without lime. *Cement and Concrete Research*, 14, 105– 112.

22. Collepari, M., Monosi, S., Moriconi, G., and Pauri, M. (1985). Influence of gluconate, lignosulfonate, and glucose admixtures on the hydration of tetracalcium aluminoferrite in the presence of gypsum with or without calcium hydroxide. *Journal of the American Ceramic Society*, 68(5).
23. Da Silva, E.J., Marques, M.L., Velasco, F.G., Junior, C.F., Luzardo, F.M., and Tashima, M.M. (2017). A new treatment for coconut fibers to improve the properties of cement-based composites—Combined effect of natural latex / pozzolanic materials. *Sustainable Materials and Technologies*. doi.org/10.1016/j.susmat.2017.04.003
24. Decisión 2003/33/CE del Consejo, de 19 de diciembre de 2002, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE (DOCE nº L11, de 16.01.03)
25. Defo, M., Cloutier, A., and Riedl B. (2004). Wood–cement compatibility of some Eastern Canadian woods by isothermal calorimetry. *Forest Products Journal*, 54(10), 49–56.
26. Demirbas, A., and Aslan, A. (1998). Effects of ground hazelnut shell, wood and tea waste on the mechanical properties of cement. *Cement and Concrete Research*, 28 (8), 1101–1104.
27. Dewacker, D.R., and Mcad, B. (1996). Cement mortar systems using blends of polysaccharides and cold-water-soluble unmodified starches, US Patent 5,575,840.
28. Diquélou, Y., Gourlay, E., Arnaud, L., and Kurek, B. (2015). Impact of hemp shiv on cement setting and hardening: Influence of the extracted components from the aggregates and study of the interfaces with the inorganic matrix. *Cement and Concrete Composites*, 55, 112-121.
29. Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. Diario Oficial de la Unión Europea. 22/11/2008. L 312/3-30. (Directiva Marco de Residuos) «DOUE» núm. 312, de 22 de noviembre de 2008, páginas 3 a 30 (28 págs). Referencia: DOUE-L-2008-82319.

30. Directiva (UE) 2015/1127 de la Comisión de 10 de julio de 2015 por la que se modifica el anexo II de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. L 184/13-15.
31. EN 1058, (1995). Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y de la densidad. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
32. EN 12667. (2001). Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Productos de alta y media resistencia térmica. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
33. EN 13986 (2006). Tableros derivados de la madera para utilización en la construcción. Características, evaluación de la conformidad y marcado. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
34. EN 309. (2005). Tableros de partículas. Definición y clasificación. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
35. EN 310. (1993). Tableros derivados de la madera. Determinación del módulo de elasticidad en flexión y de la resistencia a la flexión. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
36. EN 312. (2010). Tableros de partículas. Especificaciones. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
37. EN 317. (1993). Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la hinchazón en espesor después de inmersión en agua. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
38. EN 319. (1993). Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la resistencia a la tracción perpendicular a las caras del tablero. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
39. EN 320. (1993). Norma UNE. Tableros derivados de la madera. Determinación de la resistencia al arranque de tornillos. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

