

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIA**

**ELABORACIÓN DE TABLEROS AGLOMERADOS AUTO-
ADHERIDOS A PARTIR DE FIBRA DE RAQUIS DE PALMA
AFRICANA (*Elaeis guineensis* Jacq.)**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
QUÍMICA**

MARIUXI EMPERATRIZ MEJÍA ALMEIDA

mariu_cosi23@hotmail.com

DIRECTOR: ING. OMAR BONILLA

omar.bonilla@epn.edu.ec

Quito, abril 2012

© Escuela Politécnica Nacional (2012)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Mariuxi Emperatriz Mejía Almeida declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Mariuxi Emperatriz Mejía Almeida

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Mariuxi Emperatriz Mejía Almeida bajo mi supervisión.

Ing. Omar Bonilla

DIRECTOR DE PROYECTO

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	xiii
INTRODUCCIÓN	xv
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 Generalidades de la palma africana (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.)	1
1.1.1 Origen	1
1.1.2 Descripción de la planta	2
1.1.3 Importancia económica en el mundo	5
1.2 La palma africana en el Ecuador	5
1.2.1 Situación actual	6
1.2.2 Importancia económica en el Ecuador	7
1.3 Raquis de la palma africana como materia prima	8
1.3.1 Racimos de fruta de palma africana vacíos (raquis)	9
1.3.2 Caracterización química de componentes lignocelulósicos	12
1.3.2.1 Celulosa	14
1.3.2.2 Hemicelulosa	15
1.3.2.3 Lignina	16
1.3.2.4 Grasas, ceras y resinas	18
1.3.2.5 Cenizas	18
1.4 Procesamiento de tableros aglomerados	18
1.4.1 Clasificación de los tableros	19
1.4.1.1 Tableros de partículas	19
1.4.1.2 Tableros contrachapados	19
1.4.1.3 Tableros de fibra	20
1.4.2 Tableros de fibras de alta densidad (Hardboard)	21

1.4.3	Tableros de fibras sin resinas sintéticas	25
1.5	La lignina como adhesivo en tableros de materiales lignocelulósicos	31
2.	PARTE EXPERIMENTAL	37
2.1	Objetivos	38
2.1.1	Objetivo general	38
2.1.2	Objetivos específicos	38
2.2	Equipos y materiales	39
2.2.1	Equipos	39
2.2.2	Materiales y reactivos	41
2.3	Preparación del raquis	43
2.3.1	Estrategia metodológica	44
2.3.2	Método de ensayo	44
2.4	Caracterización química y mecánica	45
2.4.1	Estrategia metodológica de la caracterización química	45
2.4.2	Método de ensayo de la caracterización química	46
2.4.2.1	Determinación del contenido de humedad inicial	47
2.4.2.2	Determinación del contenido de humedad de análisis	48
2.4.2.3	Determinación del contenido de ceras, grasas y resinas	48
2.4.2.4	Determinación del contenido de lignina	49
2.4.2.5	Determinación del contenido de celulosa	50
2.4.2.6	Determinación del contenido de pentosanos	50
2.4.2.7	Determinación del contenido de cenizas	52
2.4.2.8	Determinación de la solubilidad en hidróxido de sodio	52
2.4.2.9	Determinación de la solubilidad en agua caliente	53
2.4.3	Caracterización mecánica	53
2.4.3.1	Estrategia metodológica de la caracterización mecánica	53
2.4.3.2	Método de ensayo de la caracterización mecánica	54

2.5	Elaboración del material aglomerado	57
2.5.1	Estrategia metodológica	57
2.5.2	Método de ensayo	61
2.6	Evaluación de las propiedades físico-mecánicas	62
2.6.1	Resistencia a la flexión estática	62
2.6.2	Tracción perpendicular a la superficie (TP)	64
2.6.3	Determinación de absorción de agua e hinchamiento	65
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	67
3.1	Recolección y preparación del raquis	67
3.2	Caracterización química y mecánica de la fibra de raquis	69
3.2.1	Caracterización química de la fibra de raquis	69
3.2.1.1	Determinación del contenido de humedad inicial y de análisis	69
3.2.1.2	Determinación del contenido de celulosa, lignina, grasas, ceras y resinas, cenizas y pentosanos	70
3.2.1.3	Determinación de la solubilidad de la fibra en agua caliente y en hidróxido de sodio al 1%	73
3.2.2	Caracterización mecánica de la fibra de raquis	74
3.3	Elaboración del material aglomerado	79
3.4	Evaluación de las propiedades físico-mecánicas	84
3.4.1	Resistencia a la flexión estática	84
3.4.1.1	Módulo de ruptura (MOR)	84
3.4.1.2	Módulo de elasticidad aparente (MOE)	94
3.4.2	Tracción perpendicular a la superficie (TP)	103
3.4.3	Absorción de agua e hinchamiento	111

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
4.1 Conclusiones	113
4.2 Recomendaciones	115
BIBLIOGRAFÍA	117
ANEXOS	124

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Composición de las fibras de raquis de palma africana	11
Tabla 1.2	Características químicas de las fibras de raquis de palma africana	11
Tabla 1.3	Composición química de algunos residuos lignocelulósicos	13
Tabla 1.4	Tenacidad y elongación de varias fibras naturales	14
Tabla 2.1	Materiales empleados en la caracterización de la fibra de raquis	42
Tabla 2.2	Reactivos empleados en la caracterización de la fibra de raquis	43
Tabla 2.3	Métodos de ensayo TAPPI utilizados en la caracterización química de la fibra de raquis	47
Tabla 2.4	Valores de las variables de termo-compresión en pruebas preliminares de obtención del material aglomerado	59
Tabla 2.5	Variación de los parámetros de termo-compresión en las pruebas preliminares de obtención del material aglomerado	60
Tabla 2.6	Criterios para evaluar el aglomerado obtenido en pruebas preliminares	60
Tabla 3.1	Resultados de la determinación del contenido de humedad inicial y de análisis de la fibra de raquis	69
Tabla 3.2	Resultados de la caracterización química de la fibra de raquis.	70
Tabla 3.3	Resultados de la solubilidad de la fibra de raquis de palma africana	73
Tabla 3.4	Resultados de las propiedades físicas de la fibra de raquis	74
Tabla 3.5	Resultados de las propiedades mecánicas de la fibra de raquis	75
Tabla 3.6	Valores de las variables establecidas para el proceso de termo-compresión	83
Tabla A.1	Determinación del contenido de humedad de la fibra de raquis de palma africana	127
Tabla A.2	Determinación de la humedad de análisis de la fibra de raquis de palma africana	127
Tabla A.3	Determinación del contenido de lignina de la fibra de raquis de palma africana	128

Tabla.A.4	Determinación del contenido de grasas, ceras y resinas de la fibra de raquis de palma africana	128
Tabla A.5	Determinación del contenido de celulosa de la fibra de raquis de palma africana	128
Tabla A.6	Determinación del contenido de pentosanos de la fibra de raquis de palma africana	128
Tabla A.7	Determinación del contenido de cenizas de la fibra de raquis de palma africana	129
Tabla A.8	Determinación de la solubilidad en sosa de la fibra de raquis de palma africana	129
Tabla A.9	Determinación de la solubilidad en agua caliente de la fibra de raquis de palma africana	129
Tabla A.10	Determinación del diámetro de la fibra de la zona externa del raquis de palma africana	130
Tabla A.11	Determinación del diámetro de la fibra de la zona interna del raquis de palma africana	131
Tabla A.12	Propiedades físicas y mecánicas de la fibra de raquis de palma africana	132
Tabla A.13	Análisis de las varianzas del diámetro de la fibra de la zona central y del diámetro de la fibra de zona externa del raquis	134
Tabla A.14	Prueba F para el análisis de las varianzas del diámetro de la fibra de la zona central y del diámetro de la fibra de zona externa del raquis	134
Tabla A.15	Análisis estadístico de las propiedades físicas y mecánicas de la fibra de raquis	134
Tabla A.16	Resultados de las pruebas preliminares del proceso de termo-compresión	135
Tabla A.17	Dimensiones de las muestras del ensayo de flexión estática	138
Tabla A.18	Dimensiones de las muestras del ensayo de tracción perpendicular a la superficie	147
Tabla A.19	Contenido de humedad de las muestras para los ensayos de flexión estática	156

Tabla A.20	Contenido de humedad de las muestras para los ensayos de tracción perpendicular a la superficie	159
Tabla A.21	Gravedad específica de las muestras para los ensayos de flexión estática	162
Tabla A.22	Gravedad específica de las muestras para los ensayos de tracción perpendicular	165
Tabla A.23	Resultados del módulo a la ruptura	168
Tabla A.24	Resultados del módulo de elasticidad aparente	173
Tabla A.25	Resultados del ensayo de tracción perpendicular a la superficie	178

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Planta de palma africana	3
Figura 1.2	Partes del fruto de palma africana	4
Figura 1.3	(a) Racimo de fruta de palma africana y (b) racimo vacío de palma africana	10
Figura 1.4	Representación de los componentes de los materiales lignocelulósicos.	12
Figura 1.5	Estructura de la celulosa	15
Figura 1.6	Diagrama de producción de los tableros de fibras	22
Figura 1.9	Representación de la degradación del material lignocelulósico.	27
Figura 2.1	(a) Prensa hidráulica con platos calentadores y (b) Placas metálicas	41
Figura 2.2	Esquema de la preparación del raquis de palma africana	44
Figura 2.3	Esquema de la caracterización química de la fibra de raquis	46
Figura 2.4	Esquema de la caracterización mecánica de la fibra de raquis	54
Figura 2.5	Disposición de la fibra para el ensayo de tensión	56
Figura 2.6	Esquema de la elaboración del material aglomerado	58
Figura 2.7	Ensayo de flexión estática con los aglomerados elaborados	63
Figura 2.8	Ensayo de tracción perpendicular a la superficie con los aglomerados elaborados	65
Figura 2.9	Ensayo de absorción de agua e hinchamiento de los aglomerados obtenidos	66
Figura 3.1	Raquis en descomposición	67
Figura 3.2	Fibra de raquis limpia	68
Figura 3.3	Fibra de raquis molida	68
Figura 3.4	Representación del contenido de celulosa, lignina, grasas, ceras y resinas, cenizas y pentosanos determinados en la fibra de raquis	71

Figura 3.5	Diagrama de caja y bigote correspondiente al título de la fibra de raquis de palma	75
Figura 3.6	Diagrama de caja y bigote correspondiente al diámetro de las fibras de raquis de palma	76
Figura 3.7	Diagrama de caja y bigote correspondiente a la tenacidad de la fibra de raquis de palma	77
Figura 3.8	Diagrama de caja y bigote correspondiente al porcentaje de elongación de la fibra de raquis	78
Figura 3.9	Tablero obtenido en pruebas preliminares con fibra retenida en malla # 40, densidad de 0,6 g/cm ³ , humedad del 4% a 160 °C, 14 MPa de presión y tiempo de 3 min, catalogado como bueno	80
Figura 3.10	Tablero obtenido en pruebas preliminares con fibra retenida en malla #40, densidad de 0,6 g/cm ³ , humedad del 4% a 220 °C, 14 MPa de presión y tiempo de 3 min, catalogado como malo	81
Figura 3.11	Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termocompresión en el módulo de ruptura de los tableros aglomerados elaborados a una presión de 14 MPa y temperatura de 160 °C	85
Figura 3.12	Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termocompresión en el módulo de ruptura de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 14 MPa y temperatura de 180 °C	87
Figura 3.13	Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termocompresión en el módulo de ruptura de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 14 MPa y temperatura de 200 °C	89
Figura 3.14	Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termocompresión en el módulo de ruptura de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 21 MPa y temperatura de 160 °C	90
Figura 3.15	Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termocompresión en el módulo de ruptura de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 21 MPa y temperatura de 180 °C	91
Figura 3.16	Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termocompresión en el módulo de ruptura de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 21 MPa y temperatura de 200 °C	92

Figura 3.17	Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el módulo de elasticidad aparente de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 14 MPa y temperatura de 160 °C	95
Figura 3.18	Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el módulo de elasticidad aparente de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 14 MPa y temperatura de 180 °C	96
Figura 3.19	Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el módulo de elasticidad aparente de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 14 MPa y temperatura de 200 °C	97
Figura 3.20	Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el módulo de elasticidad aparente de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 21 MPa y temperatura de 160 °C	99
Figura 3.21	Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el módulo de ruptura de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 21 MPa y temperatura de 180 °C	100
Figura 3.22	Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el módulo de ruptura de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 21 MPa y temperatura de 200 °C	101
Figura 3.23	Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el esfuerzo perpendicular a la superficie de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 14 MPa y temperatura de 160 °C	104
Figura 3.24	Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el esfuerzo perpendicular a la superficie de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 14 MPa y temperatura de 180 °C	105
Figura 3.25	Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el esfuerzo perpendicular a la superficie de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 14 MPa y temperatura de 200 °C	106
Figura 3.26	Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el esfuerzo perpendicular a la superficie de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 21 MPa y temperatura de 160 °C	107

Figura 3.27	Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el esfuerzo perpendicular a la superficie de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 21 MPa y temperatura de 180 °C	109
Figura 3.28	Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el esfuerzo perpendicular a la superficie de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 21 MPa y temperatura de 200 °C	110
Figura A.1	Gráfico carga vs deformación correspondiente a los ensayos de flexión estática	136
Figura A.2	Gráfico Carga vs deformación con línea de tendencia correspondiente al ensayo realizado a 14 MPa de presión, 160 °C, 10 % de humedad y 5 min de prensado	137

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I	Preparación de las soluciones utilizadas en la caracterización química de la fibra de raquis de palma africana (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.)	125
ANEXO II	Resultados de la caracterización química de la fibra de raquis de palma africana (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.)	127
ANEXO III	Resultados de la caracterización mecánica de la fibra de raquis de palma africana (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.)	130
ANEXO IV	Análisis estadístico de la caracterización física y mecánica de las fibras de raquis de palma africana	134
ANEXO V	Resultados de las pruebas preliminares realizadas para definir los parámetros del proceso de termo-compresión	135
ANEXO VI	Datos requeridos para el cálculo de las propiedades mecánicas evaluadas en los tableros aglomerados de fibra raquis obtenidos	136
ANEXO VII	Resultados de las propiedades mecánicas evaluadas en los tableros aglomerados de fibra de raquis obtenidos	168

RESUMEN

En el presente proyecto de titulación, se elaboraron tableros aglomerados auto-adheridos a partir de la fibra de raquis de palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) a través de la aplicación de altas presiones y temperaturas, este proceso se denomina termo-compresión, y en él se activan los principales componentes de la fibra, por ello, se realizó en primera instancia una caracterización química y mecánica de la fibra de raquis de palma africana.

La caracterización química de la fibra de raquis, comprendió ensayos para la determinación de componentes tales como: celulosa, lignina, pentosanos, ceras, grasas y resinas así como también humedad, solubilidad del raquis en agua caliente y su resistencia al ataque de hongos, en base a los métodos indicados en las normas TAPPI. Los resultados obtenidos son comparables con los encontrados en bibliografía, existiendo un 69,8 % de celulosa y un 16,0 % de lignina. La fibra de raquis puede ser utilizada en la elaboración de tableros aglomerados auto-adheridos.

En la caracterización mecánica del raquis, se realizaron mediciones del título de la fibra, tenacidad, porcentaje de elongación y determinación del diámetro de la fibra de la zona central y diámetro de la fibra de la zona externa del raquis. El análisis estadístico de estas propiedades mostró una dispersión considerable, lo que es propio de las fibras naturales.

Luego de estas determinaciones se establecieron los parámetros apropiados del proceso de termo-compresión. A través de pruebas preliminares se determinaron las variables que influyen en la calidad del tablero, las cuales fueron: temperatura, presión, tiempo y contenido de humedad de la fibra. Los valores establecidos para cada variable fueron, temperatura: 160, 180 y 200 °C, presión: 14 y 21 MPa, tiempo: 3, 5 y 7 min, humedad de la fibra: 10, 15 y 25 % de humedad. En lo referente a los parámetros para la procesabilidad de la fibra de raquis como son el tamaño y la densidad, se establecieron valores fijos que corresponden a fibras retenidas en la malla 60 y 1,1 g/cm³, respectivamente.

Bajo estas condiciones se elaboraron 52 tableros con su respectivo paralelo, en ellos se analizó la influencia que tiene cada variable sobre la calidad, utilizando para ello sus propiedades mecánicas, las cuales se evaluaron mediante ensayos estandarizados de resistencia a la flexión estática y resistencia a la tracción perpendicular al plano, prescritos por la norma ASTM D - 1037.

Las propiedades medidas en la prueba de flexión estática fueron el módulo de ruptura (MOR) y el módulo de elasticidad aparente (MOE), las cuales se incrementan al disminuir la presión, la temperatura y el tiempo.

De acuerdo a lo anterior se definió que las condiciones del proceso que permitieron fabricar un tablero aglomerado sin resinas adhesivas con los mejores MOR fueron: temperatura de 160 °C, una presión de 14 MPa, con un porcentaje de humedad presente en la fibra de 15 % y una duración del prensado de 3 min. Los mejores valores de MOE se obtienen a 200 °C, 14 MPa de presión, 10 % de humedad y 3 min de tiempo de prensado. Las condiciones que permiten obtener un tablero aglomerado con esfuerzos perpendiculares altos fueron: presión de 21 MPa, temperatura de 200 °C, durante 7 min con un contenido de humedad del 15 %.

INTRODUCCIÓN

La palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.) es uno de los principales cultivos agroindustriales en el Ecuador, ocupa significativamente gran cantidad de mano de obra en las fases de campo, productiva y de industrialización. El rápido aumento de la superficie de plantaciones en el Ecuador, de un 187 % entre los años 1995 y 2005, indica la importancia económica que este cultivo está alcanzando debido al crecimiento de la demanda de aceite de palma africana a nivel mundial. (ANCUPA, 2011)

El aceite de palma se extrae de la porción pulposa de la fruta mediante varias operaciones convencionales, las cuales producen grandes cantidades de subproductos lignocelulósicos, en la forma de hojas, racimos vacíos (raquis), torta de palmiste, fibras de cáscaras y cuesco, así como también efluentes. Para esta industria la disposición de los residuos generados durante su proceso productivo representa un gran desafío, ya que estos deben ser reaprovechados o tener algún tratamiento antes de ser desechados. (Ocampo, 1994)

En la actualidad la abundante cantidad de racimos vacíos o raquis ha creado un importante problema ambiental ya que produce contaminación por la combustión del raquis y generación de hongos en los residuos acumulados. (Law *et al.*, 2007)

Dada la disminución de las reservas de materias orgánicas fósiles, en los últimos años el interés hacia la utilización química y energética de los materiales lignocelulósicos de desecho, ha ido en aumento. Los polímeros constituyentes de los materiales lignocelulósicos: celulosa, lignina y hemicelulosas, sirven para obtener una amplia gama de productos de alto valor agregado como celulosas para usos textiles, alimenticios o farmacéuticos, fibras papeleras, paneles, tableros y derivados de lignina usados como adhesivos entre otros. (Vázquez y Vázquez, 2002)

La competitividad obliga a la industria a generar nuevos productos con menor cantidad de materia prima y menor consumo de energía, lo cual solo es posible

aprovechando eficazmente los recursos naturales y su reciclabilidad. Por lo tanto, es necesario dirigir los recursos de investigación hacia estos productos ya que tienen un potencial promisorio para generar dividendos económicos importantes, abrirían nuevos puestos de trabajo, garantizando la utilización de todos los recursos lignocelulósicos y lo más importante, promocionarían líneas de investigación que arrojen resultados aplicables, los cuales permitan el desarrollo de una tecnología ecológica y económicamente viable. (Figueroa, 2008)

Partiendo de esta base y conociendo que el Ecuador cuenta con grandes volúmenes de desechos agrícolas, y que en la actualidad es un problema la disposición final de los mismos, se propone dar un uso al raquis de palma africana. Con miras a trabajar en procesos y productos mas amigables con el medio ambiente, en este proyecto se desarrollará un tablero aglomerado a partir de raquis de palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.), sin ningún tipo de resina adhesiva, que, desde el punto de vista ambiental y económico, es benéfico en primer término porque los materiales lignocelulósicos son reciclables y renovables, y en segundo porque las resinas utilizadas en la fabricación de tableros convencionales provienen del petróleo, el cual es un material caro y no renovable, por lo tanto, incrementan el precio del producto, y además en algunos casos producen emisiones tóxicas. (Álvarez *et al.*, 2007)

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 GENERALIDADES DE LA PALMA AFRICANA (*Elaeis guineensis* Jacq.)

1.1.1 ORIGEN

La palma africana conocida popularmente como palma aceitera, es una planta oleaginosa de cuyos frutos se extrae aceite vegetal, con un rendimiento por hectárea mayor al de otras semillas oleaginosas. Su existencia data de tiempos remotos, ubicándose su origen en el golfo de Guinea en el África occidental, de ahí su nombre científico *Elaeis guineensis* Jacq., que etimológicamente viene del griego *eleia* que significa olivo y *guineensis* que significa Guinea. (ACUPALMA, 2003).

Las poblaciones indígenas se alimentaban de los frutos tiernos desde hace ya 5000 años, es así que para África tropical la palma de aceite se estableció desde viejos tiempos como una importante fuente de productos de uso habitual, fundamentalmente en la alimentación. (Solagro, 2006)

Fue a partir del siglo XV que su cultivo trascendió a otras regiones de África y para el siglo XVI se inicia su expansión en América, a través de los colonizadores y del tráfico de esclavos en navíos portugueses que la usaban también como parte de la dieta alimentaria. (COPORDIB, 2003)

A las regiones de Asia Oriental la palma africana fue implantada desde América en las últimas épocas. (ACUPALMA, 2003)

A inicios del siglo XX, en el año de 1910 se realizan las primeras labores culturales a las plantaciones de palma africana con lo cual, la palma pasó de la etapa de precultivo a la etapa de cultivo propiamente dicho. (COPORDIB, 2003)

El alto rendimiento por unidad de superficie en la producción de aceite, así como la gran variedad de productos que este genera, los cuales se utilizan en la alimentación y en la industria, hicieron que este cultivo vaya alcanzando gran importancia económica. (MIC, 2008)

1.1.2 DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

La palma de aceite es una planta perenne, ubicada por el científico Hutchinson dentro de las fanerógamas, tipo angiosperma, clave monocotiledónea, del orden de los palmales, familia palmaceae, tribu cocoinea y género elaeis. (COPORDIB, 2003)

Es un árbol de aspecto decorativo, su tallo alcanza en algunos ejemplares 40 m de alto, pero en cultivos industriales para la obtención de aceite, su altura se limita a los 15 m, con un diámetro de 30 a 60 cm, el cual se encuentra cubierto de cicatrices de las hojas viejas. (Solagro, 2006)

Las hojas de la palma aceitera son pinadas, de 4 a 5 m de longitud, con el nervio central marcado, tal como se puede observar en la figura 1.1 Son de color verde en ambas caras y pueden permanecer adheridas al tronco por 12 años o más. (Solagro, 2006)

Las plantas de palma comienzan a producir frutos a los 3 ó 4 años después de ser implantadas, su máxima producción se logra entre los 20 y 30 años, luego de lo cual envejecen y dejan de ser productivas, particularmente por la altura a la que se encuentran los frutos. (Solagro, 2006)

La palma africana es una especie monoica, es decir, produce inflorescencias masculinas y femeninas por separado (ciclos femeninos y masculinos alternos de manera que no ocurren autofecundaciones). El polen de otras plantas vecinas fecunda una inflorescencia femenina, la cual después de 5 meses a partir de la apertura de las flores, se convierte en un racimo con frutos maduros, de color rojo

amarillentos. (MIC, 2008)



Figura 1.1 Planta de palma africana
(Terrasol, 2011)

La cantidad de racimos y de hojas engendradas por la planta en un año es variable, y depende de la edad y de los factores genéticos de la palma. A los 5 años, se espera que una palma produzca catorce racimos por año, con un peso aproximado de 7 kg/racimo, y a los 8 años, ocho racimos con un peso promedio de 22 kg/racimo. Los racimos están conformados por unos 1 000 a 4 000 frutos de forma ovalada, de 3 a 5 cm de largo. (MIC, 2008)

Los frutos contenidos en los racimos frescos de la palma africana representan el 65 % del racimo fresco en peso y en volumen, estos, en un proceso de desfrute son separados para extraer el aceite contenido en ellos, el 35 % restante lo constituyen los racimos vacíos, conocidos también como raquis. (Gómez y Rodríguez, 2009)

El fruto de la palma africana está formado de afuera hacia dentro por: exocarpo o cáscara que es la capa externa que recubre y protege la pulpa, mesocarpo que es la pulpa carnosa de cual se obtiene el aceite de palma, endocarpo o cuesco que es una capa leñosa que cubre a la almendra, endospermo o almendra que es una única semilla y de cual se obtiene el aceite de palmiste. En la figura 1.2 se muestra las partes del fruto de palma africana. (COPORDIB, 2003)

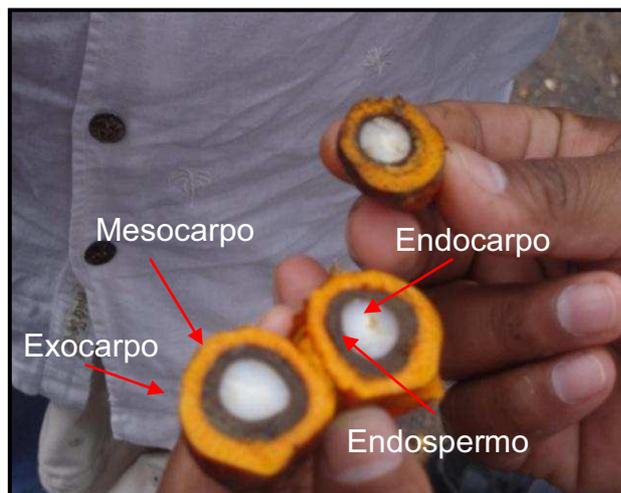


Figura 1.2 Partes del fruto de palma africana
(Extractora Río Manso/San Carlos, Quevedo, Ecuador, 2010)

La palma africana se clasifica especialmente por la forma, color y composición de su fruto, a continuación se detallan las 3 variedades más importantes de la palma africana: (Wahid *et al.*, 2004)

- Dura, cuando posee una cáscara gruesa, el mesocarpo o pulpa representa entre el 35 y 50 % del fruto y el endocarpo es relativamente grueso de más de 2 mm de espesor, el mismo que contiene fibras alrededor. El contenido de aceite de la pulpa en proporción al peso del racimo es bastante bajo entre 17 y 18 %. (Wahid *et al.*, 2004)
- Pisífera, cuando el fruto no posee cáscara ni endocarpo y el mesocarpo o pulpa no contiene fibras y ocupa la mayor parte del fruto. Esta clase de palma produce pocos frutos en el racimo, por esta razón la pisífera se utiliza para mejorar a través del cruzamiento la variedad dura. (Wahid *et al.*, 2004)
- Ténera, cuando es el híbrido del cruce entre Dura y Pisífera, posee una cáscara delgada, el mesocarpo representa entre el 60 y 96 % de la fruta y el endocarpo tiene un grosor de menos de 2 mm de espesor. Estas características son las ideales para el procesamiento y ésta variedad tiene el potencial genético de mayor rendimiento, por lo que a nivel mundial es la más utilizada para exportaciones comerciales. (COPORDIB, 2003)

1.1.3 IMPORTANCIA ECONÓMICA EN EL MUNDO

La producción de palma africana a nivel mundial se expresa en toneladas métricas de aceite crudo producido, pues la fruta de palma africana no tiene ningún uso sin su procesamiento, así, con un contenido de aceite del 50 % en el fruto, se puede obtener de 3 a 5 TM de aceite de pulpa por hectárea y de 600 a 1 000 kg de aceite de palmiste. (MIC, 2008)

En el 2010, el aceite de palma fue considerado como el de mayor producción en el mundo, ya que representó el 27,85 % de la producción total de aceites vegetales y el 51 % de todas las exportaciones mundiales de grasas y aceites. Con un crecimiento del 8 % desde 1996 hasta el 2008, la producción de aceite de palma superó la producción del aceite de soja. (IICA, 2010)

El 85 % de la producción mundial de aceite de palma proviene de Indonesia y Malasia, en el continente asiático se produce el 89,1 %, mientras que en América se produce el 5,4 %, donde Colombia y Ecuador son los mayores productores de la región. A su vez, los principales exportadores de aceite son Malasia e Indonesia, que exportan un 88 % de la producción, convirtiendo a este mercado en uno altamente concentrado. Los principales importadores en el mundo son los países de la Unión Europea, China e India, que importaron un 47 % del total de importaciones mundiales de aceite de palma. (Figuroa, 2008)

1.2 LA PALMA AFRICANA EN EL ECUADOR

El Ecuador es un país principalmente agrícola, desde hace ya algunos años, los ingresos de su economía han dependido de la exportación de productos llamados tradiciones como son: banano, cacao, camarón, entre otros. De ahí, la importancia de ampliar el mercado exportable hacia nuevos productos, en el cual, el cultivo y proceso de la palma africana reúne todos los requisitos para convertirse en uno de los ejes de desarrollo social y de gran aporte para la economía, en cuanto a generación de divisas se refiere. (Andrade, 2011)

1.2.1 SITUACIÓN ACTUAL

La palma africana fue implantada en el Ecuador por Roscoe Scott, en el año 1953, en el cantón La Concordia, provincia de Esmeraldas, los cultivos eran limitados en ese tiempo, y es en el año de 1967 cuando empieza a entrar en crecimiento este sector, hasta llegar a constituir hoy en día más de 200 000 hectáreas sembradas. (ANCUPA, 2011)

Las condiciones climáticas favorables ubican al Ecuador en un lugar de privilegio para el cultivo de la palma aceitera, es así que de las 24 provincias que tiene el país, en 11 se dedican al cultivo de la palma, concentrándose la producción de fruta y aceite en 5 provincias principalmente, las cuales son: Santo Domingo de los Tsáchilas, Los Ríos, Esmeraldas, Sucumbíos y Francisco de Orellana, las que representan el 70 % de la producción nacional. (MAGAP, 2011; ANCUPA, 2011)

Según el último censo de palmicultores (2005), existen alrededor de 5278 productores de palma en el país, de los cuales la mayoría corresponde a pequeños palmicultores con una extensión no mayor a 50 hectáreas y apenas 9 superan las 1 000 hectáreas. (ANCUPA, 2011)

Con respecto a la producción de aceite de palma, el país cuenta con recursos naturales para producir palma africana y capacidad industrial creciente para procesarlo en aceite, así existen 47 plantas extractoras de aceite crudo, ubicadas estratégicamente en las zonas de Santo Domingo de los Colorados, Quevedo, Quinindé, San Lorenzo y en La Amazonía, y de acuerdo a su capacidad instalada para la extracción de aceite crudo, las más importantes son: Palmoriente, Palmeras de los Andes y Palmeras del Ecuador con una capacidad de procesamiento de alrededor de 30 TM/h. (ANCUPA, 2011)

Dado que la palma africana es un cultivo perenne, las cifras anuales deben reconocer la superficie sembrada en ese año, la superficie total acumulada y la superficie cosechada, que según las estimaciones de MAGAP-SIAGRO, en el 2010 correspondieron a: 258 218 hectáreas acumuladas, 10 000 hectáreas

sembradas y 218 400 hectáreas cosechadas, de estas últimas se produjeron aproximadamente 2 456 811 TM de fruta fresca, extrayéndose 447 667 TM de aceite crudo de palma con un rendimiento del 20 %, y con una proyección para el 2019 de 1 015 920 TM de aceite crudo. (ANCUPA, 2011)

1.2.2 IMPORTANCIA ECONÓMICA EN EL ECUADOR

En el Ecuador, el cultivo y procesamiento de palma africana son actividades que cobran cada vez mayor importancia, la producción de aceite contribuye a la economía del país con el 15,2 % del PIB agrícola y 1,4 % del PIB total. (IICA, 2010)

De acuerdo al Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador, el cultivo de la palma africana origina importantes inversiones que alcanzan alrededor de los 600 millones de dólares, además crea plazas de trabajo y fomenta el progreso diferentes regiones del país. Tanto la producción de palma africana, así como en las actividades relacionadas al cultivo, comercialización e industrialización, se han empleado aproximadamente 60 000 personas, creándose 48 000 plazas de trabajo adicionales. (MAGAP, 2011)

Ecuador fue el sexto productor de aceite de palma del mundo en el 2009, sin embargo, en términos de producción de toneladas por hectárea, es el país más bajo en América, con una producción por hectárea de 2,1, mientras que el promedio del continente fue de 3,1 donde Costa Rica, Guatemala y Colombia son los países con mayor producción por hectárea. (Figuerola, 2008)

Aunque la producción de aceite de palma creció a un ritmo anual del 9,3 % en los últimos años, la exportación lo hizo al 32 %, impulsada por el crecimiento de los precios. El Ecuador es el segundo exportador de aceite de palma africana del continente después de Colombia, con un excedente exportable del 65 % en la producción en el 2010. Los principales mercados del aceite ecuatoriano son:

Venezuela, Colombia y Perú, entre los tres suman un 70 % de las exportaciones. (IICA, 2010)

1.3 RAQUIS DE LA PALMA AFRICANA COMO MATERIA PRIMA

La explotación de la biomasa lignocelulósica, principalmente de madera, se centra en la fabricación de pulpa y papel, construcción y carpintería, etc., pero hay una parte de esta biomasa lignocelulósica (residuos industriales, forestales, agrícolas y urbanos etc.) de la que cual no se obtiene ningún beneficio. (Vázquez y Vázquez, 2002)

Los residuos lignocelulósicos ofrecen interesantes y potenciales aplicaciones como materia prima en general, además de sus posibles usos, ellos son abundantes, renovables y reciclables. (Vázquez y Vázquez, 2002)

El empeño en la utilización de los residuos lignocelulósicos química y energéticamente ha ido en aumento en los últimos años, es así que su aplicación se ha orientado a dos fines importantes: obtener productos químicos energéticos provenientes de fuentes renovables que sustituyan la utilización del petróleo y, por otra parte, obtener fracciones poliméricas y derivados químicos de los que se puedan obtener una amplia gama de productos de valor agregado. (Vázquez y Vázquez, 2002)

En el país existe una gran cantidad de residuos industriales lignocelulósicos que son sub-aprovechados, el bagazo de caña, cascarilla de arroz, raquis de palma africana, coco, etc., son algunos de ellos. Estos materiales pueden llegar a constituir una fuente alternativa de materia prima, que mediante el desarrollo de tecnologías sustentables, generen bienes con valor agregado. (Figuroa, 2008)

1.3.1 RACIMOS DE FRUTA DE PALMA AFRICANA VACÍOS (RAQUIS)

Del fruto fresco de la palma africana se extrae el aceite de palma, mediante varias operaciones convencionales, las cuales producen grandes cantidades de subproductos lignocelulósicos en forma de: hojas, racimos vacíos, tortas de palmiste, fibras de cáscaras y cuescos. (Ocampo, 1994)

Los racimos vacíos llamados también raquis, pinzotes o escobajos, se obtienen en el proceso de desfrute, el cual consiste en la separación mecánica de los frutos del racimo, y constituyen según valoraciones de un 20 a 35 % del peso total del racimo con frutos frescos. Los frutos desprendidos son transportados a un digestor y el raquis es descargado en una banda transportadora a un patio, su disposición final en algunas plantas extractoras se realiza una vez a la semana, por lo cual, en esta área existe el problema de que a corto plazo, el raquis se convierte en un material contaminante, por producir moscas, insectos varios y roedores. (Law *et al.*, 2007)

Con el crecimiento de la demanda de aceite de palma africana en los últimos años, la cantidad de racimos vacíos ha aumentado, generando un importante problema ambiental. En algunas industrias aceiteras, los racimos de fruta vacíos son principalmente incinerados para producir ceniza, la cual es devuelta al campo como fertilizante; sin embargo, la quema de estos residuos también crea un grave problema de contaminación atmosférica. (Hashim *et al.*, 2011)

Por esta razón, se han llevado a cabo varios trabajos con el fin de encontrar métodos de procesamiento orientados a reutilizar estos desechos y reducir el impacto ambiental causado. (Ocampo, 1994)

En sí, los racimos de fruta vacíos o raquis se componen de un tallo principal y de numerosas espiguillas con espinas afiladas en las puntas. Además, consta de haces vasculares, elásticos y flexibles, que están integrados en los tejidos del parénquima, similar a lo que se encuentra en troncos y malezas. (Hasibuan y Wan Daud, 2004)

En la figura 1.3 se observan los racimos con frutos frescos y el racimo vacío, obtenido después del proceso de desfrute.



Figura 1.3 (a) Racimo de fruta de palma africana y (b) racimo vacío de palma africana
(Extractora Rio Manso/San Carlos, Quevedo, Ecuador, 2010)

De este raquis se obtiene gran cantidad de fibras que, según investigaciones realizadas, son fuertes y estables. Su diámetro se encuentra entre los 250 y los 550 μm y según investigaciones realizadas por Mohamed *et al.* (2009), la fibra de raquis presenta una fuerza de tensión, módulo de Young y porcentaje de elongación de 71 MPa, 1 073 MPa y 11 % respectivamente. Análisis termogravimétricos efectuados por Mat Soon *et al.* (2006), para medir la estabilidad térmica de este material, indican que la fibra de raquis comienza a sufrir cambios estructurales a los 332,4 °C, es decir a esta temperatura la fibra empieza a degradarse.

Las fibras del raquis de la palma africana, al ser sustancias lignocelulósicas, poseen los mismos componentes característicos de otras fibras vegetales, aunque en diferente composición. Los porcentajes de cada componente así como las características químicas de la fibra de raquis encontrada en bibliografía se presentan en la tabla 1.1 y en la tabla 1.2.

Tabla 1.1 Composición de las fibras de raquis de palma africana

COMPONENTE	PORCENTAJE PRESENTE EN LAS FIBRAS (%)
Celulosa	59,7
Hemicelulosa	22,1
Lignina	18,1
Cenizas	3,8

*Misson *et al.*, 2009**Tabla 1.2** Características químicas de las fibras de raquis de palma africana

CARACTERÍSTICA	PORCENTAJE (%)
Ceras, grasas y resinas	2,8
Solubilidad en agua caliente	9,3
Solubilidad en Sosa al 1%	29,9

*Law *et al.*, 2001

Las fibras de raquis de palma africana pueden ser procesadas fácilmente para generar las siguientes aplicaciones: (Law *et al.*, 2007; Hasibuan y Wan Daud, 2004)

- Combustible para la generación de energía o potencia.
- Abono orgánico o acondicionadores del suelo
- Relleno en los tableros de partículas moldeados / MDF
- Como fibra en fardos para la exportación
- Fabricación de esteras
- Alimento para animales
- En la industria de pulpa y papel
- Artículos biodegradables de fibra
- Como fibra de refuerzo en hormigón armado

El raquis de palma africana es considerado como una de las más prometedoras materias primas no madereras usada en la elaboración de diversos tipos de tableros de madera. (Mat Soon *et al.*, 2006)

1.3.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE COMPONENTES LIGNOCELULÓSICOS

Todos los materiales lignocelulósicos están formados principalmente por: celulosa, hemicelulosa y lignina, dichos materiales presentan además otros compuestos minoritarios de bajo peso molecular tales como: los solubles en agua o solventes orgánicos, las proteínas y sales minerales, esos últimos estimados como cenizas tras la combustión. En la figura 1.4 se muestra un esquema de los principales constituyentes de los materiales lignocelulósicos. (Vázquez y Vázquez, 2002)

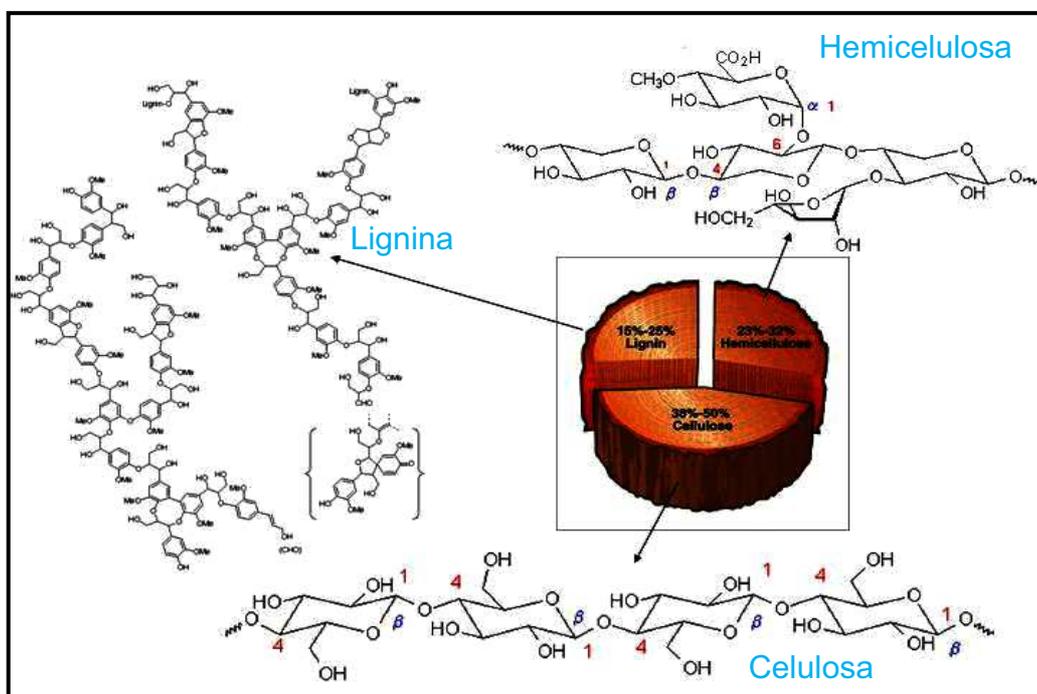


Figura 1.4 Representación de los componentes de los materiales lignocelulósicos. (Vázquez y Vázquez, 2002)

La composición química de los materiales lignocelulósicos varía de acuerdo con el tipo y origen de la planta. Normalmente, estos materiales están compuestos de entre un 60 y un 80 % de celulosa y hemicelulosa respectivamente, de un 5 a un 20 % de lignina, aproximadamente un 5 % de pectinas y lo restante de otros componentes. (Vázquez y Vázquez, 2002)

La composición porcentual de algunos de estos materiales lignocelulósicos de

desecho, utilizados en la elaboración de materiales aglomerados se observa en la tabla 1.3, el porcentaje en el cual estos componentes están presentes en las fibras, juega un papel muy importante en el comportamiento que estas tendrán al momento de ser procesadas. Por ejemplo, para la elaboración de tableros aglomerados, el contenido de lignina de las fibras jugará un papel importante en la autoadhesión de las fibras.

Tabla 1.3 Composición química de algunos residuos lignocelulósicos

FIBRA	2. % 3. CEL ULOSA	4. % 5. LIG NINA	6. % PENTOSANOS	7. % 8. CE NIZAS
Yute	9. 57,0 – 58,0	10. 21,0 – 26,0	11. 18,0 – 21,0	12. 0,5 – 1,0
Kenaf (Parte central)	13. 47,0 – 57,0	14. 7,5 – 9,5	15. 16,0 – 23,0	16. 2,0 – 5,5
Kenaf (Liber)	17. 47,0 – 57,0	18. 17,5	19. 19,3	20. 2,5
Abaca	21. 78,0	22. 9,0	23. 17,0	24. 1,0
Sisal	25. 55,0 – 73,0	26. 8,0 – 9,0	27. 21,0 – 24,0	28. 0,6 – 1,0
Bagazo de caña	29. 49,0 – 62,0	30. 19,0 – 24,0	31. 27,0 – 32,0	32. 1,5 – 5,0
Bamboo	33. 57,0 – 66,0	34. 21,0 – 31,0	35. 15,0 – 26,0	36. 1,7 – 5,0
Maderas duras	37. 54,0 – 61,0	38. 23,0 – 30,0	39. 19,0 – 26,0	40. 1,0
Maderas suaves	41. 53,0 – 62,0	42. 26,0 – 34,0	43. 7,0 – 14,0	44. 1,0

*Widyorini, 2005

La composición química tiene un rol muy importante en su microestructura, las fibras naturales están compuestas por microfibrillas de celulosa incrustadas en una matriz de lignina y hemicelulosa. Estas microfibrillas unidas mediante puentes de hidrógeno, lignina y pectina, presentan regiones amorfas y cristalinas, las cuales son las principales responsables de las propiedades mecánicas que las fibras presentan cuando están sometidas a cargas. (Morán, 2008)

En la tabla 1.4 se indican algunos datos de tenacidad y elongación de fibras vegetales.

