

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**APTITUD DE LAS FIBRAS DEL
MESOCARPIO DE LA PALMA
ACEITERA (*Elaeis guineensis* Jacq.)
PARA LA ELABORACIÓN DE
TABLEROS FIBROCEMENTO**

Presentado por:

Luis Ferroel Gamarra Romero

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO FORESTAL

Lima - Perú
2016

DEDICATORIA

A la Virgen María por ser la luz en mi camino y por cuidarme hasta el día de hoy

A mis padres Sara Romero y Clever Gamarra por darme la vida y su apoyo incondicional

A mi hermano Isaac Gamarra por ser el motor en mi vida

A las mujeres de mi familia porque cada una de ellas me ha enseñado el esfuerzo, el no rendirse nunca y seguir siempre adelante ellas son: mis abuelitas Haydee Cueva, Sofía y Juana; mi tía Rosa Romero y mi prima hermana Mariella Ozoriaga.

A mis tíos Cesar Romero y Carlos Romero por estar presente siempre

A mis primos hermanos Briana, Cesar, Fernando, Gloria, Ivonne, Maricarmen, Piero por ser más hermanos que primos en la familia

A mis abuelitos Luis, Pedro y Ricardo que desde el cielo me cuidan

A mis mejores amigos Ada, Earl, Francis, Fiorella, Giancarlo, Héctor, Lady, Lissete, Luis, Lizeth, Maricel, Milagros, Mardonio y Yeyson por su compañía, amor y buenos deseos

A cambium forestal 2013 por enseñarme que los cambios siempre traen algo bueno.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que hicieron posible que el presente trabajo de investigación se desarrolle y finalice, mi memoria no es tan generosa de recordar a todas, sin embargo, deseo agradecer a:

Al Dr. Enrique Gonzales Mora, patrocinador de la presente tesis, por su valiosa colaboración y consejos brindados.

A la Ing. Daysi Rocío Guzmán Loayza, profesora de laboratorio de química de la madera, por su valiosa colaboración y consejos brindados.

Al Mg.Sc. Aldo Joao Cárdenas Oscanoa, copatrocinador de la presente tesis, por su valiosa colaboración y consejos brindados.

A la empresa Oleaginosa Pucallpa S.A.C por facilitar la colección del material fibroso para el desarrollo de la presente investigación.

RESUMEN

Se estima que actualmente existen 60 000 hectáreas cultivadas de palma aceitera en la Amazonia peruana, producto del aumento sostenido desde su ingreso al Perú en el año 1968. El crecimiento seguirá sostenido debido a factores como la demanda por su aceite, la característica biofísica de la Amazonia peruana, tierras aptas para realizar plantaciones, el “boom” del biodiesel y el marco legal promotor para su cultivo. Las plantaciones son acompañadas por la industria de extracción de aceite crudo, cuyas plantas extractoras se han instalado cerca de dichas plantaciones, estas generan cantidades apreciables de residuos sólidos o también llamados subproductos como escobajos, cáscaras y residuos fibrosos del mesocarpio; este último residuo en la actualidad es usado, por lo general en estado húmedo, como combustible de las calderas. En el presente trabajo de investigación se planteó un uso alternativo de este residuo fibroso, por tal motivo se evaluó la aptitud de las fibras del mesocarpio de la palma aceitera para la elaboración de tableros fibrocemento. Los residuos fibrosos fueron tratados en desfibrador de discos Bauer a 10 por ciento de consistencia, el rendimiento de este proceso fue de 80,37; los haces fibrosos obtenidos fueron caracterizados física y químicamente. Finalmente se elaboraron tres tipos de tableros fibrocemento según la cantidad de haces fibrosos en la mezcla, el cual fue un porcentaje respecto a la masa del cemento; se observó que los tres tipos de tableros presentaron un fraguado a las 24 horas. Con los tableros elaborados se procedió a evaluar las propiedades físicas y mecánicas empleando la norma alemana DIN. Los resultados superan los requerimientos descritos por la norma, de esta manera se contribuye con el desarrollo de un nuevo material con potencial de uso y además se fomenta a continuar con el estudio de materiales compuestos de matriz cemento.

Palabras claves: Fibras, Mesocarpio, Residuos, Cemento, Tableros compuestos, Mezclado.

ÍNDICE GENERAL

Página

I. Introducción.....	1
II. Revisión de Literatura	3
1. Palma aceitera (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.)	3
1.1. Descripción botánica.....	3
1.2. Descripción morfológica	4
1.3. ORIGEN Y EXPANSIÓN	5
1.4. Palma aceitera en Perú	6
1.5. Industria de extracción de aceite crudo de palma	8
1.6. Productos y subproductos de la palma aceitera	9
1.7. Usos de los productos y subproductos.....	10
1.8. FIBRAS VEGETALES y residuos agroindustriales	12
2. Fibras vegetales.....	13
2.1. Definición.....	13
2.2. Clasificación.....	13
2.3. Fibras no madereras	14
2.3.1. Composición química	14
2.3.2. Estructura física	16
2.3.3. Obtención de fibras	18
2.3.4. Aplicaciones	18
3. Materiales compuestos	19
3.1. Definición.....	19
3.2. Clasificación.....	19
3.2.1. Materiales compuestos según tipo de matriz.....	19
3.2.2. Materiales compuestos según tipo de refuerzo.....	19
4. Cemento Portland.....	20
4.1. Definición.....	20
4.2. Fabricación	20
4.3. Tipos	20
4.4. Composición química.....	21
4.5. Hidratación.....	21
4.6. Reacciones del concreto	22
4.7. Curado.....	23
4.8. TIEMPO DE MEZCLADO	23
4.9. Propiedades físicas y mecánicas de los morteros	24
4.9.1. Propiedades físicas.....	24
4.9.2. Propiedades mecánicas.....	28
5. Tableros fibrocemento.....	31
5.1. Definición.....	31
5.2. Antecedentes	31
5.3. Clasificación.....	32
5.4. Componentes.....	33
5.5. Elaboración de tableros.....	33
5.6. Material compuesto fibra vegetal y cemento portland.....	34
5.6.1. Compatibilidad química.....	34
5.6.2. Mejoramiento de la compatibilidad química	37
5.7. Ventajas	37
5.8. Usos.....	37
III. Materiales y Métodos.....	39
1. Trabajo de campo	39

2.	Lugar de ejecución	39
3.	Materiales y equipos	40
3.1.	Materiales.....	40
3.2.	Equipos.....	41
3.3.	Insumos.....	41
4.	Metodología	42
4.1.	Preparación de la materia prima.....	42
4.2.	Caracterización de la materia prima	43
4.2.1.	Caracterización química	43
4.2.2.	Caracterización física	43
4.3.	Elaboración de los tableros fibrocemento.....	43
4.3.1.	Mineralización	43
4.3.2.	Mezclado	43
4.3.3.	Armado y desmoldado.....	44
4.3.4.	Curado y secado	45
4.4.	Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los tableros.....	47
4.4.1.	Contenido de humedad	47
4.4.2.	Densidad	47
4.4.3.	Absorción de agua.....	47
4.4.4.	Hinchamiento volumétrico	47
4.4.5.	Porosidad.....	47
4.4.6.	Resistencia a la compresión del espesor.....	47
4.4.7.	Resistencia a la flexión estática.....	48
4.5.	Diseño experimental	50
4.6.	Análisis estadístico.....	51
IV.	Resultados y discusión	52
1.	Caracterización de la materia prima	52
1.1.	Caracterización química.....	52
1.1.1.	Contenido de holocelulosa	52
1.1.2.	Contenido de lignina.....	52
1.1.3.	Contenido de extractivos solubles en etanol.....	53
1.1.4.	Contenido de extractivos solubles en agua.....	54
1.1.5.	Contenido de cenizas.....	54
1.2.	Caracterización física.....	55
2.	Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los tableros	56
2.1.	Contenido de humedad.....	56
2.2.	Densidad	58
2.3.	Absorción de agua	60
2.4.	Hinchamiento volumétrico	64
2.5.	Resistencia a la compresión del espesor	65
2.6.	Resistencia a la flexión estática.....	68
3.	Mezcla apropiada para LA elaboración de los tableros fibrocemento.....	71
V.	Conclusiones	74
VI.	Recomendaciones	75
VII.	Referencias bibliográficas	76
VIII.	Anexos.....	81