40. EN 322. (1993). Tableros derivados de la madera. Determinación del contenido de humedad. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
41. EN 323. (1993). Tableros de partículas y tableros de fibras. Determinación de la densidad. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
42. EN 325, (1995). Determinación de las dimensiones de las probetas. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
43. EN 326-1, (1995). Tableros derivados de la madera. Muestreo, despiece e inspección. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
44. EN 633 (1995). Tableros de partículas aglomeradas con cemento. Definición y clasificación. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
45. Espinoza Herrera, R., and Coutier, A. (2008). Compatibility of four eastern Canadian woods with gypsum and gypsum–cement binders by isothermal calorimetry. *Maderas Ciencia y Tecnología*, 10(3), 275–88.
46. Fan, M., Ndikontar, M.K., Zhou, X., and Ngamveng, J.N. (2012). Cement-bonded composites made from tropical woods: compatibility of wood and cement. *Construction and Building Materials*, 36, 135-140.
47. Ferrández García M.T. (2008). Tesis doctoral. Estudio de tableros multicapa de fibras y partículas de caña común (*Arundo donax* L.) Ph.D. Thesis. Universidad Miguel Hernández.
48. Ferrández-García, C.E., Andreu-Rodríguez, J., Ferrández-García, M. T., Ferrández-Villena, M., and García-Ortuño, T. (2012). Panels made from giant reed bonded with non-modified starches. *BioResources*, 7(4), 5904-5916.
49. Ferrández-García, C.E., García-Ortuño, T., Andreu-Rodríguez, J., Ferrández-Villena, M. and Ferrández- García M. T. (2015). Mechanical Properties of a Cement Mortar Reinforced with *Arundo donax* L. Reeds. *International Journal of Civil and Structural Engineering– IJCSE*, 2(1), 305-308.
50. Ferrández-García, MT., García-Ortuño, T., Ferrández-Villena, M., Andreu-Rodríguez, J., and Ferrández-García, C.E. (2016) Estudio de las propiedades de placas de cemento mejoradas con almidón. Proceeding, VII Congreso Iberico de Agroingeniería. Retos de la nueva agricultura mediterránea, pp 387-392. Universidad Miguel Hernández. ISBN 978-84-16024-30-8.

51. Fisher, R. A. (1958). *Statistical methods for research workers* (13<sup>a</sup> edición). New York: Hafner.
52. Garci Juenger, M. C., and Jennings, H. M. (2002). New insights into the effects of sugar on the hydration and microstructure of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 32, 393–399.
53. García-Ortuño, T., Rodríguez, J., Ferrández-García, M.T., Ferrández-Villena M., and Ferrández-García, C.E. (2011). Evaluation of the physical and mechanical properties of particleboard made from giant reed (*Arundo donax* L.). *BioResources*, 6(1), 477-486.
54. Gassan, J., and Bledzki, A. K. (1999). Possibilities for improving the mechanical properties of jute/epoxy composites by alkali treatment of fibres. *Composites Science and Technology*, 59(9), 1303-1309.
55. Ghio, V.A. Monteiro, P.J.M., and Demsetz, L.A. (1994). The rheology of fresh cement paste containing polysaccharide gums. *Cement and Concrete Research*, 24(2), 243– 249.
56. Giraldo, M. A., and Tobón, J. I. (2006). Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación. *Dyna*, 73(148), 69-82.
57. Glenn, G.M., Miller, R.M., and Orts, W.J. (1998). Moderate strength lightweight concrete from organic aquagel mixtures. *Industrial Crops and Products*, 8(2), 123– 132.
58. Glenn, G.M., Gray, G.M., Orts, W.J., and Wood D.W, (1999). Starch-based lightweight concrete: effect of starch source, processing method, and aggregate geometry. *Industrial Crops and Products*, 9(2), 133–144.
59. Govin, A., Peschard, A., and Guyonnet, R. (2006). Modification of cement hydration at early ages by natural and heated wood. *Cement and Concrete Composites*, 28(1), 12–20.
60. Gram, H. E. (1983). Durability of natural fibers in concrete. Swedish Research and Concrete Research Institute, Stockholm.
61. Hachmi, M., Moslemi, A. A., and Campbell, A. G. (1990). A new technique to classify the compatibility of wood with cement. *Wood Science and Technology*, 24(4), 345-354.