Tabla 1.4 Tenacidad y elongación de varias fibras naturales

FIBRA	TRACCIÓN PROMEDIO (cN/Tex)	ELONGACIÓN A LA RUPTURA (%)
Algodón	38,87	7,0 - 8,0
Lino	46,00	2,7 - 3,2
Cáñamo	49,29	1,60
Yute	44,85	1,5 - 1,8
Ramio	26,60	3,6 - 3,8
Abacá	64,96	2,70
Coco	16,46	15,0 - 30,0
Banano	36,67	5,0 - 6,0

*Amigo *et al.*, 2008

44.1.1.1 CELULOSA

La celulosa es el mayor constituyente de la materia vegetal. A nivel mundial, anualmente, millones de toneladas de celulosa son consumidas en todas sus formas, tales como madera, papel, productos textiles, entre otros. (Vázquez y Vázquez, 2002)

Es el principal componente de las fibras vegetales y maderas, de tal forma que la cantidad de celulosa presente en ellas, determina el grado de madurez de la planta, así a mayor madurez mayor contenido de celulosa y menor humedad. (Ott *et al.*, 1963)

La celulosa es un polisacárido insoluble en agua, de peso molecular variable y con fórmula estructural $(C_6H_{12}O_5)_n$. Además, es el componente más importante de las paredes celulares de las plantas. (Casey, 1990)

Estructuralmente, la celulosa es un polímero lineal compuesto por varias unidades de β -glucosa, de 50 hasta 5 000 o más unidades, ligadas mediante un enlace glucosídico β 1-4. La β -glucosa es un anillo hexagonal con 5 carbonos y un oxígeno y, posee un grupo CH_2OH unido en el carbono 5. La estructura de la celulosa se observa en la figura 1.5. (Ott *et al.*, 1963; Hans, 1996)

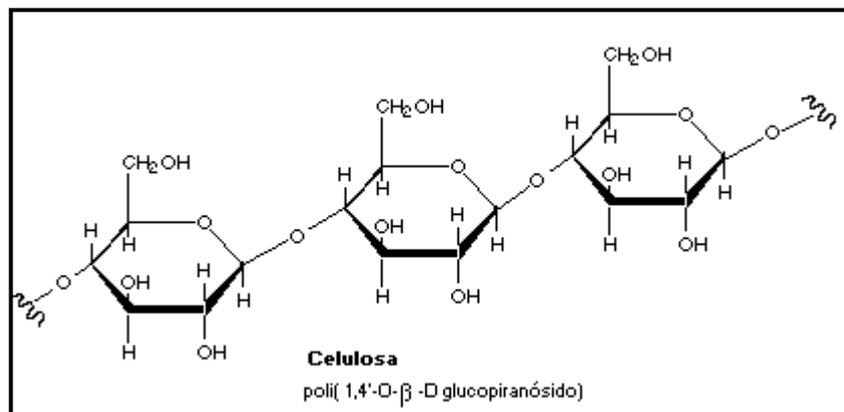


Figura 1.5 Estructura de la celulosa
(UNNE, 2006)

44.1.1.2 HEMICELULOSA

Actualmente, se conoce con este término a los polisacáridos de la pared celular, con excepción de la celulosa y las pectinas. Las hemicelulosas se diferencian de la celulosa por presentar mayor velocidad de hidrólisis en medio ácido y por su solubilidad en álcalis, y en lo referente a la lignina, en su resistencia a la oxidación. (Casey, 1990; Ariza *et al.*, 2009)

Estructuralmente, las hemicelulosas son polímeros heterogéneos que contienen cadenas de azúcares y algunos de sus derivados, como son azúcares acetilados y ácidos urónicos. Los azúcares que forman las hemicelulosas se pueden dividir en diferentes grupos como los pentosanos o azúcares de 5 carbonos (xilosa, arabinosa), azúcares de 6 carbonos llamados hexosanos (glucosa, manosa, galactosa), ácidos hexurónicos (ácido glucorónico) y deoxihexosas (ramnosa y

fucosa). Estas cadenas son ramificadas y más cortas que la celulosa, y por ende de un peso molecular menor a ésta. (Casey, 1990; Vázquez y Vázquez, 2002)

La xilosa es el monómero mayoritario en las maderas frondosas, grupo al cual pertenecen los residuos lignocelulósicos, así como los grupos acetilo son también abundantes en estos materiales. La denominación habitual que reciben los diferentes heteropolímeros que forman las hemicelulosas se deriva del monómero mayoritario. (Ariza *et al.*, 2009)

Por lo tanto, las hemicelulosas en los residuos lignocelulósicos, se encuentran representadas por una diversidad de xilanos, normalmente formados por un esqueleto de xilosa con ramificaciones laterales de ácido metilglucourónico o grupos acetilo, con trazas de arabinosa. El enlace metilglucorónico es mucho más resistente a la acción de los ácidos. (Ariza *et al.*, 2009)

44.1.1.3 LIGNINA

Es el segundo biopolímero más cuantioso en la corteza terrestre después de la celulosa, y la tercera fracción mayoritaria en los materiales lignocelulósicos. Su función es el aseguramiento de la protección contra los agentes atmosféricos, además de actuar como aglomerante de las fibras, ya que ésta no se encuentra únicamente depositada sobre las fibras celulósicas sino que también está presente en los enlaces covalentes entre lignina y carbohidratos, como es el caso de la galactosa o la arabinosa. (Vázquez y Vázquez, 2002)

En relación a la estructura y composición química de la lignina, ésta es un polímero aromático tridimensional muy complejo, cuya estructura ha sido muy difícil de determinar ya que es insoluble y no puede ser hidrolizada por ácidos.

Recientemente se ha demostrado que existen diferencias en la composición de la lignina en la pared celular de las plantas, estas diferencias dependen de las clases de botánica, ordenes e incluso especie, así como de los diferentes tejidos o capas de la pared celular. (Reale *et al.*, 2003; Boudet *et al.*, 1995)

Estudios realizados han confirmado que tres alcoholes cinamílicos llamados p-cumarílico, coniferílico y sinapílico son los precursores primarios y las unidades constitutivas de la lignina y de acuerdo al contenido relativo de estos tres precursores monoméricos, la lignina se puede clasificar en: (Reale *et al.*, 2003; Boudet *et al.*, 1995)

- Lignina guayacil, la cual posee en su mayoría polímeros del alcohol coniferílico y es distintiva de las plantas gimnospermas (maderas blandas). (Reale *et al.*, 2003)
- Lignina guayacil-siringilo, que es típica de las maderas leñosas, se compone de diferentes partes de guayacil (compuesto aromático derivado del alcohol coniferílico) y siringilo (compuesto derivado del alcohol sinapílico). (Reale *et al.*, 2003)
- Lignina guayacil-siringilo con pequeñas cantidades de unidades p-hidroxifenilo (compuesto aromático derivado del alcohol p-cumarílico), son distintivos de la hierba. (Reale *et al.*, 2003)

La lignina también posee gran variedad de grupos funcionales que ofrecen centros activos para las interacciones químicas y biológicas. Los principales grupos funcionales de la lignina son: hidroxilos fenólicos, hidróxidos alifáticos, etilénicos, metoxilos, carbonilos, carboxilos y sulfonatos. Además, la lignina presenta propiedades termoplásticas las cuales son importantes en la unión fibra-fibra de los tableros de partículas, estas propiedades explican en parte, porque la madera puede ser doblada y formada en presencia de vapor. (Reale *et al.*, 2003)

A pesar de que la lignina es la sustancia fenólica dominante en la biomasa, esta se la obtiene de los residuos de la industria de pulpa y papel y de la hidrólisis ácida de la madera. Sus posibilidades de aprovechamiento están basadas en su capacidad química para desempeñar funciones como dispersante, aglomerante, secuestrante, emulsionante y estabilizador de emulsiones. Por su estructura polifenólica muy similar a la estructura de las resinas fenol-formaldehído

existentes, así como por su abundante disponibilidad y bajo costo, se utiliza la lignina para aplicaciones específicas como copolímero de resinas fenólicas. (Reale *et al.*, 2003; Boudet *et al.*, 1995)

44.1.1.4 GRASAS, CERAS Y RESINAS

Las grasas, ceras y resinas son sustancias insolubles en medios acuosos, su función principal es la protección de las plantas al evitar la pérdida de agua, el daño por insectos y los daños mecánicos en las células de la epidermis de las hojas y tallos, gracias a su baja degradabilidad. (Vázquez y Vázquez, 2002)

44.1.1.5 CENIZAS

Están conformadas por los compuestos inorgánicos de la materia vegetal y, son aquellas que contribuyen a la regulación de la carga hidrostática. Están compuestas de minerales como hierro, fósforo, magnesio, entre otros. Las cenizas son los compuestos remanentes después de una destrucción de la materia orgánica de las fibras a temperaturas de entre 575 a 850 °C. (Vázquez y Vázquez, 2002)

44.2 PROCESAMIENTO DE TABLEROS AGLOMERADOS

La fabricación de tableros aglomerados, es un proceso que permite aprovechar mejor los recursos lignocelulósicos, convirtiendo material que en un principio se consideraba como desecho, en algo útil con propiedades similares a las de la madera. (Van Dam *et al.*, 2003)

Aunque el principal material utilizado en la fabricación comercial de tableros aglomerados es la madera particulada, proveniente de la elaboración primaria de la madera, existen otras alternativas de materia prima que son los residuos

agrícolas tales como las fibras de bagazo, la paja de cereal, kenaf, las fibras de palma de aceite, el raquis del banano, la cáscara externa del coco, entre otros, que pueden ser potencialmente utilizados como materia prima con mejores o similares propiedades. (Van Dam *et al.*, 2003)

44.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS TABLEROS

La fabricación de tableros se divide en tres grandes grupos: tableros de partículas, tableros de fibra y tableros contrachapados. (Youngquist, 2008)

44.2.1.1 Tableros de partículas

Los tableros de partículas son tableros fabricados con partículas de madera (virutas, aserrín y similares) y otros materiales lignocelulósicos de la agricultura. Se elaboran mediante la aplicación de presión sobre las partículas ligadas siempre a través de resinas colantes. Estas partículas son conglomerados de fibras que no han sido terminadas de separar entre sí, y que pueden tener tamaño y formas diversas. Los tableros de partículas se dividen a su vez en tableros OSB (Oriented Strandboard) y tableros aglomerados propiamente dicho. (AITIM, 2011)

44.2.1.2 Tableros contrachapados

Los tableros contrachapados son los fabricados con chapas o láminas de madera orientadas alternativamente, es decir, pegadas y cruzadas unas con otras como un solo cuerpo. Se componen de chapas impares y la dirección de las fibras es perpendicular entre capas adyacentes, con el objetivo de equilibrar su estructura, dar estabilidad y resistencia a las rajaduras. (AITIM, 2011)

44.2.1.3 Tableros de fibra

Los tableros de fibra están hechos de material minuciosamente desmenuzado, con el objetivo de que los componentes finales sean haces de fibras separadas que se vuelven a soldar entre sí. Además, en los tableros de fibras, los componentes están ligados por una característica natural de las fibras, que es unirse entre sí, en determinadas condiciones de temperatura, humedad, etc. (AITIM, 2011)

La FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) propone la siguiente definición: “Es una lámina de material manufacturado a partir de fibras de madera u otros elementos lignocelulósicos fibrosos, cuyo principal ligamento deriva del ordenamiento de las fibras y sus inherentes propiedades adhesivas. Agentes encolantes u otros materiales pueden ser agregados durante su fabricación”. (Fiplasto, 2010)

Además, la FAO recomienda clasificar a los tableros de fibras de acuerdo a su densidad, así:

Tableros no prensados	{	- De baja densidad (0,02 - 0,40 g/cm ³)
Tableros prensados	{	- De media densidad ó MDF (0,40 - 0,80 g/cm ³) - De alta densidad ó hardboard (0,8 - 1,2 g/cm ³)

La tecnología de producción de tableros de fibra mencionados no se diferencia sino hasta la fase de prensado y por supuesto en el contenido de humedad. En el caso de tablero no prensado, se forma el manto húmedo al cual se le elimina la humedad, sin prensado en caliente. (Fiplasto, 2010)

Los tableros prensados se producen por medio de la prensa en caliente donde adquieren propiedades de resistencia y dureza. Los métodos más conocidos para la obtención de tableros de fibras son: húmedo y seco. (Fiplasto, 2010)

La diferencia entre los métodos es la cantidad de agua presente en la fibra antes y después de la fabricación del mismo. En el método húmedo las fibras están suspendidas en el agua, el cual sirve de medio para el transporte de las mismas, a diferencia del método seco, en donde el contenido de humedad es de 5 a 10 % respectivamente, con el aire como medio de transporte de la fibra. (Fiplasto, 2010)

Los tableros producidos por uno u otro método se distinguen en el terminado de sus lados. Los producidos por el método húmedo tienen un lado marcado por la malla que permite la eliminación de agua. Los tableros producidos por el método seco tienen ambos lados pulidos ya que no requieren malla para permitir la eliminación de agua. (Fiplasto, 2010)

A continuación se detalla el proceso usado en la industria en la elaboración de tableros de fibras de alta densidad, los cuales son el objeto de estudio de esta investigación.

44.2.2 TABLEROS DE FIBRAS DE ALTA DENSIDAD (HARDBOARD)

Los tableros de fibras de alta densidad o hardboard según la definición dada por la FAO son: “Paneles manufacturados con fibras lignocelulósicas enfieltradas, que son consolidadas bajo calor y presión en una prensa caliente”, concepto que concuerda con la norma ASTM D 1554 - 10 (Terminología Estándar relacionada con paneles a base de fibras de madera y partículas) la cual hace referencia a estos tableros como “Tableros de fieltro fibroso de alta densidad”. (Fiplasto, 2010)

Estos tableros presentan una densidad que varía entre 800 y 1 200 kg/cm³, en un concepto más amplio están formados por fibras de madera u otros materiales lignocelulósicos que se adhieren por entrecruzamiento de las fibras, de modo que formen un fieltro cohesionado a través de las propiedades termoplásticas de las propias sustancias del material, su espesor oscila entre 2,5 y 8,0 mm, los equipos de corte actuales permiten obtener cualquier tipo de anchura y longitud dependiendo del formato de partida. (Palacios, 2008)

Dependiendo de las aplicaciones de los tableros, es posible incorporar aditivos durante el proceso de fabricación para mejorar ciertas propiedades como: rigidez, dureza, propiedades de terminación, resistencia a la absorción de agua y humedad, fuego o pudrición, así como también aumentar la resistencia, durabilidad y utilidad. (Fiplasto, 2010)

Elaboración de tableros de fibra de alta densidad

El proceso industrial para la elaboración de tableros de fibras comprende las siguientes etapas: astillado, limpieza de astillas, desfibrado, moldeo o enfieltrado, prensado, templado, aclimatación, acabado, lijado y corte a medida. (Palacios, 2008)

A continuación en la figura 1.6 se aprecia el diagrama de producción de tableros de fibra de alta densidad en la industria.

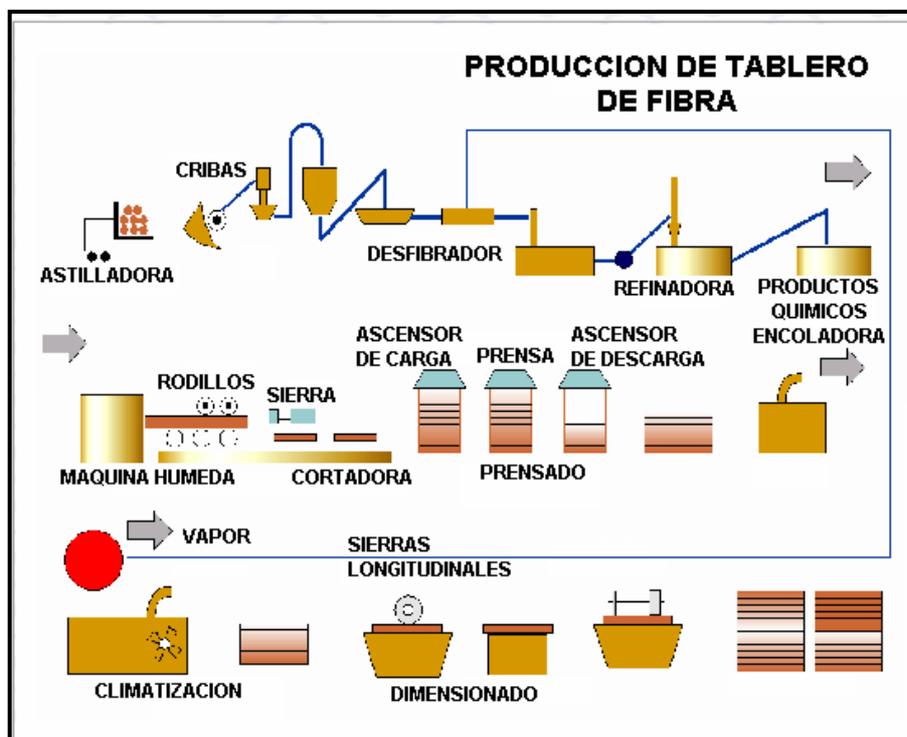


Figura 1.6 Diagrama de producción de los tableros de fibras (CNPMLTA, 2011)

El astillado o desmenuzamiento radica en obtener material en anchura y espesor aproximadamente iguales, con una longitud cuatro veces mayor que el espesor. (CNPMLTA, 2011)

Una vez producidas las astillas se seleccionan las partículas del tamaño adecuado, simultáneamente se realiza un lavado para eliminar las posibles arenas y residuos de cierto volumen. (Palacios, 2008)

El siguiente proceso es el de desfibrado que consiste en hacer de las astillas elementos delgados, lo más uniforme posible, para que una vez separados por procedimientos mecánicos se pueda elaborar con ellos la pasta de fibra para hacer el tablero. Cuando los tableros se obtienen por vía húmeda, las astillas son sometidas a un tratamiento con vapor de agua saturado dentro de un digestor por un determinado tiempo, luego del cual se eleva la presión y se expulsan las astillas al vacío, en forma de explosión. Si es por vía seca las astillas se someten a vapor en túneles, donde junto con el vapor, se aplica parafina. (Palacios, 2008)

Después de desfibrar las astillas se procede a moler, con lo cual se obtiene una pasta de fibra, en este punto se agregan los productos químicos adecuados (resinas, sosa cáustica, etc.) para luego realizar el moldeo. (Palacios, 2008)

Los tratamientos mecánicos o térmicos directos suelen producir pastas de baja calidad. Para esto, se realiza un tratamiento con productos químicos como la soda cáustica fría o sulfito de sodio caliente, los cuales aumentan ampliamente la concentración de la pasta y proporcionan cierta resistencia a la absorción del agua en el producto terminado. (CNPMLTA, 2011)

Los tableros de fibras obtenidos por el proceso en húmedo no requieren resinas habitualmente, pero los tratados por el procedimiento en seco sí, para lo cual, se necesita del 1,5 al 3,0 % de resina, y en algunos tableros prensados en húmedo se requiere del 1,0 al 1,5 %, datos referidos al peso de la fibra seca; este procedimiento es conocido como apresto. Los tipos de resinas más empleadas

son la Úrea – Formaldehído (UF), Fenol - Formaldehído (FF) y la Úrea-Melanina-Formaldehído. (Filiplasto, 2010)

Luego del apresto, se realiza el moldeo o enfieltrado, que consiste en vaciar la pasta en la máquina formadora la cual tiene placas metálicas, formándose una lámina continua que luego se corta para alimentar la prensa. En el método húmedo se suspende la fibra en agua a una concentración de 1 a 2 % y se forma el manto húmedo del tablero sin prensar, por el contrario en el método seco la fibra se seca hasta reducir su humedad de 6 a 14 %. (CNPMLTA, 2011)

Después del moldeo se realiza el prensado, este consiste en compactar los tableros aplicando presión en caliente con prensas destinadas y acondicionadas para tal fin. Si el proceso se realiza en húmedo el ciclo de prensado se realiza primero en una prensa fría en donde se elimina el 30 % de agua y luego en la prensa caliente generalmente durante 6 min para tableros de 3 mm de espesor, y si es en seco el prensado se realiza durante 2 min y medio. (CNPMLTA, 2011)

Las fibras se unen por efecto del calor, la presión aplicada y las ligninas propias del material, sin la necesidad de agregar algún agente adhesivo, en este paso se pierde agua por evaporación. Ya que en el prensado en caliente se llevan a cabo cambios físicos y químicos gracias a los cuales se forma el tablero, en el método húmedo, se realiza en 3 ciclos: una compresión hasta que el tablero tenga el 50 % de humedad, un segundo ciclo con una presión baja donde el tablero alcanza una humedad de 5 %, y finalmente una compresión a la presión inicial donde la humedad del tablero se reduce al 1 %. Normalmente el prensado se realiza en temperaturas de 180 – 205 °C. En casos especiales la temperatura puede ser hasta 220 – 225 °C. (CNPMLTA, 2011)

A la salida de la prensa los tableros se someten a un tratamiento térmico con la finalidad de aumentar su resistencia a la humedad, algunos métodos de acondicionamiento consisten en sumergir al tablero en aceite pero generalmente se prefiere la acción de calor en unas cámaras de templado, aquí se continúan las reacciones químicas; las cuales requieren cierta energía calórica y se forman

ciertos productos como formaldehído, alcohol metil, furfural, ácido acético y fórmico, la circulación del aire permite la eliminación en el ambiente de los gases que se desprenden del tablero. (CNPMLTA, 2011)

Existen variaciones de peso, grosor y largo en el tablero, por lo cual, se realiza una climatización del tablero para que este tenga un contenido de humedad de equilibrio, para el ambiente en el que va a estar en servicio; esta humedad de equilibrio es de 7 % a 20 °C y 65 % de HR. Finalmente, el tablero terminado se lija, se corta a las medidas comerciales, se le da el acabado especial y pasa al almacén para su expedición. (Palacios, 2008)

44.2.3 TABLEROS DE FIBRAS SIN RESINAS SINTÉTICAS

La fabricación de tableros de fibras sin resinas sintéticas desde el punto de vista ambiental y económico es muy valiosa, en primer lugar, porque éstos son totalmente reciclables y renovables y en segundo, porque las resinas (formaldehído) comúnmente utilizadas en la producción de tableros, provienen de fuentes fósiles que son no renovables y aumentan el precio del producto. Desde el punto de vista de la salud y de regulaciones ambientales, los tableros producidos sin resinas sintéticas son superiores porque no tienen ninguna emisión de formaldehído. (Laemsak y Okuma, 2000)

Desde los años 70 se viene estimando algunas alternativas para el uso de materiales lignocelulósicos residuales, ya que estos ofrecen interesantes y potenciales aplicaciones como materia prima en general. Además de sus posibles usos con fines energéticos, una alternativa que permite su optimización, es el uso en la fabricación de tableros. (Mat Soon *et al.*, 2006)

La tecnología de la elaboración de tableros sin resinas fue explorada desde mediados de los 80, donde se pronosticó que estos tableros se convertirían en productos importantes, especialmente en los países que no tienen los recursos forestales limitados, ni la adecuada industria química, pero sí un excedente de

productos agrícolas residuales. De hecho, se han realizado muchos intentos para producir tableros aglomerados de residuos lignocelulósicos, uno de ellos es la producción de tableros duros de paja de arroz sin el uso de resinas sintéticas, en el cual las muestras fueron sometidas a un post-tratamiento térmico a 180 °C, obteniéndose un tablero con buenas propiedades mecánicas. (Mancera *et al.*, 2011)

Tableros de fibras también han sido producidos a partir del bagazo sin tratamiento previo, en este estudio se obtuvieron tableros con ensayos de flexión de hasta 130 MPa y absorción de agua de hasta 10 %, los tableros fueron moldeados a 25,5 MPa y 175 °C. Además, en este estudio se evaluó la importancia de la humedad en el material antes del moldeo. (Mancera *et al.*, 2011)

Así mismo se obtuvieron tableros de fibras de la vena central de la hoja de plátano, los resultados mostraron que a mayores temperaturas en el proceso se obtienen las mejores propiedades mecánicas. Otros autores han producido tableros duros de la pulpa de Mansonite sin adhesivos, encontrando que los procesos de formación en seco desarrollan mejores propiedades mecánicas y baja absorción de agua en los tableros, en comparación con los procesos de formación en húmedo, además concluyeron que los puentes de hidrógeno a altas temperaturas no influyen en las propiedades mecánicas, ya que la presencia o no de agua en el proceso de formación y prensado no disminuye la calidad en el enlace. (Álvarez *et al.*, 2009)

Los tableros aglomerados también se han producido a partir de pulpa de las hojas de palma de aceite pretatadas con explosión de vapor, el material se trató previamente a una temperatura entre 210 y 235 °C durante 5 y 10 min, posteriormente, el prensado a una presión de 250 y 400 bar (3 600 - 5 800 psi), sin el lavado de la pulpa, en este estudio, los autores encontraron algunas evidencias del mecanismo de unión de los componentes del tablero. (Laemsak y Okuma, 2000)

Elaboración de tableros de fibras sin resinas sintéticas

De las diferentes investigaciones que se han llevado a cabo, en las cuales se ha utilizado una gran variedad de residuos lignocelulósicos para la elaboración de tableros de fibras sin resinas sintéticas, se concluye que ellos pueden ser fabricados mediante un tratamiento con vapor/calor que puede ser clasificado en dos diferentes categorías: un pre-tratamiento del material con vapor (steam explosion) seguido de un prensado en caliente, y un calentamiento con agua en ebullición o vapor saturado antes del prensado en caliente. (Wildyrorini, 2005)

Durante la década de 1985, Shen desarrolló y patentó el proceso de explosión de vapor de materiales lignocelulósicos, el cual los convertía directamente en tableros aglomerados sin el uso de adhesivos sintéticos. (Wildyrorini *et al.*, 2005)

La técnica conocida como explosión de vapor permite conseguir la hidrólisis de las hemicelulosas, mediante un proceso donde el material lignocelulósico es calentado con vapor a alta temperatura y presión, seguido de una ruptura del material mediante una despresurización súbita hasta la presión atmosférica. En el proceso la estructura del material se rompe y se descompone en sus tres elementos principales: celulosa, hemicelulosa y lignina. En la figura 1.9 se observa una representación de dicha degradación. (Misson *et al.*, 2009)

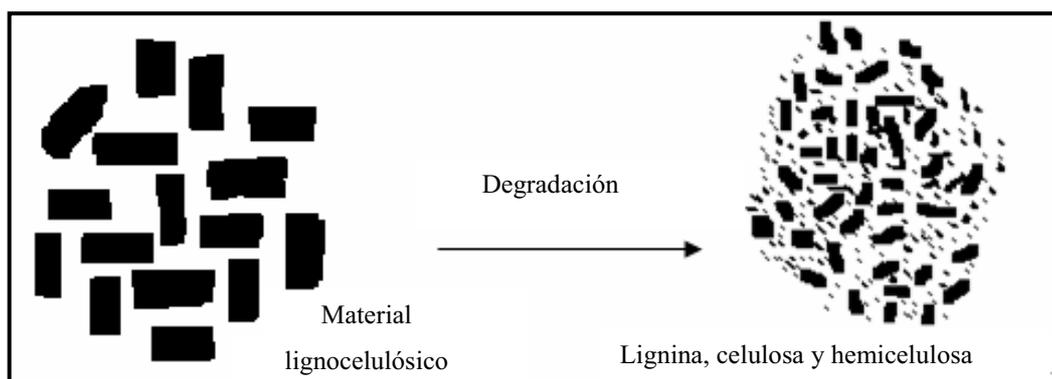


Figura 1.6 Representación de la degradación del material lignocelulósico. (Misson *et al.*, 2009)

Así después del proceso de explosión de vapor se obtiene la pulpa con un contenido de humedad de 40 a más de 100 %, en función del contenido de humedad inicial del material lignocelulósico y de la severidad de la hidrólisis. Estos materiales deben luego ser secados hasta un contenido de humedad inferior a 18%, de lo contrario, los azúcares presentes en el material tratado iniciarían la fermentación, particularmente en ambientes húmedos y calientes. (Hasibuan y Wan Daud, 2003; Quintana *et al.*, 2008)

Comienza entonces la fase del sistema de prensado en caliente, en forma de fibras, partículas, filamentos, escamas, individuales, o bien en forma de grumos, trozos, manojos y agregados. Los materiales lignocelulósicos con baja humedad se colocan en un molde para luego bajo un proceso de termo-compresión durante un tiempo suficiente, consolidar el tablero. Durante la operación se presenta el fenómeno conocido como auto-adhesión, los azúcares, productos furfurálicos, lignina y otros productos de la descomposición, polimerizan mediante la condensación y aglomeran in situ el material lignocelulósico. (Shen, 1991)

El control adecuado del proceso de explosión de vapor constituye una parte importante ya que un tratamiento excesivo con vapor de agua no solo causaría la carbonización del material tratado sino que causaría igualmente la pérdida de algunos azúcares libres y de los productos furfurálicos en particular. (Van Dam *et al.*, 2003)

Los tableros presentan una inestabilidad dimensional que se debe principalmente a su alta tendencia a absorber agua bajo condiciones de alta humedad, esta produce un hinchamiento de los tableros que puede ser reversible e irreversible. El hinchamiento reversible es causado por la naturaleza higroscópica del material lignocelulósico. La hinchazón irreversible es causada por la rotura de la red de uniones adhesivas, lo que impide que las partículas o fibras se recuperen. Se cree que el tratamiento con explosión de vapor aumenta la compresibilidad, lo que reduce el nivel de tensiones internas producidas durante el prensado en caliente, provocando que la recuperación del estrés y del espesor sea menor cuando se esponga a la humedad. (Mancera *et al.*, 2011; Shen, 1991)

La estabilidad dimensional está relacionada con la cantidad de hemicelulosas presentes en el material lignocelulósico ya que la hidrólisis de estas en el pre-tratamiento proporciona al material resistencia al agua. (Mancera *et al*, 2011)

Otro de los pre-tratamientos que permiten la obtención de tableros aglomerados auto-adheridos es el calentamiento del material con agua en ebullición o vapor saturado antes del proceso de prensado en caliente. Este pre-tratamiento se fundamenta en el ablandamiento del material lignocelulósico humedeciéndolo, lo cual es un punto crítico en la elaboración de tableros sin resinas. (Wildyorini *et al.*, 2003)

Así, después de realizar el ablandamiento de la fibra humedeciéndola, se realiza el prensado, esta operación define las propiedades del tablero, como este proceso involucra la aplicación simultánea de calor y presión sobre el material lignocelulósico pre-tratado sirve para los siguientes propósitos. (Álvarez *et al*, 2009)

La presión supera la baja contracción de las fuerzas de los haces de fibras y su efecto está relacionado con la deformación que sufren las partículas durante la compactación, ya que, para que los componentes de las fibras puedan reaccionar y formar enlaces se necesita un íntimo contacto. Durante el ciclo de presión, la presión tiene que ser relevada para permitir la evaporación de algunos extractos y agua y así evitar la delaminación y grietas en la tabla y para relajar las tensiones internas durante el prensado. (Zhou *et al.*, 2011; Shen, 1991)

La temperatura de prensado es controlada para mantener el colchón de las fibras por encima de la temperatura de transición vítrea de la lignina y así ablandar el material. El tiempo de presión es manipulado para producir el tablero con el espesor y densidad deseados. La presión y la temperatura de las placas convierten la humedad de la superficie del colchón de fibras en vapor, esto hace que se establezca un gradiente de temperatura, de contenido de humedad y de presión que, junto con las propiedades viscoelásticas de las fibras influenciadas

en gran medida por las combinaciones de temperatura y contenido de humedad, influyen en el ablandamiento y la relajación de la tensión en el tablero durante el prensado. (Bouajila *et al.*, 2005)

Generalmente el prensado en algunos tipos de producción de tableros aglomerados se realiza en tres períodos.

El primer período comprende una pre-compresión lenta en la cual cuando el material alcance una temperatura de 100 a 120 °C evaporar cierta cantidad de agua libre, este periodo dura 1 min, después de este tiempo la muestra es descomprimida para liberar vapores generados además este ciclo sirve para darle un grosor determinado, facilitando así los siguientes pasos del prensado. (Álvarez *et al.*, 2009)

Durante el segundo período la presión es sostenida durante un tiempo determinado, aquí se realizan reacciones muy importantes del tipo hidrólisis, que se dan por condiciones imperantes como agua, calor, y medio ácido generado por el ácido acético producido y otras sustancias condensables. Este tipo de reacciones permiten la unión entre fibras (enlaces) y mejora las propiedades mecánicas. En este período termina de evaporarse el agua libre y a una temperatura entre 135 a 190 °C se plastifica la lignina y se pegan las fibras aprovechando las características aditivas de esta, con una humedad del 1,5 % cesan todas las reacciones de condensación y se forma el tablero. (Álvarez *et al.*, 2009; Reale, 2003)

En el tercer período se dan propiedades físicas al tablero y se caracteriza por ser una descompresión lenta.

Algunos autores han evaluado la influencia de las condiciones de presión y temperatura sobre las propiedades de los tableros de fibra, así (Anglès *et al.*, 1999) obtuvo un tablero aglomerado sin resinas sintéticas a partir de aserrín de coníferas con un tratamiento previo de vapor a 217 °C durante 2,8 min, logrando

un contenido de humedad en el material del 7 %, el ciclo de prensado fue el siguiente: primero el material fue presionado a 4,2 MPa (600 psi) durante 5 min, luego la presión fue puesta en libertad durante 1 min para aliviar el vapor producido en el primer paso y de esta manera prevenir ampollas o burbujas en el interior del tablero y finalmente el material fue sometido a una presión de 4,2 MPa durante un tiempo entre 5 a 15 min. El ciclo de prensado lo realizó a temperaturas entre 175 a 230 °C. El autor encontró que la temperatura de prensado debe ser por lo menos 200 °C para asegurarse de que la lignina se funda y fluya cubriendo las fibras. En general, las mejores propiedades mecánicas y físicas se alcanzaron a 230 °C en la que, la presión y el tiempo no fueron significativos. (Anglés *et al.*, 1999)

44.3 LA LIGNINA COMO ADHESIVO EN TABLEROS DE MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS

Los adhesivos sintéticos son considerados los insumos de mayor costo en la elaboración de los tableros convencionales, representan el 60 % del costo de producción. Estos se derivan de fuentes no renovables de origen petroquímico. (Palacios, 2008)

A causa de las preocupaciones ambientales y con la finalidad de trabajar en procesos y productos amigables que no dañen el medio ambiente, diferentes investigaciones se han llevado a cabo en el desarrollo de adhesivos naturales o biodegradables provenientes de fuentes renovables tales como: lignina, taninos, hidratos de carbono, proteínas etc. (Álvarez *et al.*, 2007)

En este sentido muchos científicos han investigado la producción de tableros aglomerados sin resinas sintéticas y los resultados han mostrado que la lignina de los materiales lignocelulósicos utilizados, juega un rol muy importante en la conformación de estos. (Zhou *et al.*, 2011)

Al tener en cuenta que ningún adhesivo sintético es aplicado, la formación de los tableros aglomerados radica en los cambios químicos de los materiales durante el proceso de fabricación, este fenómeno toma el nombre de auto-adhesión y se realiza mediante la activación de los compuestos químicos de los componentes del tablero durante los tratamientos vapor/calor, y sus efectos dependen de muchas variables, tales como: la presión, el tiempo de prensado, la temperatura, la humedad, la composición química y otros factores que aún no se han investigado. (Widyorini, 2005)

Posiblemente son muchas las reacciones que toman lugar en la auto-adhesión, sin embargo según bibliografía se resumen en las siguientes: la degradación, tanto de la hemicelulosa como de una parte de la celulosa para producir azúcares simples y otros productos de la descomposición, el ablandamiento térmico de la lignina de los materiales, la reticulación entre los polímeros de los hidratos de carbono y la lignina y un aumento en la cristalinidad de la celulosa. (Okuda *et al.*, 2006a)

En las décadas recientes se ha vuelto a investigar viejos procesos, los cuales involucran la explosión con vapor de materiales lignocelulósicos, con la finalidad de provocar la hidrólisis de las hemicelulosas. La producción de tableros aglomerados sin resinas a base de estos materiales por el método de explosión de vapor se desarrolla químicamente en dos partes. (Shen, 1991)

La primera parte consiste en descomponer e hidrolizar la porción de hemicelulosa y convertirla en azúcares libres, carbohidratos o monosacáridos, tales como xilosa, arabinosa, manosa, galactosa, etc. La segunda parte del proceso consiste en transformar químicamente y termoendurecer los azúcares libres, in situ, a una sustancia polimerizada, combinando los materiales lignocelulósicos para formar un compuesto reconstituido. (Shen, 1991; Quintana *et al.*, 2008)

Por la expansión adiabática del agua absorbida, que se origina en este proceso, la hemicelulosa experimenta en primer lugar una reacción de descomposición, al tiempo que se forma ácido acético por ruptura de las cadenas laterales acetílicas,

el que genera un ambiente ácido débil suficiente para promover la hidrólisis de la hemicelulosa. (Quintana *et al.*, 2008)

La reacción de depolimerización de la hemicelulosa, al parecer, es una reacción secuencial, durante su fase inicial, el ataque aleatorio por ácido en las cadenas de hemicelulosa produce oligómeros de diversos grados de polimerización. Estos luego se hidrolizan convirtiéndose en monómeros, los cuales son degradados a furfural y otros productos de descomposición, los cuales, pueden ser transformados en una sustancia polimérica que proporciona un efecto de aglomeración y de aumento de volumen sobre los materiales lignocelulósicos, cuando estos son sometidos al sistema de prensado en caliente o también conocido como proceso de termo-compresión. ((Wildyrorini, 2005; Shen, 1991)

Al ser la hemicelulosa de carácter amorfo, tiene gran accesibilidad al agua, por lo tanto se descompone 100 veces más rápido que la celulosa y en consecuencia la hemicelulosa puede ser hidrolizada selectivamente sin degradar la celulosa. (Shen, 1991)

La lignina por su parte, simultáneamente a la hidrólisis de la hemicelulosa, se descompone e hidroliza también a lignina de bajo peso molecular y productos de lignina, lo que facilita su flujo durante el proceso de prensado. (Shen, 1991)

La humedad en los materiales lignocelulósicos existe de dos formas: agua libre, que es el líquido de relleno de las cavidades celulares del material, y el agua ligada, que es el líquido o vapor unidos por enlaces de hidrógeno a la celulosa de la pared celular. (Fakirov, 2007)

Cuando se seca el material lignocelulósico, en primer lugar el agua libre de las cavidades es removido y luego gradualmente el agua ligada El agua libre que se retira hace referencia al contenido de humedad, tomando en cuenta que la humedad afecta física y mecánicamente las propiedades del material, el contenido de humedad debe estar por debajo del punto de saturación, para que las propiedades cambien con el porcentaje de contenido de humedad. (Fakirov, 2007)

El punto de saturación del material está definido como el nivel de contenido de humedad al cual la pared celular del material lignocelulósico está saturada con agua ligada, pero sin presencia de agua libre en las cavidades. El punto de saturación varía según la especie pero típicamente está alrededor del 30 %.(Wildyorini *et al.*, 2005)

El ablandamiento está representado por las propiedades poliméricas de viscoelasticidad. La rigidez del material lignocelulósico disminuye hasta su punto de saturación en donde se da la rotura y el reordenamiento de los enlaces inter e intra-moleculares, los cuales parecen ser más sensibles a la humedad que a la temperatura. (Okuda *et al.*, 2006b)

Análisis realizados a los tableros aglomerados auto-adheridos a base de Kenaf, por medio de extracción Soxhlet con metanol, permitieron determinar la existencia de compuestos de bajo peso molecular con grupos aromáticos carbonilos, los cuales forman enlaces químicos durante el proceso de termo-compresión. (Okuda *et al.*, 2006b)

Dentro de estos enlaces, los responsables de la vinculación interna entre las fibras lignocelulósicas son principalmente: los puentes de hidrógeno entre fibras y los enlaces covalentes que se dan entre la lignina y los polisacáridos producto de la degradación, dentro de estos los más importantes son: el enlace lignina-furfural y el enlace lignina-lignina que son generados durante el prensado a altas temperaturas. La formación de los enlaces covalentes entre los polímeros lignocelulósicos producen fuerzas intermoleculares que son mucho más fuertes que los creados por los enlaces de hidrógeno. (Álvarez *et al.*, 2007; Zhou *et al.*, 2011)

Un aumento de contenido de humedad en las fibras promoverá enlaces de hidrógeno entre ellas, además es de gran beneficio para el ablandamiento térmico de la lignina, como se explicó anteriormente. (Zhou *et al.*, 2011)

Por su parte, la lignina produce una mejor adhesión en la interface fibra-fibra. La lignina es un material polimérico formado por sustituyentes no polares y polares, la parte no polar contiene anillos de benceno, hidrocarburos enlazados etc., y la parte polar grupos hidroxifenílicos, por lo tanto, el carácter hidrofílico de una parte de la lignina contribuye a la adhesión fibra-fibra. (Mancera *et al.*, 2011)

Como se explicó anteriormente, la lignina se fluye bajo la presión y la temperatura. Por lo tanto, las altas temperaturas del prensado aumentan la fluidez de la lignina de las fibras, mejoran su distribución generando áreas de contacto y por ende la formación de mejores vínculos entre fibras. (El Mansouri *et al.*, 2011)

Una amplia área de contacto se logra cuando los componentes poliméricos de las fibras están en un estado físico que permita la máxima deformación sobre la mínima presión. Para la lignina al ser esta un polímero amorfo, este estado se logra en su punto de transición vítrea, el cual es una temperatura a la cual comienza a deformarse y ablandarse. Esta temperatura generalmente varía de 135 a 190 °C dependiendo siempre de la humedad, el origen y el método utilizado para el aislamiento de la lignina. (Sazanov y Grinanov, 2010)

Por lo tanto para una auto-adhesión óptima la temperatura ideal del proceso de termo-compresión, debe ser una temperatura mayor a la temperatura de transición de la lignina, ya que es necesario generar un gradiente de temperatura considerable que permita mantener el estado de ablandamiento de la lignina durante un buen período de tiempo y en todo el espesor del tablero. (Mat Soon *et al.*, 2006)

Con el proceso de termo-compresión que generalmente se realiza a temperaturas altas, la temperatura del tablero aumenta rápidamente por encima de la temperatura de ablandamiento, pero durante el proceso esta temperatura (la de ablandamiento) también aumenta debido a la disminución del agua contenida en la fibra, este aumento es rápido cuando el contenido de humedad está bajo el 25 %, lo que genera entonces una competición entre el secado de la muestra y su calentamiento, que limita la diferencia entre la temperatura del proceso y la de

ablandamiento, produciéndose poco contacto entre fibras y por ende un tablero con propiedades mecánicas pobres. (Bouajila *et al.*, 2005)

Investigaciones recientes han demostrado que las fibras con superficies ricas en lignina podrían mejorar las propiedades mecánicas de los tableros debido al estrangulamiento mecánico de las moléculas de lignina, ablandadas por la presión y la temperatura, además de la formación de los enlaces covalentes. (El Mansouri *et al.*, 2011)

45. PARTE EXPERIMENTAL

El Ecuador es un país con mucha riqueza agrícola y este sector a más de satisfacer la necesidad alimentaria de la población, tiene como objetivo generar excedentes exportables que garanticen una rentabilidad económica. Es así como la palma africana, uno de los principales cultivos agroindustriales en el Ecuador, en los últimos años ha experimentado un crecimiento significativo en cuanto a producción de fruta fresca se refiere, proporcionándole a esta actividad un futuro realmente promisorio debido a la gran demanda que el aceite de palma africana tiene a nivel mundial. (Figueroa, 2008)

Este aumento en la producción de palma africana genera también un aumento en la cantidad de subproductos lignocelulósicos, dentro de los que se encuentran los racimos vacíos (raquis), los cuales han creado un importante problema ambiental en la industria aceitera ya que producen contaminación y generación de plagas. (Law y Jiang, 2001)

El desarrollo de tecnologías sustentables que permitan la correcta utilización de los recursos naturales se ha convertido hoy por hoy en una necesidad, y junto con el interés en la utilización química y energética de los materiales lignocelulósicos residuales, se ha llegado a la elaboración de los llamados aglomerados que se basan específicamente en el aglutinamiento de residuos agroindustriales. (Vázquez y Vázquez, 2002)

La cada vez más estricta reglamentación sobre el uso de materiales sintéticos, la creciente conciencia ambiental y la consideración económica conducen a buscar sustitutos para los productos del petróleo como las resinas comúnmente utilizadas en la producción de aglomerados y si a esto se le suma los efectos negativos para la salud que causan los compuestos orgánicos volátiles, tales como el formaldehído emitido por estas resinas, los aglomerados sin adhesivos sintéticos superan todas las expectativas. (Álvarez *et al.*, 2007)

Dado que el Ecuador cuenta con grandes volúmenes de raquis de palma africana

y que la fibra de dicho raquis, según varios estudios realizados en Malasia en cuanto a sus propiedades y aplicación, es una fuente potencial de biomasa de bajo precio y con gran versatilidad para producir productos con valor agregado, esta investigación está dirigida a obtener un material aglomerado a base de fibra de raquis de palma africana sin aditivos sintéticos. (Law *et al.*, 2007)

Ya que hasta el momento no existen en Ecuador estudios recientes sobre la caracterización química de la fibra de raquis de palma africana, y para cumplir con los propósitos de estudio, fue necesario realizar una caracterización química previa que permita determinar sus principales componentes, que en adelante serán la base de la elaboración del material aglomerado auto-adherido. Además como información complementaria a la investigación se realiza una caracterización física y mecánica de la fibra de raquis de palma africana.

En este punto cabe indicar que el material que se va a elaborar se encuentra catalogado según la norma ASTM D1554 10 (Terminología Estándar relacionada con materiales a base de fibras de madera y paneles de partículas), como Tableros de fieltros fibrosos de alta densidad, cuya gravedad específica y densidad son iguales o mayores a 0,80 y 800 kg/m³ respectivamente. Dicha especificación ha servido como referencia para la elaboración del aglomerado obtenido en esta investigación.

45.1 OBJETIVOS

45.1.1 OBJETIVO GENERAL

Elaborar tableros aglomerados a partir de fibra de raquis de palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.), sin añadir resinas adhesivas.

45.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar química y mecánicamente la fibra de raquis de palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.).
- Establecer los parámetros del proceso de termo-compresión utilizado para la obtención del material aglomerado.
- Determinar las propiedades físicas y mecánicas de los tableros aglomerados a ser evaluadas.
- Evaluar el efecto del tiempo, la presión y la temperatura del proceso así como el contenido de humedad de la fibra en las propiedades físico-mecánicas del material.
- Definir las condiciones del proceso para producir un tablero aglomerado sin resinas adhesivas con las mejores propiedades físico-mecánicas.

45.2 EQUIPOS Y MATERIALES

45.2.1 EQUIPOS

El desarrollo de esta investigación se llevó a cabo en el Laboratorio del Centro Textil Politécnico, donde se facilitó el uso de los equipos necesarios para los análisis químicos y mecánicos realizados.

En la primera etapa de la experimentación se realizó una preparación del raquis, para lo cual se emplearon los siguientes equipos:

- Estufa marca SDL, capacidad 240 °C, donde se realizó el secado del raquis, así como la caracterización química de la fibra.
- Molino de cuchillas Thomas-Wiley Modelo 4, con malla fina de 2 mm y 1 mm, que se usó con la finalidad de reducir el tamaño de la fibra de raquis.
- Tamizador eléctrico marca Jel con juego de tamices malla # 30, 40 y 60, tapa y recolector, se utilizó para la selección del tamaño de fibra adecuado para los

procesos de caracterización química y elaboración del material aglomerado.