Índice de tablas

	Página
Tabla 1: Superficie instalada de palma aceitera por región Perú 2006-2012.....	7
Tabla 2: Características químicas de fibras vegetales	16
Tabla 3: Características físicas de fibras vegetales.....	17
Tabla 4: Composición química del cemento Portland.....	21
Tabla 5: Valores de humedad de paneles fibrocemento	25
Tabla 6: Valores de densidad de paneles fibrocemento	25
Tabla 7: Valores de absorción de agua de paneles fibrocemento.....	26
Tabla 8: Rango de hinchamiento volumétrico de paneles fibrocemento	27
Tabla 9: Rango de porosidad de paneles fibrocemento	28
Tabla 10: Valores de resistencia a la compresión de paneles fibrocemento	29
Tabla 11: Valores de resistencia a la flexión estática de paneles fibrocemento	30
Tabla 12: Clasificación de tableros fibrocemento según su densidad.....	32
Tabla 13: Aptitud de materiales vegetales para elaboración de fibrocemento de acuerdo a la cantidad de azúcares solubles.....	35
Tabla 14: Aptitud de fibras madereras para elaboración de fibrocemento de acuerdo a la cantidad de extractivos	36
Tabla 15: Usos recomendados de tableros fibrocemento según su espesor.....	37
Tabla 16: Propiedades físicas y mecánica de tableros fibrocemento de 10 mm de espesor	38
Tabla 17: Composición de los tableros fibrocemento elaborados.....	44
Tabla 18: Número de probetas y evaluaciones para el diseño experimental (DCA).....	51
Tabla 19: Caracterización física de los haces fibrosos obtenidos	55
Tabla 20: Contenido de humedad de los tableros elaborados	56
Tabla 21: Densidad de los tableros elaborados.....	58
Tabla 22: Absorción de agua de los tableros elaborados.....	60
Tabla 23: Porosidad de los tableros elaborados	61
Tabla 24: Hinchamiento volumétrico de los tableros elaborados	64
Tabla 25: Resistencia a la compresión del espesor de los tableros elaborados.....	65
Tabla 26: Resistencia a la flexión estática de los tableros elaborados	68
Tabla 27: Propiedades físicas y mezcla apropiada	71
Tabla 28: Propiedades mecánicas y mezcla apropiada.....	72

Índice de figuras

	Página
Figura 1: Partes morfológicas de la palma aceitera (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.). A: estípite; B: hojas; C: inflorescencia; D: racimo y frutos; E: semilla.....	5
Figura 2: Expansión geográfica de la palma aceitera (<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.).....	6
Figura 3: Producción de aceite de palma en Perú entre 1993-2013	8
Figura 4: Proceso industrial de los racimos de frutos frescos de la palma aceitera	9
Figura 5: Diagrama de productos y subproductos de la palma aceitera	10
Figura 6: Residuos fibrosos del mesocarpio de la palma aceitera	12
Figura 7: Clasificación de las fibras según su origen.....	13
Figura 8: Componentes químicos principales de las fibras vegetales	15
Figura 9: Estructura física de fibra y haz de fibras. Stem: tallo; Secondary cell wall: pared secundaria; Primary cell wall: Pared primaria; Bark: epidermis; Bundle: haces vasculares; Xylem: xilema; Middle lamella: lamina media; Elementary fibres: fibras	17
Figura 10: Variación de la resistencia del cemento Portland Tipo I.....	23
Figura 11: Reacción de inhibición del fraguado del cemento Portland tipo I.....	36
Figura 12: Croquis de ubicación del trabajo de campo.....	39
Figura 13: Flujograma de la producción de haces fibrosos	42
Figura 14: Moldes de madera para la elaboración de los tableros.....	44
Figura 15: Disposición de los tableros para el secado	45
Figura 16: Flujograma de la producción de los tableros fibrocemento	46
Figura 17: Distribución de las probetas para las evaluaciones. H: humedad; D: densidad; HV: hinchamiento volumétrico y absorción de agua; CP: resistencia a la compresión del espesor y FL: flexión estática	49
Figura 18: Relación humedad y porcentaje de haces fibrosos.....	57
Figura 19: Relación densidad y porcentaje de haces fibrosos	58
Figura 20: Relación absorción de agua y porcentaje de haces fibrosos	60
Figura 21: Relación porosidad y porcentaje de haces fibrosos.....	62
Figura 22: Relación absorción de agua 24 horas de inmersión y porosidad	63
Figura 23: Relación hinchamiento volumétrico y porcentaje de haces fibrosos.....	64
Figura 24: Relación resistencia a la compresión y porcentaje de haces fibrosos.....	66
Figura 25: Relación densidad y resistencia a la compresión del espesor	67
Figura 26: Relación módulo de ruptura (MOR) y porcentaje de haces fibrosos	68

Figura 27: Probetas después de realizar ensayos de flexión estática. A: probetas con 3% de haces fibrosos; B: probetas con 6% de haces fibrosos; C: probetas con 9% de haces fibrosos. 73

Índice de anexos

	Página
Anexo 1 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HOLOCELULOSA MÉTODO JAYME-WISE	81
Anexo 2 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE LIGNINA MÉTODO KLASON	83
Anexo 3 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE EXTRACTIVOS NORMA TAPPI T6 WD-73 Y TAPPI T1 WD-75	85
Anexo 4 Norma ASTM D – 1762 CONTENIDO DE HUMEDAD Y CENIZAS	87
Anexo 5 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AZÚCARES SOLUBLES MÉTODO FEHLING	88
Anexo 6 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS TABLEROS	89
Anexo 7 DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LOS TABLEROS	90
Anexo 8 DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE AGUA E HINCHAMIENTO DE LOS TABLEROS	91
Anexo 9 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL ESPESOR DE LOS TABLEROS	93
Anexo 10 DETERMINACIÓN DEL MODULO DE RUPTURA (MOR) DE LOS TABLEROS	94
Anexo 11 DATOS PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE HUMEDAD PROMEDIO DE LOS TABLEROS.....	95
Anexo 12 ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE RESPUESTA HUMEDAD DE LOS TABLEROS	98
Anexo 13 DATOS PARA DETERMINAR LA DENSIDAD PROMEDIO DE LOS TABLEROS	99
Anexo 14 ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE RESPUESTA DENSIDAD DE LOS TABLEROS	102
Anexo 15 DATOS PARA DETERMINAR LA ABSORCIÓN DE AGUA Y POROSIDAD PROMEDIO DE LOS TABLEROS	103
Anexo 16 ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE RESPUESTA ABSORCIÓN DE AGUA A 2 Y 24 HORAS DE INMERSIÓN DE LOS TABLEROS	105
Anexo 17 ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE RESPUESTA POROSIDAD DE LOS TABLEROS	106
Anexo 18 DATOS PARA DETERMINAR EL HINCHAMIENTO VOLUMÉTRICO PROMEDIO DE LOS TABLEROS.....	107
Anexo 19 ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE RESPUESTA HINCHAMIENTO VOLUMÉTRICO A 2 Y 24 HORAS DE INMERSIÓN DE LOS TABLEROS	109

Anexo 20	DATOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL ESPESOR DE LOS TABLEROS	111
Anexo 21	ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE RESPUESTA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL ESPESOR DE LOS TABLEROS	113
Anexo 22	DATOS PARA DETERMINAR EL MODULO DE RUPTURA (MOR) DE LOS TABLEROS	114
Anexo 23	ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE RESPUESTA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN ESTÁTICA (MOR) DE LOS TABLEROS	116

I. INTRODUCCIÓN

Las fibras se vienen usando desde hace mucho tiempo para reforzar materiales tales son los casos del ichu en los adobes de barro, de la paja de arroz en los ladrillos de arcilla, del pelo de caballo en las molduras de yeso, del asbesto con el cemento, entre otros. En 1950 aparecen estudios y patentes de aglomerados de cemento y fibras distribuidas al zar y en los años 60 diversos científicos publican artículos que despiertan el interés académico e industrial sobre el tema, a partir de ese momento ha existido una actividad muy intensa de investigación sobre estos materiales (Ortiz, 1998).