62. Harsch, J. (1993). New industrial uses, new markets of US crops: status of technology and commercial adoption. US Department of Agriculture, Cooperative State Research Service. US Government Printing Office, Washington, DC.
63. Hayakawa, K., and Soshiroda, T. (1985). An experimental study on the concrete containing cellulose ether. *Trans. Jpn. Concr. Inst.*, (7), 17–24.
64. Hermawan, D., Subiyanto, B., and Kawai, S. (2001). Manufacture and properties of oil palm frond cement-bonded board. *Journal of Wood Science*, 47(3), 208-213.
65. Juarez, C., Duran, A., Valdez, P., and Fajardo, G. (2007). Performance of “Agave lecheguilla” natural fiber in Portland cement composites exposed to severe environment conditions. *Building and Environment*, 42(3), 1151-1157.
66. Kainuma, K.E.I.J.I. (1988). Structure and chemistry of the starch granule. *The biochemistry of plants*, 14, 141-180.
67. Karade, SR., Irle M., Maher, K., and Caldiera F. (2002). Cork granules as lightweight aggregate R.K. Dhir, T.D. Dyer, J.E. Halliday (Eds.). *Sustainable Concrete Construction*, 253–262.
68. Karade, SR., Irle, MA., and Maher, K. (2006). Influence of granule properties and concentration on cork–cement compatibility. *Holz Roh Werkst*, 64, 281–286.
69. Karade, S.R. (2010). Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes. *Construction and Building Materials*, 24(8), 1323-1330.
70. Khedari, J., Watsanasathaporn, P., and Hirunlabh, J. (2005). Development of fiber-based soile cement block with low thermal conductivity. *Construction and Building Materials*, 27, 111-116.
71. Kriker, A., Bali, A., Debicki, G., Bouziane, M., and Chabannet, M. (2008). Durability of date palm fibres and their use as reinforcement in hot dry climates. *Cement and Concrete Composites*, 30(7), 639-648.
72. La acción de la UE contra el cambio climático A la cabeza de la lucha mundial hasta 2020 y más allá. Luxemburgo: Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas 2007, 24 pp. ISBN 978-92-79-07038-9.
73. Luke, K., and Luke'i, G. (2000). Effect of sucrose on retardation of Portland. *Advances in cement research*, 12(1), 948.

74. Mahjoub, R., Yatim, JM., Mohd Sam, AR., and Hashemi, SH. (2014). Tensile properties of kenaf fiber due to various conditions of chemical fiber surface modifications. *Construction and Building Materials*, 55, 103-13.
75. Mannan, M. A., Alexander, J., Ganapathy, C., and Teo, D. C. L. (2006). Quality improvement of oil palm shell (OPS) as coarse aggregate in lightweight concrete. *Building and Environment*, 41(9), 1239-1242.
76. Maximilien, S., Pera, J., and Chabannet, M. (1997). Study of the reactivity of clinkers by means of the conductometric test. *Cement and Concrete Research*, 27, 63–73.
77. Milestone, N. B. (1979). Hydration of tricalcium silicate in the presence of lignosulfonates, glucose, and sodium gluconate. *Journal of the American ceramic society*, 62(7-8), 321-324.
78. Mohanty, A.K., Misra, M., and Drazel, LT. (2005). Natural fiber, biopolymers and biocomposites. Taylor & Francis, New York, NY
79. Moslemi, A. A., Garcia, J. F., and Hofstrand, A. D. (2007). Effect of various treatments and additives on wood-Portland cement-water systems. *Wood and Fiber Science*, 15(2), 164-176.
80. Monosi, S., Moriconi, G., and Collepardi, M. (1982). Combined effect of lignosulfonate and carbonate on pure Portland clinker compounds hydration: III. Hydration of tricalcium silicate alone and in the presence of tricalcium aluminate. *Cement and Concrete Research*, 12, 425– 435.
81. Moubarik, A., Mansouri, H. R., Pizzi, A., Allal, A., Charrier, F., Badia, M. A., and Charrier, B. (2013). Evaluation of mechanical and physical properties of industrial particleboard bonded with a corn flour–urea formaldehyde adhesive. *Composites Part B: Engineering*, 44(1), 48-51.
82. Olorunnisola, A.O., and Adefisan, O.O. (2002). Trial production and testing of cement-bonded particleboard from rattan furniture waste. *Wood and Fiber Science*, 34 (1), 116–124
83. Onuaguluchi, O., and Banthia, N. (2016). Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, 68, 96-108.