Los equipos que se usaron en la caracterización química se detallan a continuación:

- Equipo Soxhlet, se utilizó para la extracción de grasas, ceras, y resinas de la fibra de raquis.
- Rotavapor, se utilizó para la separación de las grasas, ceras y resinas del solvente donde están disueltas, este equipo es de marca Rinco Instruments.
- Equipo de filtración al vacío, empleado para realizar la filtración en las pruebas de determinación de celulosa, lignina, solubilidad en sosa y solubilidad en agua caliente.
- Equipo de reflujo, con el cual se realizó la determinación de lignina y la solubilidad en agua caliente de la fibra.
- Equipo de destilación acoplado un embudo de separación, en este equipo se realizó la determinación de pentosanos.
- Mufla marca Lindberg, de capacidad 800 °C, se empleó para la determinación de cenizas.

En la caracterización mecánica los equipos utilizados fueron los siguientes:

- Medidor de longitud o Mallímetro marca Shirley de 61 cm de capacidad con el cual se midió la longitud de las fibras de raquis.
- Balanza analítica, marca Kern de 210 g de capacidad y precisión 0,0001 g, con el que se realizó el pesaje de la fibra.
- Microscopio óptico, empleado en la medición del diámetro de la fibra de

raquis.

- Máquina de ensayos universales marca Lloyd con la cual se procedió en primera instancia a la determinación de las propiedades mecánicas de las fibras y posteriormente a la determinación de las propiedades mecánicas de los materiales aglomerados obtenidos.

La parte final de esta experimentación comprende la elaboración del material aglomerado, en la cual se emplean equipos facilitados por el Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros CIAP y se detallan a continuación:

- Medidor de Espesores digital marca Mitutoyo, se empleó en la medición del espesor de los aglomerados obtenidos
- Prensa Hidráulica con platos calentadores hasta 300 °C, y placas metálicas de dimensiones 121 mm X 129 mm X 1,5 mm, las cuales sirvieron de molde en el proceso de termo-compresión de los aglomerados de fibra de raquis de palma africana. Se muestra en la figura 2.1 a continuación.



Figura 45.1 (a) Prensa hidráulica con platos calentadores y (b) Placas metálicas

45.2.2 MATERIALES Y REACTIVOS

El material base de esta investigación es la fibra de raquis de palma africana, la cual fue proporcionada por la extractora de aceite de palma Rio Manso/San Carlos, ubicada en el kilómetro 41 de la vía a Quevedo en la provincia de Los Ríos, el material se encontró en forma de racimos vacíos húmedos como resultado del proceso de esterilización en autoclaves, al cual son sometidos para facilitar el desprendimiento del fruto que se encuentra en ellos.

En la tabla 2.1 que se encuentra a continuación se detallan los materiales complementarios utilizados en cada etapa de la experimentación.

Tabla 45.1 Materiales empleados en la elaboración de los tableros aglomerados auto-adheridos

MATERIALES	PROCESO
Balones aforados	Caracterización química de la fibra de raquis
Crisoles de porcelana	
Erlenmeyers	
Lunas de reloj	
Papel filtro	
Plancha de calentamiento	
Varillas de agitación	
Vasos de precipitación	
Cajas petri	Caracterización mecánica de la fibra de raquis
Pinzas	
Tijeras	Preparación del raquis
Mechero	Elaboración del material aglomerado
Guantes de asbesto	
Recipiente de vidrio	
Tamiz	
Bloques de aluminio	Evaluación propiedades mecánicas material aglomerado
Calibrador digital	

Para la realización de los análisis de composición química de la fibra de raquis de palma africana, se utilizaron los reactivos que se especifican en la siguiente tabla.

Tabla 45.2 Reactivos empleados en la elaboración de los tableros aglomerados auto-adheridos

REACTIVO	FÓRMULA	PUREZA %	CASA COMERCIAL	ANÁLISIS
Alcohol etílico anhidro	CH ₃ -CH ₂ OH	95,0	J.T. Baker	Determinación del contenido de grasas, ceras y resinas
Benceno	C ₆ H ₆	100,0	Hach	
Hipoclorito de Sodio al 10 %	NaClO	...	C.Q.	Determinación del contenido de celulosa
Metabisulfito de sodio	H.V.O.	
Sulfito de sodio	Na ₂ SO ₃	98,3	J.T. Baker	
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	95,7	Mallinckrodt	Determinación del contenido de lignina
Ácido clorhídrico	HCl	37,5	Merck	Determinación del contenido de pentosanos
Almidón soluble	Merck	
Bromato de potasio	KBrO ₃	99,9	Mallinckrodt	
Bromuro de potasio	KBr	99,5	Panreac	
Yoduro de potasio	KI	99,9	J.T. Baker	
Tiosulfato de sodio	Na ₂ S ₂ O ₃	99,0	BDH	
Ácido acético glacial	CH ₃ -COOH	99,5	J.T. Baker	Determinación de la solubilidad en sosa
Hidróxido de sodio	NaOH	97,0	Panreac	
Agua destilada	H ₂ O	Todos los análisis

45.3 PREPARACIÓN DEL RAQUIS

45.3.1 ESTRATEGIA METODOLÓGICA

La estrategia metodológica utilizada en la preparación de la fibra de raquis se exhibe en el esquema de la figura 2.2.

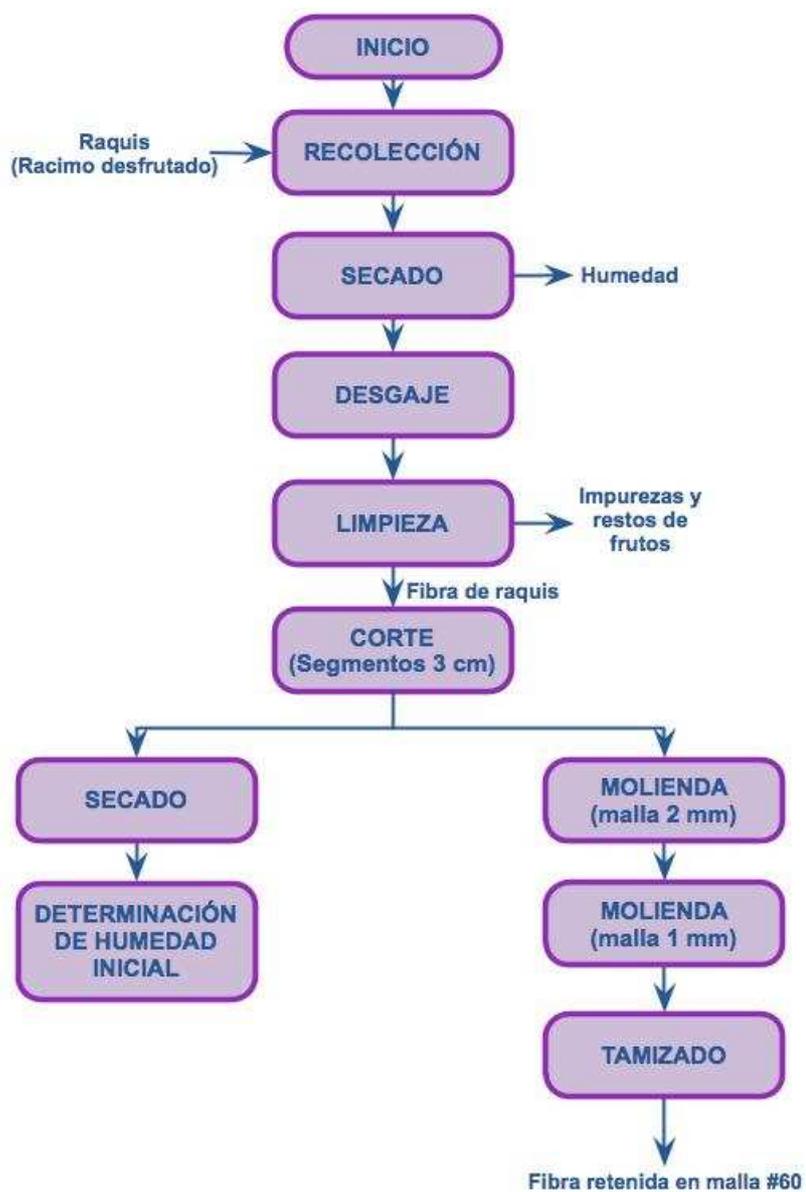


Figura 45.2 Esquema de la preparación del raquis de palma africana

45.3.2 MÉTODO DE ENSAYO

Como primera fase de la parte experimental se llevó a cabo la preparación del raquis, la cual inició con un proceso de secado del racimo desfrutado (raquis) recolectado, el cual se realizó a 60 °C y durante un lapso de 24 h.

Seco el raquis, se procedió a desgajarlo y limpiarlo, se eliminaron impurezas contenidas en los gajos y se separaron cortezas y restos de frutos; por la dureza del raquis esta limpieza se realizó unas veces manualmente y otras con tijeras.

El siguiente paso fue la molienda, para lo cual previamente se cortó la fibra en segmentos de 3 cm aproximadamente, los mismos, se introdujeron a la tolva de alimentación del molino y se molieron en primer lugar con una malla con orificios de 2 mm de diámetro, y luego para obtener un tamaño de fibra pequeño y regular se remolieron en malla con orificios de 1 mm de diámetro.

La fibra así molida, fue tamizada por 25 min en un juego de tamices malla # 30, 40 y 60 apostados en un agitador eléctrico, se recolectaron las partículas que pasaron el tamiz malla # 40 y quedaron retenidas en el tamiz malla # 60, las partículas que no cumplieron estas condiciones fueron nuevamente molidas para optimizar el uso de la fibra.

45.4 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MECÁNICA

45.4.1 ESTRATEGIA METODOLÓGICA DE LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

La estrategia metodológica que se utilizó en la caracterización química de la fibra de raquis se indica en el esquema de la figura 2.3.

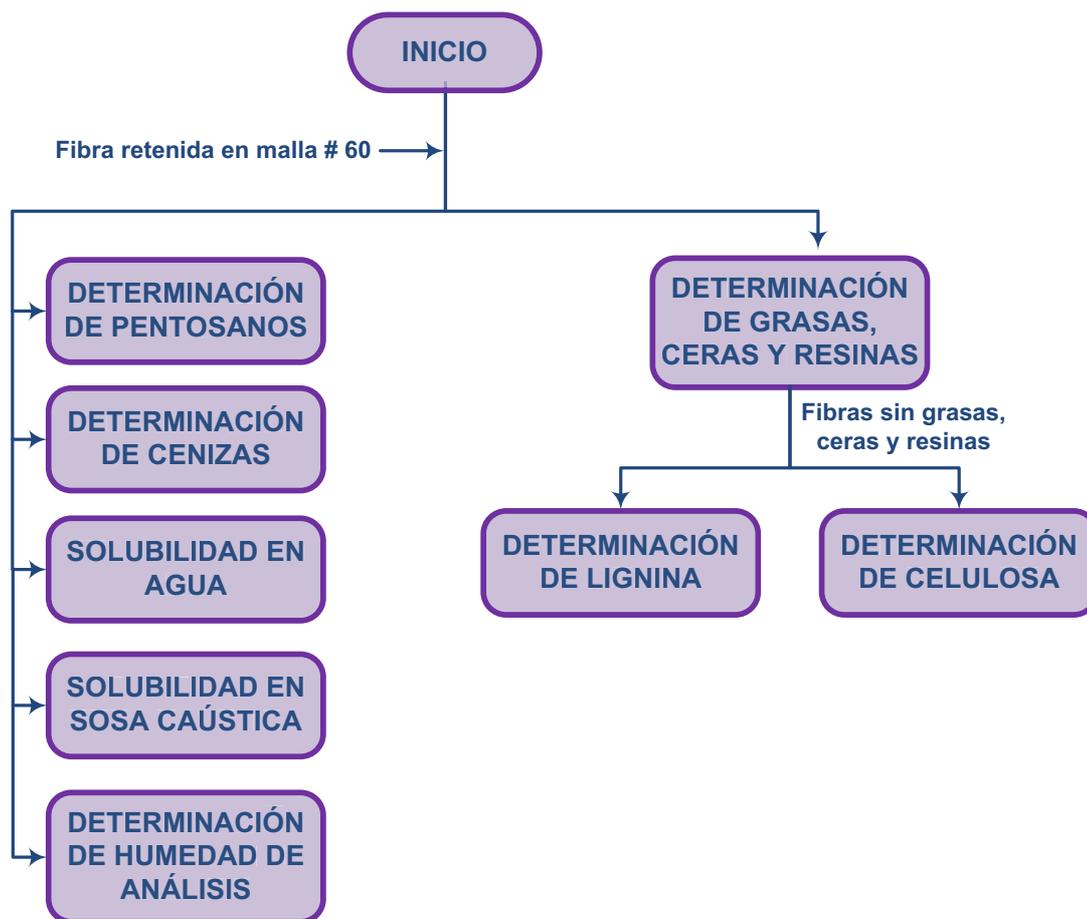


Figura 45.3 Esquema de la caracterización química de la fibra de raquis

45.4.2 MÉTODO DE ENSAYO DE LA CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

El estudio de la composición química de la fibra de raquis de palma africana se realizó en base a los procedimientos y parámetros dictados por las normas TAPPI, que son estándares mundiales para la medición de componentes químicos de materiales fibrosos celulósicos. Estos procedimientos destruyen selectivamente uno o varios componentes de un material fibroso, con lo cual se aísla el componente de los otros que conforman el material y luego por medio de métodos gravimétricos y titulométricos determinan su cantidad.

Las pruebas que se realizaron fueron: contenido de humedad inicial y de análisis, contenido de ceras, grasas y resinas, contenido de celulosa, lignina, pentosanos,

cenizas, solubilidad en sosa y solubilidad en agua caliente.

En la tabla 2.3 se detallan los análisis que se realizaron y la norma que se utilizó para cada uno de éstos.

Tabla 45.3 Métodos de ensayo TAPPI utilizados en la caracterización química de la fibra de raquis

ANÁLISIS	NORMA UTILIZADA
Determinación de la cantidad de humedad inicial y de análisis	TAPPI-T-412 m (6)
Determinación de celulosa	TAPPI-T17-m-55
Determinación de lignina	TAPPI-T13-os-54
Determinación de pentosanos	TAPPI-T450-H-66
Determinación de ceras, grasas y resinas	TAPPI-T6-os-59
Determinación de cenizas	TAPPI-15-os-58
Determinación de la solubilidad en agua caliente	TAPPI-T207-m-54
Determinación de la solubilidad en sosa	TAPPI-T212-m-54

Cabe indicar que cada muestra fue analizada con su respectiva paralela lo que permitió comparar los resultados y garantizar de alguna manera su confiabilidad.

45.4.2.1 Determinación del contenido de humedad inicial

Para el contenido de humedad inicial se pesaron 2 g de fibra cortada en segmentos de 3 cm, se colocó la muestra en una luna de reloj tarada previamente y se llevó a la estufa a 105 °C durante 3 h, tiempo después del cual se retiró la muestra, enfrió en un desecador y pesó.

Para el cálculo del contenido de humedad, se utilizó la siguiente expresión:

$$\% H = \frac{M_o - M_f}{M_o} \times 100 \quad [2.1]$$

Donde:

M_o : Masa inicial de fibra (g)

M_f : Masa final de fibra (g)

45.4.2.2 Determinación del contenido de humedad de análisis

El contenido de humedad de análisis sigue el mismo procedimiento utilizado en la determinación de humedad inicial, con la diferencia de que en este ensayo se utilizó fibra retenida en el tamiz malla # 60. El cálculo del contenido de humedad de análisis se realizó con la ecuación 2.1.

45.4.2.3 Determinación del contenido de ceras, grasas y resinas

Para este análisis se pesaron 2 g de muestra tamizada que quedó retenida en el tamiz malla # 60 y se los colocó en un timble previamente tarado a 105 °C. Posteriormente se cubrió la muestra con papel filtro y algodón para evitar pérdidas de material.

Se preparó 250 mL de mezcla alcohol-benceno en una proporción de 33 volúmenes de alcohol etílico al 95 % y 67 volúmenes de benceno, y se colocó esta mezcla en un balón con núcleos de ebullición previamente tarado y pesado. Paralelamente, se colocó el timble en la chaqueta del equipo de separación Soxhlet, y se llevó el contenido del balón a ebullición en una plancha de calentamiento a una temperatura de 80 °C; la muestra se mantuvo en reflujo durante 8 h.

Luego de este tiempo, se retiró el timble de la chaqueta y se secó al ambiente. Como las grasas, ceras y resinas se encontraban en la mezcla de solvente, se

realizó la extracción de éste con la ayuda de un rotavapor con lo cual los materiales de interés quedaron adheridos a las paredes del balón.

Finalmente este balón se secó a 105 °C durante 3 h, luego se enfrió y pesó. El contenido de ceras, grasas y resinas se halló de la siguiente forma:

$$\% \text{ Grasas} = \frac{\text{Masa final balón} - \text{Masa inicial balón}}{\text{Masa inicial timble} \times (1 - H)} \times 100 \quad [2.2]$$

Donde:

H: Humedad de análisis expresado como fracción de 1

45.4.2.4 Determinación del contenido de lignina

Para la determinación de lignina se pesó 1 g de muestra tratada con alcohol-benceno, se la colocó en un erlenmeyer de 125 mL y se añadieron 15 mL de ácido sulfúrico al 72 %. Se llevó la mezcla a agitación durante 2 h a una temperatura de 18 a 20 °C.

Luego, se colocó la muestra en un balón de 1000 mL con núcleos de ebullición y se añadieron 560 mL de agua; aparte, se armó el equipo y se dejó en reflujo por un período de 4 h, se enfrió y filtró en un crisol poroso previamente tarado.

El residuo contenido en el crisol se lavó con 500 mL de agua caliente, y se secó en la estufa durante 3 h a 105 °C, luego se enfrió en el desecador y se pesó. Para la determinación de la cantidad de lignina se empleó la siguiente relación:

$$\% \text{ Lignina} = \frac{\text{Masa final crisol} - \text{Masa crisol vacío}}{\text{Masa inicial muestra} \times (1 - H)} \times 100 \quad [2.3]$$

45.4.2.5 Determinación del contenido de celulosa

En esta valoración se pesaron 2 g de muestra tratada con alcohol-benceno y se los colocó en un erlenmeyer de 125 mL, en él se añadieron 50 mL de solución de hipoclorito de sodio, al 10 %, y se dejó reposar sin agitación a temperatura ambiente durante 8 h.

Luego se filtró el material en un crisol poroso previamente tarado, y sucesivamente se lavó con 50 mL de agua destilada, 50 mL de solución de bióxido de azufre al 3 %, 50 mL de agua destilada y finalmente con una solución de sulfito de sodio al 2 % hasta que la muestra tomó una coloración rosada tenue. En este punto se transfirió el material del crisol a un vaso de precipitación, se retiró cualquier residuo con solución de sulfito de sodio al 2 % en porciones de 15 mL, hasta completar 105 mL y se dejó reposar el material en esta solución durante 30 min.

Se filtró el material en el mismo crisol y se lavó el contenido con 250 mL de agua destilada, luego se secó a 105 °C en la estufa durante 3 h, se enfrió en el desecador y se peso. Para la determinación de la cantidad de celulosa se empleó la siguiente relación:

$$\% \text{ Celulosa} = \frac{\text{Masa final del crisol} - \text{Masa del crisol vacío}}{\text{Masa inicial muestra} \times (1-H)} \times 100 \quad [2.4]$$

La preparación de las soluciones utilizadas en los análisis de composición química de la fibra se detallan en el Anexo I.

45.4.2.6 Determinación del contenido de pentosanos

Para la determinación de pentosanos se armó el equipo de destilación y se acopló al balón un embudo de separación, luego se agregó en él: 1 g de muestra tamizada malla # 60, núcleos de ebullición y 100 mL de ácido clorhídrico 3,5 N. Posteriormente, se colocaron en el embudo de separación 300 mL de ácido

clorhídrico 3,5 N y se mantuvo en ebullición la mezcla hasta recoger 300 mL de destilado. Fue importante añadir constantemente ácido clorhídrico 3,5 N a través del embudo con el fin de compensar las pérdidas por evaporación, y de esta manera poder mantener el nivel de ácido invariable en el balón.

A continuación, se trasladó el destilado obtenido a un erlenmeyer de 1 000 mL y se agregaron 250 g de hielo picado y 50 mL de agua destilada. Cuando la temperatura fue menor a 0 °C, se añadieron 20 mL de solución de bromuro-bromato 0,2 N, se tapó el erlenmeyer y se agitó vigorosamente el contenido durante aproximadamente 5 min.

Finalmente, se adicionaron 10 mL de solución de yoduro de potasio al 10 % y unas gotas de almidón como indicador, y se tituló la muestra del erlenmeyer con una solución de tiosulfato de sodio 0,1 N.

Para obtener un valor de referencia se realizó una prueba en blanco, para lo cual se usó 270 mL de ácido clorhídrico 3,5 N, 80 mL de agua destilada, 250 g de hielo y 20 mL de solución bromuro bromato, se tituló y se midió el gasto de solución de tiosulfato de sodio 0,1 N.

Para la determinación de la cantidad de pentosanos se empleó la siguiente relación:

$$\% \text{ Pentosanos} = \left[\frac{7,5 \times N \times (V-v)}{w \times (1-H)} \right] - 1,0 \% \quad [2.5]$$

Donde:

- N: Normalidad de la solución de tiosulfato utilizada
- V: Volumen gastado de tiosulfato en el blanco (mL)
- V: Volumen gastado de tiosulfato en el destilado (mL)
- W: Peso inicial de muestra (g)

45.4.2.7 Determinación del contenido de cenizas

Esta evaluación permitió conocer el contenido de minerales en la fibra, para lo cual se taró 1 crisol de porcelana, y se agregó en él 1 g de muestra tamizada retenida en malla # 60, luego se incineró su contenido sobre un mechero. Finalmente, se colocó la muestra en una mufla a 600 °C durante 4 h, se enfrió la muestra y se pesó. El contenido de cenizas se calculó con la siguiente expresión:

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{\text{Masa final del crisol} - \text{Masa inicial del crisol}}{\text{Masa de fibra} \times (1 - H)} \times 100 \quad [2.6]$$

45.4.2.8 Determinación de la solubilidad en hidróxido de sodio

Esta evaluación es llamada también ataque de hongos ya que el material es expuesto en hidróxido de sodio al 1 % el cual disuelve carbohidratos presentes en las fibras, los cuales en un medio adecuado sirven de sustrato a estos microorganismos con lo que se concluye que a mayor solubilidad en sosa, mayor tendencia al ataque de hongos y por ende pérdida de la fibra.

Para esto se pesó 2 g de muestra tamizada retenida en la malla # 60 y se la colocó en un erlenmeyer de 125 mL, luego se agregó 100 mL de solución de hidróxido de sodio al 1 %, se añadió núcleos de ebullición, se tapó bien el erlenmeyer y se lo colocó en un baño de agua a ebullición durante 25 min.

Se agitó vigorosamente el contenido del erlenmeyer a los 10, 15 y 25 min, y se dejó enfriar durante 1 h. Transcurrido este tiempo se filtró el contenido en un crisol previamente tarado. Luego se lavó el residuo sucesivamente con 50 mL de agua caliente, 50 mL de ácido acético al 10 %, 50 mL de agua caliente. Finalmente, se secó la muestra a 105 °C hasta obtener un peso constante. La solubilidad en sosa se calculó con la siguiente expresión:

$$\% \text{ Solubilidad en Sosa} = \frac{\text{Masa inicial crisol} - \text{Masa final crisol}}{\text{Masa muestra} \times (1 - H)} \times 100 \quad [2.7]$$

45.4.2.9 Determinación de la solubilidad en agua caliente

Para la ejecución de esta prueba se pesaron 2 g de material tamizado retenido en tamiz malla # 60 y se armó el equipo de reflujo. Luego, se añadió 100 mL de agua destilada y núcleos de ebullición en el balón. Posteriormente, se colocó el matraz en un baño de agua a ebullición durante 3 h, y se filtró el contenido del matraz en un crisol filtrante previamente tarado.

Después, se lavó el residuo con agua caliente, se secó a 105 °C, se enfrió en el desecador y se pesó el crisol. La solubilidad en agua caliente se calculó con la siguiente expresión:

$$\% \text{ Solubilidad en Agua Caliente} = \frac{\text{Masa inicial crisol} - \text{Masa final crisol}}{\text{Masa muestra} \times (1 - H)} \times 100 \quad [2.8]$$

45.4.3 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

45.4.3.1 Estrategia metodológica de la caracterización mecánica

La estrategia metodológica que se usó para la caracterización mecánica de la fibra de raquis de palma africana es la que se indica a continuación en la figura 2.4.

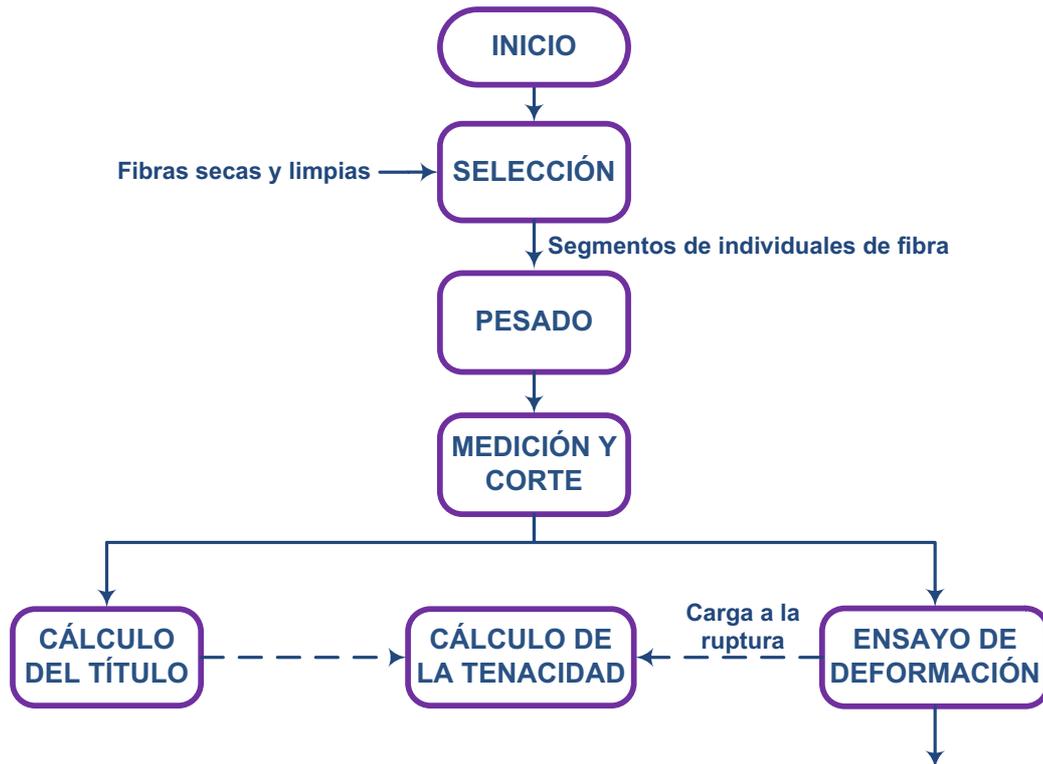


Figura 45.4 Esquema de la caracterización mecánica de la fibra de raquis

45.4.3.2 Método de ensayo de la caracterización mecánica

La caracterización mecánica consistió en la determinación de los siguientes parámetros:

- Título
- Tensión y elongación a la ruptura
- Tenacidad

La evaluación de estas propiedades se realizó en base a los procedimientos indicados por la norma ASTM 3822 “Métodos de ensayo estándar para las propiedades de tracción de fibras textiles”

Para la determinación del título de la fibra, se seleccionaron previamente al azar 50 fibras individuales, se identificó cada fibra y se procedió a medir su longitud en

el Mallímetro. Posteriormente se pesó cada una de las fibras en una balanza de precisión de 4 dígitos que se muestra en la figura 2.10 y se determinó el título de cada una de las fibras con la siguiente ecuación.

$$N = K \times \frac{M}{L} \quad [2.9]$$

Donde:

N: Título de la fibra o hilo (tex)

K: Constante para corrección de unidades (1 000 m/g)

M: Masa de la fibra (g)

L: Longitud de la fibra (m)

El ensayo de tensión a la ruptura se realizó de la siguiente manera, en la máquina de ensayos universales se fijó la distancia entre mordazas de 50 mm y una velocidad de avance de la mordaza superior de 2 mm/min.

Para facilitar la manipulación de la fibra se toma en cuenta la técnica sugerida por Mohamed *et al.*, (2009), en la cual la fibra es pegada sobre papel como se indica en la figura 2.5. Luego cuidadosamente se colocó la fibra en el centro de las mordazas, se alineo en sentido vertical y antes de iniciar el ensayo se cortó el papel por la línea de corte.

El equipo antes programado ejerció una fuerza con desplazamiento constante sobre la fibra hasta que esta se rompiera. Una vez que se realizó el ensayo se registraron los valores de fuerza máxima y elongación, reportados por el equipo.

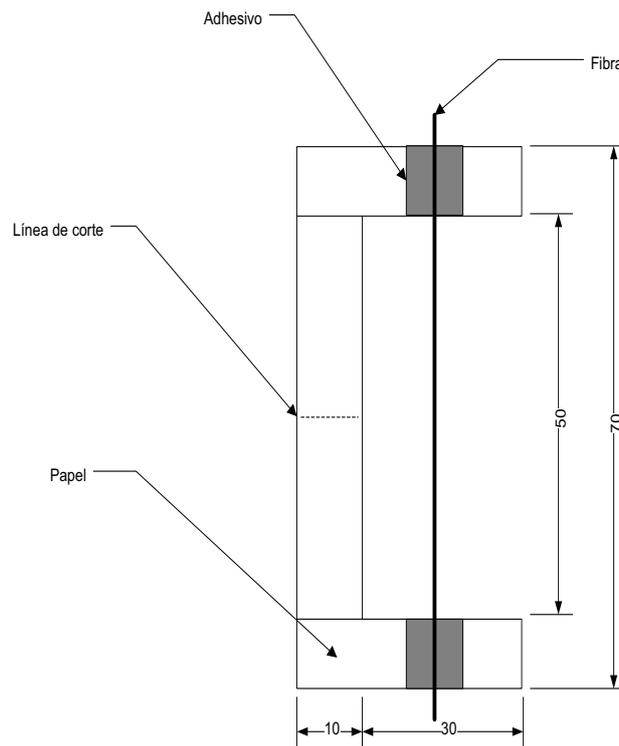


Figura 45.5 Disposición de la fibra para el ensayo de tensión

Cabe indicar que el ensayo de tensión se debe realizar con las mismas fibras a las cuales se les determinó el título ya que la propiedad de tenacidad en lo que concierne a fibras es la relación entre la tensión y el título de las mismas. El cálculo de la tenacidad se realizó con la siguiente expresión.

$$\sigma = \frac{F}{N} \quad [2.10]$$

Donde:

σ : Tenacidad de la fibra (N/tex)

F: Fuerza aplicada (N)

N: Título de la fibra (tex)

A partir de los datos obtenidos también se determinó el porcentaje de elongación, para esto se uso la siguiente relación.

$$\xi = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100 \%$$

[2.11]

Donde:

ξ : Elongación

l : Longitud al momento de la ruptura (mm)

l_0 : Longitud inicial (mm)

Como dato adicional dentro de la caracterización se midió el diámetro de la fibra de raquis. Se seleccionaron 30 fibras de la parte central del racimo y 30 fibras de su parte externa, posteriormente en el microscopio óptico, con lente graduado se midió su diámetro en diferentes secciones.

El análisis estadístico de los resultados obtenidos se realizó con el programa de computación Microsoft Excel.

45.5 ELABORACIÓN DEL MATERIAL AGLOMERADO

45.5.1 ESTRATEGIA METODOLÓGICA

La estrategia metodológica de la elaboración del material aglomerado se indica en la figura 2.6 la cual se encuentra a continuación.



Figura 45.6 Esquema de la elaboración del material aglomerado

En esta fase de la investigación se definieron las variables que afectan el proceso de elaboración del material aglomerado así como también los rangos de variación de las mismas. Para lo cual se realizaron pruebas preliminares en las cuales se estudiaron las siguientes variables:

- Tamaño de fibra
- Masa de fibra
- Humedad de la fibra
- Temperatura de operación
- Presión
- Tiempo

Para encontrar los valores mínimos y máximos de estas variables, con los cuales se puede elaborar un tablero aglomerado, se utilizó como referencia las

investigaciones realizadas por Álvarez *et al.*, (2009), en su trabajo de elaboración de aglomerados auto-adheridos.

De esta manera se fijaron tres valores para cada variable antes mencionada, uno mínimo, uno máximo y uno intermedio. Los valores se indican en la tabla que está a continuación.

Tabla 45.4 Valores de las variables del proceso de termo-compresión utilizadas en las pruebas preliminares de obtención de los tableros aglomerados auto-adheridos

VARIABLE	VALOR 1	VALOR 2	VALOR 3
Tamaño de fibra (# de malla)	40	60	< 60
Masa de fibra (densidad aglomerado g/cm ³)	0,6	0,8	1,1
Humedad de la fibra (%)	8	15	25
Temperatura de operación (°C)	160	200	220
Presión de operación (MPa)	14	21	28
Tiempo de operación (min)	3	5	10

En lo referente a la cantidad de masa de fibra utilizada para elaborar el material, cabe indicar que esta variable, para los aglomerados, se expresa como densidad, entonces con el cálculo del volumen en base a las dimensiones de los moldes utilizados, se determinó la cantidad de masa que se empleó y ésta correspondió a 14 g, 19 g, y 26 g, que equivalen a una densidad de 0,6 g/cm³, 0,8 g/cm³ y 1,1 g/cm³ respectivamente.

Las pruebas realizadas con sus respectivos parámetros se muestran a continuación en la tabla 2.5.

Tabla 45.5 Variación de los parámetros del proceso de termo-compresión en las pruebas preliminares de obtención de los tableros aglomerados auto-adheridos

ENSAYO N°	TAMAÑO FIBRA (N° #)	MASA DE FIBRA (g/cm ³)	HUMEDAD %	TEMPERATURA (°C)	PRESIÓN (MPa)	TIEMPO (min)
1	40	0,6	8	160	14	3
2	60	0,6	8	160	14	3
3	<60	0,6	8	160	14	3
4	40	0,6	8	160	14	3
5	40	0,8	8	160	14	3
6	40	1,1	8	160	14	3
7	40	0,6	8	160	14	3
8	40	0,6	15	160	14	3
9	40	0,6	25	160	14	3
10	40	0,6	8	160	14	3
11	40	0,6	8	200	14	3
12	40	0,6	8	220	14	3
13	40	0,6	8	160	14	3
14	40	0,6	8	160	21	3
15	40	0,6	8	160	28	3
16	40	0,6	8	160	14	3
17	40	0,6	8	160	14	5
18	40	0,6	8	160	14	10

Para la determinar de la influencia que cada variable tuvo en la elaboración del material aglomerado se realizó un análisis cualitativo de la calidad del mismo. Se fijó como condiciones excluyentes al color y dureza al raspado porque fueron las características físicas determinantes en los materiales obtenidos. Los criterios de evaluación se indican en la tabla 2.6 que se observa a continuación.

Tabla 45.6 Criterios para evaluar el aglomerado obtenido en pruebas preliminares

ASIGNACIÓN	CRITERIO PARA LA ASIGNACIÓN
Bueno	Si el aglomerado presenta el color amarillo característico de la fibra y no se resquebraja al raspar.
Regular	Si el aglomerado no presenta el color amarillo característico pero se resquebraja con dificultad.
Malo	Si el aglomerado presenta un color café y se resquebraja con facilidad al raspar.

De este modo, se estableció que las variables que afectan directamente la calidad del material aglomerado son: temperatura, presión, tiempo y contenido de humedad de la fibra. Así mismo se fijaron sus respectivos rangos de variación.

En lo referente al tamaño y masa de fibra, se establecieron valores fijos que corresponden a malla # 60 y $1,1 \text{ g/cm}^3$ respectivamente.

45.5.2 MÉTODO DE ENSAYO

En el presente trabajo, tableros aglomerados auto-adheridos fueron elaborados a partir de fibras de raquis de palma africana, mediante un proceso de termo-compresión donde la temperatura, presión, tiempo y humedad de la fibra influyen en el fenómeno de auto-adherencia.

Para esto, de las fibras previamente molidas retenidas en tamiz malla # 60, se pesó 26 g, masa que correspondió a la densidad del aglomerado de $1,1 \text{ g/cm}^3$ fijada anteriormente, para luego humedecerla al 10, 15 y 25 % de humedad.

Las diferentes humedades de la fibra se lograron al poner en contacto la fibra con el vapor saturado a la presión de Quito. Mediante métodos gravimétricos, dichos valores fueron evaluados cada 5 min, hasta que la cantidad de agua incorporada sea equivalente a los porcentajes de humedad deseados en el peso total de la fibra húmeda.

La fibra ya con el porcentaje de humedad deseada fue depositada uniformemente en un molde metálico completamente limpio, se colocó la tapa sobre el molde y cuidadosamente se llevó a la prensa, en la cual estaba previamente fijada la temperatura en 160, 180 ó 200 °C según fuese el caso.

El ciclo de presión de la termo-compresión de los tableros aglomerados fue dividido en tres partes: una pre compresión de 1 min tiempo después del cual la muestra fue descomprimida para liberar vapores generados por el calentamiento,

una segunda parte donde la presión correspondiente 14 ó 21 MPa fue sostenida durante el tiempo determinado que puede ser 3, 5 ó 7 min y por último una descompresión lenta.

Luego de lo cual se retiró la muestra de la prensa y se dejó enfriar para desmoldar.

45.6 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS

El efecto que cada variable tuvo sobre la calidad del tablero aglomerado fue evaluado con base en las propiedades físicas y mecánicas de las muestras obtenidas, mediante ensayos estandarizados de resistencia a la flexión estática, resistencia a la tracción perpendicular a la superficie, determinación de hinchamiento y absorción de agua, prescritos por la norma ASTM D-1037 "Métodos estándar para la evaluación de las propiedades de tableros aglomerados a base de fibras de madera y partículas".

45.6.1 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN ESTÁTICA

La resistencia a la flexión estática es un ensayo en el que se evaluó al material obtenido como una viga simplemente apoyada con carga puntual en el centro, para esto se cortó especímenes de 50 mm de ancho y 100 mm de largo, se evaluó el espesor para cada espécimen en 4 puntos, cerca de los extremos y en el centro y luego se pesó cada uno de ellos.

A continuación se fijaron las condiciones del equipo de ensayos universales LLOYD, la velocidad de ensayo fue 10 mm/min, se instaló las mordazas correspondientes para este ensayo y se colocó el espécimen en el centro de la distancia entre los apoyos como se muestra en la figura 2.7, luego se inició el equipo y se ensayo hasta que el material produzca la primera falla.

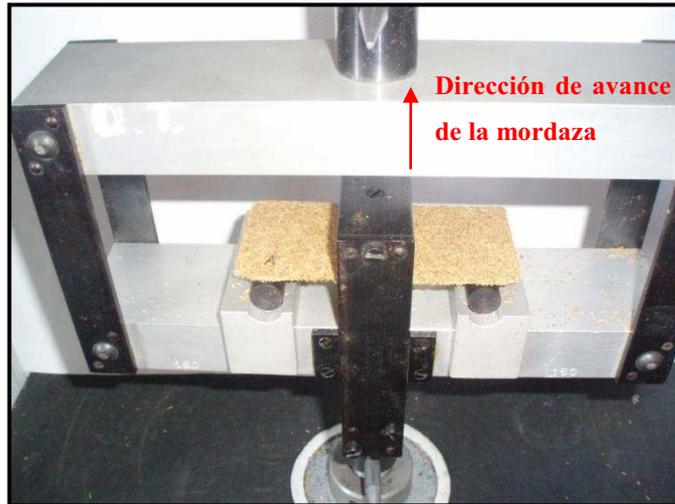


Figura 45.7 Ensayo de flexión estática con los aglomerados elaborados

Producto del ensayo de resistencia a la flexión estática se obtuvo el diagrama carga vs. deformación del cual se obtuvieron los datos para el cálculo de propiedades como: Módulo de ruptura (MOR) y Módulo de elasticidad aparente (MOE) cuyas ecuaciones se muestran a continuación.

- Módulo de ruptura, esta propiedad está básicamente en función de la carga máxima que soporta la probeta hasta la ruptura y de las propiedades geométricas de la misma así:

$$MOR = \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times d^2} \quad [2.12]$$

Donde:

MOR: Módulo de ruptura (MPa)

P: Fuerza Máxima (N)

L: Amplitud de los apoyos (mm)

b: Ancho del espécimen (mm)

d: Espesor nominal del espécimen (mm)

- Módulo de elasticidad aparente, esta propiedad incluye tanto la influencia del esfuerzo cortante como la flexión, ya que se calculó la pendiente de la curva carga vs deformación en el primer tercio, zona en la cual tienen un comportamiento lineal. Se calculó entonces con la siguiente expresión:

$$MOE = \frac{L^3}{4 \times b \times d^3} \times \frac{\Delta P}{\Delta y} \quad [2.13]$$

Donde:

- MOE: Módulo de elasticidad aparente (GPa)
 $\Delta P/\Delta y$: Pendiente de la curva carga vs deformación (N/mm)
 L: Amplitud de los apoyos (mm)
 b: Ancho del espécimen (mm)
 d: Espesor nominal del espécimen (mm)

Dentro de lo que especifica la norma también se calculó humedad de la muestra y su gravedad específica.

Cabe indicar que en el desarrollo del ensayo de flexión estática las dimensiones del espécimen y la velocidad de la prueba no correspondieron a los valores establecidos por la norma debido a limitaciones en el equipo de termo-compresión.

45.6.2 TRACCIÓN PERPENDICULAR A LA SUPERFICIE (TP)

Esta prueba se realizó para conocer la capacidad de cohesión de las partículas del tablero aglomerado en la dirección perpendicular al plano del tablero.

Para esto, de los materiales obtenidos se cortaron probetas de 50 mm² las cuales se adhirieron con pegamento (cianoacrilato) a dos bloques de aluminio cuya forma

y dimensiones se especifican en el apartado número 29 de la norma ASTM D-1037.

En el equipo de ensayos universales se programó la velocidad de desplazamiento de la mordaza superior en 2 mm/min y se colocaron los bloques pegados al cuerpo de prueba entre las mordazas como se indica en la figura 2.8, se tuvo en cuenta que la línea de fuerza pase por el centro del espécimen, luego de lo cual se ensayó el material hasta que se produzca la falla.



Figura 45.8 Ensayo de tracción perpendicular a la superficie con los aglomerados elaborados

Se registraron los datos de la máxima fuerza a la ruptura con lo que se calculó el esfuerzo dividiendo dicha fuerza para el área del espécimen. Adicionalmente se determinó el contenido de humedad de cada espécimen.

45.6.3 DETERMINACIÓN DE ABSORCIÓN DE AGUA E HINCHAMIENTO

Este ensayo se fundamentó en la determinación de la absorción de agua al calcular el aumento en la masa y el hinchamiento en espesor de las probetas ensayadas.

Para esta prueba se cortaron probetas de 50 mm de ancho por 100 mm de largo, se procedió a medir su espesor de la misma manera que en el ensayo de flexión estática y luego se sumergieron horizontalmente y separadas unas de otras en un recipiente que contenía agua destilada a una temperatura de 20 °C, los tableros se sumergieron unos 25 mm por debajo del nivel del agua.

El tiempo de exposición de las probetas en el agua debió ser de 24 h, luego del cual las probetas se sacaban, se dejaban reposar durante 10 min sobre una superficie limpia para retirar el exceso de agua y luego medir su espesor como al inicio; sin embargo a los 5 min de iniciado el ensayo el material aglomerado obtenido no resistió lo cual se puede observar en la figura 2.9, por lo tanto la prueba no se pudo efectuar.



Figura 45.9 Ensayo de absorción de agua e hinchamiento de los aglomerados obtenidos

46. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este capítulo muestra los resultados obtenidos en diferentes fases de la investigación. Inicialmente se presentan algunas observaciones respecto a la recepción y preparación del raquis. En segundo lugar se presentan los resultados de la caracterización química y mecánica así como también los resultados de las pruebas preliminares en las cuales se determinan las variables del proceso y sus respectivos valores. Por último se explican los efectos de las variables determinadas en la calidad del tablero.

46.1 RECOLECCIÓN Y PREPARACIÓN DEL RAQUIS

El raquis recolectado se encontraba húmedo, como resultado del proceso de esterilización al cual es sometido previamente para facilitar el desprendimiento de los frutos contenidos en él. Por esta razón una vez realizada la recolección fue necesario secar el raquis, ya que como se observa en la figura 3.1, este material bajo estas condiciones se descompone rápidamente y genera hongos a los pocos días de ser recogido.



Figura 46.1 Raquis en descomposición

El secado del raquis se llevó a cabo en la estufa, cada 2 h se retiró y cambió de posición para garantizar así que su secado sea homogéneo.

Como resultado de la limpieza se obtuvo la fibra de raquis libre de cortezas y de restos de frutos tal como se muestra en la figura 3.2. En la figura 3.3 se observa la fibra molida que se usó para la elaboración de los aglomerados.



Figura 46.2 Fibra de raquis limpia



Figura 46.3 Fibra de raquis molida

46.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MECÁNICA DE LA FIBRA DE RAQUIS

Previo a la obtención del material aglomerado de interés de esta investigación, se realizó una caracterización química y mecánica de la fibra de raquis utilizada como materia prima, esto permitió inferir con fundamento en referencias bibliográficas, la factibilidad de su uso en el campo de los aglomerados.

46.2.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LA FIBRA DE RAQUIS

El proceso experimental de la caracterización química se realizó con base en las normas TAPPI, se siguieron los procedimientos de los análisis químicos sugeridos en ellas como se indica en la metodología. Los datos obtenidos de cada uno de los análisis realizados se exponen en el Anexo II.

46.2.1.1 Determinación del contenido de humedad inicial y de análisis

En la tabla 3.1 se muestra los promedios correspondientes a los resultados del contenido de humedad inicial (fibra cortada de 3 cm de largo) y de análisis (fibra molida retenida en tamiz malla # 60).