En años recientes la investigación de materiales compuestos a base de matriz cemento incorpora fibras para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas tales como la resistencia a la tensión, a la compresión, al agrietamiento, al impacto y brindar seguridad por ser antisísmica. Las fibras utilizadas han sido muy variadas desde fibra de vidrio, fibras de nylon, polipropileno entre otras fibras sintéticas. Sin embargo, en países donde el abastecimiento de estas fibras es limitado se prefiere fibras naturales de origen vegetal, de amplia disponibilidad sobre todo en países en desarrollo (Juárez, 2002; Noriega, 1996; Álvarez, 2008).

En el año 2001 la superficie cultivada de palma aceitera fue de 14 667 hectáreas y el año 2012 se cultivaron 57 752 hectáreas; esta última superficie representó el 5,08 por ciento del total de tierras aptas para realizar plantaciones de palma aceitera. Actualmente se estima que hay 60 000 hectáreas de palmas instaladas en la Amazonia peruana (MINAGRI, 2012; Barrena *et al.* 2014).

En la industria de extracción de aceite de palma, cuyas plantas extractoras se instalan cerca de las plantaciones, se procesan racimos de frutos frescos (RFF); esta actividad agroindustrial genera cantidades importantes de subproductos, que el año 2012, a partir de casi 600 000 toneladas de RFF, se generaron subproductos estimados en 155 000 toneladas de escobajos, 24 700 toneladas de cáscaras y 71 500 toneladas de residuos fibrosos del mesocarpio (Osorio, 2007; Vargas y Zumbado, 2003).

El uso actual de los subproductos para el caso del escobajo es como abono orgánico en las propias plantaciones y como combustible para generar calor en la fábrica; en el caso de las semillas (palmiste) se obtiene aceite y torta, destinados para alimentación animal; las cáscaras y los residuos fibrosos también son usadas para la generación de calor. Estos residuos fibrosos son usados en húmedo, aunque en una pequeña proporción (Garcés y Cuellar, 1997); estos residuos vegetales presentaron cualidades que permiten su uso como componentes fibrosos en la elaboración de paneles.

Al respecto se plantea la posibilidad de aprovechar fibras de recursos vegetales, diferentes a la madera, dentro de las que destacan los residuos agrícolas y agroindustriales. Estos residuos por lo general son de ciclo anual, se encuentran disponibles en grandes cantidades, su costo de generación es mínimo y fácil obtención (Gonzales *et al*, 2007; Saldívar, 2005). Dentro de los cultivos de más rápida expansión en los trópicos es el de palma aceitera, cultivados en gran escala para la obtención de aceite vegetal. Desde su ingreso al Perú en el año 1968, la superficie de palma aceitera ha experimentado una expansión sostenida y actualmente se encuentran en regiones de San Martín, Loreto, Ucayali y Huánuco convirtiéndose en el principal cultivo oleaginoso del Perú (WRM, 2006).

En el presente trabajo de investigación que se desarrolla a continuación, se evaluó la aptitud de los haces fibrosos del mesocarpio de palma aceitera para la elaboración de tableros fibrocemento. Para evaluar dicha aptitud se realizó la caracterización física y química de los mismos, después se realizó la elaboración de los tableros, los cuales se evaluó las propiedades físicas y mecánicas; finalmente se determinó la mezcla apropiada para la obtención de tableros de buena resistencia mecánica. De acuerdo a los valores obtenidos los tableros poseen potencial de uso en remplazo de los tableros fibrocemento comerciales.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

1. PALMA ACEITERA (*Elaeis guineensis* Jacq.)

1.1. DESCRIPCIÓN BOTÁNICA

La palma aceitera o también llamada palma africana es una planta monocotiledónea y en la percepción popular este tipo de planta perenne simboliza el paisaje tropical, ya que gran mayoría de las especies de palmeras habitan casi exclusivamente en regiones tropicales. El estípote raramente ramificado se mantiene con el mismo diámetro desde la base hasta el ápice y marcado por cicatrices foliares o cubierto por las bases de los peciolos persistentes, con una yema terminal y coronado con una roseta de hojas en el ápice (García, 2009).

La palma aceitera pertenece a la siguiente ubicación taxonómica (Hartley, 1986):

Reino	:	Vegetal
Clase	:	Monocotiledónea
Orden	:	Palmales
Familia	:	Palmaceae
Tribu	:	Cocoinae
Género	:	<i>Elaeis</i>
Especie	:	<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.

El género *Elaeis* incluye tres especies: *E.guineensis* de África occidental; *E.oleifera* que se extiende de Centro América a Brasil y *E.odora* es una especie muy poco conocida de América del Sur. Con respecto al nombre científico, Jacquin la describió en 1763 y le dio el nombre de *Elaeis guineensis* (Torres, 2006); *Elaeis* se deriva de la palabra griega “elaión” =aceite, mientras que el nombre específico *guineensis* muestra que Jacquin atribuía su nombre a la costa de Guinea (Hartley, 1986). La especie *Elaeis guineensis* posee tres variedades la Dura, Pisifera y el híbrido de los dos anteriores genera la variedad Tenera, la cual es usada en plantaciones comerciales, las características de esta variedad híbrida son: cáscara delgada, mesocarpio carnoso-fibroso y almendra grande (Paniagua, 1988).

Los nombres comunes con los que se conoce a esta palmera son palma aceitera o palma africana, “oil palm” o “african oil palm” en inglés y “dendê” en portugués (Ramírez, 2011).

1.2. DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA

De acuerdo con Torres (2006), la descripción de la planta es la siguiente (Figura 1):

- a) Estípite: durante los primeros tres años de edad se caracteriza por su forma de cono invertido, a partir de esa edad, el estípite se alarga conforme emergen las hojas y puede alcanzar alturas entre 15 a 20 m y un diámetro entre 30 a 50 cm.
- b) Hojas: se forman a partir de los primordios florales localizados en la parte superior del estípite del que nacen hojas e inflorescencias, el estípite de una palma adulta en condiciones normales posee entre 30 a 40 hojas, que pueden alcanzar entre 5 a 7 m de longitud y de 5 a 8 kg de masa.
- c) Inflorescencia: la palma aceitera es monoica, es decir, las flores masculinas se desarrollan separadamente, en el tiempo, de las flores femeninas; las inflorescencias masculinas y femeninas se forman en las axilas de las hojas. La inflorescencia masculina está constituida por un pedúnculo largo o eje central, alrededor del cual se distribuyen espigas con forma de dedos de 10 a 20 cm de largo. La inflorescencia femenina es un racimo globoso, cubierto al principio por dos brácteas coriáceas protegido con 5 a 10 unidades duras y puntiagudas que alcanzan 15 cm de longitud.
- d) Racimos y frutos: el racimo puede ser de varias formas, por lo general es ovoide y posee un tamaño promedio de 35 cm de ancho por 50 cm de longitud; su peso varía entre 2 a 3 kg en palmas jóvenes y hasta 100 kg en palmas adultas. El racimo está compuesto de un raquis central, espiguillas y frutos. El fruto es una drupa sésil, ovoide, que presenta color oscuro o negro cuando está inmaduro y color predominantemente rojo en su madurez. Un corte longitudinal del fruto presenta, de afuera hacia adentro, las siguientes partes: exocarpio, capa epidérmica delgada y ceros; mesocarpio, capa gruesa de color amarillo o anaranjado con alto contenido de aceites y fibras; endocarpio, cáscara dura, oscura, casi negra.
- e) Semilla: consta de un cuesco o endocarpio, y de 1 a 3 endospermos, aunque en la mayoría de los casos contiene solo una unidad. El tamaño de la semilla es variable, dependiendo del grosor de la cáscara como del tamaño del endospermo; pueden ser de 2 a 3 cm de largo y un peso de 4 g cada una.