- 
84. Pal, P.K., and Ranganatha, S.R. (1986). Jute plastics composites for the building industry. *Pop Plast*, 31, 22–24.
  85. Peschard, A., Govin, A., Grosseau, P., Guilhot, B., and Guyonnet, R. (2004). Effect of polysaccharides on the hydration of cement paste at early ages. *Cement and Concrete Research*, 34, 2153–2158.
  86. Peschard, A., Govina A., Pourchez J., Fredon, E., Bertrand, L., and Maximilien Guilhot, S. (2006). Effect of polysaccharides on the hydration of cement suspension. *Journal of the European Ceramic Society*. 26, 1439–1445.
  87. Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. Publicado en: «BOE» núm. 25, de 29/01/2002. Entrada en vigor: 30/01/2002 Departamento: Ministerio de Medio Ambiente. BOE-A-2002-1697.
  88. Real Decreto 653/2003, de 30 de mayo, sobre incineración de residuos (BOE nº 142, de 14.06.03). – Corrección de errores (BOE nº 224, de 18.09.03).
  89. Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición (BOE nº 38, de 13.02.08).
  90. Roe, P. J., and Ansell, M. P. (1985). Jute-reinforced polyester composites. *Journal of Materials Science*, 20(11), 4015-4020.
  91. Sathiparan, N., Rupasinghe, M. N., and, Pavithra, B. H. (2017). Performance of coconut coir reinforced hydraulic cement mortar for surface plastering application. *Construction and Building Materials*, 142, 23-30.
  92. Satterthwaite, R. W., and Iwinski, D. J. (1973) Starch dextrins. In *Industrial Gums: Polysaccharides and Their Derivatives*, ed. R. L. Whistler. Academic Press, New York and London, 1973, pp. 577–587 [chapter XXVI].
  93. Sauvat, N., Sell, R., Mougél, E., and Zoulalian, A. (1999). A study of ordinary Portland cement hydration with wood by isothermal calorimetry. *Holzforschung*, 53 (1), 104– 108.
  94. Savastano Jr. H., Warden, PG., and Coutts, SRP. (2003). Mechanically pulped sisal as reinforcement in cementitious matrices. *Cement and Concrete Composites*, 25, 311–319.

95. Savastano Jr. H., Warden, P.G., and Coutts, S.R.P. (2003). Potential of alternative fibre cements as building materials for developing areas. *Cement and Concrete Composites*, 25, 585–592.
96. Sedan, D., Pagnoux, C., Smith, A., and Chotard, T. (2008). Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: influence of the fibre/matrix interaction. *Journal of the European Ceramic Society*, 28, 183-92.
97. Silva, D.A., Roman, H.R., and Gleize, P.J.P. (2002). Evidences of chemical interaction between EVA and hydrating Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 32, 1383-1390.
98. Silva, F.A., Toledo Filho, R.D., Melo Filho, J.A., and Fairbairn, E.M.R. (2010). Physical and mechanical properties of durable sisal fiber-cement composites. *Construction and Building Materials*, 24, 777-785.
99. Singh, N. B. (1976). Effect of gluconates on the hydration of cement. *Cement and Concrete Research*, 6, 455–460.
100. Singh, B., Gupta, M., and Verma, A. (1996). Influence of fiber surface treatment on the properties of sisal-polyester composites. *Polymer Composites*, 17(6), 910-918.
101. Soroushian, P., Plasencia, J., and Ravanbakhsh, S. (2003). Assessment of reinforcing effects of recycled plastic and paper in concrete. *Materials Journal*, 100(3), 203-207.
102. Soroushian, P., Won, J. P., Chowdhury, H., and Nossoni, A. (2003). Development of accelerated processing techniques for cement-bonded wood particleboard. *Cement and Concrete Composites*, 25(7), 721-727.
103. Speck, O., Speck, T., and Spatz, H.-CH. (2000): *Arundo donax* as a damped harmonic oscillator. *Biona*, 14, 143-147.
104. Steel, R. G., Torrie, J. H., and Martínez, R. (1985). *Bioestadística: principios y procedimientos* (Vol. 2). Bogotá: McGraw-Hill.
105. Sudin, R., and Swamy, N. (2006). Bamboo and wood fibre cement composites for sustainable infrastructure regeneration. *Journal of materials science*, 41(21), 6917-6924.