Tabla 46.1 Resultados de la determinación del contenido de humedad inicial y de análisis de la fibra de raquis

PROPIEDAD	PORCENTAJE PRESENTE EN LAS FIBRAS (%)
Humedad inicial	5,88
Humedad de análisis	8,37

Los resultados de estos análisis muestran una diferencia considerable entre la humedad inicial y la de análisis, esta diferencia de aproximadamente un 30 %,

radica en el tamaño de partícula de la fibra que fue usada para estas determinaciones.

Las fibras utilizadas para la determinación de la humedad de análisis son de un tamaño de partícula menor al de las fibras utilizadas para la humedad inicial, lo que permitió que exista mayor área superficial y por lo tanto mayor absorción de humedad del ambiente, por la naturaleza higroscópica de la fibra.

46.2.1.2 Determinación del contenido de celulosa, lignina, grasas, ceras y resinas, cenizas y pentosanos.

La evaluación del contenido de celulosa, lignina, grasas, ceras y resinas, cenizas y pentosanos permitió estimar la factibilidad del uso del raquis en la elaboración de tableros aglomerados sin resinas. Los resultados que se obtuvieron se detallan a continuación en la tabla 3.2 y se representan en la figura 3.4.

Tabla 46.2 Resultados de la caracterización química de la fibra de raquis

COMPONENTE	PORCENTAJE PRESENTE EN LAS FIBRAS (%)
Celulosa	69,83
Lignina	16,46
Grasas, ceras y resinas	6,59
Cenizas	4,24
Pentosanos	4,23

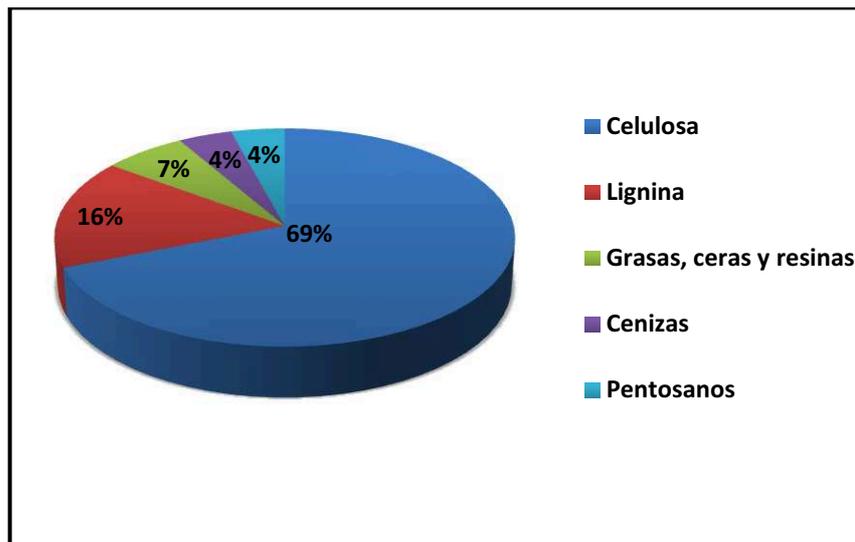


Figura 46.4 Representación del contenido de celulosa, lignina, grasas, ceras y resinas, cenizas y pentosanos determinados en la fibra de raquis

La determinación de la cantidad de celulosa es muy importante, como se indica en la figura 3.4, es el mayor constituyente de la materia prima utilizada en esta investigación, lo cual demuestra que el raquis, al igual que los demás materiales lignocelulósicos, tiene a la celulosa como su principal constituyente, tal como se muestra en la tabla 1.3, y por lo tanto puede ser utilizado en muchas de las aplicaciones propias de los materiales ricos en celulosa.

La cantidad de celulosa presente en la fibra de raquis ensayada corresponde a 69,83 %, dicho valor es superior al que se encuentra en bibliografía y que se expone en la tabla 1.1, en donde se indica que el contenido de celulosa en la fibra de raquis es de 59,70 %, lo cual se debe a que la composición de los materiales lignocelulósicos varía de acuerdo a la variedad, condiciones del suelo, clima, etc.

La evaluación del contenido de lignina en la fibra de raquis permitió determinar la factibilidad de elaborar con ella tableros aglomerados auto-adheridos, ya que el principio del fenómeno de auto-adherencia, con base en bibliografía se centra en el aprovechamiento de la lignina propia del material como adhesivo.

En la industria de tableros de fibra se necesitan de 8 a 12 % en peso de resina, la fibra de raquis ensayada posee un 16 % de lignina, cantidad suficiente para

reemplazar el uso de resina sintética y desempeñar el papel de adhesivo en la elaboración de tableros aglomerados.

El valor del contenido de lignina obtenido en los ensayos de caracterización guarda una cercana relación con el expuesto en fuentes bibliográficas mostrado en la tabla 1.1 referente a la composición química de las fibras de raquis, en la que se observa que la lignina representa un 18,1 %. Por lo tanto, se verificó que la fibra de raquis posee la suficiente cantidad de lignina necesaria para elaborar tableros de fibras auto-adheridos.

Otro de los componentes presente en las fibras de raquis son las grasas, ceras y resinas, que como se puede apreciar en la figura 3.4, representan el 7 %, un valor bajo comparado con los otros componentes de fibra ensayada, sin embargo con respecto a la bibliografía de la tabla 1.2 es mayor en un 50 % aproximadamente. Esto debido a que en el proceso de esterilización que se usa en el país, para separar los frutos de los racimos frescos, se desprende aceite el cual se deposita como aceite residual en los racimos vacíos o raquis.

La hemicelulosa, representada en esta investigación por los pentosanos, presenta un valor relativamente bajo con relación al encontrado en bibliografía, el valor obtenido difiere en un 80 % del valor encontrado en Misson *et al.*, (2009), sin embargo, el alto porcentaje de solubilidad en sosa, el cual representa también la cantidad de carbohidratos de bajo peso molecular presentes en la fibra, hace suponer que los pentosanos no son los principales componentes de las hemicelulosas de las fibras de raquis.

Las cenizas también constituyen un componente minoritario en la fibra de raquis y al igual que en bibliografía representan de 3 a 4 % del peso de la fibra.

46.2.1.3 Determinación de la solubilidad de la fibra en agua caliente y en hidróxido de sodio al 1 %

En la tabla 3.3 se exponen los resultados de las características químicas como solubilidad en sosa al 1 % y solubilidad en agua caliente de la fibra de raquis, estos datos indican la resistencia que presenta la fibra al ataque de hongos y la cantidad de azúcares solubles que posee respectivamente.

Tabla 46.3 Resultados de la solubilidad de la fibra de raquis de palma africana

CARACTERÍSTICA	PORCENTAJE (%)
Solubilidad en agua caliente	10,97
Solubilidad en Sosa al 1%	34,10

En lo referente a la solubilidad en agua caliente que presenta la fibra, ésta está acorde con la bibliografía presentada en la tabla 1.3 y corresponde al 10,97 %, e indica la cantidad de taninos, gomas y ciertos carbohidratos que se separaron fácilmente de la fibra de raquis.

Por su parte la solubilidad en hidróxido de sodio al 1 % (sosa) es una prueba que se realiza para determinar la resistencia que presenta la fibra al ataque de hongos y bacterias, como la sosa disuelve a los carbohidratos de bajo peso molecular los cuales sirven de sustrato para los microorganismos, son un indicador de cuan susceptibles son las fibras a este ataque así a mayor solubilidad mayor tendencia al ataque de hongos.

La fibra de raquis en lo que se refiere a solubilidad en sosa al 1 % presenta una cantidad considerable y congruente a la encontrada en bibliografía, lo que indica que es un material vulnerable al ataque de microorganismos bajo condiciones inadecuadas de humedad y temperatura, lo cual debe ser considerado en el momento de almacenar el raquis para su futura aplicación.

46.2.2 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA FIBRA DE RAQUIS

La caracterización mecánica de la fibra fue realizada con la finalidad de obtener un estudio completo de la fibra de raquis, que sirva de base para esta investigación, así como también para la búsqueda de nuevas y promisorias aplicaciones.

Para esto, se determinaron propiedades físicas de la fibra como título y diámetro, y propiedades mecánicas como tenacidad y elongación a la ruptura.

Los datos obtenidos se evaluaron mediante un análisis estadístico que se llevó a cabo con el programa Microsoft Excel 2007. Se estableció un nivel de confianza del 95 %, con lo cual se obtuvieron los intervalos de confianza para la media de las propiedades determinadas.

En el Anexo III se detallan los datos obtenidos de estos ensayos y en el Anexo IV se presentan los datos correspondientes al análisis estadístico de las propiedades físicas y mecánicas de las fibras.

Los resultados de las propiedades físicas y mecánicas de las fibras de raquis obtenidos en esta investigación se exponen en la tabla 3.4 y 3.5

Tabla 46.4 Resultados de las propiedades físicas de la fibra de raquis

PROPIEDAD MEDIDA	VALOR PROMEDIO
Título (Tex)	87,4 ± 7,0
Diámetro zona cental (µm)	32,9 ± 2,9
Diámetro zona externa (µm)	337,6 ± 29,5

Nota: $X = \bar{X} \pm E$ donde : $E = 1.96 \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ para $n = 30$

Tabla 46.5 Resultados de las propiedades mecánicas de la fibra de raquis

PROPIEDAD MEDIDA	VALOR PROMEDIO
Tenacidad (cN/Tex)	9,9 ± 1,1
Elongación a la ruptura (%)	10,6 ± 1,4

Nota: $X = \bar{X} \pm E$ donde : $E = 1.96 \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ para $n = 30$

La determinación del título es importante porque permite caracterizar físicamente a la fibra, es decir, determinar sus dimensiones. El título es una magnitud utilizada para expresar el espesor de la fibra, relaciona el peso de ésta con la unidad de longitud. En la figura 3.5 mediante un diagrama de caja y bigote se indica la dispersión de los resultados obtenidos del título de la fibra de raquis.

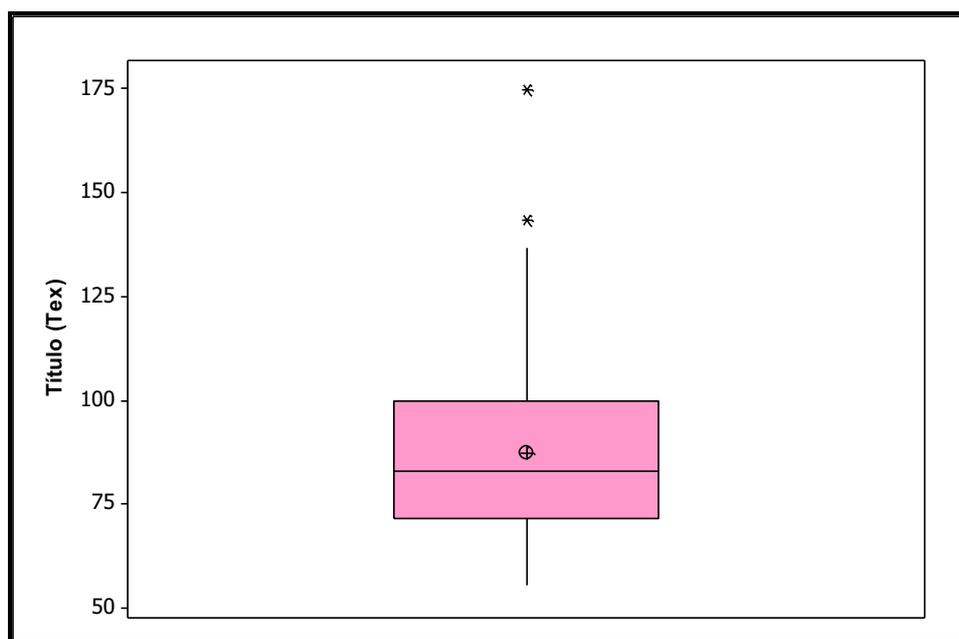


Figura 46.5 Diagrama de caja y bigote correspondiente al título de la fibra de raquis de palma

Este análisis estadístico reveló que la distribución de los resultados es sesgada hacia la derecha, es decir, los valores del título se concentran en los valores bajos mientras que los valores altos están más dispersos. Adicionalmente, se observa

que existieron dos resultados atípicos, probablemente ocasionados por errores experimentales.

En la figura 3.6 por su parte se muestra la representación de los resultados del diámetro de la fibra, en un diagrama de caja y bigote.

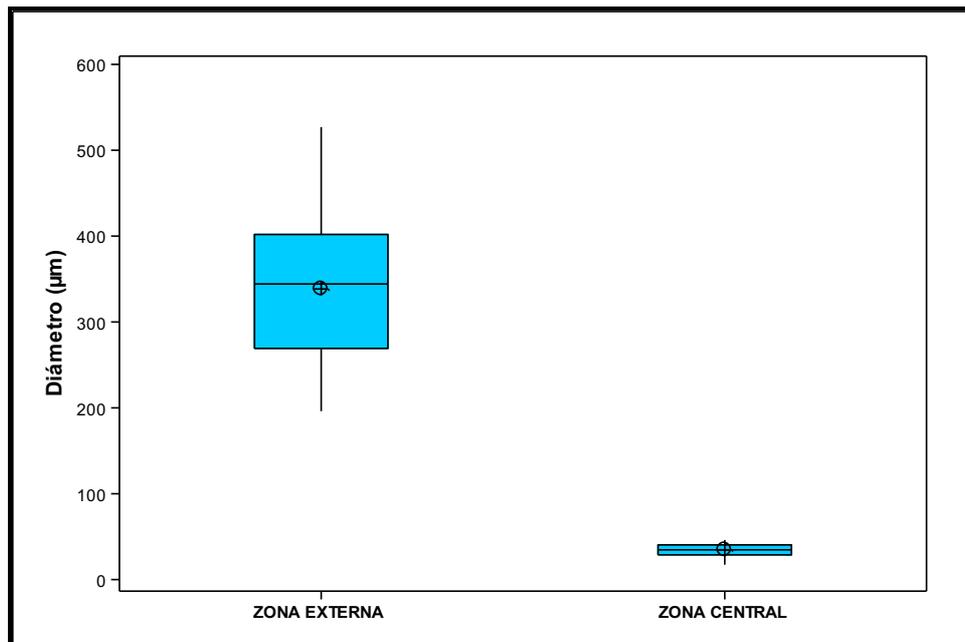


Figura 46.6 Diagrama de caja y bigote correspondiente al diámetro de las fibras de raquis de palma

En el diagrama se representan los resultados del diámetro de la fibra de la zona central del raquis y el diámetro de la fibra de la zona externa, en él se observa que los datos del diámetro de la zona externa son dispersos. En el caso del diámetro de la zona central los valores presentan baja dispersión, exhibiendo diámetros pequeños, en comparación con los diámetros de la fibra de la zona externa.

Empleando la distribución F como estadístico para analizar la varianza que presentan los dos diámetros, se comprobó que existe una diferencia estadísticamente significativa entre el diámetro de las fibras de la zona central con aquellas de la zona exterior. Esta diferencia se debe a la naturaleza propia del raquis, las fibras externas que sujetan al fruto son más gruesas que las internas, las cuales se encuentran pegadas unas con otras a un pequeño tallo.

Al comparar los datos obtenidos, tanto del diámetro de la fibra de la zona central del raquis, como de la zona externa, con los datos en bibliografía, se observa que el valor del diámetro de la fibra de raquis bibliográfico es comparable con el diámetro de la fibra de la zona externa, obtenido en esta investigación.

En la figura 3.7 se presenta el diagrama de caja y bigote correspondiente a la prueba de tenacidad para la fibra de raquis de palma africana.

La tenacidad es una propiedad que permite tener una idea de la capacidad que tiene la fibra para soportar un esfuerzo, en el caso de la fibra de raquis en lo que se refiere a su aplicación en el área de los biocompuestos adquiere cierta relevancia, pues permite inferir la capacidad que tiene el raquis de soportar un esfuerzo y por ende su posible comportamiento.

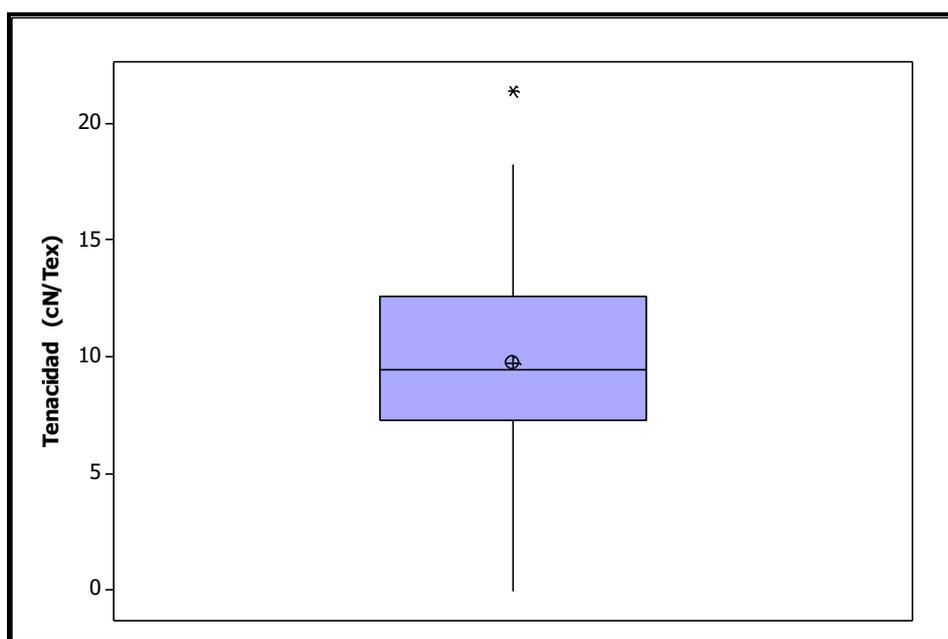


Figura 46.7 Diagrama de caja y bigote correspondiente a la tenacidad de la fibra de raquis de palma

La distribución de los resultados de la tenacidad de la fibra de raquis, con base en el análisis estadístico descriptivo, es una distribución normal, ya que los valores de los estadísticos sesgo y curtosis (1,02 y 0,95 respectivamente) se encuentran dentro del rango de normalidad (-2,00 a +2,00). Los estadísticos correspondientes

se reportan en el Anexo IV. Además, como se observa en la figura 3.7, la forma de la distribución de los resultados muestra un ligero sesgo, sin embargo, se podría decir que es simétrica. Se observa también, que existieron resultados atípicos, probablemente ocasionados por errores experimentales.

El valor promedio de la tenacidad de la fibra de raquis, obtenido es pequeño, comparado con los valores de tenacidad de otras fibras naturales que se muestran en la tabla 1.4, probablemente en los procesos de limpieza y desgaje del raquis, la fibra fue sometida a esfuerzos que dañaron su estructura y disminuyeron su capacidad de resistir una tensión. De igual manera, la sección transversal de la fibra, en la cual se aplica la fuerza, no es uniforme en toda la longitud, lo cual también afecta a la tenacidad.

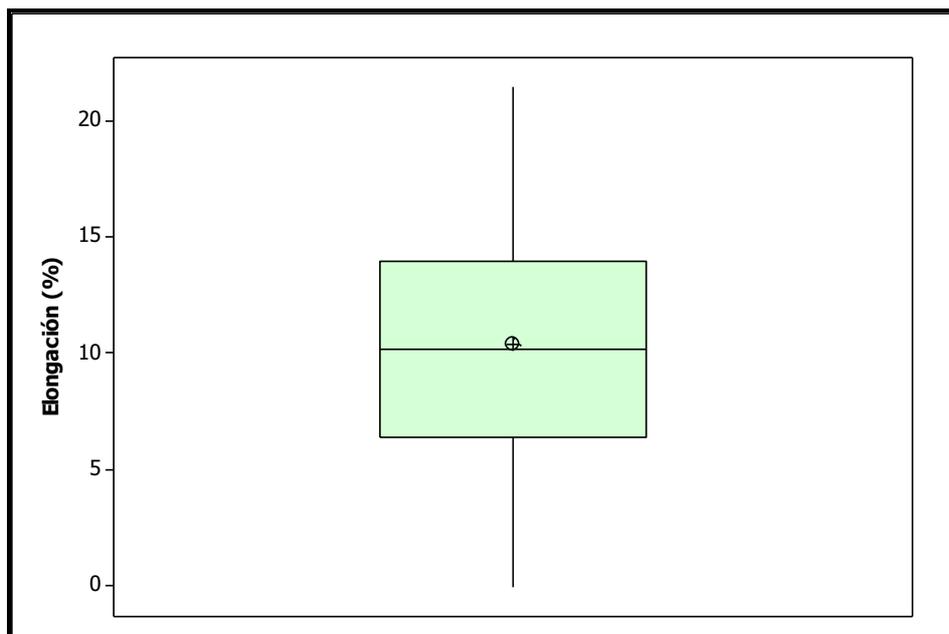


Figura 46.8 Diagrama de caja y bigote correspondiente al porcentaje de elongación de la fibra de raquis

Los resultados de porcentaje de elongación por su parte, que se observan en la figura 3.8, representados en forma de diagrama de caja y bigote, presentan una distribución simétrica ya que las medianas de los resultados se encuentran cercanos a la media.

El valor de la elongación de la fibra de raquis antes de la ruptura es $10,6 \% \pm 1,4 \%$, con un nivel de confianza del 95 %. Este porcentaje de elongación es comparable con el porcentaje de elongación de las fibras de algodón y coco, como se puede observar en la tabla 1.4.

46.3 ELABORACIÓN DEL MATERIAL AGLOMERADO

Previo a la elaboración de los tableros aglomerados auto-adheridos fue indispensable definir las variables y establecer los rangos de variación de las mismas, que por bibliografía se sabe tienen influencia importante sobre la calidad del tablero.

Para esto se realizaron 18 ensayos preliminares y en base al análisis cualitativo que se indica en la parte experimental, se examinó cada uno de los tableros obtenidos.

Los tableros catalogados como *buenos* mostraron un color amarillo característico de la fibra, al rasparlos con un objeto punzante no se desintegraron, demostrando así que sus fibras estaban bien enlazadas, proporcionándole estructura al tablero.

Además durante el proceso de termo-compresión emanaban un olor característico, similar al de la cebada tostada, y después del proceso se desprendían fácilmente del molde metálico utilizado. En la figura 3.9 se muestra un ejemplo de los tableros catalogados como *buenos*.



Figura 46.9 Tablero obtenido en pruebas preliminares con fibra retenida en malla # 40, densidad de $0,6 \text{ g/cm}^3$, humedad del 4 % a $160 \text{ }^\circ\text{C}$, 14 MPa de presión y tiempo de 3 min, catalogado como bueno

Los tableros catalogados como *regular* y *malo* fueron aquellos que mostraron un color amarillo muy oscuro o café, al rasparlos se descomponían con facilidad. En el proceso de termo-compresión desprendieron un olor característico a madera quemada y se descomponían al separarlos del molde. En la figura 3.10 se observa un tablero aglomerado catalogado como *malo*.



Figura 46.10 Tablero obtenido en pruebas preliminares con fibra retenida en malla # 40, densidad de $0,6 \text{ g/cm}^3$, humedad del 4 % a $220 \text{ }^\circ\text{C}$, 14 MPa de presión y tiempo de 3 min, catalogado como malo

De lo experimentado y con los datos obtenidos que se detallan en el Anexo V, se determinó que las variables que intervinieron directamente en el material aglomerado fueron: temperatura, presión, tiempo y contenido de humedad de la fibra, fijándose tres valores para cada una de las variables determinadas.

Los valores establecidos para la humedad de la fibra fueron: 10, 15, 25 %. La humedad ensayada preliminarmente que corresponde al valor de 8 % mostrado en la tabla 2.4 en la parte experimental, fue reemplazada por la humedad de 10 % ya que la humedad de análisis inicialmente utilizada (8 %) no promovió los enlaces de hidrógeno entre las fibras y por lo tanto los tableros no mostraron estabilidad y se desintegraron con facilidad.

En lo que se refiere a la temperatura de operación, los valores fijados para los ensayos definitivos fueron: 160, 180 y $200 \text{ }^\circ\text{C}$. La temperatura de $220 \text{ }^\circ\text{C}$, que inicialmente se planteó, fue desechada ya que bajo esta condición se obtenían tableros quemados. En bibliografía (Mat Soon *et al.*, 2006) se indica que la fibra es térmicamente estable hasta los $330 \text{ }^\circ\text{C}$ aproximadamente, la degradación de la

fibra ocurre a temperaturas superiores a ésta, así que el deterioro de los tableros a la temperatura de 220 °C se debe a una degradación de la lignina. Sin embargo como el proceso se debe realizar a una temperatura mayor a la temperatura de transición vítrea de la lignina, se redujo el rango de temperaturas de trabajo de 160 a 200 °C.

Para la presión se fijaron los siguientes valores: 14 y 21 MPa, si bien cada variable tiene tres niveles de ensayo, la presión es la excepción, debido a que el valor máximo ensayado para esta variable que corresponde a 28 MPa, deformó el tablero, la excesiva presión no permitió que la lignina ablanda fluya en toda el área del tablero, formándose grietas en el centro del mismo, y en ocasiones partiendo en dos el aglomerado. Al final del proceso, se observaron vapores blanquecinos que se hallaban contenidos y que en el momento de liberar la presión salieron, expulsando las fibras ya degradadas. La falta de precisión del equipo imposibilitó ensayar con un tercer valor intermedio.

En lo que respecta al tiempo del proceso de termo-compresión, los valores determinados fueron: 3, 5 y 7 min. El tiempo de 10 min que se utilizó en las pruebas preliminares, fue reducido a 7 min ya que a mayores tiempos de proceso bajo presión y calor, los tableros se quemaron debido a una degradación de la lignina presente en las fibras.

En lo referente a la procesabilidad de la fibra de raquis, como son el tamaño y masa, se establecieron valores fijos. En lo que corresponde al tamaño de la fibra se estableció la fibra retenida en tamiz malla 60, ya que bajo esta condición se obtuvieron los mejores resultados.

Por su parte, en lo que tiene que ver con la masa de fibra utilizada o en otras palabras, la densidad del tablero, la elección dependió de la capacidad de los moldes del equipo de compresión utilizado y fue establecida en 1,1 g/cm³, esta densidad permitió catalogar los tableros obtenidos dentro de la clasificación de tableros de fibras de alta densidad.

En la tabla 3.6 se indican las variables y los valores establecidos.

Tabla 46.6 Valores de las variables establecidas para el proceso de termo-compresión del material aglomerado

VARIABLE	VALOR 1	VALOR 2	VALOR 3
Humedad de la fibra (%)	7	15	25
Temperatura de operación (°C)	160	180	200
Presión de operación (MPa)	14	21	-
Tiempo de operación (min)	3	5	7

Obtención de los tableros aglomerados

Con las variables de estudio definidas y con un diseño experimental en el cual cada variable tuvo 3 niveles a excepción de la presión, se elaboraron 52 tableros, cada uno con su respectivo paralelo. Las dimensiones de los tableros obtenidos fueron de 100 mm × 100 mm. Cabe indicar que algunos de los tableros elaborados presentaron manchas oscuras en su superficie.

Se observó que dichas manchas se producían siempre en la misma posición en los tableros, lo cual llevó a suponer que una mala transferencia de calor en las placas calefactoras ocasionó las manchas, razón por la cual se efectuó la medición de las temperaturas de las placas en varios puntos.

La medición realizada permitió concluir que evidentemente existe una mala distribución de calor tanto en la placa superior como en la inferior, esto provocó que la lignina no se distribuya uniformemente en toda el área del tablero, produciéndose el fenómeno de la auto-adhesión sólo en estas zonas. Por ende, estas zonas presentaron una superficie muy lisa, con cierto brillo y con una rigidez mayor a la de las zonas sin manchas, lo cual era el objetivo de esta investigación.

Por otra parte, algunas de las reacciones que toman lugar en la auto-adhesión posiblemente no se efectuaron en toda el área del tablero, debido a que el proceso utilizado para el tratamiento vapor/calor, no fue suficiente para hidrolizar

las hemicelulosas. Por lo tanto, la generación de carbohidratos de bajo peso molecular se limitó y con ello también la formación de los enlaces lignina-carbohidratos, que como se indica en la teoría permiten obtener los tableros aglomerados auto-adheridos.

46.4 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS

Con base en las propiedades físicas y mecánicas de los tableros obtenidos se evaluó el efecto que cada variable tuvo sobre la calidad del tablero y consecuentemente se definieron las condiciones más adecuadas para la obtención de tableros aglomerados auto-adheridos.

46.4.1 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN ESTÁTICA

Producto del ensayo de resistencia a la flexión estática realizado como se indica en la parte experimental, se obtuvo el diagrama carga vs. deformación del cual se obtuvieron los datos para el cálculo de las siguientes propiedades: módulo de ruptura (MOR) y módulo de elasticidad aparente (MOE).

Cabe mencionar que la norma ASTM empleada para la evaluación de estas propiedades tuvo que ser adaptada, ya que los tableros obtenidos no cumplieron con el largo ni el espesor que se especifica para la utilización de esta norma, las dimensiones del equipo de prensado imposibilitaron la elaboración de tableros de dimensiones mayores, por esta razón pueden existir ciertos errores en los resultados de estas propiedades.

46.4.1.1 Módulo de ruptura (MOR)

Esta propiedad básicamente indica la carga máxima que soporta la probeta hasta romperse y está en función de la geometría del tablero. Los datos requeridos para

el cálculo del MOR se exponen en el Anexo VI y los resultados respectivos en el Anexo VII.

A continuación en las figuras 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15 y 3.16 se muestra el efecto que presentan el contenido de humedad y el tiempo del proceso de la termo-compresión en el módulo de ruptura de los tableros obtenidos.

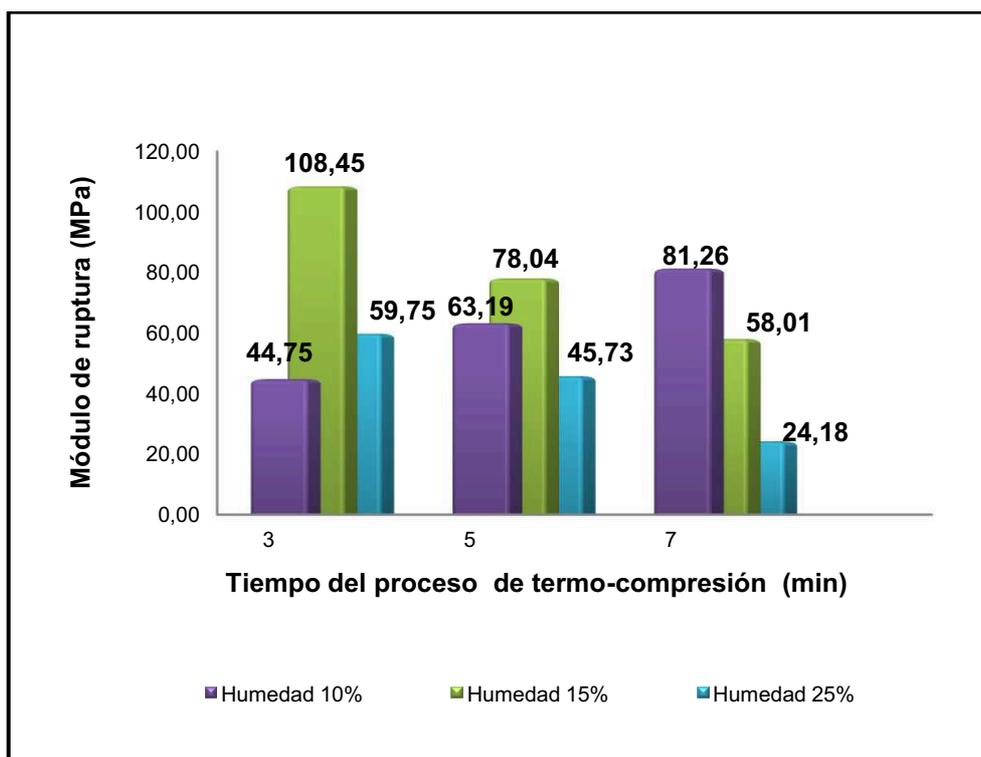


Figura 46.11 Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el módulo de ruptura de los tableros aglomerados elaborados a una presión de 14 MPa y temperatura de 160 °C

En la figura 3.11 se observa que el máximo valor de MOR (108 MPa) fue obtenido con un 15 % de humedad y con un período de prensado en caliente de 3 min a una temperatura de 160 °C y presión de 14 MPa.

Se observa también que a una humedad del 10 % el aumento del tiempo beneficia el MOR, ya que las fibras se encuentran en contacto por un período más largo, lo que junto con el ablandamiento de la lignina, favoreció la formación de mejores vínculos entre ellas, sin embargo para la humedad de 15 % y 25 % un aumento en

el tiempo de prensado produce una reducción de esta propiedad.

Según Bouajila *et al.*, (2005), la temperatura del tablero aumenta rápidamente por encima de la temperatura de ablandamiento de la lignina, la cual durante el proceso aumenta también debido a la disminución del agua contenida en la fibra, lo que genera una competición entre el secado de la muestra y su calentamiento, que limita la diferencia entre la temperatura del proceso y la de ablandamiento, produciéndose poco contacto entre las fibras.

Por lo tanto la posible causa de la reducción del MOR a la humedad de 15 %, se debió a que al inicio el alto contenido de humedad en la fibra, mantuvo la temperatura de ablandamiento de la lignina baja, con lo cual se generó un gradiente (entre la temperatura del proceso y la de la de ablandamiento) alto, que benefició el contacto entre las fibras y por lo tanto la generación de vínculos entre ellas, pero al aumentar el tiempo de prensado la humedad de la fibra disminuyó, produciéndose un aumento de la temperatura de ablandamiento de la lignina, con lo que el gradiente de temperatura antes mencionado se redujo, provocándose poco contacto entre las fibras y por ende un tablero con MOE bajos.

A la humedad de 25 %, el MOR presenta el mismo comportamiento que presenta a la humedad de 15 %, con la diferencia de que los valores de MOR a ésta humedad, son más bajos que a la humedad de 15 %, esto se debió a que al ser mayor la humedad, gran parte del calor suministrado se utilizó para evaporar el agua, con lo cual la temperatura del tablero a la humedad de 25 % es menor que la temperatura del tablero a la humedad de 15 %, con ello el gradiente de temperatura a la humedad de 25 % es menor que el gradiente generado a la humedad de 15 %, y por lo tanto se generó menor contacto entre las fibras.

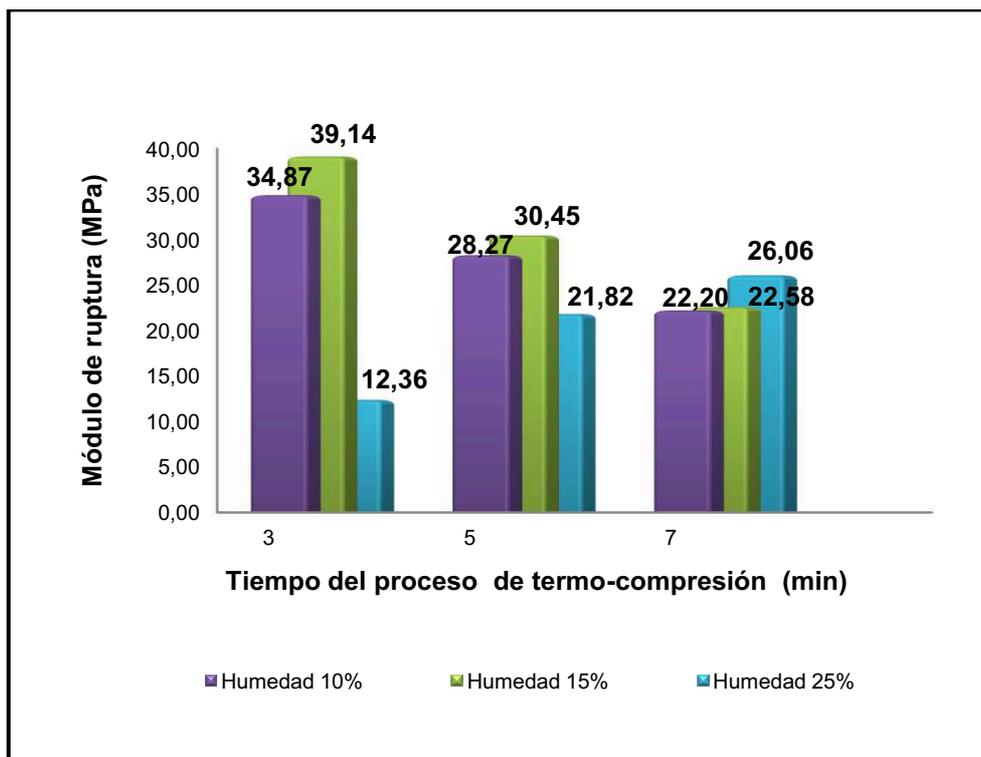


Figura 46.12 Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el módulo de ruptura de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 14 MPa y temperatura de 180 °C

Para el ensayo realizado a 14 MPa y 180 °C, el máximo valor de MOR (39,14 MPa) se logra a un tiempo de 3 min y 15 % de humedad como se indica en la figura 3.12. A humedades de 10 y 15 %, el aumento del tiempo produce una reducción del MOR, esto se debió a que a tiempos cortos, existió alto contenido de humedad y por lo tanto baja temperatura de ablandamiento de la lignina, con esto el gradiente que se generó entre la temperatura del proceso y la de ablandamiento fue alto, lo cual favoreció la formación de mejores vínculos entre las fibras, al aumentar el tiempo de prensado la humedad se evaporó y la temperatura de ablandamiento de la lignina aumentó, y con ello, el gradiente de temperatura disminuyó y provocó MOR bajos.

A la humedad de 15 %, los valores de MOR son más altos que a la humedad de 10 % debido a que, al aumentar la humedad existió más cantidad de agua ligada que evaporar, y como la temperatura de ablandamiento aumenta al disminuir la humedad, la temperatura de ablandamiento a la humedad de 15 % fue menor que la temperatura de ablandamiento al 10 %, y por lo tanto el gradiente de

temperatura a la humedad de 15 % fue mayor que a la humedad del 10 %, produciéndose mayor contacto entre las fibras y por ende mayores MOR a la humedad de 15 %.

Se observa también que a una humedad del 25 % el aumento de temperatura y tiempo de prensado, benefició el MOR, ya que esta temperatura compensó el requerimiento de calor que se necesitó para evaporar el agua ligada presente, a medida que la humedad del tablero se evaporó, la temperatura de ablandamiento de la lignina aumentó, lo que permitió que esta fluya, lo cual juntamente con el contacto entre las fibras por un período más largo, favoreció la formación de un mayor número de enlaces entre ellas produciéndose tableros con mejores MOR.

En la figura 3.13 que se encuentra a continuación, se observa que a 3 min y 25 % de humedad se logra el máximo valor de MOR (40,95 MPa) a una temperatura de 200 °C y 14 MPa.

Para humedades de 10 y 15 % los mejores resultados se logran a los 7 min. Un tiempo de prensado más largo promovió seguramente que el contacto entre los componentes de las fibras sea más íntimo y se generen por lo tanto mayor número de enlaces entre ellos. Al trabajar con una temperatura de 200 °C el gradiente de temperatura que se genera entre ésta y la temperatura de ablandamiento de la lignina, se incrementa conforme aumenta el tiempo.

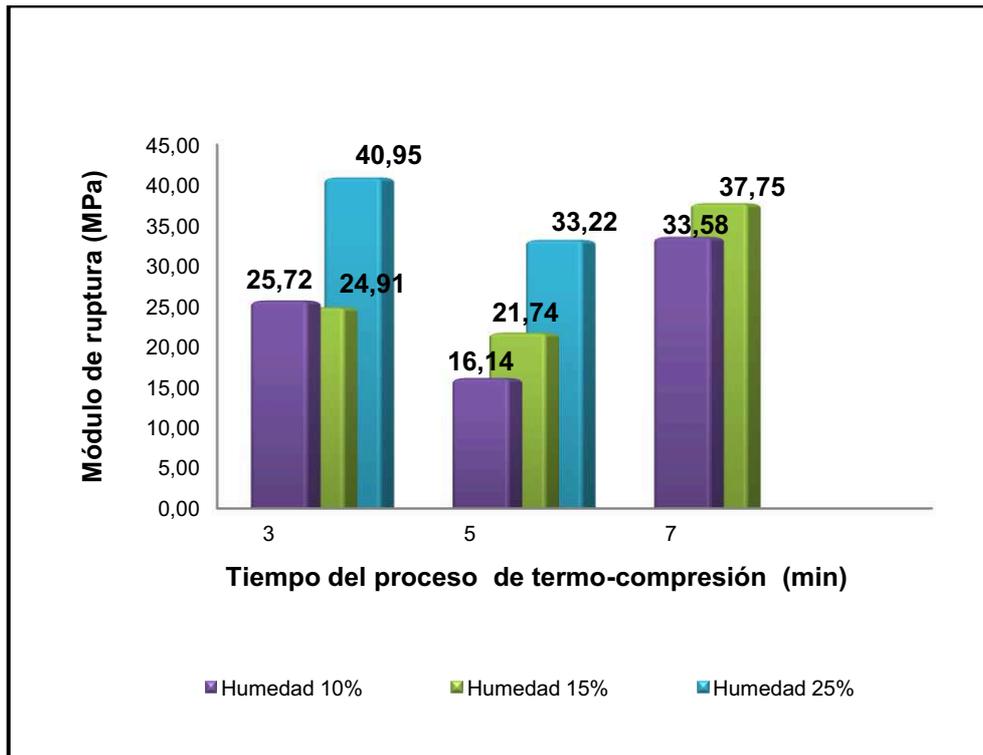


Figura 46.13 Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el módulo de ruptura de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 14 MPa y temperatura de 200 °C

A la humedad de 25 %, se observa el mismo comportamiento que presenta el proceso realizado a 160 °C mostrado en la figura 3.11, el MOR disminuye al aumentar el tiempo de prensado. Este comportamiento se debe a que parte del calor proporcionado, se utiliza para evaporar el agua ligada y otra cantidad para ablandar la lignina presente, conforme la humedad se evaporó, la temperatura de la lignina aumentó, disminuyendo así el gradiente de temperatura en el cual se genera la adhesión.

En lo referente a la humedad de 25 %, un tiempo de 7 min, bajo las condiciones de temperatura y presión antes mencionadas, fue excesivo ya que a esta temperatura posiblemente se degradó la lignina presente, produciéndose tableros quemados razón por la cual se omitió graficarlo en la figura 3.13.

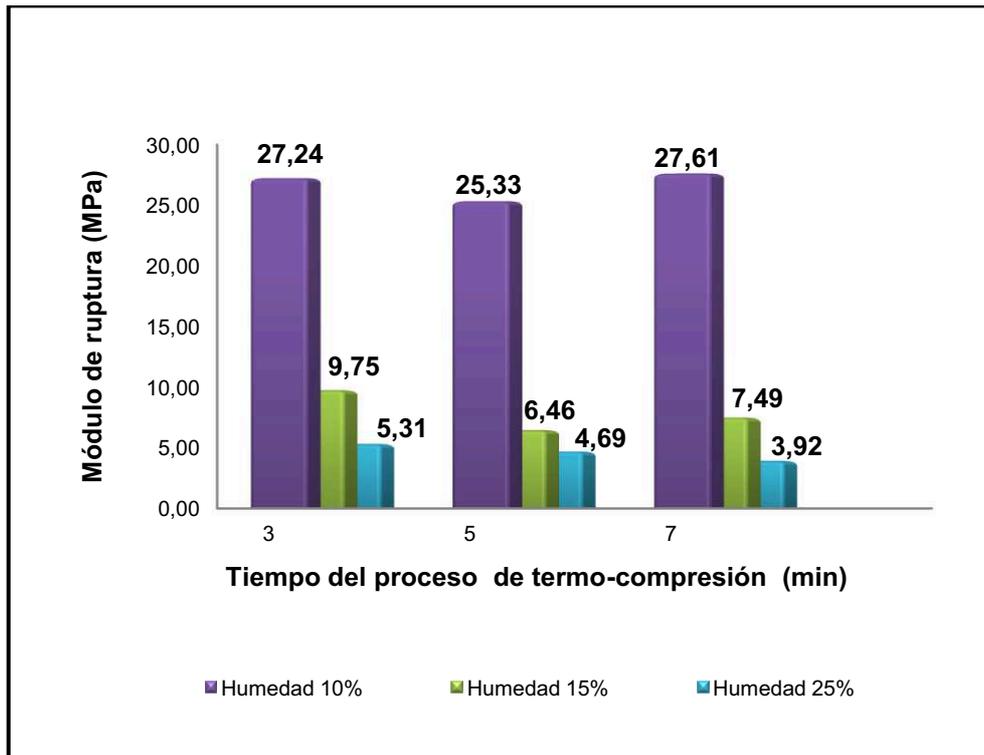


Figura 46.14 Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el módulo de ruptura de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 21 MPa y temperatura de 160 °C

Para la figura 3.14 se tiene que un tiempo de 7 min a una humedad del 10 % se consigue el valor máximo del MOR (27,61 MPa) bajo condiciones de temperatura y presión iguales a 21 MPa y 160 °C respectivamente.

En esta figura se puede observar que hay una reducción significativa del módulo de ruptura a condiciones de humedad de 15 y 25 %, además a 10 % de humedad los valores del MOR son muy cercanos al valor máximo obtenido y se podría decir que no existe influencia del tiempo en la calidad del tablero. La reducción del MOR con el aumento de humedad se produce por las razones antes mencionadas, a humedades bajo el 25 % la temperatura de ablandamiento de la lignina aumenta rápidamente, conforme se evapora la humedad, generando un gradiente pequeño de temperaturas, el cual no permite que la lignina ablandada se distribuya en toda la superficie produciendo una pobre unión entre las fibras y por ende MOR bajos.