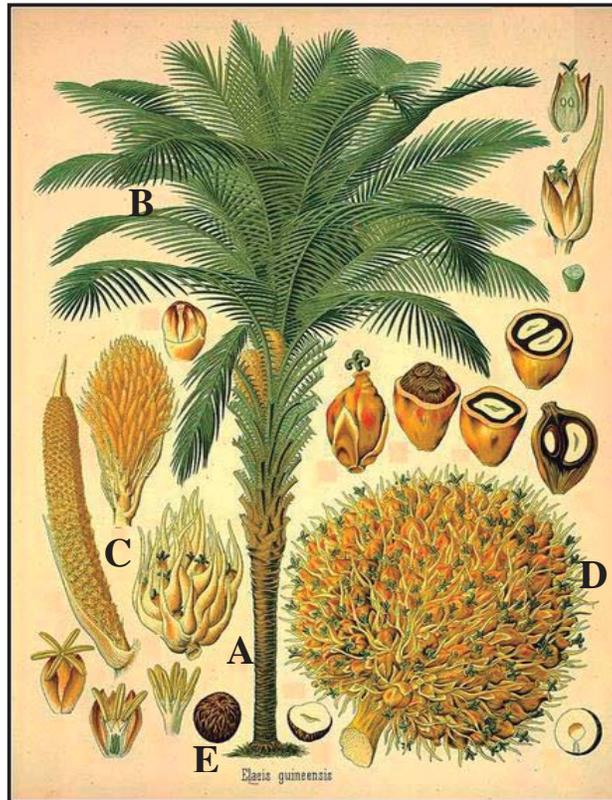


Figura 1: Partes morfológicas de la palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.). A: estípite; B: hojas; C: inflorescencia; D: racimo y frutos; E: semilla

FUENTE: Missouri Botanical (2015)

1.3. ORIGEN Y EXPANSIÓN

Existen indicios históricos, fósiles y lingüísticos que respaldan que esta palmera es originaria de las costas del golfo de Guinea, África occidental, de ahí su nombre científico *Elaeis guineensis* Jacq. (Hartley, 1986). La introducción en América tropical fue realizada por colonizadores y comerciantes portugueses que la usaban como parte de la dieta alimentaria de esclavos (Barrena *et al*, 2014).

Se han establecido relaciones de registros existentes con los principales hitos de la exploración, que en resumen indican que aun cuando pudiese de haber rastros de que la palma africana haya llegado a América, luego del año 1492, no se descarta posibilidades de transporte en épocas precolombinas (Hartley, 1986).

En África el hábitat de la palma se localiza en el borde de bosques, cerca de ríos, donde tienen una menor competencia de la flora selvática y suficiente humedad. Algunos autores han sugerido que el pantano de agua dulce es el hábitat natural, pero el caso es que ambas áreas de África se encuentran generalmente cerca a centros poblados de climas calurosos (Hartley, 1983). La distribución geográfica natural de la palma esta en todas las tierras bajas tropicales de África occidental y central, extendiéndose desde los 16° LN, en Senegal, hasta los 15° LS, en Angola (UNAD, 2011).

La palma aceitera es una planta perenne propia de zonas ecuatoriales y que tiene gran capacidad de adaptación, lo que ha permitido su expansión en toda la franja tropical y subtropical, del mundo, tal como se aprecia en la Figura 2. Se cultiva en países como: Liberia, Sierra Leona, Nigeria, Costa de Marfil, Dhomey, Zaire, Angola, Indonesia, Malasia, Tailandia, Madagascar, México, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, Panamá, Colombia, Filipinas, Venezuela, Surinam, Paraguay, Ecuador, Brasil y Perú (FAOSAT, 2015).

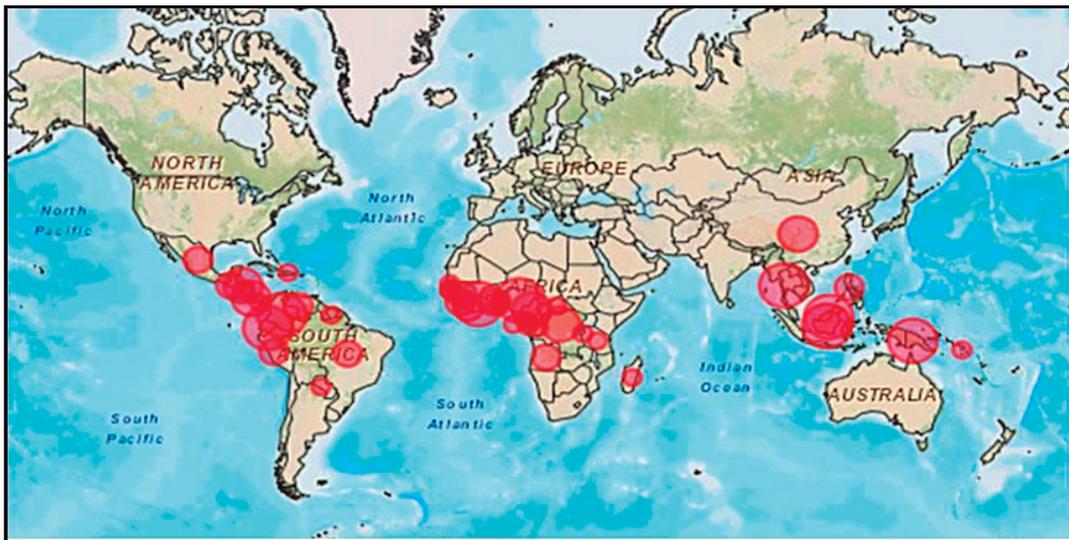


Figura 2: Expansión geográfica de la palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.)

FUENTE: FAOSAT (2015)

1.4. PALMA ACEITERA EN PERÚ

En el Perú el interés por la palma aceitera se remonta a 1965, cuando el gobierno solicitó al “Institut de Recherches pour les Huiles et Oleagineux” (IRHO) que analice las posibilidades

de establecer el cultivo de palma aceitera. Como resultado de los estudios, se estableció que la Amazonia peruana reúne las condiciones agroclimáticas adecuadas para el desarrollo de este cultivo (MINAGRI, 2012).

El año 1968 tuvo lugar la primera experiencia de instalación de una plantación piloto de 200 hectáreas ubicada en el centro poblado de Tananta, distrito y provincia de Tocache, región San Martín, a cargo del Programa de Servicio de Investigación y Promoción Agraria del Ministerio de Agricultura (MINAGRI, 2012). Hoy en día la palma aceitera es el principal cultivo oleaginoso del Perú, con un amplio potencial de crecimiento (Dammert, 2014).

La producción de palma aceitera fue interés nacional por el estado peruano en el año 2000, generando mayor interés en las grandes inversiones para energía (Barrena *et al.* 2014), conforme a la actual política energética del Perú, con adaptación de la matriz energética al desarrollo de fuentes primarias disponibles en el país, en reemplazo del petróleo diésel (Barrena *et al.* 2014). Así mismo se elaboró El Plan Nacional de Palma Aceitera, estableciendo como línea base la superficie instalada de palma hasta julio del año 2000 con un total acumulado de 14 667 hectáreas. Entre el año 2006 al 2012, se registraron valores de superficie anual cultivada por regiones en el Perú (Tabla 1).

En la actualidad se estima que existen 60 000 hectáreas instaladas de palma (Barrena *et al.* 2014). Así mismo se añade que en el mediano plazo el área cultivada podría crecer hasta llegar a las 250 000 hectáreas (Dammert, 2014). Finalmente cabe resaltar que de acuerdo con dicho plan existen aproximadamente 1 135 000 hectáreas aptas para realizar plantaciones de palma aceitera (MINAGRI, 2012).