- 
106. Swamy, R.N. (1988). Natural fiber reinforced cement and concrete, vol 1, Concrete technology and design. Blackie, London.
107. Tanaka, Y., Uryu, T., and Yaguchi, M. (1996). Cement compositions containing a sulfated polysaccharide and method, US Patent 5,573,589.
108. Tenoutasse, N., and Singh, N. B. (1978). Effect of glucose and calcium gluconate on the hydration of Portland cement. *Indian Journal of Technology*, 16(5), 184-189
109. Thomas, N.L., and Birchall, J.D. (1983). The retarding action of sugars on cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 13, 830-42.
110. Tittlein, P., Cloutier, A., and Bissonnette, B. (2012). Design of a low-density wood-cement particleboard for interior wall finish. *Cement and Concrete Composites*, 34, 218-222.
111. Tondi, G., Wieland, S., Wimmer, T., Schnabel, T., and Petutschnigg, A. (2012). Starch-sugar synergy in wood adhesion science: basic studies and particleboard production. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(1-3), 271-278.
112. Torkaman, J., Ashori, A., and Momtazi, A.S. (2014). Using wood fiber waste, rice husk ash, and limestone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks. *Construction and Building Materials*, 50, 432-436.
113. Vo, L.T., and Navard, P. (2016). Treatments of plant biomass for cementitious building materials. *Construction and Building Materials*, 12, 161-76.
114. Wang, W., and Chouw, N. (2017). The behaviour of coconut fibre reinforced concrete (CFRC) under impact loading. *Construction and Building Materials*, 134, 452-461.
115. Wei, J., and Meyer, C. (2014). Sisal fiber-reinforced cement composite with Portland cement substitution by a combination of metakaolin and nanoclay. *Journal of Materials Science*, 49(21), 7604-7619.
116. Winfield, A. G. (1979). Jute reinforced polyester projects for UNIDO/government of India. *Plastics and Rubber International*, 4(1), 23-28.
117. Yamamuro, H. (1999). Property of new polysaccharide derivative as a viscosity agent for self compacting concrete, First International Rilem Symposium on Self

- Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, RILEM publications, Bagnaux, France, 449–459.
118. Yan, L., Kasal, B., and Huang, L. (2016). A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. *Composites Part B: Engineering*, 92, 94-132.
119. Young, J. F. (1970). Effect of organic compounds on the interconversions of calcium aluminate hydrates: hydration of tricalcium aluminate. *Journal of the American Ceramic Society*, 53(2), 65-69.
120. Zadorecki, P., and Flodin, P. (1985). Surface modification of cellulose fibers. II. The effect of cellulose fiber treatment on the performance of cellulose-polyester composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 30, 3971–3983.
121. Zadorecki, P., and Flodin, P. (1985). Surface modification of cellulose fibers. I. Spectroscopic characterization of surface-modified cellulose fibers and their copolymerization with styrene. *Journal of Applied Polymer Science*, 30(6), 2419-2429.
122. Zhang, D. F., Ju, B. Z., Zhang, S. F., He, L., and Yang, J. Z. (2007). The study on the dispersing mechanism of starch sulfonate as a water-reducing agent for cement. *Carbohydrate Polymers*, 70(4), 363-368.
123. Zhengtian, L., and Moslemi, A. A. (1985). Influence of chemical additives on the hydration characteristics of western larch wood-cement-water mixtures. *Forest Products Journal*, 35(7-8), 37-43.