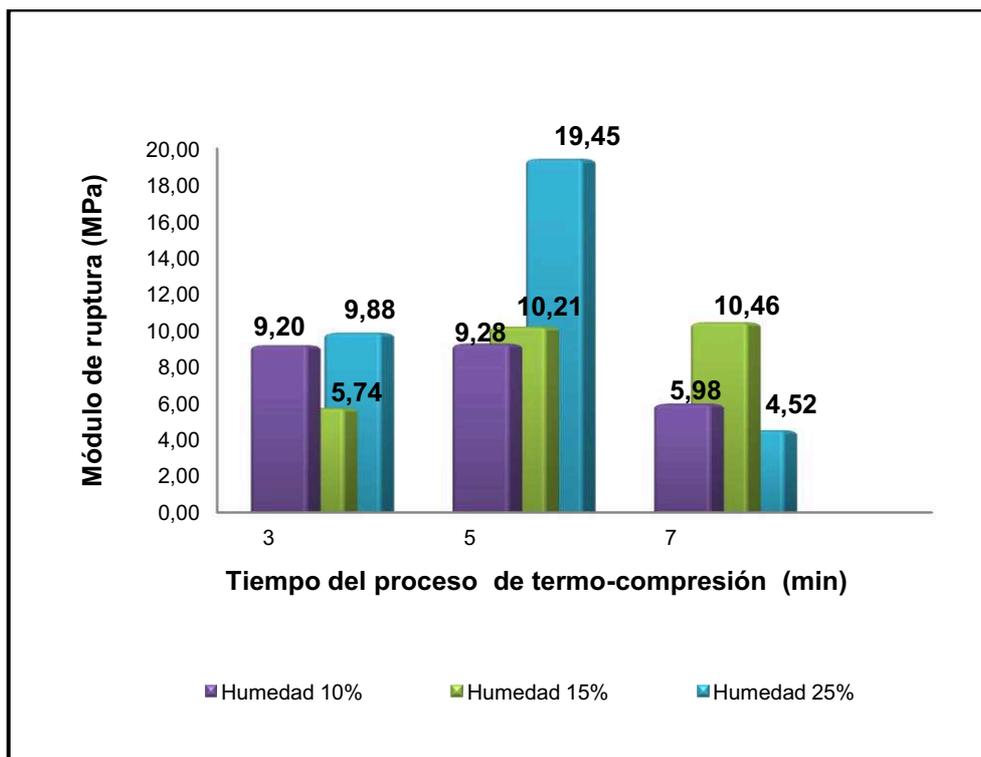


Figura 46.15 Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el módulo de ruptura de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 21 MPa y temperatura de 180 °C

En el caso de los ensayos realizados a 21 MPa y 180 °C, el máximo valor del MOR se obtiene a los 5 min a una humedad de 25 % y corresponde a 19,45 MPa como se observa en la figura 3.15, aquí se distingue también que a la humedad de 10 y 15 % los resultados de MOR son muy similares entre sí, por lo que se podría decir que el tiempo y la humedad no tienen influencia en el proceso. La presión a la cual se trabaja en estos casos (21 MPa) junto con la temperatura de trabajo, convierten la humedad de la superficie del tablero en vapor, generándose el mencionado gradiente de temperatura y además un gradiente de presión que permite que las fibras entren en contacto y que con el ablandamiento de la lignina se produzca la auto-adhesión.

El valor atípico obtenido a los 5 min a la humedad de 25 %, seguramente se debe a que durante el proceso existió una recuperación brusca de la temperatura del proceso, cuando ya la lignina alcanzó su temperatura de ablandamiento, el gradiente de temperaturas que se generó fue moderado y por lo tanto produjo un

MOR alto.

Finalmente en el gráfico 3.16 que se encuentra a continuación se muestra que el valor máximo de MOR es 13,05 MPa logrado a 3 min y 10 % de humedad bajo condiciones de temperatura y presión iguales a 200 °C y 21 MPa respectivamente.

Los valores obtenidos a excepción del valor máximo, son muy cercanos. Por falta de más muestras para ensayos, no se pudo definir si hay o no diferencia estadística, sin embargo con base en el gráfico, se puede concluir que bajo estas condiciones de presión y temperatura, ni la humedad ni el tiempo influyen en la calidad del tablero. Los ensayos realizados a 25 % de humedad bajo las condiciones de temperatura y presión antes mencionadas no arrojaron buenos resultados, debido a una posible degradación de la lignina, los tableros se obtenían quemados, razón por la cual no se graficaron.

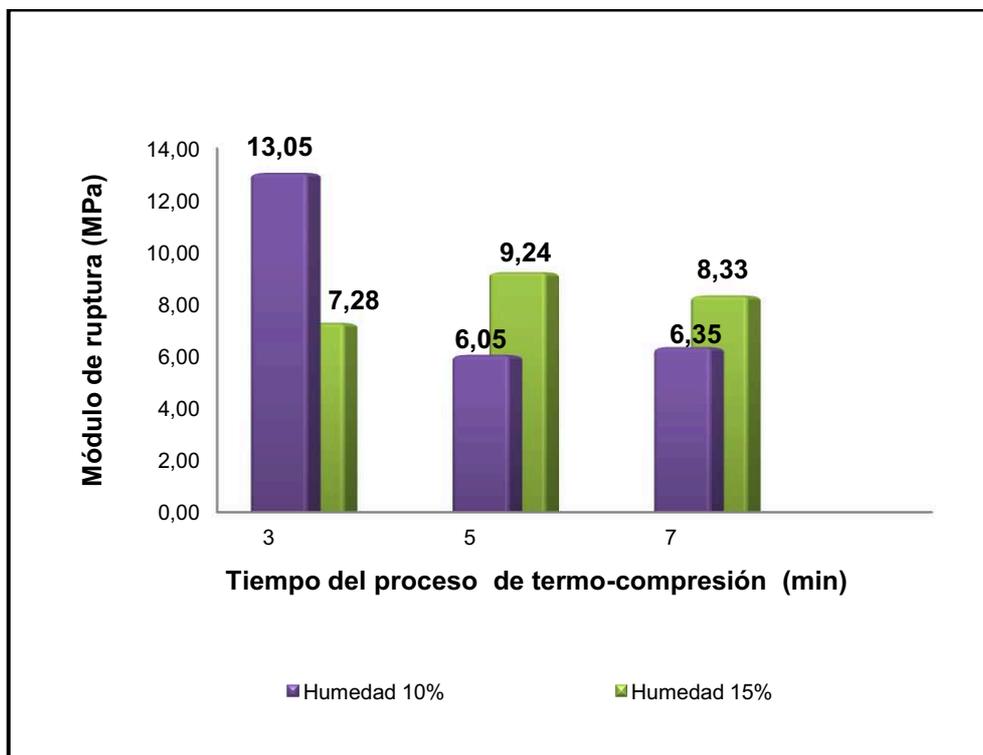


Figura 46.16 Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el módulo de ruptura de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 21 MPa y temperatura de 200 °C

Al realizar un análisis en conjunto y comparar las figuras 3.11, 3.12 y 3.13 las cuales muestran datos de MOR obtenidos a una presión igual a 14 MPa, con las figuras 3.14, 3.15 y 3.16 con datos de MOR a presión de 21 MPa, se distingue que un cambio en la presión de 14 a 21 MPa influye significativamente en el módulo de ruptura ya que ocasiona una disminución de los valores.

Los altos valores de MOR obtenidos a la mínima presión que es de 14 MPa, son una consecuencia del ablandamiento de la lignina que se ablanda y fluye en el material formando enlaces entre las fibras, las cuales no necesitan de mucha presión para entrar en contacto. Lo cual es beneficioso desde el punto de vista económico.

También se observa que no existe interacción entre la temperatura y el tiempo de prensado ya que al aumentar la temperatura los mejores resultados de MOR siempre se logran a los 3 min. Aquí la duración del prensado no favorece la formación de enlaces que mejoren el MOR, la acción de la temperatura y la humedad son suficientes para liberar las sustancias enlazantes, un período de prensado largo tan solo deterioró la resistencia de la fibra de raquis.

Por otra parte en lo que se refiere a la temperatura y humedad el aumento de estas dos variables produce MOR bajos en los tableros de raquis. Lo cual se corrobora con la información encontrada en (Álvarez et al, 2009) donde se indica que tableros aglomerados fabricados a partir de pulpa Mansonite a temperaturas de 199 y 211 °C no mostraron sensibilidad al aumento de humedad ya que a temperaturas altas los puentes de hidrógeno entre fibras no influyen sobre las propiedades mecánicas, debido a que la presencia o ausencia de agua en el proceso de formación y en el prensado no disminuye la calidad del enlace.

Por lo tanto los mejores resultados de MOR se obtienen a 160 °C tanto para los ensayos realizados a una presión de 14 MPa como para los realizados 21 MPa. Durante el proceso de termo-compresión es difícil determinar la temperatura de transición vítrea de la lignina ya que ésta depende de factores como humedad, origen, etc., según bibliografía esta temperatura se encuentra entre 135 y 190 °C,

por lo tanto al trabajar con una temperatura de 160 °C que es superior a la temperatura de transición de la lignina se facilitó el proceso.

Debido a la interacción que existe entre las 4 variables el definir con precisión el porcentaje de humedad y el tiempo a los cuales se obtienen los mejores resultados de MOR se hace complicado, sin embargo se podría decir, con base en las figuras 3.11 a 3.16, que el porcentaje de humedad y el tiempo de proceso que permiten obtener un tablero con un MOR alto son 15 % y 3 min, respectivamente, a una presión de 14 MPa.

46.4.1.2 Módulo de elasticidad aparente (MOE)

El módulo de elasticidad aparente (MOE), es una propiedad que hace referencia al esfuerzo cortante aplicado y la flexión, para su cálculo, del gráfico carga vs. deformación se obtuvo la pendiente de la curva en la zona donde presenta un comportamiento lineal.

Cabe mencionar que dichos gráficos mostraron líneas irregulares, la elongación presenta un aumento brusco en los primeros datos, tal como se observa en la figura A1 del Anexo VI, por lo cual se debió agregar una línea de tendencia que permita obtener datos aproximados del ensayo que consideren la influencia de todos los puntos y no solo de los iniciales. Ejemplos de la línea de tendencia se observan en la figura A2 del Anexo VI.

Esto generó errores en el cálculo de esta propiedad, razón por la cual algunos resultados pueden no presentar la misma tendencia que los mostrados anteriormente con el MOR. Un ejemplo de los datos obtenidos de la línea de tendencia y los resultados de esta propiedad se indican los Anexos VI y VII, respectivamente.

A continuación en la figuras 3.17, 3.18, 3.19, 3.20, 3.21 y 3.22, se muestra el efecto que presentan el contenido de humedad y el tiempo del proceso de la

termo-compresión en el módulo de elasticidad aparente de los tableros obtenidos.

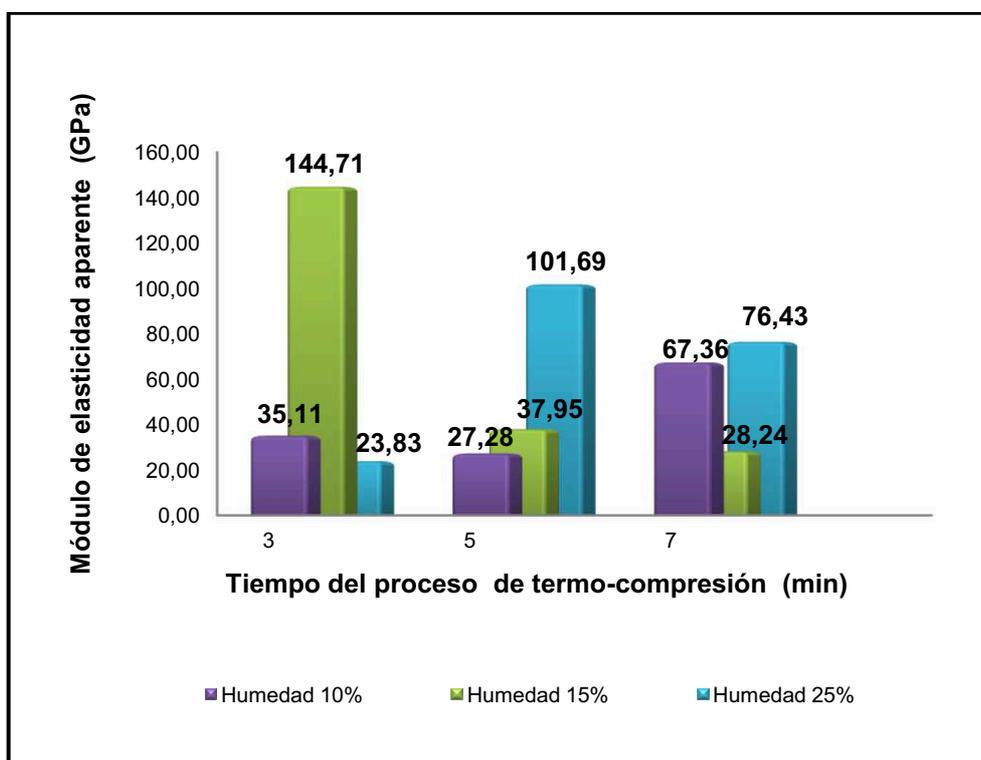


Figura 46.17 Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el módulo de elasticidad aparente de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 14 MPa y temperatura de 160 °C

En la figura 3.17 se observa que el máximo valor de MOE (144,71 GPa) fue obtenido con un 15 % de humedad y con un período de prensado en caliente de 3 min a una temperatura de 160 °C y presión de 14 MPa.

A la humedad de 10 %, el MOE aumenta al incrementar el tiempo de prensado, sin embargo a la humedad de 15 %, se observa que el aumento del tiempo no beneficia a el MOE, los valores de MOE disminuyen bruscamente. Aquí las fibras entran en un contacto íntimo en un corto período de tiempo, debido a que el gradiente de temperatura que se originó al inicio fue grande, ya que a mayor humedad contenida en la fibra, menor es la temperatura de ablandamiento de la lignina, al aumentar el tiempo de prensado, solo se produce la degradación de la lignina presente en la fibra. Con la humedad de 25 % por su parte, el MOE alcanza su máximo a los 5 min.

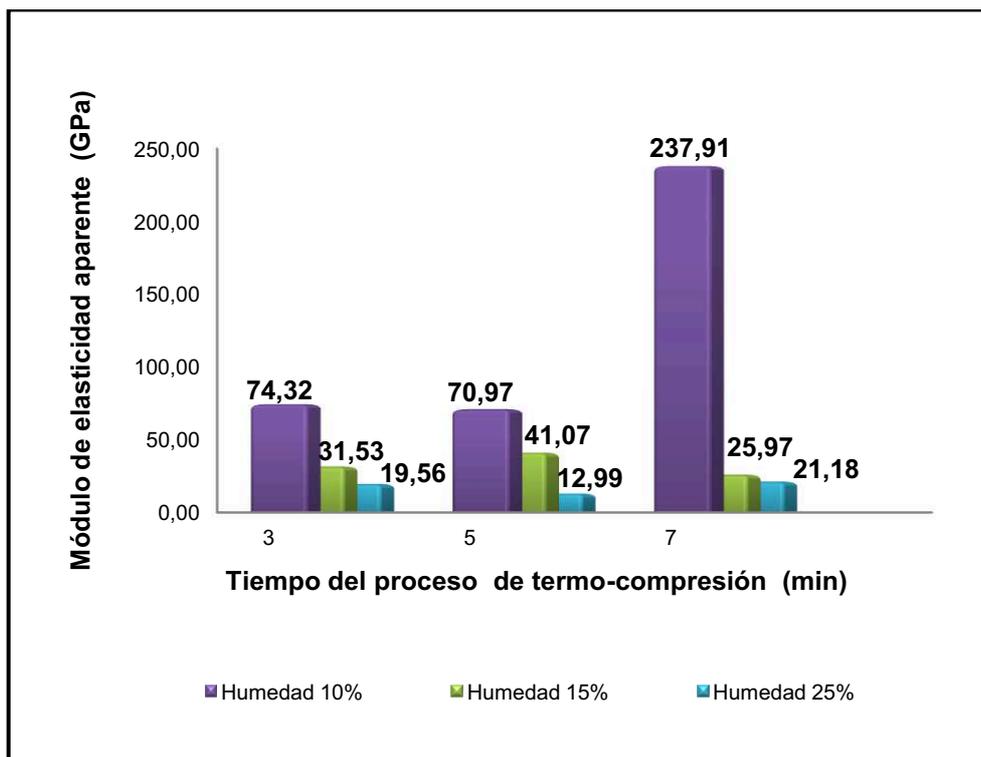


Figura 46.18 Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el módulo de elasticidad aparente de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 14 MPa y temperatura de 180 °C

Para el ensayo realizado a una presión 14 MPa y 180 °C, el máximo valor de MOE (237,91 GPa) se logra a un tiempo de 7 min y 10 % de humedad como se indica en la figura 3.18.

A una humedad del 10 % el aumento del tiempo produce una mejora en el MOE, esto se debería a que el calor suministrado a esta temperatura fue el necesario para evaporar el agua ligada de las fibras y a medida que la humedad en ellas disminuyó, la temperatura de ablandamiento de la lignina aumentó, sin embargo ya que se utiliza menos energía para evaporar el agua ligada, el calor sobrante aumenta la temperatura del tablero, estableciéndose un gradiente considerable de temperatura entre la temperatura del tablero y temperatura de ablandamiento de la lignina, lo que permitió que esta fluya; y al haber mayor tiempo de contacto entre las fibras, se promovió la formación de un mayor número de enlaces. En la humedad del 15 % y 25 % ocurre todo lo contrario, se observa que hay una disminución significativa del módulo de elasticidad aparente. La reducción del MOE con el aumento de humedad, como se indicó anteriormente, se debe a que a

humedades bajo el 25 %, la temperatura de ablandamiento de la lignina aumenta rápidamente, conforme se evapora la humedad, generando un gradiente pequeño de temperaturas, debido a que, el calor evapora la mayor cantidad de humedad haciendo que la temperatura del tablero no se incremente como se incrementa al 10% de humedad, lo cual no permite que la lignina ablandada se distribuya en toda la superficie produciendo poca unión entre las fibras y por ende MOE bajos.

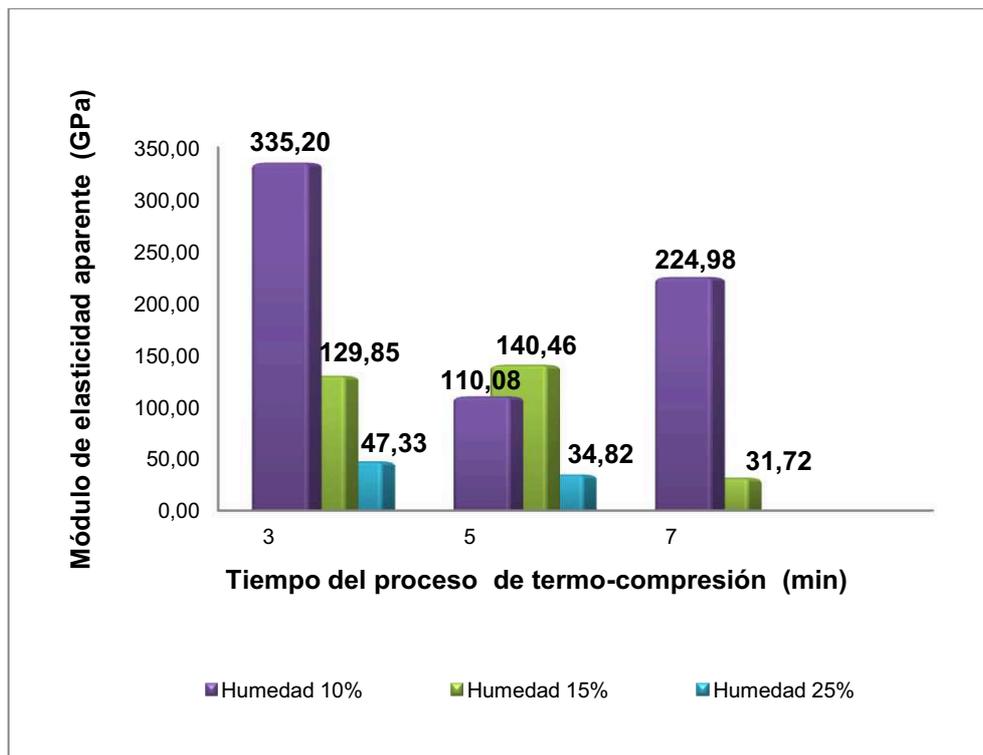


Figura 46.19 Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el módulo de elasticidad aparente de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 14 MPa y temperatura de 200 °C

En la figura 3.19 por su parte se observa que a 3 min y 10 % de humedad se logra el máximo valor de MOE (335,20 GPa) a una temperatura de 200 °C y 14 MPa.

Para la humedad de 10 % el MOE disminuye al incrementar el tiempo de prensado de 3 a 5 min, y aumenta a los 7 min. Este comportamiento se debe a que, al aumentar el tiempo de prensado, la humedad de la fibra disminuyó y por consiguiente la temperatura de ablandamiento de la lignina aumentó, lo que redujo el gradiente de temperatura originado entre la temperatura del tablero y la

temperatura de la lignina; reduciéndose por ende la formación de enlaces, sin embargo a los 7 min de prensado posiblemente la lignina ya alcanzó su temperatura de ablandamiento y la energía suministrada por la temperatura de 200 °C ya no es consumida para dicho ablandamiento, sino para calentar el tablero, elevando así su temperatura, provocando un gradiente nuevamente significativo que mejoró las condiciones para que se den los vínculos entre las fibras.

Por otra parte a humedades de 15 y 25 % el módulo de elasticidad aparente disminuye, como ya se explicó anteriormente, la temperatura que el tablero alcanza a la humedad de 25 % es menor que la temperatura que el tablero alcanza a la humedad de 15 %, con ello el gradiente de temperatura a la humedad de 25 % es menor que el gradiente generado a la humedad de 15 %, por lo cual al aumentar el porcentaje de humedad en las fibras el MOE de los tableros auto-adheridos disminuye.

Además a la humedad de 25 %, un tiempo de 7 min, fue extremado, ya que se obtuvo un tablero en malas condiciones (quemado), un aumento de temperatura y presión excesivo deteriora la fibra, degrada la lignina, y por este motivo no se determinó el valor del MOE.

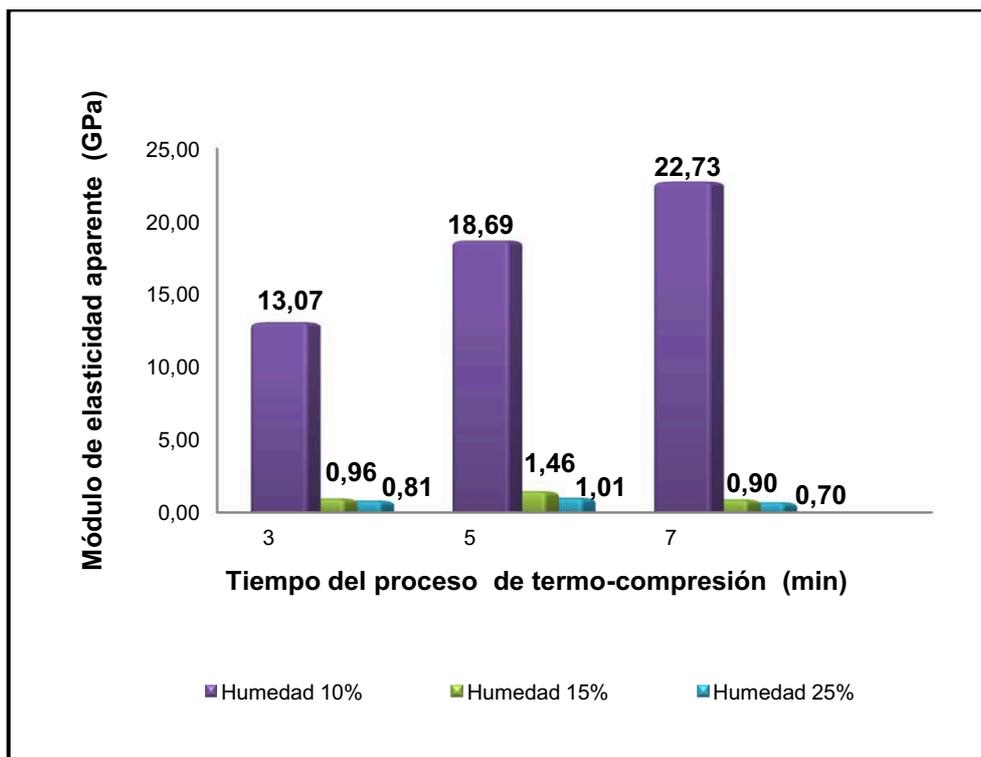


Figura 46.20 Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el módulo de elasticidad aparente de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 21 MPa y temperatura de 160 °C

Para la figura 3.20 se tiene que un tiempo de 7 min a una humedad del 10 % se consigue el valor máximo del MOE (22,73 GPa) bajo condiciones de temperatura y presión iguales a 21 MPa y 160 °C, respectivamente.

Para la humedad del 10 % el aumento en el tiempo de prensado presenta una influencia positiva en el MOE, como se ha venido explicando, a medida que la humedad del tablero disminuye, la temperatura de ablandamiento de la lignina aumenta, lo cual genera un gradiente entre la temperatura del proceso y la de ablandamiento que aumenta con el tiempo de prensado, beneficiando la formación de enlaces entre las fibras.

En esta figura se puede observar también que hay una reducción significativa del módulo de ruptura a condiciones de humedad de 15 y 25 %. La reducción del MOE con el aumento de humedad se produce por las razones antes mencionadas, conforme la humedad del tablero se evaporó, la temperatura de

ablandamiento de la lignina fue en aumento, sin embargo, al trabajar con una temperatura baja igual a 160 °C, el gradiente de temperatura fue pequeño y no permitió que las fibras entren en contacto con la lignina ablandada, produciéndose una pobre unión entre las fibras. Además el aumento de presión de 14 a 21 MPa, junto con la acumulación de vapor de agua dentro del material, generaron un gradiente de presión, que no permitió la relajación de la tensión del tablero durante el prensado, produciendo la degradación del material, razón por la cual, a humedades del 15 y 25 % es notoria la poca influencia que tiene el tiempo sobre el MOE.

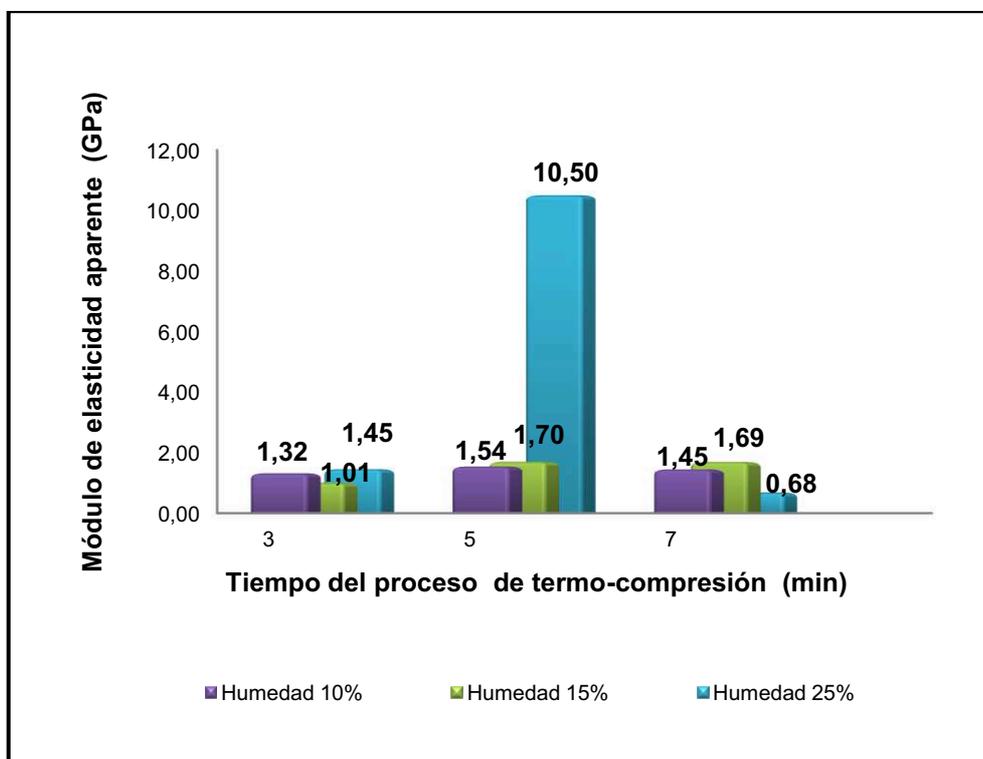


Figura 46.21 Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el módulo de ruptura de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 21 MPa y temperatura de 180 °C

En el caso de los ensayos realizados a 21 MPa y 180 °C, el máximo valor del MOE se obtiene a los 5 min a una humedad de 25 % y corresponde a 10,50 GPa, como se observa en la figura 3.21, aquí se distingue también que a la humedad de 15 % y 25 % los resultados de MOE disminuyen significativamente.

El máximo valor de MOE obtenido bajo estas condiciones de presión y temperatura, es un valor atípico que seguramente se debe a una recuperación brusca de la temperatura del proceso después de que la lignina alcanzó su temperatura de ablandamiento, razón por la cual el gradiente de temperatura que se generó fue moderado y por lo tanto permitió la formación de un mayor número de enlaces entre las fibras, lo que produjo un valor relativamente alto de esta propiedad.

Los valores del MOE para las humedades de 10 y 15 % casi no presentan diferencias significativas, por lo que se podría decir que el tiempo y la humedad no influyen en esta propiedad a estas condiciones de presión y temperatura, lo que seguramente se debió a una degradación de la lignina de la fibra durante el proceso.

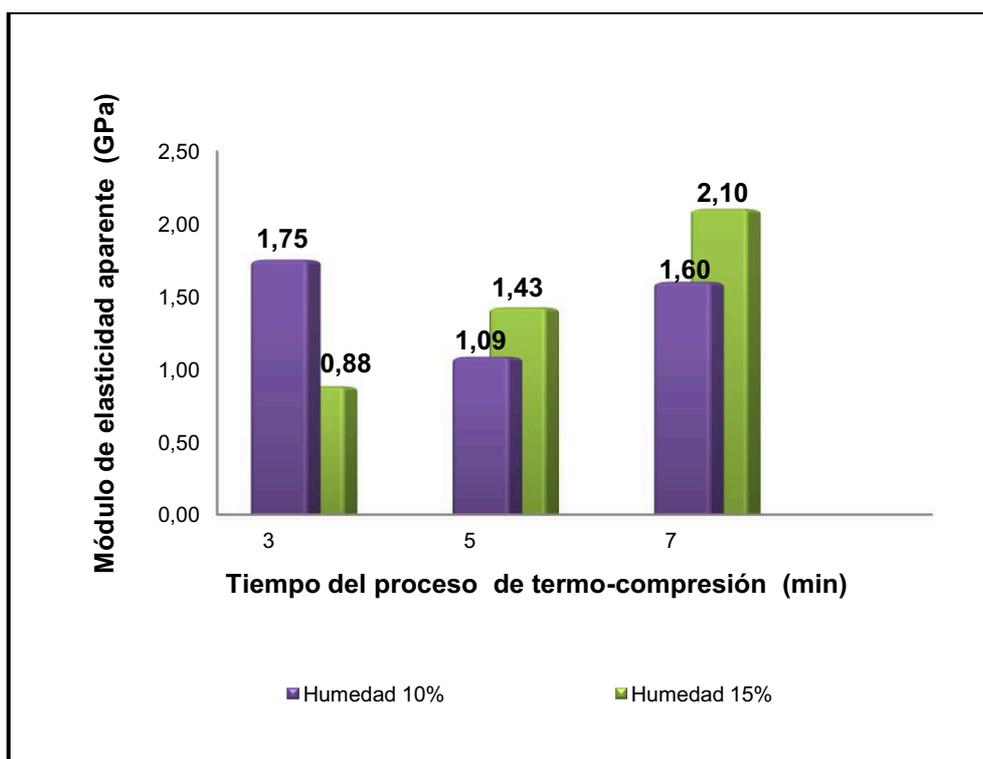


Figura 46.22 Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el módulo de ruptura de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 21 MPa y temperatura de 200 °C

Finalmente en el gráfico de la figura 3.22 se muestra que el valor máximo de MOE es 2,10 MPa logrado a 7 min y 25 % de humedad bajo condiciones de temperatura y presión iguales a 200 °C y 21 MPa respectivamente.

Si bien la presión permite mantener en un contacto más íntimo a las fibras y junto con la temperatura hacen posible que la lignina fluya y se distribuya en toda la superficie del tablero; a las condiciones de presión de 21 MPa se produce una degradación de la fibra, tanto la lignina como la celulosa que constituyen las fibras se encuentran sometidas a una temperatura excesiva, debido a que la transferencia de calor a dicha presión se realiza eficientemente. Dicha degradación hace que las fibras reduzcan su resistencia.

Al aumentar el porcentaje de humedad en las fibras, este comportamiento se ve aún más afectado, ya que además del exceso de temperatura, el vapor de agua producto del secado de la fibra no permite la relajación de las tensiones dentro del tablero, provocando que este se agriete o fracture.

En términos generales, al igual que con el módulo de ruptura MOR, el módulo de elasticidad aparente MOE presenta mejores valores cuando se trabaja con una presión de 14 MPa, lo cual se puede apreciar al comparar las figuras 3.17, 3.18 y 3.19 con las figuras 3.20, 3.21 y 3.22. La temperatura a la cual el proceso origina los mejores MOE es 200 °C, en lo referente a su interacción con la humedad los mejores resultados se obtienen con humedades de 10 %. A pesar de que en bibliografía (Okuda et al, 2006) se muestra que cuando la temperatura del proceso está por debajo de 180 °C, el MOE mejora a medida que la humedad aumenta, los tableros de raquis no presentan esta tendencia.

En cuanto a la interacción de la temperatura con el tiempo de prensado, los cambios de MOE son significativos, se observa que a tiempos cortos la temperatura tiene una influencia positiva, ya que genera valores altos de MOE. Resultados obtenidos por Bouajila (2005) y otros mostraron que las propiedades mecánicas de los tableros aglomerados auto-adheridos incrementan con mayores tiempos de prensado, sin embargo los mejores resultados con fibra de raquis se

logran a tiempos cortos. Los mejores resultados al igual que en el MOR se logran a los 3 min.

46.4.2 TRACCIÓN PERPENDICULAR A LA SUPERFICIE

Esta prueba se la realiza para conocer la capacidad de cohesión de las partículas del tablero aglomerado en la dirección perpendicular al plano del tablero.

Esfuerzo perpendicular a la superficie (TP)

El esfuerzo perpendicular a la superficie permite analizar el enlace inter-fibra, el cual domina la resistencia a la tensión perpendicular a las caras ya que las fibras se orientan principalmente en el plano del tablero. Los datos requeridos para el cálculo del esfuerzo perpendicular al plano y los resultados obtenidos se exponen en el Anexo VI y Anexo VII. A continuación en la figuras 3.23, 3.24, 3.25, 3.26, 3.27 y 3.28 se muestra el efecto que presentan el contenido de humedad y el tiempo del proceso de la termo-compresión en esta propiedad.

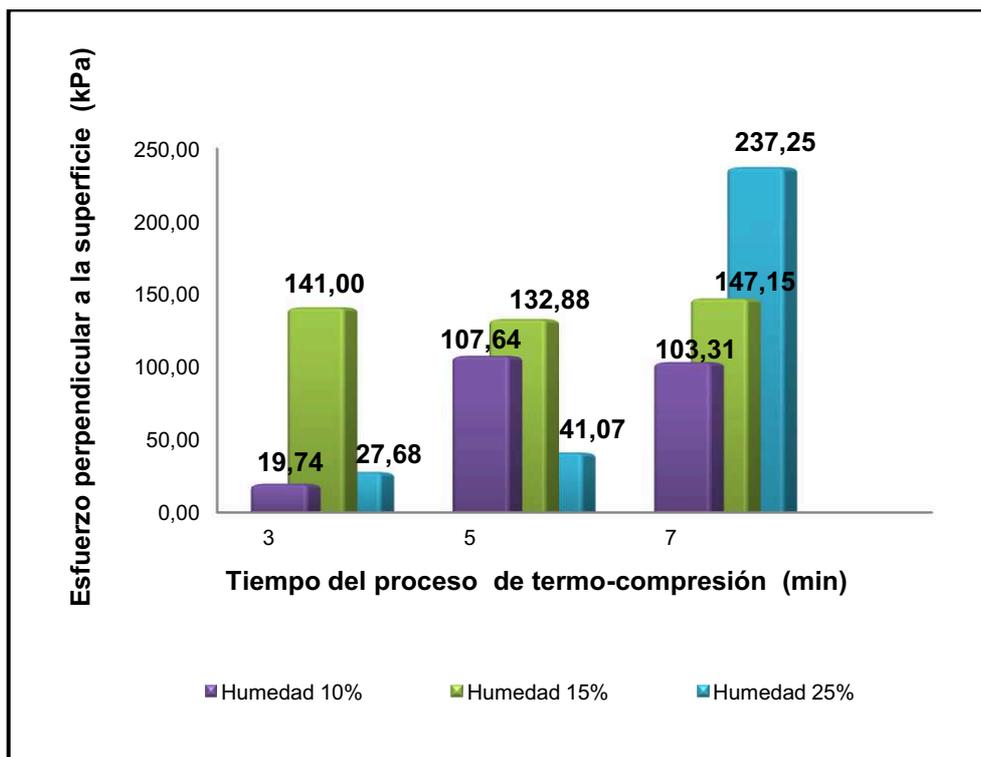


Figura 46.23 Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el esfuerzo perpendicular a la superficie de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 14 MPa y temperatura de 160 °C

En la figura 3.23 se observa que el máximo valor del esfuerzo (237,25 kPa) fue obtenido con un 25 % de humedad y con un período de prensado en caliente de 7 min a una temperatura de 160 °C y presión de 14 MPa. Se observa también que a humedades de 10 y 15 % existe interacción entre la humedad y el tiempo de prensado, ya que a mayor humedad y mayor tiempo de prensado se obtienen tableros con mejores valores de esfuerzo perpendicular. Con la humedad de 25 % se observa un cambio brusco de esta propiedad con el aumento del tiempo, este aumento se debió seguramente a que, una vez que la lignina alcanzó su temperatura de transición vítrea, la energía que se suministra al proceso es aprovechada solo para el secado del tablero, y por lo tanto la temperatura del proceso alcanza un valor más alto lo que generó un gradiente también alto, favoreciendo la auto-adhesión

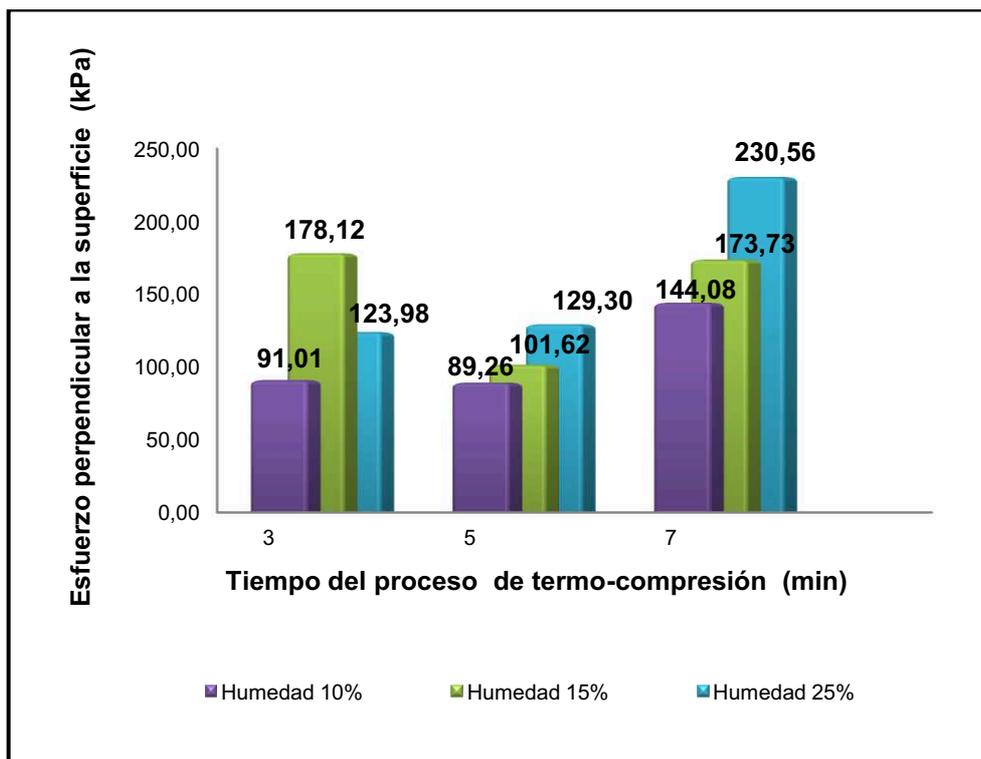


Figura 46.24 Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el esfuerzo perpendicular a la superficie de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 14 MPa y temperatura de 180 °C

Para el ensayo realizado a 14 MPa y 180 °C, el máximo valor del esfuerzo perpendicular (230,56 kPa) se logra a un tiempo de 7 min y 25 % de humedad como se indica en la figura 3.24.

A humedades de 10 y 25 % se observa un aumento de esta propiedad con el aumento de tiempo de prensado, debido a que las fibras entran en contacto por un período más largo mejorando el fenómeno de la auto-adhesión, además el aumento del contenido de humedad promovió la formación de enlaces hidrógeno, razón por la cual los valores del MOE, al 25 % de humedad, son mayores. Con la humedad de 15 % se observa una disminución de esta propiedad a los 5 min, lo cual podría corresponder a un error en los ensayos, ya que esta prueba involucra varios pasos (como se indica en la parte experimental) que no fueron realizados adecuadamente.

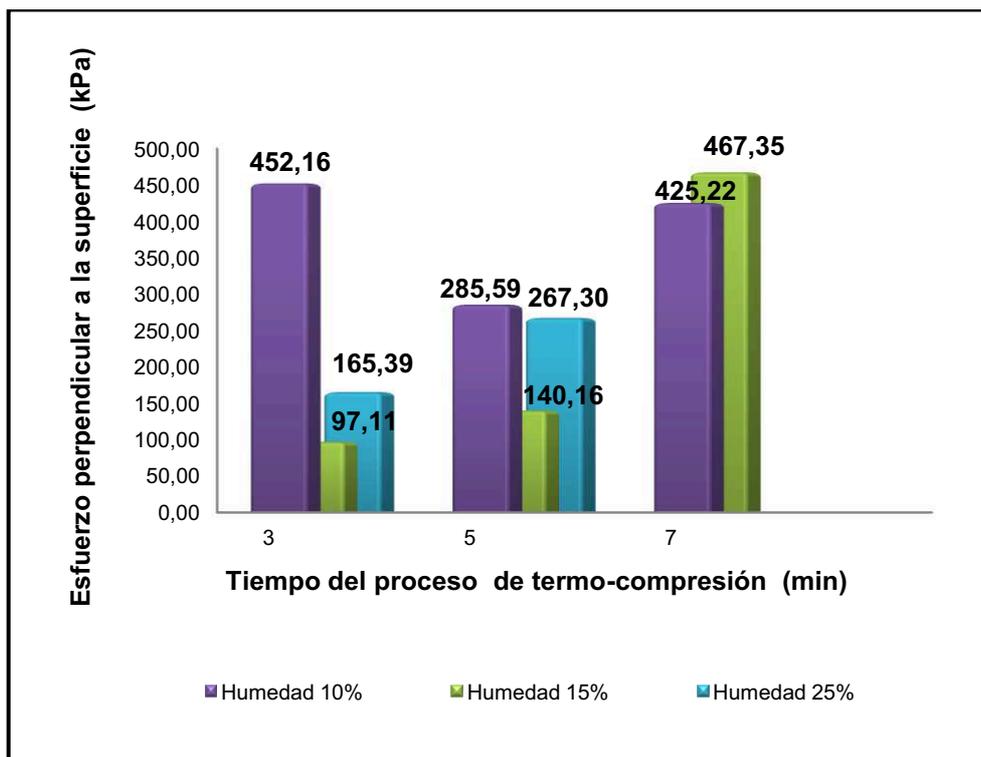


Figura 46.25 Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el esfuerzo perpendicular a la superficie de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 14 MPa y temperatura de 200 °C

En la figura 3.25 se observa que a 7 min y 15 % de humedad se logra el máximo valor del esfuerzo perpendicular (467,35 kPa) a una temperatura de 200 °C y 14 MPa.

A la humedad de 10 % se logran valores altos que disminuyen conforme aumenta el tiempo de prensado, debido al gradiente de temperatura que se generó, ya que a media que se evapora la humedad, la temperatura de ablandamiento de la lignina aumenta, generando un gradiente cada vez más pequeño, que influye negativamente en las propiedades mecánicas de los tableros.

En lo referente a la humedad de 25 %, un tiempo de 7 min, fue excesivo ya que se obtuvo un tablero en malas condiciones (quemado) y no se graficó.

Al comparar los resultados obtenidos en las figuras 3.23, 3.24 y 3.25 se observa que los mejores resultados de esfuerzo se obtienen a los 7 min y a un contenido

de humedad de 25 % en su mayoría, y mejoran conforme aumenta la temperatura. Este comportamiento se debe posiblemente a la transferencia de calor hacia el interior del tablero desde las placas de la prensa, ya que cuando el tiempo fue corto, en el centro del tablero la temperatura fue menor que en su superficie, y a medida que el tiempo de prensado y la temperatura aumentaron, se mejoró la eficiencia del proceso, con lo cual se generó mejores enlaces entre las fibras, debido a un buen ablandamiento de la lignina.