Tabla 1: Superficie instalada de palma aceitera por región Perú 2006-2012

Región	2006 (ha)	2007 (ha)	2008 (ha)	2009 (ha)	2010 (ha)	2011 (ha)	2012 (ha)
San Martín	15880	21680	25051	25611	28657	28657	28657
Ucayali	6641	10341	13102	13741	12699	13741	14741
Loreto	1250	1250	1610	5900	7844	11613	13354
Huánuco	0	232	732	1000	1000	1000	1000
TOTAL	23771	33503	40495	46252	50200	55011	57752

FUENTE: MINAGRI (2012)

Del total de la superficie instalada de palma en el año 2012, 32 567 hectáreas se dedicaron a producción, generando 595 944 t de racimos de frutos frescos (RFF); en el año 2012, el 75 por ciento de la superficie cultivada de palma aceitera correspondía a San Martín y Ucayali, y el 25 por ciento restante a Loreto y Huánuco; mientras que para el año 2014, el 90 por ciento de la superficie cultivada de palma aceitera correspondía a regiones de San Martín y Ucayali, y el 10 por ciento restante a Loreto y Huánuco (Barrena *et al*, 2014).

En el Perú la producción de aceite de palma ha presentado una tendencia creciente en los últimos 10 años: de 30 000 toneladas el año 1993 a 142 000 toneladas el año 2013; ver Figura 3 (FAO, 2015).

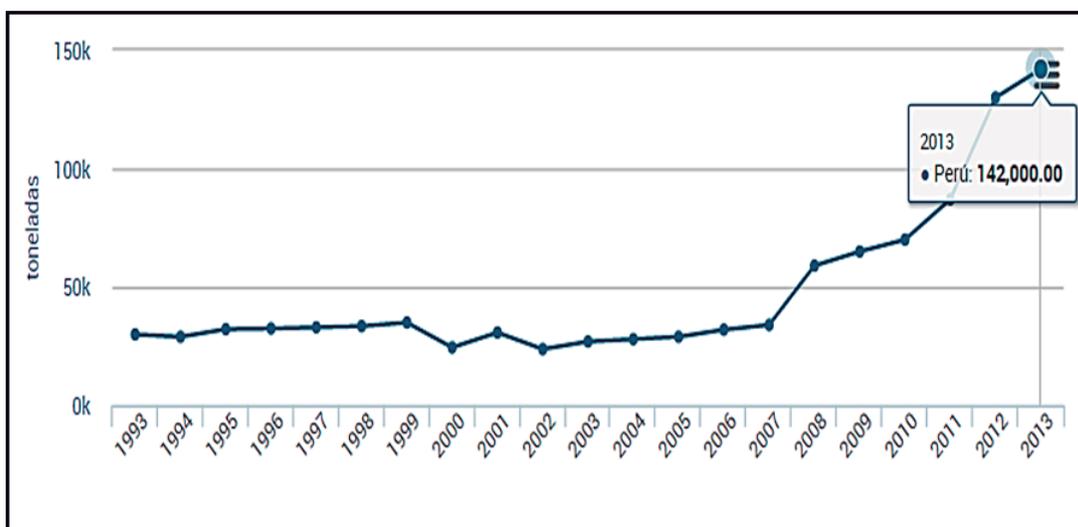


Figura 3: Producción de aceite de palma en Perú entre 1993-2013

FUENTE: FAOSAT (2015)

1.5. INDUSTRIA DE EXTRACCIÓN DE ACEITE CRUDO DE PALMA

Los racimos de frutos cosechados de las palmas deben ser llevados frescos a la planta extractora, el mismo día con el fin de reducir la formación de radicales libres dentro de las grasas de los frutos (Alfaro y Ortiz, 2006).

En las plantas se desarrolla el proceso de extracción del aceite de palma y de las semillas, que se inicia con la esterilización de los racimos, desgranado de frutos, digestión, prensado y extracción del aceite de la pulpa, clarificación y recuperación de semillas de donde se obtiene dos subproductos aceite y torta de palmiste, ver Figura 4 (MINAGRI, 2012).

En la etapa de palmistería se realiza la recuperación de semillas, separándolas de los haces fibrosos del mesocarpio. El proceso se inicia cuando la torta, que posee haces fibrosos y semillas, caen a un transportador donde se agrega vapor para facilitar el transporte y separación de los haces fibrosos en el ciclón. Los haces fibrosos extraídos son depositados en un silo y luego enviados como combustible a los calderos y las semillas separadas caen y se almacenan para posteriormente enviarlas a la planta de extracción de aceite de palmiste (Dongo, 2014).

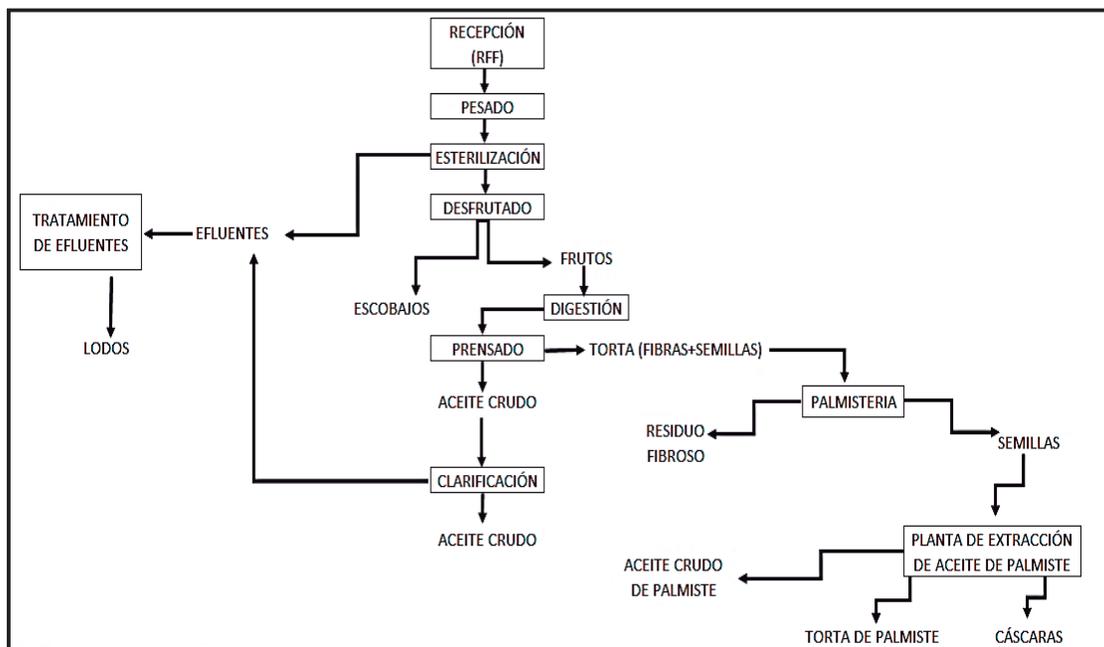


Figura 4: Proceso industrial de los racimos de frutos frescos de la palma aceitera

FUENTE: Palmas Espino (2008)

1.6. PRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS DE LA PALMA ACEITERA

Del fruto de la palma aceitera se obtienen los aceites de palma y de palmiste que son los principales productos; además, con el proceso de extracción de estos aceites, se obtienen diferentes subproductos como escobajos, cáscaras, haces fibrosos además de los efluentes respectivos (Garcés y Cuellar, 1997). En la Figura 5 se observa la distribución de masas, valores relativos de los racimos de palma luego del proceso.

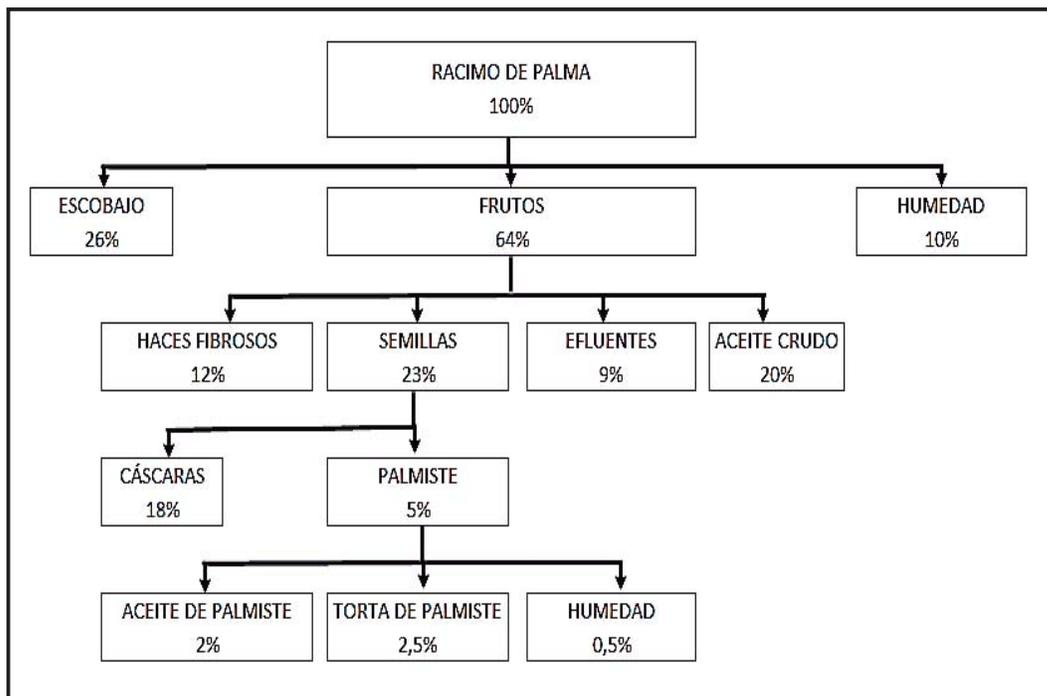


Figura 5: Diagrama de productos y subproductos de la palma aceitera

FUENTE: Vargas y Zumbado (2003)

Resaltar que con el aumento en la producción de palma aceitera también se elevan la cantidad de subproductos o residuos, lo que provoca que esta actividad genere una problemática ambiental. Resolver los problemas de logística, manejo y reducción es de mucha importancia debido a que las tecnologías de producción que en la actualidad imperan en el mundo de la industria aceitera carecen de mecanismos y herramientas que reduzcan, reutilicen y reciclen los residuos de sus líneas de producción (Castillo y Gonzales, 2010).

1.7. USOS DE LOS PRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS

La palma aceitera posee un amplio campo de utilización y se pueden aprovechar el tronco, las hojas y los frutos. El tronco y las hojas se utilizan como materia prima en la elaboración de muebles y pulpa para papel respectivamente (Garcés y Cuellar, 1997).

Mientras que el aceite de palma es usado en la fabricación de productos de belleza, lubricantes, margarinas, helados entre otros productos para la alimentación humana y el

aceite de semilla conocido como aceite de palmiste es usado para elaboración de jabones, bronceadores y otros productos cosméticos (Castillo y Gonzales, 2010).

Por otro lado, los subproductos como escobajos, cáscaras, cenizas generadas por combustión de residuos en las calderas, lodos generados durante el tratamiento de los efluentes y los haces fibrosos del mesocarpio (Ramírez *et al.* 2011) tienen gran potencial de usarse en otros procesos. A continuación, se detalla los usos más comunes de estos subproductos:

- a) Los escobajos son usados en poco porcentaje como combustible para las calderas, no se puede utilizar en su totalidad debido al alto porcentaje de humedad que almacena después de esterilización de los racimos. Otros usos son como cobertura para el control de malezas, para mejorar las condiciones del suelo en las plantaciones jóvenes y como fuente de nutrientes. También son usados para la fabricación de tableros de partículas, producción de papel, cobertura para reducir la erosión y como sustratos para jardinería (Castillo y Gonzales, 2010).
- b) Las cáscaras recubren el endospermo y son obtenidos al triturar la semilla, estos residuos poseen poder calórico apreciado que permite su uso como combustible doméstico o para calderas (Garcés y Cuellar, 1997).
- c) Las cenizas resultantes de la combustión de residuos son usadas para fertilizar los suelos en plantaciones o como complemento en la producción de compost (Ramírez *et al.* 2011).
- d) Los lodos son generados durante el tratamiento de los efluentes de las plantas extractoras, acumulados en el fondo de las lagunas anaeróbicas. Diversos estudios demuestran el potencial que tienen la aplicación de estos lodos en el cultivo como complemento de la fertilización y en la producción de compost (Ramírez *et al.* 2011).
- e) Los haces fibrosos del mesocarpio (Figura 6) son usados en la actualidad como combustible en calderas para generación de vapor. También son usados como material de compostaje (Castillo y Gonzales, 2010); es considerado como material similar al bagazo, con haces fibrosos que se entrelazan, se apelmazan a presión, no son abrasivos y posee una densidad de 112-160 kg/m³ (Perry, 1986).



Figura 6: Residuos fibrosos del mesocarpio de la palma aceitera

FUENTE: Elaboración propia

1.8. FIBRAS VEGETALES Y RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

La agroindustria es una actividad económica que combina el proceso productivo agrícola con el industrial para generar alimentos o materias primas semielaboradas destinadas al mercado. Con respecto a los residuos agroindustriales estos son materiales en estado sólido o líquido que se generan a partir del consumo directo de productos primarios o de su industrialización y son susceptibles de aprovechamiento o transformación para generar otros productos con valor económico de interés comercial y social (Saval, 2012).

La industria agrícola puede proporcionar una gran variedad de materiales naturales llamadas agrofibras, que provienen de sus residuos lignocelulósicos y son materiales completamente naturales y renovables (Sokolova, 2014). Estas fibras constituyen una masa biológica que no tienen una disponibilidad definida que en la mayoría de los casos se deja en el campo para su descomposición natural o producción de energía; tales son los casos de: bagazo de caña de azúcar, cáscaras de cereales, residuos del procesamiento de plantas fibrosas (algodón, sisal, abacá, entre otros) y de plantas oleaginosas como girasol y palma aceitera (Simbaña y Mera, 2010). Se tiene que considerar que la biomasa generada por estas fuentes de fibras renovables es importante y debería ser explotada; por esta razón el uso de estos residuos agrícolas y agroindustriales como refuerzo para materiales compuestos es uno de los objetivos más importantes en las investigaciones actuales (Jarabo, 2013).

Finalmente cabe resaltar que las fibras provenientes de otras fuentes diferentes a la madera específicamente de los residuos agrícolas y agroindustriales son reconocidos como fuente de fibras y que jugaran un rol importante en el futuro, principalmente en los países altamente poblados como China, India, Egipto y algunos países de África y Latino América, donde estas plantas anuales se cultivan con fines alimenticios y sus residuos pueden aprovecharse en la fabricación de otros productos (Saldívar, 2005).

2. FIBRAS VEGETALES

2.1. DEFINICIÓN

Son células fusiformes de paredes más o menos gruesas con extremos reducidos y lumen angosto, al mismo tiempo tienen disposiciones de materias inorgánicas en forma de carbonatos y oxalatos de calcio (Libby, 1974).

2.2. CLASIFICACIÓN

En la Figura 7 se presenta la clasificación general de las fibras de acuerdo a su origen.