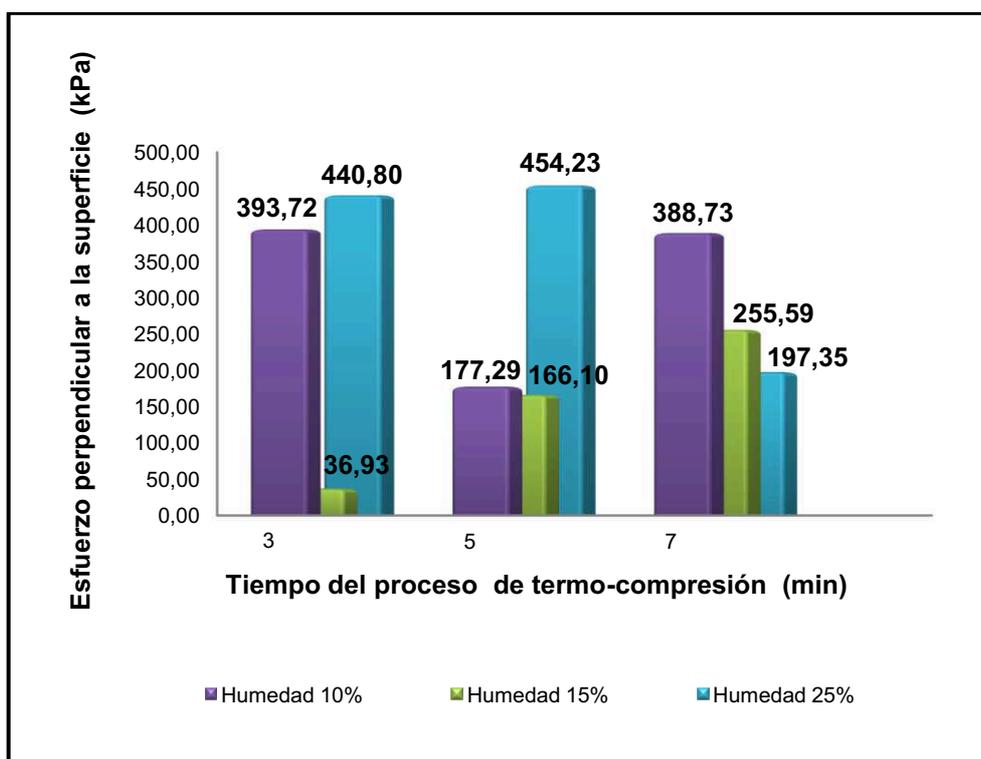


Figura 46.26 Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el esfuerzo perpendicular a la superficie de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 21 MPa y temperatura de 160 °C

Para la figura 3.26 se tiene que a un tiempo de 5 min y una humedad del 25 % se consigue el valor máximo del esfuerzo perpendicular (454,23 kPa) bajo condiciones de temperatura y presión iguales a 21 MPa y 160 °C respectivamente.

En esta figura se puede observar que hay una reducción significativa del esfuerzo perpendicular a condiciones de humedad de 15 %, el aumento en la presión junto con la temperatura del proceso provocó que la humedad de la superficie del

tablero se convierta en vapor, generándose un gradiente de presión que no permitió que las tensiones del tablero se relajen durante el prensado, y por lo tanto el esfuerzo perpendicular disminuya a estas condiciones de humedad. Además en la figura también se observa que a 10 % de humedad los valores de dicho esfuerzo son cercanos al valor máximo obtenido.

Durante el proceso de la termo-compresión se genera una competición entre la temperatura de secado de la fibra y la temperatura de ablandamiento de la lignina, al trabajar con un mayor contenido de humedad, una mayor parte de la energía proporcionada se encarga de evaporar la humedad con lo cual, la temperatura de ablandamiento de la lignina no aumenta con rapidez, y con ello el gradiente de temperaturas que se generó al 25 % de humedad, fue mayor que el generado a las humedades de 10 y 15 %, promoviéndose el contacto entre las fibras y por ende la formación de los enlaces entre ellas.

En el caso de los ensayos realizados a 21 MPa y 180 °C, el máximo valor del MOR se obtiene a los 5 min a una humedad de 15 % y corresponde a 19,45 MPa como se observa en la figura 3.27, aquí se distingue también que a la humedad de 10 % y un tiempo de 5 min el valor del esfuerzo es muy similar al mayor.

En este caso también se observa que un aumento en la humedad reduce el esfuerzo perpendicular, debido a la generación del gradiente de presión que se mencionó anteriormente, el cual produce que las tensiones dentro del tablero no se relajen reduciendo la calidad del tablero, lo cual se evidencia en la reducción de esta propiedad.

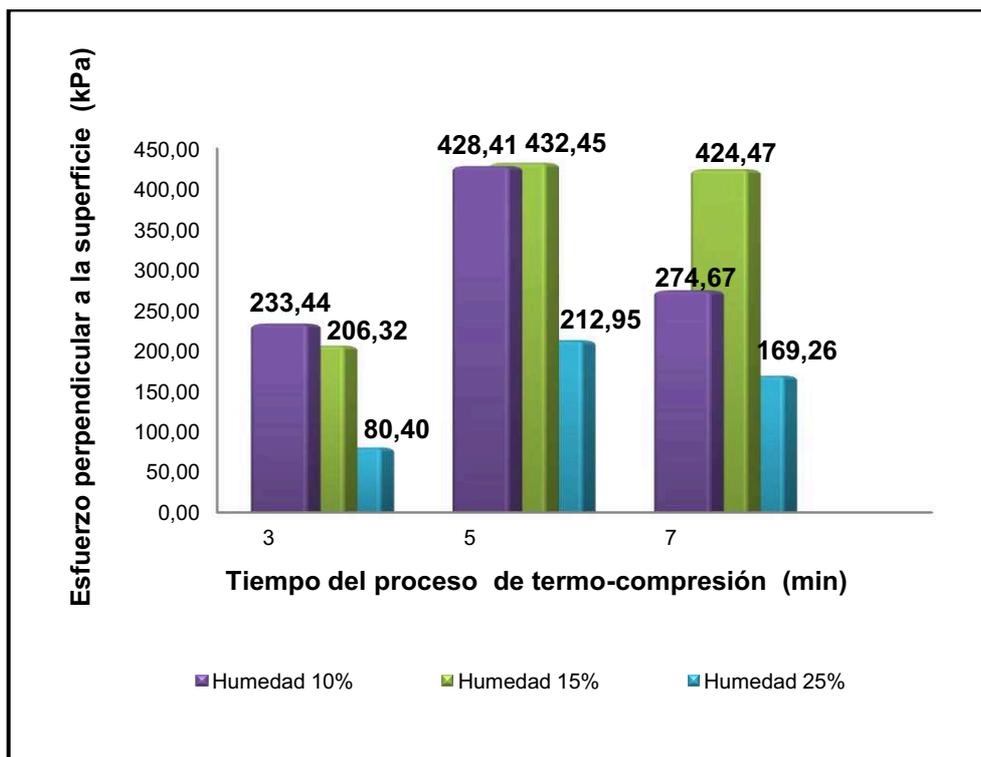


Figura 46.27 Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el esfuerzo perpendicular a la superficie de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 21 MPa y temperatura de 180 °C

Finalmente en el gráfico 3.28 se muestra que el valor máximo del esfuerzo es 497,32 MPa logrado a 7 min y 15 % de humedad bajo condiciones de temperatura y presión iguales a 200 °C y 21 MPa respectivamente.

A la humedad del 10 % los valores del esfuerzo perpendicular se ven influenciados positivamente por el tiempo de prensado, ya que un período más largo de tiempo permitió que la transferencia de calor sea más eficiente, lo que produjo que la lignina se ablande y fluya en toda la superficie del tablero. Al incrementar la humedad a 15 %, se produjo una disminución de esta propiedad en los primeros tiempos, sin embargo, se observa un aumento brusco a los 7 min, este aumento se debió a que, una vez que la lignina alcanzó su temperatura de ablandamiento, la energía suministrada al proceso se usó solo para el secado del tablero, con lo cual la temperatura del proceso alcanzada fue mayor y generó un gradiente alto, así el contacto entre las fibras mejoro y por lo tanto los enlaces entre ellas.

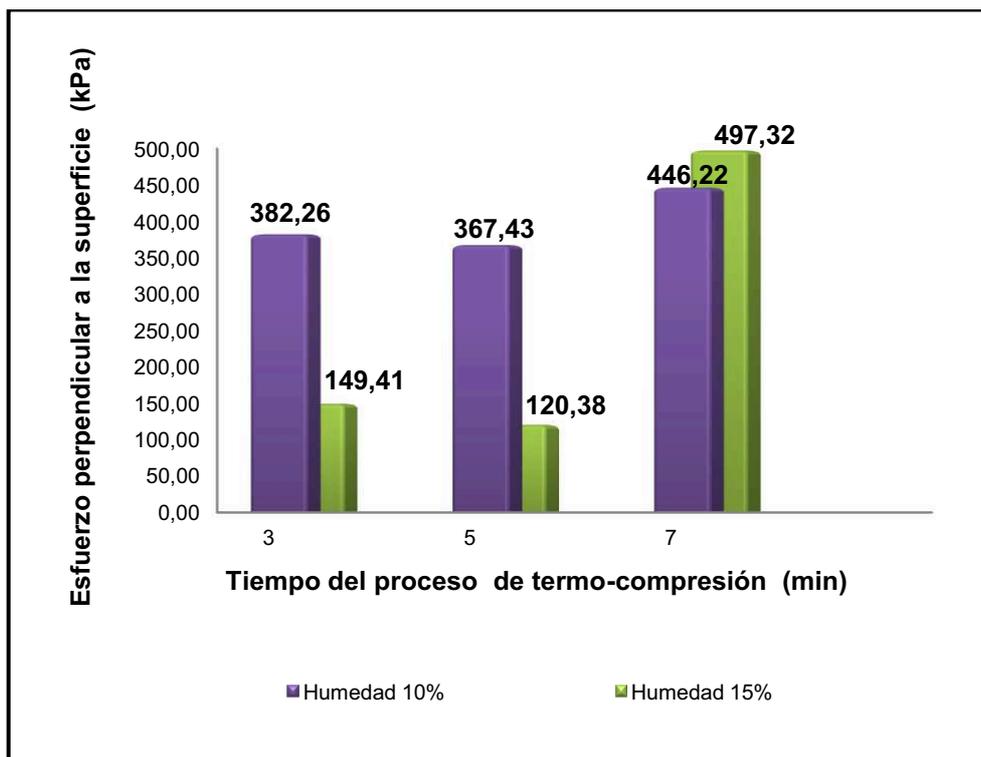


Figura 46.28 Efecto del contenido de humedad y tiempo del proceso de termo-compresión en el esfuerzo perpendicular a la superficie de los tableros aglomerados auto-adheridos elaborados a una presión de 21 MPa y temperatura de 200 °C

Los ensayos realizados a 25 % de humedad bajo las condiciones de temperatura y presión antes mencionadas no arrojaron buenos resultados, los tableros se obtenían quemados debido a la degradación de la lignina, y por lo tanto no se muestran en el gráfico.

Al analizar en conjunto los resultados obtenidos se observa que el esfuerzo perpendicular a la superficie presenta un comportamiento diferente al que muestran tanto el MOR como el MOE, y es lo correcto, ya que la prueba de flexión compromete todos los planos de la muestra, a diferencia, el ensayo de tracción perpendicular a la superficie se aplica únicamente al plano más débil. En la prueba de flexión estática las probetas se rompieron y dividieron en dos partes, la primera fractura se observó en su cara inferior, en cambio, en el ensayo de tracción perpendicular, las dos caras (superior e inferior) de las probetas fueron separadas.

La preparación de las muestras además, en esta prueba involucra varios pasos y

cada paso podría incrementar un error.

En las figuras antes observadas se identifica que a mayor presión, mayor es el valor del esfuerzo perpendicular, debido a que, al incrementar la presión se logra una mejor compactación, se reduce el espesor y por lo tanto las fibras entran en contacto íntimo, la transferencia de calor por lo tanto es más eficiente lo que permite que se realicen tanto las uniones inter-fibrilares como los intra-fibrilares.

Además se observa que este aumento de la presión hace que los resultados mejoren a menor tiempo de prensado. Las condiciones que permiten obtener un tablero aglomerado con esfuerzos perpendiculares altos fueron: presión de 21 MPa, temperatura de 200 °C, durante 7 min con un contenido de humedad del 15 %.

46.4.3 ABSORCIÓN DE AGUA E HINCHAMIENTO

Los tableros de fibra de raquis auto-adheridos mostraron no ser resistentes a la humedad, en el desarrollo de la prueba de absorción de agua e hinchamiento los tableros se desintegraron al poco tiempo de ser sumergidos en el agua. Por bibliografía consultada se tiene conocimiento de que la estabilidad dimensional de los tableros está relacionada con la cantidad de hemicelulosas presentes en el material lignocelulósico, ya que la hidrólisis de estas en el pre tratamiento proporciona al material resistencia al agua. De la caracterización química realizada al raquis en el principio de esta investigación, se obtuvo que la cantidad de hemicelulosas presentes en el raquis fue muy baja comparada con la de bibliografía, lo cual en este punto, es un indicio de las posibles causas de la pobre estabilidad dimensional que mostraron los tableros obtenidos.

La degradación de las hemicelulosa obtenida durante un pre tratamiento con vapor genera carbohidratos de bajo peso molecular entre otros compuestos los cuales, bajo la acción de la presión y el calor se vuelven a aglomerar formando nuevos enlaces entre ellos y con las ligninas del material, enlazando así a las

fibras; en el procedimiento utilizado en esta investigación no se realizó un pre tratamiento severo como es la explosión de vapor, lo cual podría ser otra de las causas, ya que el proceso realizado de humidificación no descompuso por completo las hemicelulosas presentes en las fibras, por ende el fenómeno de auto-adhesión se dio solo entre las ligninas de la fibras, formándose solo vínculos inter-fibrilares provocados por los enlaces de hidrógeno.

47.

C

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

47.1 CONCLUSIONES

- La caracterización química realizada a la fibra de raquis de palma africana bajo los métodos indicados en las normas TAPPI permitió obtener datos de sus componentes comparables con los encontrados en bibliografía. Permitted además actualizar la información ya que la única caracterización de raquis de palma encontrada en el Ecuador data de 1984.
- Los resultados de la determinación de celulosa indican que el raquis al igual que los demás materiales lignocelulósicos, tiene a la celulosa como su principal constituyente ya que representa el 69,83 % del peso total, por lo tanto puede ser utilizado en muchas de las aplicaciones propias de los materiales lignocelulósicos.
- El valor del contenido de lignina obtenido en los ensayos es suficiente para reemplazar el uso de resinas sintéticas y desempeñar el papel de adhesivo en la elaboración de tableros aglomerados ya que en esta industria se necesitan de 8 a 12 % en peso de resina, y el contenido de lignina determinado es de 16 %.
- El análisis correspondiente a grasas ceras y resinas indica que el raquis tiene un alto contenido de aceite residual como resultado del proceso de esterilización que se utiliza en el país para separar los frutos de racimos frescos.
- En lo referente a la solubilidad en hidróxido de sodio al 1 % y en agua caliente los datos obtenidos indican que la fibra de raquis es un material vulnerable al ataque de hongos por lo tanto su almacenamiento debe ser realizado bajo condiciones de humedad y temperatura controladas.

- En la caracterización física y mecánica realizada a la fibra de raquis se determinó que la fibra presenta un título igual a $87,4 \pm 7,0$ Tex con un nivel de confianza del 95 %. La tenacidad y elongación a la ruptura son iguales a $9,9 \pm 1,1$ cN/Tex y $10,6 \pm 1,4$ % respectivamente, estos resultados mostraron una distribución normal.
- El diámetro de la zona central de la fibra de raquis presenta una diferencia estadísticamente significativa con el diámetro de la zona externa. Los valores obtenidos son, diámetro zona central del raquis $32,9 \pm 2,9$ μm y diámetro zona externa $337,6 \pm 29,5$ μm .
- En las pruebas preliminares se determinó que las variables que intervinieron directamente en la calidad del tablero aglomerado auto-adherido fueron: temperatura, presión, tiempo y contenido de humedad de la fibra.
- Se evaluó el efecto que cada variable tuvo sobre la calidad del tablero en base a sus propiedades mecánicas, siguiendo los procedimientos de la norma ASTM D – 1037, la cuales fueron adaptadas debido a que los tableros obtenidos no presentaban las dimensiones requeridas para los ensayos.
- Las pruebas realizadas fueron: flexión estática y tracción perpendicular a la superficie. Los ensayos de absorción de agua e hinchamiento no se pudieron llevar a cabo debido a que el material obtenido resultó no ser resistente al agua.
- Las propiedades medidas en la prueba de flexión estática fueron el módulo de ruptura (MOR), el módulo de elasticidad aparente (MOE), y en la prueba de tracción perpendicular a la superficie, el esfuerzo perpendicular a la superficie.
- La presión presentó una influencia negativa en el MOR y MOE, ya que con su incremento estas propiedades bajaron considerablemente.

- A presiones bajas, el MOR y MOE disminuye conforme se aumenta la humedad y el tiempo de prensado.
- Los mejores resultados del MOR se obtienen a una temperatura de 160 °C, una presión de 14 MPa, con un porcentaje de humedad presente en la fibra de 15 % y una duración del presado de 3 min.
- La interacción entre la temperatura y el tiempo de prensado produce cambios significativos en el MOE, el cual se incrementa a mayor temperatura y menor tiempo de prensado; si los tableros se fabrican a una presión de 14 MPa.
- Los mejores valores de MOE se obtienen a 200 °C, 14 MPa de presión, y 10 % de humedad y 3 min de tiempo de prensado.
- Las condiciones que permiten obtener un tablero aglomerado con esfuerzos perpendiculares altos fueron: presión de 21 MPa, temperatura de 200 °C, durante 7 min con un contenido de humedad del 15 %.
- Los tableros aglomerados auto-adheridos de fibras de raquis de palma presentan una pobre estabilidad cuando son sometidos a la humedad.

47.2 RECOMENDACIONES

- Realizar en un futuro la elaboración de tableros aglomerados auto-adheridos con fibras de raquis pre tratadas con explosión de vapor, ya que esto mejoraría la activación de sus componentes, en especial la de las hemicelulosas, que son las encargadas de proporcionar la estabilidad dimensional de los tableros cuando estos son sometidos a la humedad.
- Realizar un estudio de la elaboración de tableros aglomerados auto-adheridos con fibras de raquis de palma, adicionando lignina para comprobar

el efecto que esta tiene en las propiedades mecánicas de los tableros.

- Realizar esta investigación en una prensa con platos calefactores más grandes, que permitan la utilización de moldes de mayor longitud, para que el tamaño y espesor de las muestras sea el adecuado y puedan ser evaluadas bajo las normas ASTM D sin ninguna modificación.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACUPALMA, Asociación Venezolana de cultivadores de palma aceitera, 2003, "Generalidades de la palma aceteitera" <http://www.acupalma.org.ve/index.asp?categoryid=7554>, (Mayo, 2011)
2. AITIM, 2011, Asociación de Investigación Técnica de Industrias de la Madera, "Tableros de Partículas", http://infomadera.net/uploads/productos/informacion_general_455_Tableros_PART%C3%8DCULAS_28.06.2011.pdf, (Junio, 2011)
3. Álvarez, C., Capanema, E., Rojas, O. y Gañán, P., 2009, "Desarrollo de tableros aglomerados auto – enlazados a partir de fibra de la vena central de la hoja de plátano", *Prospect*, 7 (2), 69.
4. Álvarez, C., Gañán, P., Arboleda, C. y Mejía, A., 2007, "Desarrollo de Materiales Compuestos a Partir de Fibras de Plátano Modificadas con enzimas ligninolíticas", *Scientia et Technica* (36), 725.
5. Amigo V., Salvador M., Sahuquillo O., Llorens R. y Martí F., 2008, "Valorización de residuos de fibras vegetales como refuerzo de plásticos industriales", *Simposio Iberoamérica de Ingeniería de Residuos*, 1,5.
6. ANCUPA, Asociación Nacional de Cultivadores de Palma Africana, 2011, "Estadísticas de la producción de palma africana en el Ecuador", <http://www.ancupa.com>, (Marzo, 2011)
7. Andrade, V., 2011, "Presente y futuro de las oleaginosas en el Ecuador", <http://publicaciones.pucesi.edu.ec/documentos/libros/cultivos/59-74.pdf>, (Junio, 2011)
8. Anglés, M. N., Reguant, J., Montané, D., Ferrando, F., Farriol, X. y Salvadó, J., 1999, "Binderless Composites from Pretreated Residual

Softwood”, Journal of Applied Polymer Science, 73, 2485.

9. Ariza, J., Caparrós, S. y Jiménez, L., 2009, “Subproductos en la fabricación de pastas. Autohidrólisis de las hemicelulosas”, <http://rabida.uhu.es/dspace/bitstream/handle/10272/328/b152962832.pdf?sequence=3>, (Agosto, 2009)
10. Bouajila, J., Limare, A., Joly, C.y Dole, P., 2005, “Lignin Plasticization to Improve Binderless Fiberboard Mechanical Properties”, Polymer Engineering and Science, 45, 809.
11. Boudet, A., Lapierre, C. y Grima-Pettenati, J., 1995, “Tansley Review No. 80: Biochemistry and molecular biology of lignification”, New Phytol, 129, 203 – 236.
12. Casey, J., 1990, “Pulpa y Papel, Química y tecnología química”, Vol. 1, primera edición, Editorial Limusa, México D. F., México, pp., 33 - 44, 49 - 55, 59 - 64, 87 - 92, 314 - 321, 358 - 368, 456 - 459, 801 - 802.
13. CNPMLTA, Centro Nacional de Producción Más Limpia y Tecnologías Ambientales, 2011, “Etapas y equipos del proceso”, http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/331104/331104_ee.htm, (Junio, 2011)
14. COPORDIB, 2003, Corporación para el Desarrollo Industrial de la Biotecnología y Producción Limpia, “Programa estratégico para la producción de biodiesel -combustible automotriz - a partir de aceites vegetales”, http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/Biodiesel/Produccion_Biodiesel.pdf, (Enero, 2012)
15. El Mansoruri, N., Yuan, Q.y Huang, F.,2011, “Synthesis and characterization of kraft lignin-based epoxy resins”, BioResources, 6, (3), 2492.

16. Fakirov, S., 2007, "Handbook of engineering biopolymers, homopolymers, blends and composites", Hanser Publishers, Munich, Alemania, pp. 581, 582, 583.
17. Figueroa, F., 2008, "Tablero de comando" para la promoción de los biocombustibles en Ecuador, <http://www.eclac.org/publicaciones/xml/9/33219/lcw189e.pdf>, (Junio, 2011)
18. Fiplasto, S.A., 2010, "Introducción a la Fabricación Mundial de Tableros Basados en la Madera", www.fiplasto.com.ar/mercado_tableros.doc, (Junio, 2011)
19. Gomez, J.y Rodríguez, D., 2009, "Elaboración de compostaje con el fruto de la palma africana", http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_tec/inia_divulga/numero%2013/gomez_j.pdf, (Julio, 2011)
20. Hans A., 1996, "Cellulose, structure, accessibility and reactivity", Segunda edición, Editorial Gordon and Breach Science, Amsterdam, Holanda, pp. 6 - 21.
21. Hashim R., Guan Seng T., y Tanaka R., 2011, "Characterization of raw materials and manufactured binderless particleboard from oil palm biomass", *Materials and Design*, 32 (1), 246.
22. Hasibuan, R.y Wan Daud, W., 2004, "Through Drying of Oil Palm Empty Fruit Bunches (EFB) Fiber Using Superheated Steam", *Proceedings of the 14th International Drying Symposium*, vol. C, 2 027 – 2 034.
23. IICA, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2010, "Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas: II Biodiesel", <http://webiica.iica.ac.cr/bibliotecas/repiica/B1884e/B1884e.pdf>, (Mayo, 2011)

24. Laemsak, N.y Okuma, M., 2000, "Development of boards made from oil palm frond II: properties of binderless boards from steam-exploded fibers of oil palm frond", The Japan Wood Research Society, 46, 322.
25. Law, K. y Jiang, X., 2001, "Comparative Papermaking Properties of Oil-Palm Empty Fruit Bunch", Tappi Journal Peer Reviewed Paper, 84 (1), 1.
26. Law, K., Wan Daud, W.R.y Ghazali, A., 2007, "Morphological and Chemical Nature of fiber Strands of Oil Palm Empty-Fruit-Bunch (OPEFB)", BioResources, 2 (3), 351.
27. MAGAP, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, "Principales cultivos del Ecuador", http://www.magap.gob.ec/sinagap/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=414, (Agosto, 2011)
28. Mancera, C., El Mansouri, N., Vilaseca, F., Ferrando, F.y Salvado, J., 2011, "The Efect of Lignin as a Natural Adhesive on the Physico-Mechanical Properties of Vitis Vinifera Fiberboards", BioResources, 6 (3), 2851.
29. Mat Soon, R., Wan Hassan, W., Md Top, AB., y Kamarudin, H., 2006, "Thermal Properties of Oil Palm Fibre, Cellulose and Its Derivatives", Journal of oil palm Research, 18, 272.
30. MIC, Ministerio de Industrias y Competitividad, ONUDI, Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial, 2008, "Palma Africana: Estudio Agroindustrial en el Ecuador, Competitividad de la cadena de valor y perspectivas de mercado, <http://issuu.com/mipro/docs/palma>, (Mayo, 2011)
31. Misson, M., Haron, R., Kamaroddin, M. y Amin, N., 2009,"Pretreatment of Empty Palm Fruit Bunch For Lignin Degradation", Jurnal Teknologi, 50 (F), 89.
32. Mohamed, M., Sapuan, M.y Ismail N., 2009, "Tensile properties of single oil

palm empty fruit bunch (OPEFB) fibre”, Sains Malaysiana, 38 (4), 525.

33. Morán J., 2008, “Extracción de celulosa y obtención de nanocelulosa a partir de fibra sisal – caracterización”, Asociación Argentina de materiales, Mar del Plata, Argentina, pp. 1 - 3.
34. Ocampo A., 1994, “La palma aceitera africana, un recurso de alto potencial para la producción animal en el trópico”, <http://www.fao.org/ag/AGA/agap/frg/FEEDback/War/v44440b/44440b0g.htm#la> palma aceitera africana, un recurso de alto potencial para la producción, (Marzo, 2011)
35. Okuda, N., Hori, K., Sato, M., 2006a, “Chemical changes of kenaf core binderless boards during hot pressing (I): influence of the pressing temperature condition”, The Japan Wood Research Society, 1.
36. Okuda, N., Hori, K., Sato, M., 2006b, “Chemical changes of kenaf core binderless boards during hot pressing (II): effects on the binderless board properties”, The Japan Wood Research Society, 1.
37. Ott E., Spurlin H. y Grafflin M., 1963, High polymers: “Cellulose and cellulose derivatives”, Vol. 5, Segunda edición, Editorial Interscience publishers Inc., Nueva York, Estados Unidos, pp. 9 - 12, 461 - 467, 480 - 497, 524 - 539.
38. Palacios, J., 2008, “Cuidar los bosques naturales fabricando tableros derivados de la madera”, <http://www.monografias.com/trabajos65/tableros-derivados-madera/tableros-derivados-madera2.shtml>, (Junio, 2011)
39. Quintana, G., Arroyave, M. y Suárez, D., 2008, “Obtención de pulpa a partir de los residuos de palma africana pretratados con steam explosión”, Grupo pulpa y papel, (1), 70.
40. Reale, S., Di Tullio, A., Spreti, N. y De Angelis, F., 2003, “Mass spectrometry

in the biosynthetic and structural investigation of lignins”, *Mass Spectrometry Reviews*, 23, 87.

41. Sazanov, Y.y Gribanov, A., 2010, “Thermochemistry of Lignin”, *Russian Journal of Applied Chemistry*, 83, (2), 175.
42. Shen, KC., 1991, “Method of making composite products from lignocellulosic materials”, United States Patent 5017319.
43. Solagro, 2006, “Palma Africana”, <http://www.solagro.com.ec/cultdet.php?vcultivo=Palma Afri>, (Junio, 2011)
44. Terrasol, 2011, “Palma”, <http://www.terra-sol.com/spa/palma002html>., (Junio, 2011)
45. UNNE, 2006, “Azúcares o glúcidos”, <http://www.biologia.edu.ar/macromoleculas/azucar.htm>, (Agosto, 2011)
46. Van Dam, E. G., Van den Oever, M. y Keijzers, E., 2003. “Production process for high density high performance binderless boards from whole coconut husk”, *Industrial Crops and Products*, 20, 97.
47. Vázquez D. y Vázquez M., 2002, “Transformación de materiales lignocelulósicos. Composición, fraccionamiento y aprovechamiento”, *Revista de agroquímica y tecnología de alimentos*, 31 (2), 143.
48. Wahid, M., Akmar, S. y Henson, I. E., 2004, "Oil Palm, Achievements and Potencial", <http://www.cropscience.org.au>, (Enero, 2011)
49. Widyorini R., Higashihara T., Xu, J., Watanabe, T.y Kawai, S., 2005, “Self-bonding characteristics of binderless kenaf core composites”, *Wood Sci Technol*, 39, 651.

50. Widyorini, R., 2005, "Self-bonding Characterization of Non-wood Lignocellulosic Materials", <http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/51158/1/KJ00004529199.pdf>, (Junio, 2011)
51. Widyorini, R., Xu, J.y Watanabe T., 2003, "Chemical changes in steam-pressed kenaf core binderless particleboard", The Japan Wood Research Society, 51, 26.
52. Youngquist, J., 2008, "Wood-based Composites and Panel Products", http://www.carbeck.org/pdfs/FPL_Wood_Handbook_Ch10.pdf, (Junio, 2011)
53. Zhou, X., Tan, L., Zhang, W., Lv, Ch., Zheng, F., Zhang, R., Du, G., Tang, B.y Liu, X., 2011, "Enzymatic Hydrolysis Lignin Derived from corn stover as an intrinsic binder for bio-composites manufacture: Effect of fiber moisture content and pressing temperature on boards properties", *Bioresources*, 6 (1), 253.

ANEXOS

ANEXO I

Preparación de las soluciones utilizadas en la caracterización química de la fibra de raquis de palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.)

En la caracterización química de la fibra de raquis, se utilizaron 3 soluciones especiales, cuya preparación se indica a continuación.

1. Solución de bióxido de azufre 3%

Para preparar un litro de solución de bióxido de azufre al 3 % se requiere:

- Pesar 44,6 g de metabisulfito de sodio
- Disolver el metabisulfito en 942,4 mL de agua destilada
- Agregar 37,4 mL de ácido clorhídrico concentrado y agitar

2. Solución bromuro-bromato 0,2 N

Para preparar un litro de solución bromuro-bromato 0,2 N se requiere:

- Pesar 44,1 g de bromato de potasio y 47,6 g de bromuro de potasio.
- Agregar ambos componentes en un matraz de 1 000 mL y aforar con agua destilada.

3. Solución sulfocrómica

Para preparar un litro de solución sulfocrómica se requiere:

- Llevar a temperatura de ebullición 100 mL de agua destilada.

- Pesar 50,0 g de dicromato de potasio, agregarlo al agua destilada y agitar hasta conseguir una disolución completa.
- Colocar en un matraz de 1 000 mL y aforar con ácido sulfúrico concentrado.
- Realizar la adición ácido sulfúrico en una sorbona, tomar las debidas precauciones de seguridad.

ANEXO II

Resultados de la caracterización química de la fibra de raquis de palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.)

Tabla A.1 Determinación del contenido de humedad de la fibra de raquis de palma africana

ANÁLISIS REALIZADO	PESO INICIAL CRISOL (g)	PESO FINAL CRISOL (g)	PESO FIBRA (g)	(%) HUMEDAD	PROMEDIO
Humedad inicial	17,64	16,54	2,00	6,20	5,88
	18,91	17,85	2,01	5,55	
Humedad de análisis	17,46	17,13	2,00	8,23	8,37
	17,64	15,97	2,00	8,51	

Tabla A.2 Determinación de la humedad de análisis de la fibra de raquis de palma africana

ANÁLISIS REALIZADO	PESO INICIAL CRISOL (g)	PESO FINAL CRISOL (g)	PESO FIBRA (g)	% H. DE ANÁLISIS	PROMEDIO
Grasas, ceras y resinas	17,64	15,92	2,00	9,74	9,39
	18,67	16,98	2,00	9,04	
Celulosa	17,65	16,61	2,01	5,90	5,93
	18,89	17,76	1,99	5,96	
Lignina	17,64	15,92	2,00	9,74	9,39
	18,67	16,98	2,00	9,04	
Pentosanos	17,62	15,90	1,98	9,74	9,39
	18,68	16,99	2,01	9,04	
Solubilidad en sosa	17,64	15,92	2,00	9,74	9,39
	18,68	16,99	2,01	9,04	
Solubilidad en agua caliente	17,45	16,02	1,99	8,19	8,07
	18,68	17,19	2,01	7,95	

Tabla A.3 Determinación del contenido de lignina de la fibra de raquis de palma africana

MUESTRA	PESO INICIAL CRISOL (g)	PESO FINAL CRISOL (g)	MASA INICIAL MUESTRA (g)	% H. DE ANÁLISIS	% DE LIGNINA	PROMEDIO
1	50,16	50,33	1,01	9,39	17,54	16,46
2	49,72	49,86	1,03		15,38	

Tabla.A.4 Determinación del contenido de grasas, ceras y resinas de la fibra de raquis de palma africana

MUESTRA	PESO INICIAL BALÓN (g)	PESO FINAL BALÓN (g)	MASA INICIAL TIMBLE (g)	%H. DE ANÁLISIS	% G, C Y R	PROMEDIO
1	168,15	168,50	5,27	9,39	7,35	6,59
2	167,67	168,01	5,43		6,86	
3	164,47	164,75	5,17		6,13	
4	168,86	169,15	5,28		6,00	

Tabla A.5 Determinación del contenido de celulosa de la fibra de raquis de palma africana

MUESTRA	PESO INICIAL CRISOL (g)	PESO FINAL CRISOL (g)	MASA INICIAL MUESTRA (g)	% H. DE ANÁLISIS	% CELULOSA	PROMEDIO
1	49,71	51,05	2,01	5,93	70,80	69,83
2	49,99	51,29	2,00		68,86	

Tabla A.6 Determinación del contenido de pentosanos de la fibra de raquis de palma africana

MUESTRA	MASA INICIAL MUESTRA (g)	VOLUMEN GASTADO MUESTRA (mL)	VOLUMEN GASTADO BLANCO (mL)	% H. DE ANÁLISIS	% PENTOSANOS	PROMEDIO
1	1,01	64,50	71,25	9,39	4,02	4,23
2	1,01	66,50	73,85		4,45	

Tabla A.7 Determinación del contenido de cenizas de la fibra de raquis de palma africana

MUESTRA	PESO INICIAL CRISOL (g)	PESO FINAL CRISOL (g)	MASA INICIAL MUESTRA (g)	% H. DE ANÁLISIS	% CENIZAS	PROMEDIO
1	16,67	16,71	1,00	9,39	4,30	4,24
2	15,64	15,68	1,00		4,19	

Tabla A.8 Determinación de la solubilidad en sosa de la fibra de raquis de palma africana

MUESTRA	PESO INICIAL CRISOL (g)	MASA INICIAL MUESTRA (g)	PESO FINAL CRISOL (g)	% H. DE ANÁLISIS	% SOLUBILIDAD EN SOSA	PROMEDIO
1	50,17	2,04	51,58	9,39	33,61	34,10
2	49,71	2,05	51,12		34,58	

Tabla A.9 Determinación de la solubilidad en agua caliente de la fibra de raquis de palma africana

MUESTRA	PESO INICIAL CRISOL (g)	MASA INICIAL MUESTRA (g)	PESO FINAL CRISOL (g)	% H. DE ANÁLISIS	% SOLUBILIDAD EN AGUA CALIENTE	PROMEDIO
1	52,38	2,00	52,19	8,07	10,15	10,97
2	52,21	2,00	52,00		11,78	

ANEXO III

Resultados de la caracterización mecánica de la fibra de raquis de palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.)

Tabla A.10 Determinación del diámetro de la fibra de la zona externa del raquis de palma africana

# FIBRA	D1 (unidades)	D2 (unidades)	D3 (unidades)	PROMEDIO (unidades)	DIÁMETRO ZONA EXTERNA (µm)
1	1,2	1,0	0,9	1,03	355,93
2	0,9	1,1	1,0	1,00	344,44
3	1,1	0,9	1,2	1,07	367,41
4	0,8	0,9	0,8	0,83	287,04
5	1,2	1,0	0,9	1,03	355,93
6	1,2	1,3	1,2	1,23	424,81
7	1,2	1,1	1,2	1,17	401,85
8	0,5	0,6	0,6	0,57	195,19
9	0,9	1,0	1,1	1,00	344,44
10	0,9	0,9	0,8	0,87	298,52
11	0,7	0,8	0,9	0,80	275,56
12	1,3	1,2	1,2	1,23	424,81
13	0,9	1,0	0,7	0,87	298,52
14	0,7	0,8	0,7	0,73	252,59
15	1,4	1,0	1,1	1,17	401,85
16	0,8	0,8	1,0	0,87	298,52
17	1,0	0,9	1,0	0,97	332,96
18	0,6	0,7	0,9	0,73	252,59
19	1,0	0,8	1,0	0,93	321,48
20	0,6	0,7	0,7	0,67	229,63
21	0,9	1,2	1,0	1,03	355,93
22	1,0	1,2	1,3	1,17	401,85
23	0,7	0,7	0,8	0,73	252,59
24	1,6	1,4	1,3	1,43	493,70
25	0,5	0,7	0,9	0,70	241,11
26	0,9	1,2	1,4	1,17	401,85
27	1,5	1,5	1,6	1,53	528,15
28	1,1	1,0	1,0	1,03	355,93
29	0,7	0,5	0,9	0,70	241,11
30	1,3	1,1	1,0	1,13	390,37
PROMEDIO					337,56
DESVIACIÓN ESTÁNDAR					79,01

Tabla A.11 Determinación del diámetro de la fibra de la zona interna del raquis de palma africana

# FIBRA	D1 (unidades)	D2 (unidades)	D3 (unidades)	PROMEDIO (unidades)	DIÁMETRO ZONA INTERNA (μm)
1	0,7	0,6	0,8	0,98	24,11
2	0,8	0,7	1,0	1,03	28,70
3	0,7	0,9	0,6	1,06	25,26
4	0,7	0,6	0,6	0,84	21,81
5	0,7	0,5	0,6	0,98	20,67
6	0,7	0,5	0,7	1,24	21,81
7	0,5	0,5	0,4	1,16	16,07
8	1,0	1,1	0,9	0,59	34,44
9	1,1	1,2	1,4	1,03	42,48
10	1,2	1,0	1,2	0,86	39,04
11	0,9	0,8	0,9	0,83	29,85
12	0,7	0,7	1,0	1,21	27,56
13	1,2	1,3	1,4	0,86	44,78
14	1,2	1,1	1,0	0,74	37,89
15	1,2	1,1	1,2	1,09	40,19
16	0,9	0,9	0,9	0,89	31,00
17	1,1	1,1	1,1	0,96	37,89
18	0,8	1,2	0,8	0,78	32,15
19	1,0	0,7	1,0	0,91	31,00
20	0,9	1,0	1,0	0,69	33,30
21	1,1	1,1	1,2	1,08	39,04
22	1,3	1,3	1,1	1,22	42,48
23	1,3	1,2	1,2	0,74	42,48
24	1,5	1,3	1,0	1,38	43,63
25	0,9	0,9	0,9	0,77	31,00
26	0,9	0,9	1,0	1,26	32,15
27	1,4	1,1	1,1	1,54	41,33
28	1,0	1,2	0,8	1,01	34,44
29	1,2	1,0	0,9	0,70	35,59
30	0,8	0,7	0,8	1,08	26,41
PROMEDIO					32,95
DESVIACIÓN ESTÁNDAR					7,69

Tabla A.12 Propiedades físicas y mecánicas de la fibra de raquis de palma africana

# FIBRA	LONGITUD (mm)	PESO (mg)	TÍTULO (Tex)	DISTANCIA ENTRE MORDAZAS (mm)	CARGA MÁXIMA (N)	ΔL	ELONGACIÓN A LA RUPTURA (%)	TENACIDAD (cN/Tex)
1	206,00	17,60	85,44	50,00	10,30	6,10	12,21	12,06
2	249,00	23,20	93,17	50,00	11,44	6,41	12,82	12,28
3	172,00	17,20	100,00	50,00	9,87	5,40	10,80	9,87
4	132,00	13,00	98,48	50,00	7,02	6,10	12,21	7,13
5	156,00	10,20	65,38	50,00	8,01	4,58	9,16	12,25
6	180,00	13,20	73,33	50,00	8,39	6,41	12,82	11,44
7	279,00	20,20	72,40	50,00	5,34	2,14	4,27	7,38
8	239,00	18,60	77,82	50,00	12,97	7,63	15,26	16,67
9	155,00	13,00	83,87	50,00	10,68	3,97	7,93	12,73
10	207,00	14,00	67,63	50,00	6,10	3,05	6,10	9,03
11	145,00	12,90	88,97	50,00	13,73	9,46	18,92	15,43
12	195,00	11,70	60,00	50,00	6,87	5,49	10,99	11,44
13	180,00	19,00	105,56	50,00	9,16	3,97	7,93	8,67
14	250,00	26,00	104,00	50,00	14,50	7,94	15,87	13,94
15	135,00	9,00	66,67	50,00	8,39	5,19	10,38	12,59
16	103,00	18,00	174,76	50,00	6,10	4,27	8,54	3,49
17	263,00	22,00	83,65	50,00	15,26	8,86	17,72	18,24
18	130,00	13,20	101,54	50,00	11,06	8,74	17,47	10,89
19	216,00	21,60	100,00	50,00	12,97	7,02	14,04	12,97
20	201,00	11,70	58,21	50,00	4,58	1,98	3,97	7,86
21	248,00	14,80	59,68	50,00	0,76	0,34	0,69	1,28
22	156,00	12,40	79,49	50,00	4,96	3,70	7,40	6,24
23	120,00	7,30	60,83	50,00	7,25	6,68	13,35	11,91
24	305,00	26,70	87,54	50,00	6,87	7,44	14,88	7,84
25	215,00	13,90	64,65	50,00	6,10	6,75	13,50	9,44
26	177,00	9,80	55,37	50,00	5,34	2,71	5,42	9,65
27	237,00	18,00	75,95	50,00	3,82	3,24	6,48	5,02
28	177,00	11,30	63,84	50,00	4,58	4,18	8,36	7,17
29	225,00	30,80	136,89	50,00	18,31	9,96	19,91	13,38
30	235,00	19,40	82,55	50,00	5,72	3,09	6,18	6,93
31	215,00	15,40	71,63	50,00	9,92	8,93	17,85	13,85
32	205,00	15,00	73,17	50,00	15,64	10,72	21,44	21,37
33	182,00	13,60	74,73	50,00	2,29	0,57	1,14	3,06
34	161,00	20,80	129,19	50,00	10,30	4,54	9,08	7,97
35	171,00	19,00	111,11	50,00	11,83	6,98	13,96	10,65
36	153,00	12,70	83,01	50,00	2,67	1,37	2,75	3,22

Tabla A.12 Propiedades físicas y mecánicas de la fibra de raquis de palma africana
(continuación...)

# FIBRA	LONGITUD (mm)	PESO (mg)	TÍTULO (Tex)	DISTANCIA ENTRE MORDAZAS (mm)	CARGA MÁXIMA (N)	ΔL	ELONGACIÓN A LA RUPTURA (%)	TENACIDAD (cN/Tex)
36	153,00	12,70	83,01	50,00	2,67	1,37	2,75	3,22
37	155,00	13,00	83,87	50,00	6,10	3,01	6,03	7,28
38	258,00	37,00	143,41	50,00	19,84	7,32	14,65	13,83
39	202,00	14,70	72,77	50,00	6,10	6,03	12,05	8,39
40	167,00	14,40	86,23	50,00	12,59	4,50	9,00	14,60
41	149,00	11,90	79,87	50,00	7,63	5,00	9,99	9,55
42	149,00	17,00	114,09	50,00	8,39	4,39	8,77	7,36
43	139,00	17,40	125,18	50,00	9,92	5,91	11,83	7,92
44	183,00	17,20	93,99	50,00	7,63	4,04	8,09	8,12
45	134,00	16,60	123,88	50,00	13,35	8,62	17,24	10,78
46	191,00	13,90	72,77	50,00	9,16	6,64	13,28	12,58
47	213,00	17,40	81,69	50,00	6,10	1,72	3,43	7,47
48	151,00	8,50	56,29	50,00	3,82	2,37	4,73	6,78
49	136,00	12,80	94,12	50,00	6,87	5,53	11,06	7,30
50	186,00	13,30	71,51	50,00	7,63	4,50	9,00	10,67
PROMEDIO	187,76	16,23	87,40	-	8,68	5,31	10,62	9,96
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	45,07	5,60	24,74	-	4,05	2,47	4,94	3,92

ANEXO IV

**Análisis estadístico de la caracterización física y mecánica de las fibras
de raquis de palma africana**

Tabla A.13 Análisis de las varianzas del diámetro de la fibra de la zona central y del diámetro de la fibra de zona externa del raquis

DIÁMETRO FIBRA DE RAQUIS	MEDIA μm	VARIANZA (μm^2)	CUENTA	GRADOS DE LIBERTAD
Zona central	337,56	6242,11	30	29
Zona externa	32,95	59,20	30	29

Tabla A.14 Prueba F para el análisis de las varianzas del diámetro de la fibra de la zona central y del diámetro de la fibra de zona externa del raquis

VALOR DE F	PROBABILIDAD ($F \leq f$)	VALOR CRÍTICO PARA F (f)	SIGNIFICANCIA	DIFERENCIA ESTADÍSTICA
105,44	1,42E-22	1,86	0,05	SI

Tabla A.15 Análisis estadístico de las propiedades físicas y mecánicas de la fibra de raquis

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	TÍTULO (tex)	DIÁMETRO (μm)		TENACIDAD (cN/tex)	ELONGACIÓN (%)
		ZONA EXTERNA	ZONA CENTRAL		
Media	87,40	337,56	32,95	9,96	10,62
Error típico	3,50	14,42	1,40	0,55	0,70
Mediana	82,78	344,44	32,72	9,60	10,59
Moda	100,00	355,93	42,48		12,21
Desviación estándar	24,74	79,01	7,69	3,92	4,94
Varianza de la muestra	612,10	6242,11	59,20	15,36	24,38
Sesgo estandarizado	3,89	0,83	-0,72	1,02	0,24
Curtosis estandarizada	3,20	-0,06	-0,80	0,95	-0,72
Rango	119,39	332,96	28,70	20,10	20,75
Mínimo	55,37	195,19	16,07	1,28	0,69
Máximo	174,76	528,15	44,78	21,37	21,44
Suma	4370,18	10126,67	988,56	497,97	530,95
Cuenta	50	30	30	50	50
Nivel de confianza(95 %)	7,03	29,50	2,87	1,11	1,40

ANEXO V

**Resultados de las pruebas preliminares realizadas para definir los
parámetros del proceso de termo-compresión**

Tabla A.16 Resultados de las pruebas preliminares del proceso de termo-compresión

ENSAYO Nº	TAMAÑO FIBRA (Nº #)	MASA DE FIBRA (g/cm ³)	HUMEDAD %	TEMPERATURA (°C)	PRESIÓN (MPa)	TIEMPO (min)	CRITERIO EVALUACIÓN
1	40	0,6	6	160	14	3	REGULAR
2	60	0,6	6	160	14	3	BUENO
3	<60	0,6	6	160	14	3	MALO
4	40	0,6	6	160	14	3	REGULAR
5	40	0,8	6	160	14	3	REGULAR
6	40	1,1	6	160	14	3	BUENO
7	40	0,6	6	160	14	3	MALO
8	40	0,6	15	160	14	3	BUENO
9	40	0,6	25	160	14	3	BUENO
10	40	0,6	6	160	14	3	BUENO
11	40	0,6	6	200	14	3	BUENO
12	40	0,6	6	220	14	3	MALO
13	40	0,6	6	160	14	3	BUENO
14	40	0,6	6	160	21	3	BUENO
15	40	0,6	6	160	28	3	MALO
16	40	0,6	6	160	14	3	BUENO
17	40	0,6	6	160	14	5	BUENO
18	40	0,6	6	160	14	10	MALO

ANEXO VI

Datos requeridos para el cálculo de las propiedades mecánicas evaluadas en los tableros aglomerados de fibra raquis obtenidos

Ejemplo de cálculo de la pendiente de la curva carga vs. deformación ($\Delta P/\Delta y$)

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de los gráficos carga vs. deformación que se obtuvieron de los ensayos de resistencia a la flexión realizados en el equipo de ensayos universales.