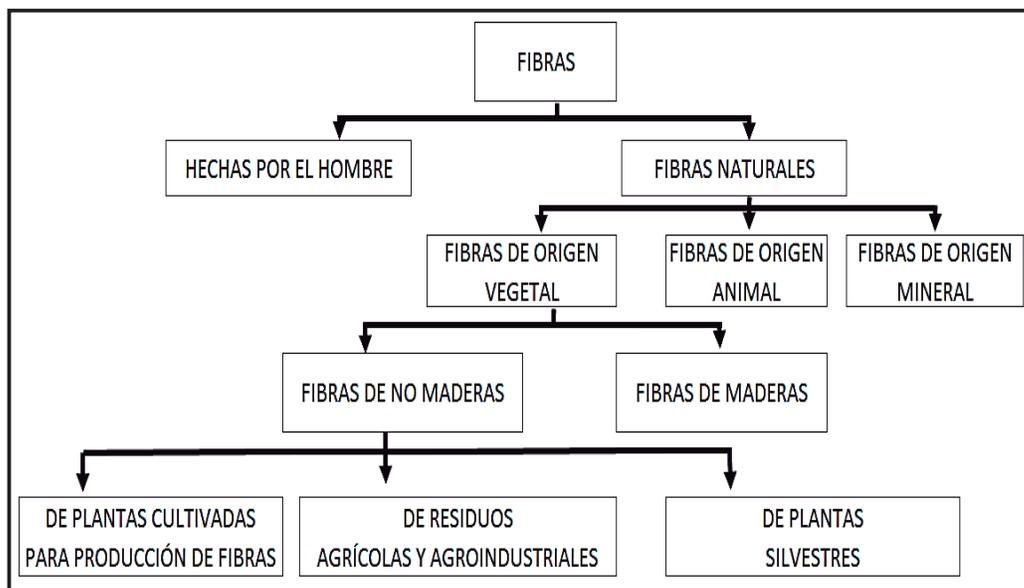


Figura 7: Clasificación de las fibras según su origen

FUENTE: Misra (1990)

2.3. FIBRAS NO MADERERAS

2.3.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA

Estos materiales lignocelulósicos son estructuras biológicas compuestas principalmente de celulosa, hemicelulosa, lignina y pectina. Los tres primeros son polímeros químicos básicos y principales constituyentes de las fibras, estos forman un arreglo tridimensional tal como se aprecia en la Figura 8. La finalidad de la hemicelulosa y lignina consiste en establecer una matriz para proteger las fibras de celulosas de las agresiones externas y al mismo tiempo transmitir las tensiones a las que se somete al conjunto del material (Bayer, 2013).

- a) La celulosa es un polímero homogéneo que contienen unidades repetitivas de glucosa de tipo D, con enlaces β (1-4) piranosido pudiendo establecerse puentes de hidrogeno en las posiciones 1 y 6 logrando así aumentar la resistencia. Las cadenas lineales se polimerizan formando fibrillas y estas a su vez se polimerizan en microfibrillas hasta dar una estructura rígida y cristalina. En la naturaleza la celulosa posee alto peso molecular y es la responsable de la resistencia mecánica de las fibras (Rodríguez, 2014). La superficie de las microfibrillas de celulosa es altamente polar debido a los grupos hidroxílicos que se asocian entre sí por puentes de hidrogeno. Esto dificulta la compatibilidad con materiales no polares, y afecta a la agregación entre fibras y a la absorción de humedad que hacen disminuir respectivamente su dispersión en materiales compuestos (Prinsen, 2010). El hinchamiento es la capacidad que tienen las celulosas y por ende de las fibras, de aumentar sus dimensiones (ancho y longitud) por diversas reacciones o propiedades físicas-químicas de las fibras; puede manifestarse de dos formas: intercrystalino e intracrystalino. El hinchamiento intercrystalino se relaciona con la capacidad de tomar agua dentro de su estructura, relacionado con las propiedades físicas de adsorción y desorción (Gonzales, 2003).
- b) Las hemicelulosas son polímeros heterogéneos que contienen hexosas y pentosas; ejemplos la glucosa, galactosa o fructosa, que conforman cadenas lineales ramificadas, que se caracterizan por su alta absorción de agua. Después de la celulosa, este polímero se reporta como el segundo carbohidrato más importante en las paredes de las células (Rodríguez, 2014).
- c) La lignina es un polímero heterogéneo complejo de hidrocarburos alifáticos y aromáticos que están asociados a la celulosa y hemicelulosas dentro de las paredes

celulares. La lignina es totalmente amorfa e hidrofóbica en la naturaleza y es considerada como un polímero termoplástico (Rodríguez, 2014).

- d) La pectina es un tipo de heteropolisacárido entre polímeros ácidos y neutros muy ramificados; la cantidad de pectinas en las fibras vegetales es baja, pero están ubicadas estratégicamente en la estructura de la planta. Las pectinas junto con las hemicelulosas se llaman polisacáridos de la matriz en las plantas y mantienen los tejidos unidos (Rodríguez, 2014).

También contiene cantidades de materia orgánica llamados extractivos y de componentes inorgánicos llamados cenizas (Rodríguez, 2014). Los extractivos según su naturaleza pueden ser ácidos grasos, terpenos, fenoles, azúcares, resinas entre otros. Muchos de estos compuestos son solubles en agua o disolventes orgánicos polares como metanol, etanol o acetona. Las cenizas indican la cantidad de material que queda remanente luego de ser sometido a ignición, este material está formado principalmente por minerales esenciales como magnesio, potasio y calcio; la variación de las cenizas dentro de la misma especie estaría relacionada a factores de fertilidad del suelo y condiciones del cultivo (Espinoza, 2010).

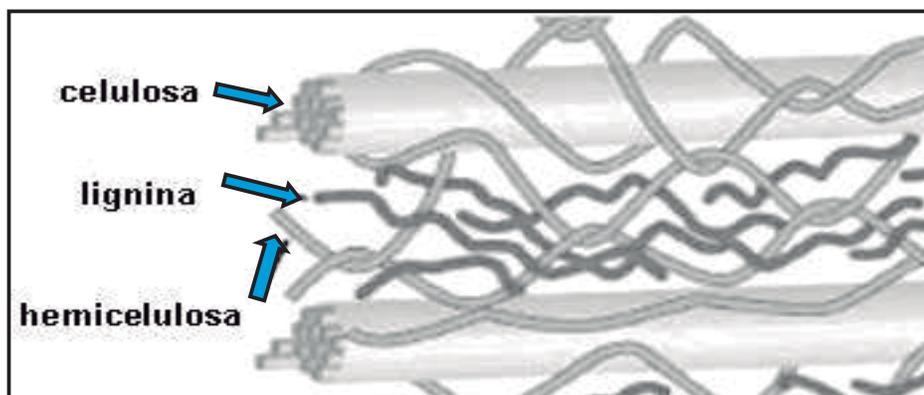


Figura 8: Componentes químicos principales de las fibras vegetales

FUENTE: Rodríguez (2014)

Los tres principales constituyentes de las fibras vegetales (celulosa, hemicelulosa y lignina) varían según la especie de planta, tal como se aprecia en la Tabla 2; y en la misma especie la variación de estos compuestos estaría relacionado a factores edafoclimáticos, desarrollo de las plantas y tratamientos silviculturales (Lucana, 2008).

Tabla 2: Características químicas de fibras vegetales

Fibra	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Holocelulosa (celulosa+hemicelulosa) (%)	Lignina (%)	Cenizas (%)	Extractivos (%)
Cáñamo	57-77	14-17	71-94	9-13	2,0	-
Sisal	42-62	21-24	63-86	07-09	0,2	-
Algodón	85-96	1-3	86-99	0,7-1,6	0,13	-
Paja de trigo	29-51	26-32	55-83	16-21	4,5-9	-
Palma aceitera	29-32	23-29	52-61	28-31	3-3,5	8-9
Maderas de Amazonia peruana	38-58	20-26	58-84	23-34	< a 4	-

FUENTE: Lucana (2008), Rojas (2011) y Saldívar (2005)

2.3.2. ESTRUCTURA FÍSICA

Estos materiales lignocelulósicos poseen como elemento constitutivo fibras que son responsables de su estructura física (Lucana, 2008). Estos elementos son como tubos microscópicos de paredes celulósicas alrededor de una cavidad hueca llamada lumen, el cual influye en el cálculo del diámetro de las fibras y el comportamiento de absorción de agua; estos elementos se unen mediante la lignina y conforman un haz de fibras. Las dos principales estructuras físicas descritas se aprecian en la Figura 9 (Rodríguez, 2014).

Las dimensiones de las fibras tienen variaciones según los tipos de plantas, pueden poseer una forma alargada con una alta relación longitud/diámetro. En especial las plantas no maderables poseen gran variación, ver Tabla 3 (Lucana, 2008; Saldívar, 2005).