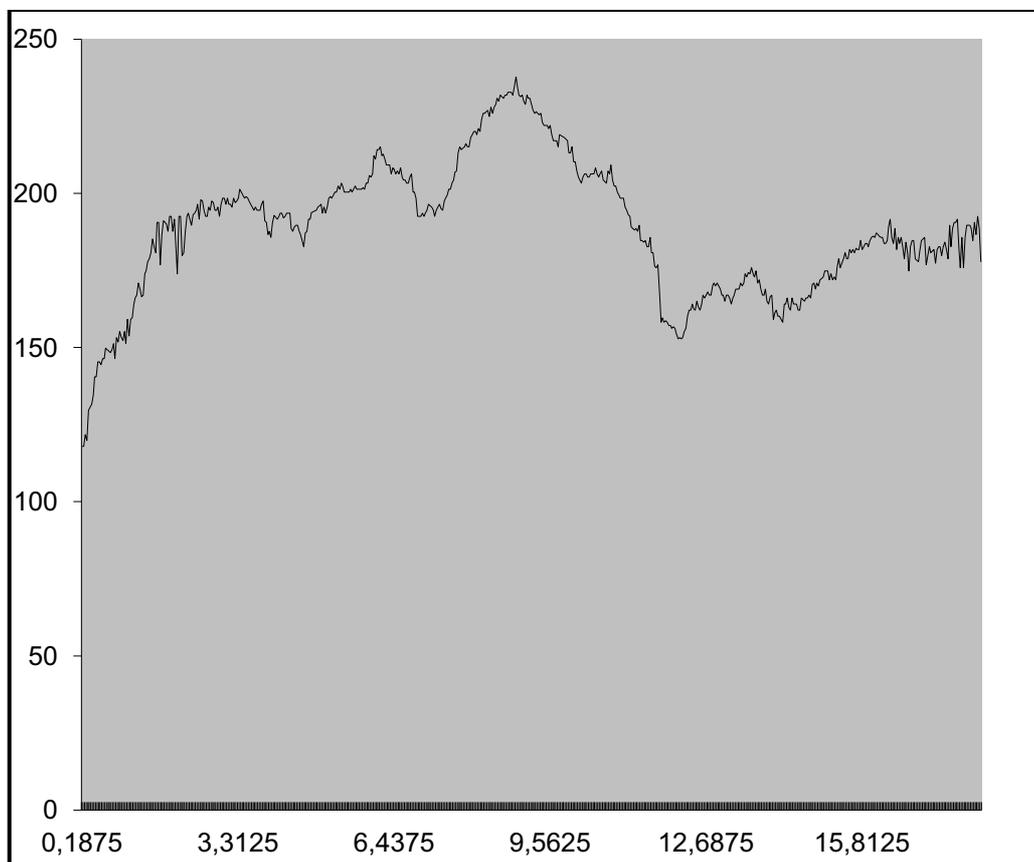


Figura A.1 Gráfico carga vs deformación correspondiente a los ensayos de flexión estática

Para el cálculo del módulo de elasticidad aparente fue necesario obtener la pendiente de la curva, en el primer tercio de la curva, zona en la cual tiene un comportamiento lineal. Debido a la complejidad de las curvas obtenidas, con el

programa de computación Microsoft Excel se agregó una línea de tendencia polinómica, que fue la que mejor se adaptó a los datos, como se indica en la figura A 2.

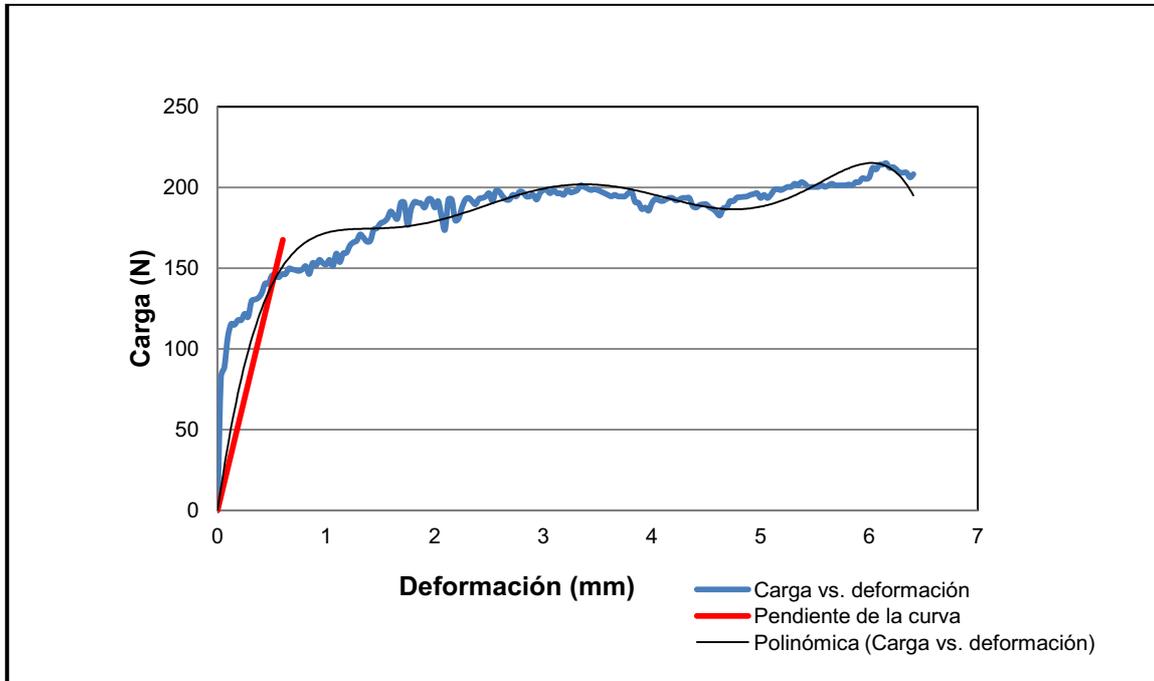


Figura A.2 Gráfico Carga vs deformación con línea de tendencia correspondiente al ensayo realizado a 14 MPa de presión, 160 °C, 10 % de humedad y 5 min de prensado

La ecuación de la línea de tendencia es la siguiente.

$$y = 8,630x^5 - 67,58x^4 + 257,6x^3 - 498,3x^2 + 472,0x \quad [A.1]$$

Se cálculo entonces la pendiente, de la parte lineal inicial, se utilizó para esto el programa de computación Microsoft Excel. La pendiente de la curva obtenida fue:

$$m = pendiente = 279,32 \left(\frac{N}{mm} \right)$$

Tabla A.17 Dimensiones de las muestras del ensayo de flexión estática

CONDICIONES	PARÁMETRO	t1			t2			t3					
		A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B
PITI1	LONGITUD (mm)	100,26	100,40	100,12	95,41	96,80	96,35	99,78	100,10	100,98	100,86	100,86	
		100,92	100,56	100,56	97,32	96,80	96,57	100,01	100,10	100,86	100,86	100,86	
		100,01	100,23	100,23	97,68	96,80	96,12	100,5	100,5	100,73	100,73	100,73	
	2,28		2,23	2,56		2,78	2,02	2,02		1,96			
	2,30	2,30	2,30	2,72	2,80	2,63	2,07	2,07	2,09	1,99	2,07	2,07	
	2,23		2,21	2,92		2,49	2,18	2,18		2,22	2,22	2,22	
	2,35		2,35	3,01		2,32	2,07	2,07		2,11	2,11	2,11	
	47,1	47,02	46,56	47,72	47,67	49,69	49,89	49,89	49,96	48,71	49,27	49,26	
	46,92		47,12	46,68	47,67	48,00	49,99	49,99	49,96	49,27	49,27	49,26	
	47,04		46,23	48,60		47,34	49,99	49,99		49,81	49,81	49,81	
	PITI2	LONGITUD (mm)	101,12	101,56	102,48	101,50	101,49	99,81	101,83	101,83	100,65	101,83	100,65
			101,26	101,56	102,66	101,00	101,49	100,31	102,77	101,83	99,80	101,83	99,80
102,29				102,55	101,97		99,93	100,90	100,90	100,40	100,90	100,40	
1,77			1,90	2,00		2,63	2,12	2,12		2,63			
1,80		1,85	1,92	1,99	2,07	2,60	2,31	2,31	2,38	2,58	2,58	2,52	
1,88			1,97	2,08		2,48	2,47	2,46		2,47	2,47	2,47	
1,93			1,95	2,19		2,42	2,62	2,62		2,39	2,39	2,39	
47,25		47,25	48,58	49,13	49,06	49,37	46,09	46,09	46,54	48,09	48,09	48,09	
47,01			48,04	49,08	49,06	48,85	45,76	45,76	46,54	45,95	45,95	46,68	
47,48			46,49	48,97		48,5	47,77	47,77		45,99	45,99	45,99	

Tabla A.17 Dimensiones de las muestras del ensayo de flexión estática (**continuación...**)

CONDICIONES	PARÁMETRO	t1			t2			t3						
		A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	
P1T1H3	LONGITUD (mm)	100,32	101,38	101,16	101,51	100,02	101,48	100,02	100,14	101,84	102,07	101,83	101,30	
		101,6		101,56		100,12		101,92		101,63				
		102,23		101,81		100,28		102,46		100,43				
	ESPESOR (mm)	2,391	2,28	2,179	2,14	2,44	2,40	2,49	2,48	1,89	1,89	2,02	1,82	
		2,305		2,171		2,42		1,87		1,39				
		2,222		2,116		2,36		1,90		1,93				
	ANCHO (mm)	2,198	45,9	2,09	45,41	2,41	45,41	2,43	45,03	1,90	48,30	1,96	47,13	
		45,7		44,80		44,80		48,30		48,51				
		46,11		45,40		45,40		48,79		47,35				
	P1T2H1	LONGITUD (mm)	99,89	99,95	99,05	99,35	104,57	104,19	104,10	103,24	102,73	102,93	103,80	102,77
			99,64		99,45		104,61		102,97		103,11		102,80	
			100,31		99,54		103,4		102,66		102,95		101,72	
ESPESOR (mm)		2,08	2,22	2,55	2,31	2,588	2,30	1,98	2,19	2,06	2,23	2,11	2,17	
		2,18		2,43		2,428		2,09		2,39		2,08		
		2,27		2,24		2,201		2,29		2,29		1,89		
ANCHO (mm)		2,35	50,15	2,04	50,37	1,975	50,34	2,42	50,93	2,17	49,96	2,59	49,86	
		49,43		50,40		51,63		50,67		50,21		49,46		
		50,20		50,00		50,21		50,96		49,70		50,52		
			50,83	50,71	49,19		51,17		49,97			49,60		

Tabla A.17 Dimensiones de las muestras del ensayo de flexión estática (continuación...)

CONDICIONES	PARÁMETRO	t1			t2			t3					
		A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B
P1T2H2	LONGITUD (mm)	101,42	101,34	102,74	102,72	104,91	104,81	105,27	105,72	99,09	100,04	100,64	100,64
		101,37		102,94		106,35		105,46		100,37		100,85	
		101,23		102,48		105,89		103,71		100,65		100,43	
	2,02	2,18	2,11	2,04	2,09	2,23	2,43	2,36	2,41	2,24	2,29	2,24	
	2,17		1,93		2,22		2,49		2,19				
	2,22		2,03		2,29		2,30		2,07				
	2,29	50,57	2,08	49,83	2,39	51,32	2,20	50,55	50,39	49,71	51,19	49,23	49,51
	50,21		49,03		51,09		51,24		50,39				
	51,47		50,15		51,58		51,24		49,24				
50,03	101,58	50,30	101,34	52,45	101,99	100,61	100,76	99,59	100,21	100,61	100,65	100,21	
101,47		101,38		102,35		100,82		100,40					
101,64		101,25		102,95		100,84		100,65					
101,64	2,02	101,40	2,05	102,48	2,14	1,92	2,04	2,19	2,14	1,92	2,09	2,14	
2,07		1,99		2,29		2,01		2,17					
2,02		2,02		2,27		2,14		2,17					
1,99	51,32	2,01	51,95	2,139	50,06	2,14	51,18	2,11	50,81	2,14	50,99	50,81	
2,02		2,17		2,22		50,85		50,42					
2,02		2,17		2,22		50,99		50,42					
51,32	51,00	51,94	51,95	50,44	50,06	51,70	51,18	50,70	50,81	51,70	50,99	50,81	
51,65		52,07		50,47		50,85		51,30					
51,00		51,85		51,27		50,99		50,42					

Tabla A.17 Dimensiones de las muestras del ensayo de flexión estática (continuación...)

CONDICIONES	PARÁMETRO	t1			t2			t3						
		A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	
P1T3H1	LONGITUD (mm)	99,95	99,79	100,39	99,80	99,83	100,35	100,84	101,13	102,03	101,85	101,55	101,41	
		99,77		101,12		100,65		101,13		101,70		101,65		
		99,65		97,88		100,57		101,41		101,81		101,04		
	ESPESOR (mm)	2,30	2,16	2,26	2,27	2,23	2,19	2,06	2,13	1,98	2,02	2,00	2,03	
		2,01		2,21		2,20		2,34		1,99		2,05		
		2,02		2,16		2,20		2,05		2,03		2,03		
	ANCHO (mm)	2,30	50,02	2,44	50,42	2,13	50,71	2,05	50,51	2,07	51,01	2,02	50,90	
		49,95		50,75		50,58		50,71		50,74		51,34		
		51,00		50,27		50,97		50,04		50,72		51,25		
	P1T3H2	LONGITUD (mm)	101,37	101,35	101,39	101,46	101,88	101,95	102,32	102,59	101,98	101,77	100,96	101,22
			101,44		101,61		102,00		102,92		101,69		101,29	
			101,25		101,38		101,97		102,53		101,65		101,41	
ESPESOR (mm)		2,15	2,07	2,23	2,14	2,25	2,17	2,21	2,11	2,03	1,93	2,03	1,85	
		2,06		2,17		2,19		2,14		1,94		1,83		
		2,02		2,09		2,12		2,10		1,86		1,75		
ANCHO (mm)		2,03	51,72	2,06	51,25	2,13	50,55	2,02	50,00	1,89	49,61	1,81	49,90	
		52,43		51,30		51,06		49,37		49,12		50,13		
		51,51		50,78		50,70		50,15		49,34		50,25		
			51,23		51,67		49,90	50,47		50,36		49,32		

Tabla A.17 Dimensiones de las muestras del ensayo de flexión estática (continuación...)

CONDICIONES	PARÁMETRO	t1			t2			t3					
		A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B
P1T3H3	LONGITUD (mm)	100,77	100,80	101,25	100,85	101,09	101,35	101,42	101,99				
		100,96		100,62		102,08		102,22					
		100,68		100,69		100,87		102,32					
		1,94	1,98	1,82	1,86	2,21	2,14	2,06	2,12				
		2,00		1,82		2,12		2,56					
		1,98		1,84		2,07		1,94					
		2,00		1,97		2,17		1,93					
		50,60	50,93	50,83	50,24	51,13	51,26	51,47	51,01				
		51,22		50,25		51,64		50,89					
	50,96	49,63		51,00		50,68							
P2T1H1	LONGITUD (mm)	102,19	103,50	103,82	103,80	101,75	101,80	101,63	101,15	101,25	101,07	101,51	101,57
		104,31		103,92		101,30		101,33		100,41		101,73	
		104,01		103,65		102,35		100,49		101,54		101,46	
		2,18	2,20	2,11	2,18	1,94	2,08	2,09	2,03	1,94	2,08	2,16	2,01
		2,14		2,13		2,03		2,02		2,06			
		2,21		2,16		2,12		2,17		1,97			
		2,27		2,33		2,24		2,00		2,17		1,86	
		51,27	51,20	50,89	51,13	52,41	51,40	51,60	51,61	50,14	50,53	50,56	50,65
		51,34		51,91		51,90		51,14		50,73		50,36	
	51,00	50,58		49,90		52,09		50,71		51,03			

Tabla A.17 Dimensiones de las muestras del ensayo de flexión estática (continuación...)

CONDICIONES	PARÁMETRO	t1			t2			t3					
		A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B
P2T1H2	LONGITUD (mm)	101,18	101,17	101,53	101,51	102,16	102,33	102,77	102,39	101,34	101,32	101,46	101,13
		101,05		102,44		102,17		101,27		101,06		100,88	
		101,28		102,40		102,23		101,34		100,88			
	ESPESOR (mm)	2,08	2,00	2,04	2,05	2,03	2,01	2,08	2,00	2,07	2,05	2,23	2,11
		1,99		2,03		2,02		2,05		2,10			
		1,99		2,03		1,97		2,04		2,07			
	ANCHO (mm)	48,61	49,07	49,08	49,36	49,55	50,13	50,28	50,42	50,10	49,89	49,28	49,46
		49,25		49,01		50,34		51,54		49,88		49,67	
		49,36		49,99		50,50		49,44		49,70		49,44	
P2T1H3	LONGITUD (mm)	101,22	101,60	101,66	101,47	101,81	101,98	101,71	102,27	101,66	101,69	101,64	101,80
		101,95		101,23		101,86		102,44		101,18		101,87	
		101,62		101,52		102,28		102,65		102,22		101,88	
	ESPESOR (mm)	2,32	2,15	2,08	2,10	2,16	2,14	2,24	2,11	2,47	2,36	2,37	2,32
		2,13		2,05		2,09		2,10		2,33		2,28	
		2,08		2,11		2,12		2,05		2,32		2,30	
	ANCHO (mm)	51,29	51,11	51,42	51,14	50,17	50,12	50,07	50,52	51,33	51,06	51,01	51,30
		51,50		50,98		50,24		50,45		50,78		51,10	
		50,53		51,01		49,94		51,03		51,06		51,79	

Tabla A.17 Dimensiones de las muestras del ensayo de flexión estática (continuación...)

CONDICIONES	PARÁMETRO	t1			t2			t3						
		A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	
P2T2H1	LONGITUD (mm)	101,93	101,95	100,78	101,75	100,39	100,62	100,46	100,52	101,46	101,11	101,21	101,16	
		101,95		102,29		100,17		100,51		101,51				
		101,97		102,17		101,30		100,60		100,76				
	ESPESOR (mm)	2,01	1,96	2,03	1,97	2,45	2,20	2,14	2,11	2,19	2,03	2,03	2,00	
		1,97		1,99		2,35		2,20		2,06				
		1,96		1,93		2,00		2,13		1,98		2,03		
		1,92		1,94		1,98		1,99		1,91		2,00		
		50,68		51,21		50,62		50,89		50,77		49,44		
	ANCHO (mm)	51,20	50,89	51,02	50,68	51,23	51,09	50,98	51,12	50,97	50,61	50,70	50,32	
		50,79		49,81		51,42		51,50		50,08		50,83		
		102,83		102,88		100,24		101,14		102,08		102,10		
		103,19		102,48		101,93		101,35		101,08		100,91		
P2T2H2	LONGITUD (mm)	102,12	102,71	101,33	102,23	102,21	101,46	101,74	101,41	99,97	101,04	101,90	101,64	
		2,35		2,18		2,12		1,94		1,94		2,20		
		2,08		2,14		2,03		1,96		1,98		2,08		
	ESPESOR (mm)	2,06	2,14	2,12	2,15	1,95	2,01	2,00	2,00	2,00	2,00	1,99	2,04	
		2,07		2,14		1,95		2,09		2,10		1,91		
		50,73		50,35		49,05		50,61		52,00		51,07		
		50,45		51,00		51,23		50,74		51,76		51,88		51,90
		51,16		51,51		51,93		50,26		51,87		52,38		
	ANCHO (mm)	50,78	50,78	50,78	50,95	51,23	50,74	50,30	50,39	51,76	51,88	52,25	51,90	
		51,16		51,51		51,93		50,26		51,87		52,38		

Tabla A.17 Dimensiones de las muestras del ensayo de flexión estática (continuación...)

CONDICIONES	PARÁMETRO	t1			t2			t3					
		A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B
P2T2H3	LONGITUD (mm)	102,65	102,33	102,97	102,92	101,87	101,36	101,87	101,87	100,65	101,36	101,39	101,24
		102,12		102,94		101,82		101,39		101,02			
		102,21		102,85		101,93		102,04		101,30			
	2,00	1,98	1,84	1,90	1,94	1,91	2,32	2,19	2,28	2,09	2,30	2,31	
	1,96		1,86		2,01		2,18		2,32				
	1,98		1,92		1,95		2,16		2,34				
	1,98	52,04	2,00	52,05	2,05	50,49	50,77	50,80	50,77	51,21	50,50	51,28	
	51,28		52,00		50,96		51,37		51,85				
	52,35		52,15		51,20		51,48		51,49				
	52,49	101,79	51,99	101,68	50,25	101,41	101,55	101,10	101,55	101,26	101,06	101,61	
	101,68		102,23		100,68		101,54		102,04				
	101,84		101,98		100,76		100,68		101,73				
101,85	1,96	100,84	1,97	101,85	2,12	2,18	2,03	2,18	2,06	2,00	2,13		
1,90		2,02		2,20		2,07		2,54					
2,02		2,02		1,93		2,02		1,93					
1,94	50,63	1,94	50,39	1,96	50,96	2,02	50,87	2,02	50,85	1,95	50,51		
2,00		1,91		2,02		1,95		2,06					
50,84		50,58		50,69		50,72		51,65					
50,85	50,19	50,31	50,28	50,46	51,47	50,80	51,04	50,80	50,85	50,67	50,51		
50,19		50,28		51,47		51,04		49,22					

Tabla A.17 Dimensiones de las muestras del ensayo de flexión estática (continuación...)

CONDICIONES	PARÁMETRO	t1			t2			t3					
		A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B
P2T3H2	LONGITUD (mm)	101,22	101,20	101,18	101,19	102,00	102,04	102,22	102,06	101,56	101,26	101,45	101,22
		101,18		101,57		101,99		102,10		101,47		101,13	
		101,21		100,83		102,14		101,85		100,75		101,07	
		2,01	2,14	1,98	2,09	2,20	2,13	2,16	2,22	1,88	1,82	1,77	1,89
		2,31		2,04		2,03		2,22		1,82		1,90	
		2,20		2,13		2,30		2,22		1,81		1,91	
		2,02	50,39	2,23	50,88	1,98	51,01	2,29	51,26	1,76	51,01	1,97	51,24
		49,92		50,09		50,05		50,04		51,54		51,33	
		50,37		50,91		51,00		52,57		50,48		51,16	
		50,87		51,64		51,98		51,17		51,01		51,23	

Tabla A.18 Dimensiones de las muestras del ensayo de tracción perpendicular a la superficie

CONDICIONES	PARÁMETRO	t1			t2			t3						
		A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	
P1T1H1	LONGITUD (mm)	50,13	50,20	50,06	50,15	47,71	48,40	48,18	48,17	49,89	50,05	50,49	50,43	
		50,46		48,66		48,29		50,01		50,365				
		50,01		48,84		48,06		50,25						
	ESPESOR (mm)	2,29	2,30	2,23	2,27	2,56	2,80	2,78	2,56	2,02	2,09	1,96	2,07	
		2,31		2,30		2,72		2,63		1,99				
		2,24		2,21		2,92		2,49		2,22				
		2,35		2,35		3,01		2,32		2,11				
	ANCHO (mm)	47,10	47,02	46,56	46,64	47,72	47,67	49,69	48,343	49,89	49,95	48,71	49,26	
		46,92		47,12		46,68		48,00		49,99		49,27		
		47,04		46,23		48,60		47,34		49,99		49,81		
	P1T1H2	LONGITUD (mm)	50,56	50,78	51,24	51,28	50,75	50,75	49,91	50,01	50,92	50,92	50,33	50,14
			50,63		51,33		50,50		50,16		51,39		49,90	
51,15			51,28		50,99		49,97		50,45		50,20			
ESPESOR (mm)		1,78	1,85	1,90	1,94	2,00	2,07	2,63	2,53	2,12	2,38	2,63	2,52	
		1,81		1,93		1,99		2,60		2,31		2,58		
		1,89		1,97		2,09		2,48		2,46		2,47		
		1,94		1,95		2,19		2,42		2,62		2,39		
ANCHO (mm)		47,25	47,25	48,58	47,70	49,13	49,06	49,37	48,91	46,09	46,54	48,09	46,68	
		47,01		48,04		49,08		48,85		45,76		45,95		
		47,48		46,49		48,97		48,50		47,77		45,99		

Tabla A.18 Dimensiones de las muestras del ensayo de tracción perpendicular a la superficie (continuación...)

CONDICIONES	PARÁMETRO	t1			t2			t3						
		A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	
P1T1H3	LONGITUD (mm)	50,16	50,69	50,58	50,76	51,00	50,74	50,01	50,07	50,92	51,04	50,915	50,65	
		50,80		50,78		50,97		50,06		50,96		50,815		
		51,12		50,91		50,26		50,14		51,23		50,215		
	ESPESOR (mm)	2,39	2,28	2,18	2,14	2,44	2,40	2,49	2,48	1,89	1,89	2,02	1,82	
		2,31		2,17		2,42		2,51		1,87		1,39		
		2,22		2,12		2,36		2,48		1,90		1,93		
	ANCHO (mm)	2,20	45,89	2,09	45,41	2,41	45,41	2,43	45,03	1,90	48,30	1,96	47,13	
		45,70		44,80		44,80		44,82		48,30		48,51		
		46,11		45,40		45,40		45,13		48,79		47,35		
	P1T2H1	LONGITUD (mm)	49,95	49,97	49,53	49,67	52,29	52,10	52,05	51,62	51,37	51,47	51,90	51,39
			49,82		49,73		52,31		51,49		51,56		51,40	
			50,16		49,77		51,70		51,33		51,48		50,86	
ESPESOR (mm)		2,08	2,22	2,55	2,31	2,59	2,30	1,98	2,19	2,06	2,23	2,11	2,17	
		2,18		2,43		2,43		2,09		2,39		2,08		
		2,27		2,24		2,20		2,29		2,29		1,89		
ANCHO (mm)		2,35	50,15	2,04	50,37	1,98	50,34	2,42	50,93	2,17	49,96	2,59	49,86	
		49,43		50,40		51,63		50,67		50,21		49,46		
		50,20		50,00		50,21		50,96		49,70		50,52		
		50,83		50,71	49,19		51,17		49,97			49,60		

Tabla A.18 Dimensiones de las muestras del ensayo de tracción perpendicular a la superficie (**continuación...**)

CONDICIONES	PARÁMETRO	t1			t2			t3						
		A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	
P1T2H2	LONGITUD (mm)	50,71	50,67	51,37	51,36	52,64	52,41	52,46	52,86	49,55	50,02	50,32	50,32	
		50,69		51,47		52,73		53,18		50,19		50,425		
		50,62		51,24		51,86		52,95		50,33		50,215		
	ESPESOR (mm)	2,02	2,18	2,11	2,04	2,07	2,23	2,09	2,24	2,43	2,36	2,41	2,24	
		2,17		1,93		2,16		2,22		2,49		2,29		
		2,22		2,03		2,28		2,29		2,30		2,19		
	ANCHO (mm)	2,29	50,57	2,08	49,83	2,39	51,32	2,39	51,17	2,20	50,55	2,07	49,71	
		50,21		49,03		50,70		51,09		51,19		50,39		
		51,47		50,15		50,82		51,58		51,24		49,24		
	P1T2H3	LONGITUD (mm)	50,74	50,79	50,69	50,67	50,94	51,00	51,18	51,27	50,31	50,38	49,80	50,10
			50,82		50,63		50,82		51,48		50,41		50,20	
			50,82		50,70		51,24		51,15		50,42		50,33	
ESPESOR (mm)		2,07	2,02	1,99	2,05	2,06	2,14	2,29	2,25	1,92	2,04	2,19	2,14	
		2,02		2,02		2,14		2,27		2,01		2,17		
		1,99		2,01		2,14		2,23		2,14		2,11		
ANCHO (mm)		2,02	51,32	2,17	51,95	2,21	50,06	2,22	50,88	2,12	51,18	2,09	50,81	
		51,32		51,94		50,44		50,91		51,70		50,70		
		51,65		52,07		50,00		50,47		50,85		51,30		
			51,00	51,85	49,74	51,27	50,99	50,42						

Tabla A.18 Dimensiones de las muestras del ensayo de tracción perpendicular a la superficie (continuación...)

CONDICIONES	PARÁMETRO	t1			t2			t3						
		A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	
P1T3H1	LONGITUD (mm)	49,98	49,90	50,20	49,90	49,92	50,175	50,42	50,56	51,02	50,92	50,775	50,71	
		49,89		50,56		50,33		50,57		50,85		50,825		
		49,83		48,94		50,29		50,71		50,91		50,52		
	ESPESOR (mm)	2,30	2,16	2,26	2,27	2,23	2,19	2,06	2,13	1,98	2,02	2,00	2,03	
		2,01		2,21		2,20		2,34		1,99		2,05		
		2,02		2,16		2,20		2,05		2,03		2,03		
	ANCHO (mm)	2,30	50,02	2,44	50,42	2,13	50,71	2,05	50,51	2,07	51,01	2,02	50,90	
		49,95		50,75		50,58		50,71		50,74		51,34		
		51,00		50,27		50,97		50,71		50,72		51,25		
	P1T3H2	LONGITUD (mm)	49,10	50,25	50,58	50,58	50,58	50,98	50,78	51,30	51,57	50,89	50,11	50,61
			50,69		50,70		50,94		51,16		50,99		50,48	
			50,72		50,81		51,00		51,46		50,85		50,65	
ESPESOR (mm)		50,63	50,69	50,69	50,73	50,99	2,17	51,27	2,11	50,83	1,93	50,71	1,85	
		2,15		2,23		2,25		2,21		2,03		2,03		
		2,06		2,17		2,19		2,14		1,94		1,83		
ANCHO (mm)		2,02	2,07	2,09	2,14	2,12	50,55	2,10	50,00	1,86	49,61	1,75	49,90	
		2,03		2,06		2,13		2,02		1,89		1,81		
		52,43		51,30		51,06		49,37		49,12		50,13		
		51,51	51,72	50,78	51,25	50,70	50,55	50,15	50,00	49,34	49,61	50,25	49,90	
		51,23		51,67		49,90		50,47		50,36		49,32		

Tabla A.18 Dimensiones de las muestras del ensayo de tracción perpendicular a la superficie (continuación...)

CONDICIONES	PARÁMETRO	t1			t2			t3						
		A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	
P1T3H3	LONGITUD (mm)	50,39	50,40	50,63	50,43	50,55	50,67	50,71	50,99					
		50,48		51,04		51,11								
		50,34		50,44		51,16								
	1,94	1,98	1,82	1,86	2,21	2,14	2,06	2,12						
	2,00		1,82		2,12		2,56							
	1,98		1,84		2,07		1,94							
	2,00		1,97		2,17		1,93							
	50,60	50,93	50,83	50,24	51,13	51,26	51,47	51,01						
	51,22		50,25		51,64		50,89							
50,96	49,63		51,00		50,68									
P2T1H1	LONGITUD (mm)	51,10	51,75	51,91	51,90	50,88	50,90	50,82	50,58	50,63	50,53	50,76	50,78	
		52,16		51,96		50,65		50,67		50,21		50,87		
		52,01		51,83		51,18		50,25		50,77		50,73		
	2,18	2,20	2,11	2,18	1,94	2,08	2,09	2,03	1,94	2,08	2,16	2,01		
	2,14		2,13		2,03		2,01		2,02		2,06			
	2,21		2,16		2,12		2,04		2,17		1,97			
	2,27		2,33		2,24		2,00		2,17		1,86			
	51,27	51,20	50,89	51,13	52,41	51,40	51,60	51,61	50,14	50,53	50,56	50,65		
	51,34		51,91		51,90		51,14		50,73		50,36			
51,00	50,58		49,90		52,09		50,71		51,03					

Tabla A.18 Dimensiones de las muestras del ensayo de tracción perpendicular a la superficie (continuación...)

CONDICIONES	PARÁMETRO	t1			t2			t3						
		A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	
P2T1H2	LONGITUD (mm)	50,59	50,59	50,77	50,76	51,08	51,17	51,39	51,20	50,67	50,66	50,73	50,57	
		50,53		50,78		51,22		51,09		50,64		50,53		
		50,64		50,73		51,20		51,12		50,67		50,44		
	ESPESOR (mm)	2,08	2,00	2,04	2,05	2,03	2,01	2,08	2,00	2,07	2,05	2,23	2,11	
		1,99		2,03		1,99		2,02		2,05		2,10		
		1,99		2,03		2,03		1,97		2,04		2,07		
	ANCHO (mm)	1,93	49,07	2,11	49,36	1,99	50,13	1,91	50,42	2,03	49,70	2,05	49,46	
		48,61		49,08		49,55		50,28		50,10		49,28		
		49,25		49,01		50,34		51,54		49,88		49,67		
	P2T1H3	LONGITUD (mm)	50,61	50,80	50,83	50,74	50,91	50,99	50,86	51,13	50,83	50,84	50,82	50,90
			50,98		50,62		50,93		51,22		50,59		50,94	
			50,81		50,76		51,14		51,33		51,11		50,94	
ESPESOR (mm)		2,32	2,15	2,08	2,10	2,16	2,14	2,24	2,11	2,47	2,36	2,37	2,32	
		2,13		2,05		2,09		2,10		2,33		2,28		
		2,08		2,11		2,12		2,05		2,32		2,30		
ANCHO (mm)		2,06	51,11	2,16	51,14	2,19	50,12	2,02	50,52	2,30	51,06	2,32	51,30	
		51,29		51,42		50,17		50,07		51,33		51,01		
		51,50		50,98		50,24		50,45		50,78		51,10		
			50,53	51,01	49,94	51,14	50,24	51,03	50,52	51,06	51,79	51,30		

Tabla A.18 Dimensiones de las muestras del ensayo de tracción perpendicular a la superficie (continuación...)

CONDICIONES	PARÁMETRO	t1			t2			t3					
		A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B
P2T2H1	LONGITUD (mm)	50,97	50,98	50,39	50,87	50,20	50,31	50,23	50,26	50,73	50,55	50,605	50,58
		50,98		51,15		50,09		50,26		50,49		50,755	
		50,99		51,09		50,65		50,30		50,44		50,38	
	2,01	1,96	2,03	1,97	2,45	2,20	2,14	2,11	2,19	2,03	2,03	2,00	
	1,97		1,99		2,35		2,20		2,06				
	1,96		1,93		2,00		2,13		1,98		1,93		
	1,92	50,89	1,94	50,68	1,98	51,09	1,99	51,12	1,91	50,61	2,00	50,83	
	50,68		51,21		50,62		50,89		50,77		49,44		
	51,20		51,02		51,23		50,98		50,97		50,70		
50,79	51,36	49,81	51,12	51,42	50,73	51,50	50,71	50,08	50,52	50,95	50,82		
51,42		51,44		50,12		50,57		51,04		51,05			
51,60		51,24		50,97		50,68		50,54		50,46			
51,06	2,14	50,67	2,15	51,11	2,01	50,87	2,00	49,99	2,00	1,99	2,04		
2,35		2,18		2,12		1,94		1,94		2,20			
2,08		2,14		2,03		1,96		1,98		2,08			
2,06	50,78	2,12	50,95	1,95	50,74	2,00	50,39	2,00	51,88	1,99	51,90		
2,07		2,14		1,95		2,09		2,10		1,91			
50,73		50,35		49,05		50,61		52,00		51,07			
50,45	51,16	51,00	51,51	51,23	51,93	50,30	50,26	51,76	52,25	52,25	52,38		
51,16		51,51		51,93		50,26		51,87		52,38			

Tabla A.18 Dimensiones de las muestras del ensayo de tracción perpendicular a la superficie (continuación...)

CONDICIONES	PARÁMETRO	t1			t2			t3						
		A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	
P2T2H3	LONGITUD (mm)	51,33	51,16	51,49	51,46	50,67	50,68	50,94	50,94	50,33	50,68	50,695	50,62	
		51,06		51,47		50,77		50,91		50,70		50,51		
		51,11		51,43		50,60		50,97		51,02		50,65		
	ESPESOR (mm)	2,00	1,98	1,84	1,90	1,85	1,91	1,94	1,99	2,32	2,19	2,28	2,31	
		1,96		1,86		1,86		2,01		2,18		2,30		
		1,98		1,92		1,98		1,95		2,16		2,32		
		1,98		2,00		1,96		2,05		2,09		2,34		
	ANCHO (mm)	51,28	52,04	52,00	52,05	50,47	50,49	50,96	50,80	50,77	51,20	50,50	51,28	
		52,35		52,15		50,72		51,20		51,37		51,85		
		52,49		51,99		50,29		50,25		51,48		51,49		
	P2T3H1	LONGITUD ζ (mm)	50,84	50,90	51,12	50,84	50,46	50,71	50,34	50,55	50,78	50,63	50,53	50,81
			50,92		50,99		50,97		50,38		50,77		51,02	
50,93			50,42		50,69		50,93		50,34		50,87			
ESPESOR (mm)		1,90	1,96	2,02	1,97	2,05	2,12	2,20	2,03	2,18	2,06	2,00	2,13	
		2,02		2,02		2,07		1,93		2,07		2,54		
		1,94		1,94		2,16		1,96		2,02		1,93		
		2,00		1,91		2,20		2,02		1,95		2,06		
ANCHO (mm)		50,84	50,63	50,58	50,39	50,44	50,96	50,69	50,87	50,72	50,85	51,65	50,51	
		50,85		50,31		50,90		50,46		50,80		50,67		
		50,19		50,28		51,53		51,47		51,04		49,22		

Tabla A.18 Dimensiones de las muestras del ensayo de tracción perpendicular a la superficie (continuación...)

CONDICIONES	PARÁMETRO	t1			t2			t3						
		A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	A	Prom A	B	Prom B	
P2T3H2	LONGITUD (mm)	50,61	50,60	50,59	50,60	51,00	51,02	51,11	51,03	50,78	50,63	50,725	50,61	
		50,59		50,79		51,00		51,05		50,74		50,565		
		50,61		50,42		51,07		50,93		50,38		50,535		
	ESPESOR (mm)	2,01	2,14	1,98	2,09	2,20	2,13	2,16	2,22	1,88	1,82	1,82	1,77	1,89
		2,31		2,04		2,03		2,22		1,82			1,90	
		2,20		2,13		2,30		2,22		1,81			1,91	
		2,02		2,23		1,98		2,29		1,76			1,97	
	ANCHO (mm)	49,92	50,39	50,09	50,88	50,05	51,01	50,04	51,26	51,54	51,01	51,33	51,24	
		50,37		50,91		51,00		52,57		50,48		51,16		
		50,87		51,64		51,98		51,17		51,01		51,23		

Tabla A.19 Contenido de humedad de las muestras para los ensayos de flexión estática

ENSAYO N°	CONDICIONES	A			B			PROMEDIO HUMEDAD (%)
		PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	HUMEDA D (%)	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	HUMEDAD (%)	
1	P1T1H1t1	0,94	0,87	6,95	0,96	0,89	6,80	6,88
2	P1T1H1t2	1,06	0,99	6,54	1,04	0,97	6,80	6,67
3	P1T1H1t3	0,92	0,86	6,83	0,92	0,85	6,89	6,86
4	P1T1H2t1	1,04	0,97	6,83	1,10	1,03	6,11	6,47
5	P1T1H2t2	1,05	0,97	7,16	0,90	0,83	7,49	7,32
6	P1T1H2t3	1,04	0,97	6,94	0,96	0,89	7,10	7,02
7	P1T1H3t1	0,97	0,90	6,93	0,95	0,89	7,01	6,97
8	P1T1H3t2	1,26	1,18	6,45	1,02	0,94	7,09	6,77
9	P1T1H3t3	0,91	0,84	7,28	0,78	0,73	7,17	7,22
10	P1T2H1t1	1,39	1,34	3,95	1,04	1,01	3,55	3,75
11	P1T2H1t2	0,90	0,87	3,21	1,36	1,32	3,37	3,29
12	P1T2H1t3	1,33	1,29	3,38	0,99	0,97	1,93	2,65
13	P1T2H2t1	1,29	1,26	2,71	1,21	1,17	3,23	2,97
14	P1T2H2t2	1,31	1,27	3,06	1,08	1,05	3,05	3,06
15	P1T2H2t3	1,25	1,21	3,60	1,16	1,11	4,23	3,91
16	P1T2H3t1	1,15	1,10	4,70	1,12	1,07	4,82	4,76
17	P1T2H3t2	0,87	0,82	5,64	0,92	0,87	5,66	5,65
18	P1T2H3t3	1,06	1,02	4,51	1,15	1,10	4,34	4,43
19	P1T3H1t1	1,60	1,54	3,87	1,16	1,11	3,72	3,79
20	P1T3H1t2	1,13	1,09	3,70	1,13	1,09	3,55	3,63

Tabla A.19 Contenido de humedad de las muestras para los ensayos de flexión estática (continuación....).

ENSAYO Nº	CONDICIONES	A			B			PROMEDIO HUMEDAD (%)
		PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	HUMEDAD (%)	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	HUMEDAD (%)	
21	P1T3H1t3	1,19	1,15	3,35	1,24	1,20	3,30	3,32
22	P1T3H2t1	1,04	1,00	3,85	0,90	0,87	3,66	3,75
23	P1T3H2t2	0,99	0,92	6,39	1,33	1,25	6,23	6,31
24	P1T3H2t3	1,14	1,09	3,70	1,13	1,09	3,73	3,71
25	P1T3H3t1	1,11	1,06	4,51	1,19	1,14	4,70	4,61
26	P1T3H3t2	1,10	1,06	3,80	1,35	1,31	3,40	3,60
27	P2T1H1t1	1,09	1,06	2,94	0,90	0,87	3,78	3,36
28	P2T1H1t2	1,23	1,18	4,39	1,24	1,18	4,68	4,54
29	P2T1H1t3	0,84	0,81	4,15	1,23	1,18	3,91	4,03
30	P2T1H2t1	1,02	0,97	4,88	1,23	1,17	4,98	4,93
31	P2T1H2t2	0,93	0,89	4,99	1,00	0,95	5,01	5,00
32	P2T1H2t3	1,08	1,01	6,35	1,35	1,26	6,23	6,29
33	P2T1H3t1	0,96	0,91	4,58	0,91	0,87	4,38	4,48
34	P2T1H3t2	1,26	1,20	4,34	1,08	1,03	4,47	4,40
35	P2T1H3t3	0,94	0,90	3,69	0,98	0,94	3,96	3,83
36	P2T2H1t1	1,03	0,99	4,65	1,35	1,30	4,26	4,46
37	P2T2H1t2	0,93	0,89	3,56	0,91	0,88	3,78	3,67
38	P2T2H1t3	1,02	0,99	3,65	1,10	1,06	3,48	3,57
39	P2T2H2t1	1,09	1,04	4,43	1,05	1,00	4,64	4,54
40	P2T2H2t2	0,97	0,93	4,09	1,66	1,59	4,26	4,17

Tabla A.19 Contenido de humedad de las muestras para los ensayos de flexión estática (continuación...)

ENSAYO N°	CONDICIONES	A			B			PROMEDIO HUMEDAD (%)
		PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	HUMEDAD (%)	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	HUMEDAD (%)	
41	P2T2H2t3	1,09	1,06	2,66	1,32	1,30	1,82	2,24
42	P2T2H3t1	1,01	0,97	3,85	1,25	1,20	4,07	3,96
43	P2T2H3t2	0,95	0,92	3,15	1,19	1,15	3,45	3,30
44	P2T2H3t3	1,09	1,05	3,58	1,60	1,54	3,69	3,64
45	P2T3H1t1	0,94	0,91	3,19	1,06	1,03	3,67	3,43
46	P2T3H1t2	1,12	1,08	4,00	1,06	1,02	4,24	4,12
47	P2T3H1t3	1,16	1,12	3,78	1,22	1,17	3,69	3,74
48	P2T3H2t1	1,34	1,31	2,61	1,31	1,27	2,68	2,64
49	P2T3H2t2	1,12	1,10	2,06	1,21	1,18	2,31	2,18
50	P2T3H2t3	1,28	1,23	3,75	1,18	1,14	3,80	3,78

Tabla A.20 Contenido de humedad de las muestras para los ensayos de tracción perpendicular a la superficie

ENSAYO N°	CONDICIONES	A				B				PROMEDIO HUMEDAD (%)
		PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	HUMEDAD (%)	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	HUMEDAD (%)	HUMEDAD (%)		
1	P1T1H1t1	4,30	3,99	7,19	4,34	4,02	7,27	7,23		
2	P1T1H1t2	3,96	3,69	6,96	4,52	4,21	6,97	6,97		
3	P1T1H1t3	4,63	4,32	6,67	4,77	4,45	6,71	6,69		
4	P1T1H2t1	4,09	3,79	7,31	4,62	4,30	7,05	7,18		
5	P1T1H2t2	4,44	4,11	7,49	4,27	3,94	7,66	7,58		
6	P1T1H2t3	5,08	4,72	7,14	5,04	4,68	7,05	7,09		
7	P1T1H3t1	4,97	4,64	6,70	4,51	4,20	6,88	6,79		
8	P1T1H3t2	4,45	4,13	7,10	4,93	4,59	6,98	7,04		
9	P1T1H3t3	4,95	4,67	5,74	4,24	4,00	5,73	5,73		
10	P1T2H1t1	4,16	3,99	4,13	5,03	4,82	4,33	4,23		
11	P1T2H1t2	4,45	4,25	4,45	4,75	4,55	4,25	4,35		
12	P1T2H1t3	4,28	4,10	4,11	4,67	4,47	4,22	4,17		
13	P1T2H2t1	3,74	3,59	3,85	3,15	3,03	3,94	3,89		
14	P1T2H2t2	4,56	4,33	4,89	4,70	4,49	4,43	4,66		
15	P1T2H2t3	4,26	4,09	3,90	4,29	4,15	3,26	3,58		
16	P1T2H3t1	4,02	3,81	5,03	4,93	4,69	4,81	4,92		
17	P1T2H3t2	4,77	4,49	5,91	4,69	4,41	5,99	5,95		
18	P1T2H3t3	4,61	4,09	11,19	4,69	4,14	11,81	11,50		
19	P1T3H1t1	4,67	4,47	4,32	4,32	4,13	4,46	4,39		
20	P1T3H1t2	5,00	4,81	3,80	4,08	3,93	3,80	3,80		

Tabla A.20 Contenido de humedad de las muestras para los ensayos de tracción perpendicular a la superficie (continuación...)

ENSAYO N°	CONDICIONES	A			B			PROMEDIO HUMEDAD (%)
		PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	HUMEDAD (%)	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	HUMEDAD (%)	
21	P1T3H1t3	4,85	4,66	3,88	4,37	4,21	3,73	3,80
22	P1T3H2t1	4,53	4,33	4,46	4,63	4,41	4,58	4,52
23	P1T3H2t2	4,71	4,42	6,14	4,26	3,99	6,29	6,21
24	P1T3H2t3	3,98	3,80	4,43	4,70	4,50	4,28	4,35
25	P1T3H3t1	4,58	4,34	5,20	5,53	4,30	22,15	13,68
26	P1T3H3t2	4,84	4,62	4,58	3,77	3,59	4,70	4,64
27	P2T1H1t1	4,48	4,31	3,86	4,57	4,39	3,92	3,89
28	P2T1H1t2	4,85	4,65	4,06	4,46	4,28	4,08	4,07
29	P2T1H1t3	4,70	4,51	3,98	3,92	3,78	3,65	3,82
30	P2T1H2t1	4,64	4,42	4,89	4,37	4,16	4,74	4,82
31	P2T1H2t2	4,93	4,72	4,16	4,29	4,11	4,08	4,12
32	P2T1H2t3	5,15	4,93	4,38	4,39	4,19	4,60	4,49
33	P2T1H3t1	4,75	4,58	3,47	4,26	4,10	3,69	3,58
34	P2T1H3t2	5,03	4,79	4,77	4,55	4,34	4,72	4,75
35	P2T1H3t3	4,56	4,24	7,16	4,34	4,03	7,01	7,09
36	P2T2H1t1	4,49	4,33	3,54	4,43	4,27	3,61	3,58
37	P2T2H1t2	4,62	4,44	3,73	4,24	4,07	3,99	3,86
38	P2T2H1t3	4,84	4,63	4,34	4,21	4,03	4,30	4,32
39	P2T2H2t1	4,45	4,24	4,57	5,37	5,13	4,51	4,54
40	P2T2H2t2	4,54	4,35	4,18	4,77	4,57	4,20	4,19

Tabla A.20 Contenido de humedad de las muestras para los ensayos de tracción perpendicular a la superficie (continuación...)

ENSAYO N°	CONDICIONES	A			B			PROMEDIO HUMEDAD (%)
		PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	HUMEDAD (%)	PESO INICIAL (g)	PESO FINAL (g)	HUMEDAD (%)	
41	P2T2H2t3	4,93	4,73	3,98	4,57	4,41	3,59	3,78
42	P2T2H3t1	4,32	4,04	6,46	3,54	3,33	6,01	6,24
43	P2T2H3t2	4,36	4,18	4,19	4,47	4,29	4,05	4,12
44	P2T2H3t3	4,71	4,49	4,71	4,76	4,55	4,52	4,62
45	P2T3H1t1	4,67	4,49	3,83	4,32	4,15	3,80	3,82
46	P2T3H1t2	4,04	3,87	4,06	4,08	3,91	4,02	4,04
47	P2T3H1t3	4,28	4,11	3,88	4,07	3,91	3,88	3,88
48	P2T3H2t1	4,99	4,82	3,53	4,49	4,34	3,25	3,39
49	P2T3H2t2	4,53	4,37	3,60	4,51	4,34	3,70	3,65
50	P2T3H2t3	4,91	4,74	3,42	4,11	3,98	3,35	3,39

Tabla A.21 Gravedad específica de las muestras para los ensayos de flexión estática

ENSAYO N°	ESPECIMEN	A						B						PROMEDIO GRAVEDAD ESPECÍFICA
		PESO (g)	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	K	GRAVEDAD ESPECÍFICA	PESO (g)	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	K	GRAVEDAD ESPECÍFICA	
1	P1T1H1I1	8,63	100,40	47,02	2,30	1 000	0,80	8,36	100,30	46,64	2,27	1 000	0,79	0,79
2	P1T1H1I2	8,44	96,80	47,67	2,80	1 000	0,65	7,71	96,35	48,34	2,56	1 000	0,65	0,65
3	P1T1H1I3	7,66	100,10	49,96	2,09	1 000	0,73	9,53	100,86	49,26	2,07	1 000	0,93	0,83
4	P1T1H2I1	8,18	101,56	47,25	1,85	1 000	0,92	8,29	102,56	47,70	1,94	1 000	0,87	0,90
5	P1T1H2I2	8,67	101,49	49,06	2,07	1 000	0,84	9,17	100,20	48,91	2,53	1 000	0,74	0,79
6	P1T1H2I3	8,34	101,83	46,54	2,38	1 000	0,74	9,72	100,28	46,68	2,52	1 000	0,82	0,78
7	P1T1H3I1	9,48	101,38	45,90	2,28	1 000	0,89	8,71	101,51	45,41	2,14	1 000	0,88	0,89
8	P1T1H3I2	8,48	101,48	45,41	2,40	1 000	0,77	8,58	100,14	45,03	2,48	1 000	0,77	0,77
9	P1T1H3I3	8,79	102,07	48,30	1,89	1 000	0,94	8,24	101,30	47,13	1,82	1 000	0,95	0,95
10	P1T2H1I1	8,15	99,95	50,15	2,22	1 000	0,73	8,15	99,35	50,37	2,31	1 000	0,71	0,72
11	P1T2H1I2	8,92	104,19	50,34	2,30	1 000	0,74	8,70	103,24	50,93	2,19	1 000	0,76	0,75
12	P1T2H1I3	8,95	102,93	49,96	2,23	1 000	0,78	8,13	102,77	49,86	2,17	1 000	0,73	0,76
13	P1T2H2I1	6,89	101,34	50,57	2,18	1 000	0,62	8,67	102,72	49,83	2,04	1 000	0,83	0,72
14	P1T2H2I2	9,27	104,81	51,32	2,23	1 000	0,77	8,89	105,72	51,17	2,24	1 000	0,73	0,75
15	P1T2H2I3	8,55	100,04	50,55	2,36	1 000	0,72	8,64	100,64	49,71	2,24	1 000	0,77	0,74
16	P1T2H3I1	7,87	101,58	51,32	2,02	1 000	0,75	7,83	101,34	51,95	2,05	1 000	0,73	0,74
17	P1T2H3I2	8,54	101,99	50,06	2,14	1 000	0,78	8,15	102,52	50,88	2,25	1 000	0,69	0,74
18	P1T2H3I3	9,30	100,76	51,18	2,04	1 000	0,88	9,20	100,21	50,81	2,14	1 000	0,84	0,86
19	P1T3H1I1	9,00	99,79	50,02	2,16	1 000	0,83	8,42	99,80	50,42	2,27	1 000	0,74	0,79
20	P1T3H1I2	8,98	100,35	50,71	2,19	1 000	0,81	9,81	101,13	50,51	2,13	1 000	0,90	0,85

Tabla A.21 Gravedad específica de las muestras para los ensayos de flexión estática (continuación...)

ENSAYO N°	ESPECIMEN	A						B						PROMEDIO GRAVEDAD ESPECÍFICA
		PESO (g)	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	K	GRAVEDAD ESPECÍFICA	PESO (g)	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	K	GRAVEDAD ESPECÍFICA	
21	P1T3H1t3	9,22	101,85	51,01	2,02	1 000	0,88	8,66	101,41	50,90	2,03	1 000	0,83	0,85
22	P1T3H2t1	9,16	101,35	51,72	2,07	1 000	0,84	8,87	101,46	51,25	2,14	1 000	0,80	0,82
23	P1T3H2t2	8,97	101,95	50,55	2,17	1 000	0,80	9,06	102,59	50,00	2,11	1 000	0,84	0,82
24	P1T3H2t3	8,50	101,77	49,61	1,93	1 000	0,87	7,78	101,22	49,90	1,85	1 000	0,83	0,85
25	P1T3H3t1	9,16	100,80	50,93	1,98	1 000	0,90	8,92	100,85	50,24	1,86	1 000	0,95	0,92
26	P1T3H3t2	8,47	101,35	51,26	2,14	1 000	0,76	9,46	101,99	51,01	2,12	1 000	0,86	0,81
27	P2T1H1t1	8,34	103,50	51,20	2,20	1 000	0,72	8,79	103,80	51,13	2,18	1 000	0,76	0,74
28	P2T1H1t2	9,31	101,80	51,40	2,08	1 000	0,86	8,89	101,15	51,61	2,03	1 000	0,84	0,85
29	P2T1H1t3	9,03	101,07	50,53	2,08	1 000	0,85	9,21	101,57	50,65	2,01	1 000	0,89	0,87
30	P2T1H2t1	8,63	101,17	49,07	2,00	1 000	0,87	8,84	101,51	49,36	2,05	1 000	0,86	0,87
31	P2T1H2t2	9,26	102,33	50,13	2,01	1 000	0,90	8,88	102,39	50,42	2,00	1 000	0,86	0,88
32	P2T1H2t3	7,87	101,32	49,89	2,05	1 000	0,76	9,71	101,13	49,96	2,11	1 000	0,91	0,83
33	P2T1H3t1	8,54	101,60	51,11	2,15	1 000	0,77	8,74	101,47	51,14	2,10	1 000	0,80	0,78
34	P2T1H3t2	8,34	101,98	50,12	2,14	1 000	0,76	8,72	102,27	50,52	2,11	1 000	0,80	0,78
35	P2T1H3t3	9,67	101,69	51,06	2,36	1 000	0,79	9,45	101,80	51,30	2,32	1 000	0,78	0,78
36	P2T2H1t1	8,51	101,95	50,89	1,96	1 000	0,84	8,78	101,75	50,68	1,97	1 000	0,86	0,85
37	P2T2H1t2	8,47	100,62	51,09	2,20	1 000	0,75	8,83	100,52	51,12	2,11	1 000	0,81	0,78
38	P2T2H1t3	8,18	101,11	50,61	2,03	1 000	0,79	8,68	101,16	50,32	2,00	1 000	0,85	0,82
39	P2T2H2t1	9,32	102,71	50,78	2,14	1 000	0,84	8,89	102,23	50,95	2,15	1 000	0,79	0,81
40	P2T2H2t2	8,73	101,46	50,74	2,01	1 000	0,84	8,62	101,41	50,39	2,00	1 000	0,84	0,84

Tabla A.21 Gravedad específica de las muestras para los ensayos de flexión estática (continuación...)

ENSAYO N°	ESPECIMEN	A						B						PROMEDIO GRAVEDAD ESPECÍFICA
		PESO (g)	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	K	GRAVEDAD ESPECÍFICA	PESO (g)	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	K	GRAVEDAD ESPECÍFICA	
41	P2T2H2t3	8,99	101,04	51,88	2,00	1 000	0,86	9,23	101,64	51,90	2,04	1 000	0,86	0,86
42	P2T2H3t1	8,82	102,33	52,04	1,98	1 000	0,84	8,36	102,92	52,05	1,90	1 000	0,82	0,83
43	P2T2H3t2	8,29	101,36	50,49	1,91	1 000	0,85	8,54	101,87	50,80	1,99	1 000	0,83	0,84
44	P2T2H3t3	9,47	101,36	51,21	2,19	1 000	0,83	9,20	101,24	51,28	2,31	1 000	0,77	0,80
45	P2T3H1t1	8,99	101,79	50,63	1,96	1 000	0,89	9,16	101,68	50,39	1,97	1 000	0,91	0,90
46	P2T3H1t2	8,21	101,41	50,96	2,12	1 000	0,75	7,91	101,10	50,87	2,03	1 000	0,76	0,75
47	P2T3H1t3	8,51	101,26	50,85	2,06	1 000	0,80	8,39	101,61	50,51	2,13	1 000	0,77	0,78
48	P2T3H2t1	8,53	101,20	50,39	2,14	1 000	0,78	9,81	101,19	50,88	2,09	1 000	0,91	0,85
49	P2T3H2t2	9,04	102,04	51,01	2,13	1 000	0,82	8,90	102,06	51,26	2,22	1 000	0,77	0,79
50	P2T3H2t3	9,02	101,26	51,01	1,82	1 000	0,96	9,65	101,22	51,24	1,89	1 000	0,98	0,97

Tabla A.22 Gravedad específica de las muestras para los ensayos de tracción perpendicular

ENSAYO N°	ESPECIMEN	A						B						PROMEDIO GRAVEDAD ESPECÍFICA
		PESO (g)	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	K	GRAVEDAD ESPECÍFICA	PESO (g)	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	K	GRAVEDAD ESPECÍFICA	
1	P1T1H1t1	3,99	50,20	47,02	2,30	1 000	0,37	4,02	50,15	46,64	2,27	1 000	0,76	0,56
2	P1T1H1t2	3,69	48,40	47,67	2,80	1 000	0,29	4,21	48,18	48,34	2,56	1 000	0,71	0,50
3	P1T1H1t3	4,32	50,05	49,96	2,09	1 000	0,41	4,45	50,43	49,26	2,07	1 000	0,87	0,64
4	P1T1H2t1	3,79	50,78	47,25	1,85	1 000	0,43	4,30	51,28	47,70	1,94	1 000	0,91	0,67
5	P1T1H2t2	4,11	50,75	49,06	2,07	1 000	0,40	3,94	50,10	48,91	2,53	1 000	0,64	0,52
6	P1T1H2t3	4,72	50,92	46,54	2,38	1 000	0,42	4,68	50,14	46,68	2,52	1 000	0,79	0,61
7	P1T1H3t1	4,64	50,69	45,90	2,28	1 000	0,44	4,20	50,76	45,41	2,14	1 000	0,85	0,64
8	P1T1H3t2	4,13	50,74	45,41	2,40	1 000	0,37	4,59	50,07	45,03	2,48	1 000	0,82	0,60
9	P1T1H3t3	4,67	51,04	48,30	1,89	1 000	0,50	4,00	50,65	47,13	1,82	1 000	0,92	0,71
10	P1T2H1t1	3,99	49,98	50,15	2,22	1 000	0,36	4,82	49,68	50,37	2,31	1 000	0,83	0,60
11	P1T2H1t2	4,25	52,10	50,34	2,30	1 000	0,35	4,55	51,62	50,93	2,19	1 000	0,79	0,57
12	P1T2H1t3	4,10	51,47	49,96	2,23	1 000	0,36	4,47	51,39	49,86	2,17	1 000	0,80	0,58
13	P1T2H2t1	3,59	50,67	50,57	2,18	1 000	0,32	3,03	51,36	49,83	2,04	1 000	0,58	0,45
14	P1T2H2t2	4,33	52,41	51,32	2,23	1 000	0,36	4,49	52,86	51,17	2,24	1 000	0,74	0,55
15	P1T2H2t3	4,09	50,02	50,55	2,36	1 000	0,34	4,15	50,32	49,71	2,24	1 000	0,74	0,54
16	P1T2H3t1	3,81	50,79	51,32	2,02	1 000	0,36	4,69	50,67	51,95	2,05	1 000	0,87	0,62
17	P1T2H3t2	4,49	51,00	50,06	2,14	1 000	0,41	4,41	51,26	50,88	2,25	1 000	0,75	0,58
18	P1T2H3t3	4,09	50,38	51,18	2,04	1 000	0,39	4,14	50,11	50,81	2,14	1 000	0,76	0,57
19	P1T3H1t1	4,47	49,90	50,02	2,16	1 000	0,41	4,13	49,90	50,42	2,27	1 000	0,72	0,57
20	P1T3H1t2	4,81	50,18	50,71	2,19	1 000	0,43	3,93	50,57	50,51	2,13	1 000	0,72	0,58

Tabla A.22 Gravedad específica de las muestras para los ensayos de tracción perpendicular (**continuación...**)

ENSAYO N°	ESPECIMEN	A						B						PROMEDIO GRAVEDAD ESPECÍFICA
		PESO (g)	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	K	GRAVEDAD ESPECÍFICA	PESO (g)	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	K	GRAVEDAD ESPECÍFICA	
21	P1T3H13	4,66	50,93	51,01	2,02	1 000	0,44	4,21	50,71	50,90	2,03	1 000	0,80	0,62
22	P1T3H21	4,33	50,68	51,72	2,07	1 000	0,40	4,41	50,73	51,25	2,14	1 000	0,79	0,60
23	P1T3H22	4,42	50,98	50,55	2,17	1 000	0,40	3,99	51,30	50,00	2,11	1 000	0,74	0,57
24	P1T3H23	3,80	50,89	49,61	1,93	1 000	0,39	4,50	50,61	49,90	1,85	1 000	0,96	0,68
25	P1T3H31	4,34	50,40	50,93	1,98	1 000	0,43	4,30	50,43	50,24	1,86	1 000	0,91	0,67
26	P1T3H32	4,62	50,68	51,26	2,14	1 000	0,42	3,59	51,00	51,01	2,12	1 000	0,65	0,53
27	P2T1H11	4,31	51,75	51,20	2,20	1 000	0,37	4,39	51,90	51,13	2,18	1 000	0,76	0,56
28	P2T1H12	4,65	50,90	51,40	2,08	1 000	0,43	4,28	50,58	51,61	2,03	1 000	0,81	0,62
29	P2T1H13	4,51	50,54	50,53	2,08	1 000	0,42	3,78	50,79	50,65	2,01	1 000	0,73	0,58
30	P2T1H21	4,42	50,59	49,07	2,00	1 000	0,44	4,16	50,76	49,36	2,05	1 000	0,81	0,63
31	P2T1H22	4,72	51,17	50,13	2,01	1 000	0,46	4,11	51,20	50,42	2,00	1 000	0,80	0,63
32	P2T1H23	4,93	50,66	49,89	2,05	1 000	0,48	4,19	50,57	49,96	2,11	1 000	0,79	0,63
33	P2T1H31	4,58	50,80	51,11	2,15	1 000	0,41	4,10	50,74	51,14	2,10	1 000	0,75	0,58
34	P2T1H32	4,79	50,99	50,12	2,14	1 000	0,44	4,34	51,14	50,52	2,11	1 000	0,80	0,62
35	P2T1H33	4,24	50,85	51,06	2,36	1 000	0,35	4,03	50,90	51,30	2,32	1 000	0,67	0,51
36	P2T2H11	4,33	50,98	50,89	1,96	1 000	0,43	4,27	50,88	50,68	1,97	1 000	0,84	0,63
37	P2T2H12	4,44	50,31	51,09	2,20	1 000	0,39	4,07	50,26	51,12	2,11	1 000	0,75	0,57
38	P2T2H13	4,63	50,56	50,61	2,03	1 000	0,45	4,03	50,58	50,32	2,00	1 000	0,79	0,62
39	P2T2H21	4,24	51,36	50,78	2,14	1 000	0,38	5,13	51,12	50,95	2,15	1 000	0,92	0,65
40	P2T2H22	4,35	50,73	50,74	2,01	1 000	0,42	4,57	50,71	50,39	2,00	1 000	0,89	0,66

Tabla A.22 Gravedad específica de las muestras para los ensayos de tracción perpendicular (**continuación...**)

ENSAYO N°	ESPECIMEN	A						B						PROMEDIO GRAVEDAD ESPECÍFICA
		PESO (g)	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	K	GRAVEDAD ESPECÍFICA	PESO (g)	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	K	GRAVEDAD ESPECÍFICA	
41	P2T2H2t3	4,73	50,52	51,88	2,00	1 000	0,45	4,41	50,82	51,90	2,04	1 000	0,82	0,64
42	P2T2H3t1	4,04	51,17	52,04	1,98	1 000	0,38	3,33	51,46	52,05	1,90	1 000	0,65	0,52
43	P2T2H3t2	4,18	50,68	50,49	1,91	1 000	0,43	4,29	50,94	50,80	1,99	1 000	0,83	0,63
44	P2T2H3t3	4,49	50,68	51,21	2,19	1 000	0,39	4,55	50,62	51,28	2,31	1 000	0,76	0,58
45	P2T3H1t1	4,49	50,90	50,63	1,96	1 000	0,44	4,15	50,84	50,39	1,97	1 000	0,82	0,63
46	P2T3H1t2	3,87	50,71	50,96	2,12	1 000	0,35	3,91	50,55	50,87	2,03	1 000	0,75	0,55
47	P2T3H1t3	4,11	50,63	50,85	2,06	1 000	0,39	3,91	50,81	50,51	2,13	1 000	0,72	0,55
48	P2T3H2t1	4,82	50,60	50,39	2,14	1 000	0,44	4,34	50,60	50,88	2,09	1 000	0,81	0,62
49	P2T3H2t2	4,37	51,02	51,01	2,13	1 000	0,39	4,34	51,03	51,26	2,22	1 000	0,75	0,57
50	P2T3H2t3	4,74	50,63	51,01	1,82	1 000	0,50	3,98	50,61	51,24	1,89	1 000	0,81	0,66

ANEXO VII

Resultados de las propiedades mecánicas evaluadas en los tableros aglomerados de fibra de raquis obtenidos

Tabla A.23 Resultados del módulo a la ruptura

ENSAYO N°	CONDICIONES	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	LARGO SPAN (mm)	FUERZA MÁXIMA (N)	MÓDULO DE RUPTURA (MPa)	PROMEDIO MÓDULO DE RUPTURA (MPa)
1	P1T1H1t1	47,02	2,30	75,00	99,23	44,88	44,75
		46,64	2,27	75,00	95,30	44,61	
2	P1T1H1t2	47,67	2,80	75,00	198,47	59,74	63,19
		48,34	2,56	75,00	187,66	66,64	
3	P1T1H1t3	49,96	2,09	75,00	139,52	71,92	81,26
		49,26	2,07	75,00	169,98	90,60	
4	P1T1H2t1	47,25	1,85	75,00	171,94	119,62	108,45
		47,70	1,94	75,00	155,24	97,28	
5	P1T1H2t2	49,06	2,07	75,00	178,82	95,70	78,04
		48,91	2,53	75,00	168,01	60,37	
6	P1T1H2t3	46,54	2,38	75,00	190,61	81,34	58,01
		46,68	2,52	75,00	91,37	34,68	
7	P1T1H3t1	45,89	2,28	75,00	126,06	59,45	59,75
		45,41	2,14	75,00	111,02	60,06	
8	P1T1H3t2	45,41	2,40	75,00	136,57	58,74	45,73
		45,03	2,48	75,00	80,56	32,72	
9	P1T1H3t3	48,30	1,89	75,00	38,32	24,99	24,18
		47,13	1,82	75,00	32,42	23,37	
10	P1T2H1t1	50,15	2,22	75,00	96,29	43,83	34,87
		50,37	2,31	75,00	61,90	25,91	

Tabla A.23 Resultados del módulo a la ruptura (continuación...)

ENSAYO N°	CONDICIONES	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	LARGO SPAN (mm)	FUERZA MÁXIMA (N)	MÓDULO DE RUPTURA (MPa)	PROMEDIO MÓDULO DE RUPTURA (MPa)
11	P1T2H1t2	50,34	2,30	75,00	59,93	25,32	28,27
		50,93	2,19	75,00	67,79	31,22	
12	P1T2H1t3	49,96	2,23	75,00	38,81	17,57	22,20
		49,86	2,17	75,00	56,00	26,83	
13	P1T2H2t1	50,57	2,18	75,00	76,34	35,74	39,14
		49,83	2,04	75,00	78,41	42,53	
14	P1T2H2t2	51,32	2,23	75,00	29,97	13,21	30,45
		51,37	2,24	75,00	109,26	47,69	
15	P1T2H2t3	50,55	2,36	75,00	53,19	21,26	22,58
		49,71	2,24	75,00	53,00	23,91	
16	P1T2H3t1	51,32	2,02	75,00	32,52	17,47	12,36
		51,95	2,05	75,00	14,05	7,24	
17	P1T2H3t2	50,06	2,14	75,00	41,17	20,20	21,82
		50,88	2,25	75,00	53,65	23,43	
18	P1T2H3t3	51,18	2,04	75,00	45,79	24,18	26,06
		50,81	2,14	75,00	57,77	27,93	
19	P1T3H1t1	50,02	2,16	75,00	59,93	28,89	25,72
		50,42	2,27	75,00	52,07	22,55	
20	P1T3H1t2	50,71	2,19	75,00	35,37	16,36	16,14
		50,51	2,13	75,00	32,42	15,92	

Tabla A.23 Resultados del módulo a la ruptura (continuación...)

ENSAYO N°	CONDICIONES	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	LARGO SPAN (mm)	FUERZA MÁXIMA (N)	MÓDULO DE RUPTURA (MPa)	PROMEDIO MÓDULO DE RUPTURA (MPa)
21	P1T3H1t3	51,01	2,02	75,00	57,97	31,33	33,58
		50,90	2,03	75,00	66,81	35,83	
22	P1T3H2t1	51,72	2,07	75,00	46,18	23,44	24,91
		51,25	2,14	75,00	55,02	26,37	
23	P1T3H2t2	50,55	2,17	75,00	44,21	20,90	21,74
		50,00	2,11	75,00	44,70	22,59	
24	P1T3H2t3	49,61	1,93	75,00	55,02	33,50	37,75
		49,90	1,85	75,00	63,77	42,00	
25	P1T3H3t1	50,93	1,98	75,00	72,12	40,63	40,95
		50,24	1,86	75,00	63,77	41,27	
26	P1T3H3t2	51,26	2,14	75,00	64,06	30,70	33,22
		51,01	1,97	75,00	62,88	35,73	
27	P2T1H1t1	51,20	2,20	75,00	57,87	26,27	27,24
		51,13	2,18	75,00	60,92	28,20	
28	P2T1H1t2	51,40	2,08	75,00	49,13	24,85	25,33
		51,61	2,03	75,00	48,80	25,81	
29	P2T1H1t3	50,53	2,08	75,00	57,97	29,83	27,61
		50,65	2,01	75,00	46,18	25,39	
30	P2T1H2t1	49,07	2,00	75,00	18,67	10,70	9,75
		49,36	2,05	75,00	16,21	8,79	

Tabla A.23 Resultados del módulo a la ruptura (continuación...)

ENSAYO N°	CONDICIONES	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	LARGO SPAN (mm)	FUERZA MÁXIMA (N)	MÓDULO DE RUPTURA (MPa)	PROMEDIO MÓDULO DE RUPTURA (MPa)
31	P2T1H2t2	50,13	2,01	75,00	9,83	5,46	6,46
		50,42	2,00	75,00	13,39	7,47	
32	P2T1H2t3	49,89	2,05	75,00	16,70	8,96	7,49
		49,46	2,11	75,00	11,79	6,02	
33	P2T1H3t1	51,11	2,15	75,00	9,83	4,68	5,31
		51,14	2,10	75,00	11,91	5,94	
34	P2T1H3t2	50,12	2,14	75,00	7,88	3,86	4,69
		50,52	2,11	75,00	11,02	5,51	
35	P2T1H3t3	51,06	2,36	75,00	10,03	3,97	3,92
		51,30	2,32	75,00	9,51	3,88	
36	P2T2H1t1	50,89	1,96	75,00	14,05	8,09	9,20
		50,68	1,97	75,00	18,03	10,31	
37	P2T2H1t2	51,09	2,20	75,00	16,00	7,28	9,28
		51,12	2,11	75,00	22,83	11,28	
38	P2T2H1t3	50,61	2,03	75,00	13,44	7,25	5,98
		50,32	2,00	75,00	8,43	4,71	
39	P2T2H2t1	50,78	2,14	75,00	10,94	5,29	5,74
		50,95	2,15	75,00	12,97	6,20	
40	P2T2H2t2	50,74	2,01	75,00	19,84	10,89	10,21
		50,39	2,00	75,00	17,08	9,53	

Tabla A.23 Resultados del módulo a la ruptura (continuación...)

ENSAYO N°	CONDICIONES	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	LARGO SPAN (mm)	FUERZA MÁXIMA (N)	MÓDULO DE RUPTURA (MPa)	PROMEDIO MÓDULO DE RUPTURA (MPa)
41	P2T2H2t3	51,88	2,00	75,00	19,89	10,78	10,46
		51,90	2,04	75,00	19,45	10,13	
42	P2T2H3t1	52,04	1,98	75,00	16,00	8,82	9,88
		52,05	1,90	75,00	18,28	10,94	
43	P2T2H3t2	50,49	1,91	75,00	21,40	13,07	19,45
		50,80	1,99	75,00	46,18	25,82	
44	P2T2H3t3	50,31	2,19	75,00	11,00	5,13	4,52
		51,28	2,31	75,00	9,51	3,91	
45	P2T3H1t1	50,63	1,86	75,00	21,83	14,02	13,05
		50,39	1,97	75,00	21,01	12,09	
46	P2T3H1t2	50,96	2,12	75,00	10,57	5,19	6,05
		50,87	2,03	75,00	12,88	6,91	
47	P2T3H1t3	50,85	2,06	75,00	14,44	7,53	6,35
		50,51	2,13	75,00	10,54	5,18	
48	P2T3H2t1	50,39	2,14	75,00	16,86	8,22	7,28
		50,88	2,09	75,00	12,54	6,35	
49	P2T3H2t2	51,01	2,13	75,00	23,34	11,35	9,24
		51,26	2,22	75,00	16,00	7,12	
50	P2T3H2t3	51,01	1,82	75,00	9,51	6,33	8,33
		51,24	1,89	75,00	16,81	10,33	

Tabla A.24 Resultados del módulo de elasticidad aparente

ENSAYO N°	CONDICIONES	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	LARGO SPAN (mm)	PENDIENTE $\Delta P/\Delta y$ (N/mm)	MÓDULO DE ELASTICIDAD APARENTE (GPa)	PROMEDIO MÓDULO DE ELASTICIDAD (GPa)
1	PIT1H1t1	47,02	2,30	75,00	206,44	38,06	35,11
		46,64	2,27	75,00	166,31	32,15	
2	PIT1H1t2	47,67	2,80	75,00	279,32	28,15	27,28
		48,34	2,56	75,00	203,01	26,40	
3	PIT1H1t3	49,96	2,09	75,00	167,99	38,85	67,36
		49,26	2,07	75,00	397,15	95,87	
4	PIT1H2t1	47,25	1,85	75,00	622,72	219,53	144,71
		47,70	1,94	75,00	230,81	69,90	
5	PIT1H2t2	49,06	2,07	75,00	178,77	43,33	37,95
		48,91	2,53	75,00	244,66	32,58	
6	PIT1H2t3	46,54	2,38	75,00	223,41	37,56	28,24
		46,68	2,52	75,00	134,07	18,93	
7	PIT1H3t1	45,89	2,28	75,00	100,10	19,41	23,83
		45,41	2,14	75,00	119,16	28,24	
8	PIT1H3t2	45,41	2,40	75,00	509,41	85,59	101,69
		45,03	2,48	75,00	767,15	117,80	
9	PIT1H3t3	48,30	1,89	75,00	123,38	39,91	76,43
		47,13	1,82	75,00	304,30	112,96	
10	PIT2H1t1	50,15	2,22	75,00	609,32	117,12	74,32
		50,37	2,31	75,00	185,58	31,52	

Tabla A.24 Resultados del módulo de elasticidad aparente (continuación...)

ENSAYO N°	CONDICIONES	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	LARGO SPAN (mm)	PENDIENTE $\Delta P/\Delta y$ (N/mm)	MÓDULO DE ELASTICIDAD APARENTE (GPa)	PROMEDIO MÓDULO DE ELASTICIDAD (GPa)
11	P1T2H1t2	50,34	2,30	75,00	307,74	52,99	70,97
		50,93	2,19	75,00	451,12	88,94	
12	P1T2H1t3	49,96	2,23	75,00	590,58	112,43	237,91
		49,86	2,17	75,00	1 755,40	363,39	
13	P1T2H2t1	50,57	2,18	75,00	216,16	43,51	31,53
		49,83	2,04	75,00	78,41	19,55	
14	P1T2H2t2	51,32	2,23	75,00	92,36	17,12	41,07
		51,37	2,24	75,00	355,94	65,02	
15	P1T2H2t3	50,55	2,36	75,00	151,98	24,12	25,97
		49,71	2,24	75,00	147,38	27,82	
16	P1T2H3t1	51,32	2,02	75,00	103,39	25,78	19,56
		51,95	2,05	75,00	56,61	13,34	
17	P1T2H3t2	50,06	2,14	75,00	28,37	6,10	12,99
		50,88	2,25	75,00	109,25	19,88	
18	P1T2H3t3	51,18	2,04	75,00	39,61	9,61	21,18
		50,81	2,14	75,00	154,60	32,74	
19	P1T3H1t1	50,02	2,16	75,00	1 866,00	390,42	335,20
		50,42	2,27	75,00	1 565,60	279,98	
20	P1T3H1t2	50,71	2,19	75,00	141,49	28,02	110,08
		50,51	2,13	75,00	889,20	192,14	

Tabla A.24 Resultados del módulo de elasticidad aparente (**continuación...**)

ENSAYO N°	CONDICIONES	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	LARGO SPAN (mm)	PENDIENTE $\Delta P/\Delta y$ (N/mm)	MÓDULO DE ELASTICIDAD APARENTE (GPa)	PROMEDIO MÓDULO DE ELASTICIDAD (GPa)
21	P1T3H1t3	51,01	2,02	75,00	680,88	170,80	224,98
		50,90	2,03	75,00	1 127,00	279,15	
22	P1T3H2t1	51,72	2,07	75,00	522,78	120,19	129,85
		51,25	2,14	75,00	664,37	139,51	
23	P1T3H2t2	50,55	2,17	75,00	1 139,70	232,71	140,46
		50,00	2,11	75,00	214,70	48,21	
24	P1T3H2t3	49,61	1,93	75,00	76,37	22,58	31,72
		49,90	1,85	75,00	122,37	40,85	
25	P1T3H3t1	50,93	1,98	75,00	133,96	35,74	47,33
		50,24	1,86	75,00	180,61	58,92	
26	P1T3H3t2	51,26	2,14	75,00	163,31	34,29	34,82
		51,01	1,97	75,00	130,70	35,35	
27	P2T1H1t1	51,20	2,20	75,00	86,55	16,74	13,07
		51,13	2,18	75,00	47,16	9,39	
28	P2T1H1t2	51,40	2,08	75,00	55,60	12,68	18,69
		51,61	2,03	75,00	101,11	24,70	
29	P2T1H1t3	50,53	2,08	75,00	101,14	23,46	22,73
		50,65	2,01	75,00	85,78	22,00	
30	P2T1H2t1	49,07	2,00	75,00	3,50	0,94	0,96
		49,36	2,05	75,00	3,93	0,98	

Tabla A.24 Resultados del módulo de elasticidad aparente (continuación...)

ENSAYO N°	CONDICIONES	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	LARGO SPAN (mm)	PENDIENTE $\Delta P/\Delta y$ (N/mm)	MÓDULO DE ELASTICIDAD APARENTE (GPa)	PROMEDIO MÓDULO DE ELASTICIDAD (GPa)
31	P2T1H2t2	50,13	2,01	75,00	3,32	0,86	1,46
		50,42	2,00	75,00	7,85	2,05	
32	P2T1H2t3	49,89	2,05	75,00	4,03	0,99	0,90
		49,46	2,11	75,00	3,54	0,80	
33	P2T1H3t1	51,11	2,15	75,00	2,90	0,60	0,81
		51,14	2,10	75,00	4,57	1,02	
34	P2T1H3t2	50,12	2,14	75,00	2,70	0,58	1,01
		50,52	2,11	75,00	6,48	1,44	
35	P2T1H3t3	51,06	2,36	75,00	4,10	0,64	0,70
		51,30	2,32	75,00	4,60	0,76	
36	P2T2H1t1	50,89	1,96	75,00	4,46	1,23	1,32
		50,68	1,97	75,00	5,19	1,41	
37	P2T2H1t2	51,09	2,20	75,00	5,50	1,07	1,54
		51,12	2,11	75,00	9,20	2,02	
38	P2T2H1t3	50,61	2,03	75,00	5,60	1,40	1,45
		50,32	2,00	75,00	5,76	1,51	
39	P2T2H2t1	50,78	2,14	75,00	5,50	1,17	1,01
		50,95	2,15	75,00	4,09	0,85	
40	P2T2H2t2	50,74	2,01	75,00	5,71	1,46	1,70
		50,39	2,00	75,00	7,40	1,94	

Tabla A.24 Resultados del módulo de elasticidad aparente (continuación...)

ENSAYO N°	CONDICIONES	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	LARGO SPAN (mm)	PENDIENTE $\Delta P/\Delta y$ (N/mm)	MÓDULO DE ELASTICIDAD APARENTE (GPa)	PROMEDIO MÓDULO DE ELASTICIDAD (GPa)
41	P2T2H2t3	51,88	2,00	75,00	5,49	1,40	1,69
		51,90	2,04	75,00	8,30	1,99	
42	P2T2H3t1	52,04	1,98	75,00	3,67	0,96	1,45
		52,05	1,90	75,00	6,60	1,95	
43	P2T2H3t2	50,49	1,91	75,00	4,40	1,32	10,50
		50,80	1,99	75,00	74,72	19,68	
44	P2T2H3t3	50,31	2,19	75,00	3,50	0,70	0,68
		51,28	2,31	75,00	4,00	0,67	
45	P2T3H1t1	50,63	1,86	75,00	4,77	1,54	1,75
		50,39	1,97	75,00	7,17	1,96	
46	P2T3H1t2	50,96	2,12	75,00	4,64	1,01	1,09
		50,87	2,03	75,00	4,70	1,16	
47	P2T3H1t3	50,85	2,06	75,00	6,40	1,52	1,60
		50,51	2,13	75,00	7,80	1,69	
48	P2T3H2t1	50,39	2,14	75,00	4,60	0,98	0,88
		50,88	2,09	75,00	3,45	0,78	
49	P2T3H2t2	51,01	2,13	75,00	8,58	1,84	1,43
		51,26	2,22	75,00	5,40	1,02	
50	P2T3H2t3	51,01	1,82	75,00	5,60	1,92	2,10
		51,24	1,89	75,00	7,50	2,29	

Tabla A.25 Resultados del ensayo de tracción perpendicular a la superficie

ENSAYO N°	CONDICIONES	A			B			PROM ESFUERZO (kPa)
		FUERZA (N)	ÁREA (mm ²)	ESFUERZO (kPa)	FUERZA (N)	ÁREA (mm ²)	ESFUERZO (kPa)	
1	P1T1H1t1	43,90	2 360,33	18,60	48,83	2 338,91	20,88	19,74
2	P1T1H1t2	252,50	2 307,15	109,44	246,50	2 328,86	105,85	107,64
3	P1T1H1t3	264,70	2 500,25	105,87	250,30	2 484,27	100,75	103,31
4	P1T1H2t1	337,60	2 399,11	140,72	345,60	2 446,31	141,27	141,00
5	P1T1H2t2	331,90	2 489,55	133,32	323,90	2 445,74	132,43	132,88
6	P1T1H2t3	342,50	2 369,66	144,54	350,50	2 340,45	149,76	147,15
7	P1T1H3t1	64,09	2 326,07	27,55	64,09	2 304,95	27,81	27,68
8	P1T1H3t2	97,66	2 304,27	42,38	89,66	2 254,65	39,77	41,07
9	P1T1H3t3	571,40	2 465,24	231,78	579,40	2 387,22	242,71	237,25
10	P1T2H1t1	231,90	2 506,33	92,53	223,90	2 502,05	89,49	91,01
11	P1T2H1t2	230,40	2 622,72	87,85	238,40	2 629,26	90,67	89,26
12	P1T2H1t3	365,80	2 571,19	142,27	373,80	2 562,14	145,89	144,08
13	P1T2H2t1	345,20	2 562,38	134,72	566,90	2 559,10	221,52	178,12
14	P1T2H2t2	270,10	2 689,68	100,42	278,10	2 704,94	102,81	101,62
15	P1T2H2t3	432,90	2 528,59	171,20	440,90	2 501,57	176,25	173,73
16	P1T2H3t1	320,80	2 606,80	123,06	328,80	2 632,56	124,90	123,98
17	P1T2H3t2	337,60	2 552,89	132,24	329,60	2 608,62	126,35	129,30
18	P1T2H3t3	594,70	2 578,36	230,65	586,70	2 545,75	230,46	230,56
19	P1T3H1t1	1 137,00	2 495,58	455,61	1 129,00	2 516,04	448,72	452,16

Tabla A.25 Resultados del ensayo de tracción perpendicular a la superficie (continuación...)

ENSAYO N°	CONDICIONES	A			B			PROMI ESFUERZO (kPa)
		FUERZA (N)	ÁREA (mm ²)	ESFUERZO (kPa)	FUERZA (N)	ÁREA (mm ²)	ESFUERZO (kPa)	
20	P1T3H1t2	732,00	2 544,37	287,69	724,00	2 553,95	283,48	285,59
21	P1T3H1t3	1 097,00	2 597,60	422,31	1 105,00	2 580,97	428,13	425,22
22	P1T3H2t1	249,50	2 621,17	95,19	257,50	2 599,91	99,04	97,11
23	P1T3H2t2	356,30	2 576,96	138,26	364,30	2 564,58	142,05	140,16
24	P1T3H2t3	1 176,00	2 524,32	465,87	1 184,00	2 525,44	468,83	467,35
25	P1T3H3t1	417,70	2 566,79	162,73	425,70	2 533,27	168,04	165,39
26	P1T3H3t2	690,80	2 597,35	265,96	698,80	2 601,34	268,63	267,30
27	P2T1H1t1	1 040,00	2 649,86	392,47	1 048,00	2 653,39	394,97	393,72
28	P2T1H1t2	459,30	2 616,43	175,54	467,30	2 610,18	179,03	177,29
29	P2T1H1t3	992,20	2 553,28	388,60	1 000,20	2 572,18	388,85	388,73
30	P2T1H2t1	88,11	2 482,37	35,49	96,11	2 505,27	38,36	36,93
31	P2T1H2t2	423,40	2 564,99	165,07	431,40	2 581,25	167,13	166,10
32	P2T1H2t3	638,60	2 527,51	252,66	646,60	2 501,20	258,52	255,59
33	P2T1H3t1	1 148,00	2 596,13	442,20	1 140,00	2 594,42	439,40	440,80
34	P2T1H3t2	1 171,00	2 555,53	458,22	1 163,00	2 583,09	450,24	454,23
35	P2T1H3t3	509,80	2 595,89	196,39	517,80	2 611,08	198,31	197,35
36	P2T2H1t1	599,70	2 594,12	231,18	607,70	2 578,26	235,70	233,44
37	P2T2H1t2	1 105,00	2 570,34	429,90	1 097,00	2 569,54	426,92	428,41
38	P2T2H1t3	696,90	2 558,34	272,40	704,90	2 545,35	276,94	274,67

Tabla A.24 Resultados del ensayo de tracción perpendicular a la superficie (**continuación...**)

ENSAYO N°	CONDICIONES	A			B			PROM ESFUERZO (kPa)
		FUERZA (N)	ÁREA (mm ²)	ESFUERZO (kPa)	FUERZA (N)	ÁREA (mm ²)	ESFUERZO (kPa)	
39	P2T2H2t1	533,70	2 607,89	204,65	541,70	2 604,48	207,99	206,32
40	P2T2H2t2	1 113,00	2 573,87	432,42	1 105,00	2 555,02	432,48	432,45
41	P2T2H2t3	1 112,00	2 620,90	424,28	1 120,00	2 637,47	424,65	424,47
42	P2T2H3t1	210,70	2 662,54	79,13	218,70	2 678,32	81,66	80,40
43	P2T2H3t2	544,00	2 558,92	212,59	552,00	2 587,75	213,31	212,95
44	P2T2H3t3	435,30	2 595,15	167,74	443,30	2 595,71	170,78	169,26
45	P2T3H1t1	978,10	2 576,64	379,60	986,10	2 561,91	384,91	382,26
46	P2T3H1t2	943,10	2 583,76	365,01	951,10	2 571,56	369,85	367,43
47	P2T3H1t3	1 151,00	2 574,62	447,06	1 143,00	2 566,33	445,38	446,22
48	P2T3H2t1	378,80	2 549,65	148,57	386,80	2 574,36	150,25	149,41
49	P2T3H2t2	310,10	2 602,62	119,15	318,10	2 615,71	121,61	120,38
50	P2T3H2t3	1 291,00	2 582,64	499,88	1 283,00	2 593,17	494,76	497,32