La resistencia de material compuesto de matriz cemento y polimérica se mejora cuando el índice de esbeltez o también llamado relación de forma es grande (Álvarez, 2008). Los índices de esbeltez reportados para haces fibrosos no maderables usados en materiales compuestos de matriz polimérica y cemento que brindan un reforzamiento poseen un mínimo de 90, tal como se aprecia en la Tabla 3 las celdas resaltadas (Lucana, 2008). Si el índice de esbeltez es menor a dicho valor crítico el reforzamiento es insignificante, en cambio si el índice de esbeltez es mayor que el valor crítico es más efectivo el reforzamiento (Gonzales *et al.* 2007).

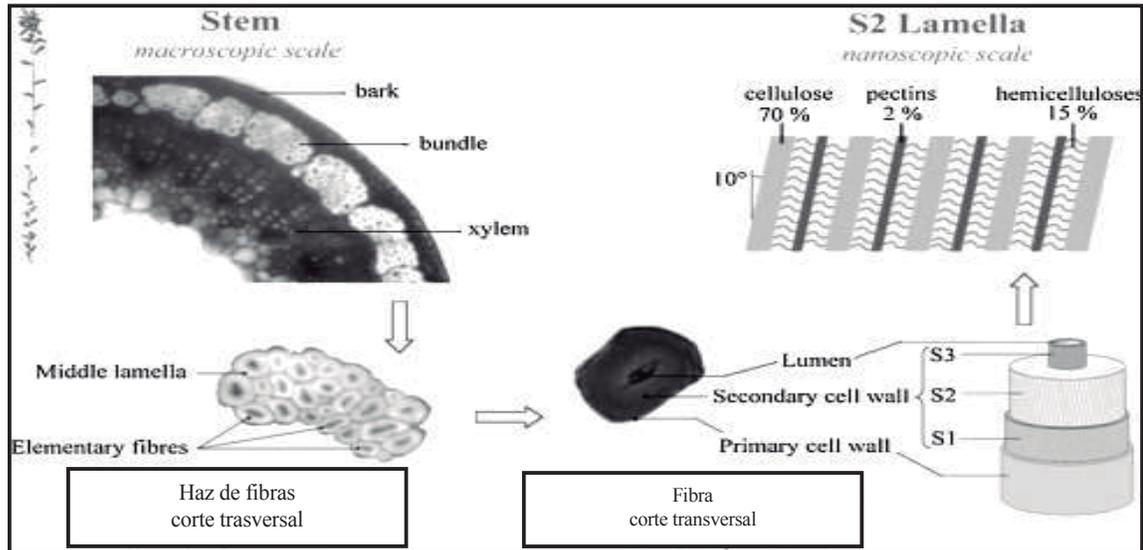


Figura 9: Estructura física de fibra y haz de fibras. Stem: tallo; Secondary cell wall: pared secundaria; Primary cell wall: Pared primaria; Bark: epidermis; Bundle: haces vasculares; Xylem: xilema; Middle lamella: lamina media; Elementary fibres: fibras

FUENTE: Rodríguez (2014)

Tabla 3: Características físicas de fibras vegetales

Especie		Parte	Longitud (mm)	Diámetro (µm)	L/D
Nombre común	Nombre científico				
Pona	<i>Socratea</i> sp.	tallo	1,9	29	66
Unguragui	<i>Jessenia polycarpa</i>	tallo	1,7	24	70
Aguaje	<i>Mauritia flexuosa</i>	tallo	1,7	33	52
Shebon	<i>Schelea</i> sp.	tallo	1,0	15	67
Palma aceitera	<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.	fruto	1,0	19,1	52
Cáñamo	<i>Cannabis sativa</i>	tallo	10-51	5-55	1000
Yute	<i>Corchorus capsularis</i>	tallo	10-25	2-5	100
Sisal	<i>Agave sisalana</i>	hojas	8-41	1-8	150
Algodón	<i>Gossypium</i> spp.	fruto	12-38	10-40	900
Paja de trigo	<i>Triticum</i> sp.	paja	8-34	0,4-0,32	90
Paja de arroz	<i>Oryza sativa</i> L.	Paja	0,7-3,5	5,1-13,6	176
Madera coníferas	<i>Madera coníferas</i>	tallo	33	3,3	100
Maderas frondosas	<i>Maderas frondosas</i>	tallo	20	1,0	50

FUENTE: Lucana (2008) y Saldívar (2005)

2.3.3. OBTENCIÓN DE FIBRAS

Este tipo de fibras no maderables se pueden obtener a un bajo costo usando la mano de obra disponible en la localidad y las técnicas adecuadas para la obtención; estas fibras son llamadas generalmente fibras naturales no procesadas. Sin embargo, estas fibras naturales pueden ser procesadas químicamente o mecánicamente para mejorar sus propiedades y posterior aplicación industrial (Juárez, 2002).

En un proceso mecánico para la obtención de fibras se requiere dos etapas: la primera etapa llamado desfibrado, en esta etapa se convierte la estructura original de la materia prima en fibras simples o haz de fibras y la segunda etapa denominada fibrilación, en esta etapa se reduce una parte de las fibras en fragmentos de pared celular. En la primera etapa se efectúa generalmente en un desfibrador de discos de gran potencia con alta velocidad diferencial, una de las principales ventajas de este tipo de proceso es el alto rendimiento obtenido, aunque un inconveniente es su elevado consumo de energía durante el proceso (Saldívar, 2005).

2.3.4. APLICACIONES

Una de las vertientes para utilizar estos materiales lignocelulósicos es como fuente de celulosa tal como tradicionalmente son utilizados, sin embargo, en la última década ha crecido el interés por estos materiales puesto que también presentan aplicaciones químicas, energéticas o estructurales. Esta última aplicación referida al desarrollo de materiales de construcción para disminuir costos y minimizar el impacto ambiental durante su uso o producción, especialmente sustituyendo al asbesto como material de refuerzo. Las matrices que se han utilizado son del tipo termoplásticas, termoestables, poliméricas e inorgánicas (Álvarez *et al.* 2012; Simbaña y Mera, 2010).

La aplicación de fibras no maderables como refuerzo presenta ventajas comparativas con otros materiales (fibras de vidrio, acero, etc.) debido a su bajo costo, baja densidad, altos valores de resistencia a la tracción, buenas propiedades térmicas, fácil separación, fácil reciclaje, no presentan fracturas en su procesamiento, no son abrasivas, son de gran variedad y su utilización implica un bajo costo consumo de energía. El uso de estas fibras presenta algunas desventajas en su aplicación estructural como la capacidad de absorción de agua que provocan el hinchamiento de las fibras, así como la baja adherencia con las matrices. Estas desventajas se pueden evitar aplicando tratamientos diversos como el secado, explosión de vapor, acetilado e impregnación de mineralizante (Lucana, 2008).

3. MATERIALES COMPUESTOS

3.1. DEFINICIÓN

Es un sistema de materiales formado por una mezcla o combinación debidamente dispuesta de dos o más micro o macro constituyentes con una interfase que los separa (Rodríguez, 2014). Se distingue tres fases: una continua o matriz, otra discontinua o refuerzo y la que se encuentra comprendida entre estas conocidas como la interfase (Trejos, 2014). Los constituyentes del material compuesto no deben disolverse ni fusionarse completamente uno con otros.

3.2. CLASIFICACIÓN

3.2.1. MATERIALES COMPUESTOS SEGÚN TIPO DE MATRIZ

- a) Matriz polimérica: son los que utilizan materiales de origen polimérico como fase continúa. Este tipo de materiales es más común de uso por la versatilidad de los polímeros, porque tanto los termoplásticos, termoestables y elastómeros son fáciles de procesar, son livianos y en general económicos (Trejos, 2014).
- b) Matriz metálica: son materiales que utilizan aluminio, magnesio y titanio como fase continua. Los metales usados para materiales compuestos son comúnmente dúctiles y esencialmente isotrópicos, a diferencia de los polímeros (Trejos, 2014).
- c) Matriz mineral: son materiales que utilizan comúnmente el carburo de silicio (SiC), nitruro de silicio (Si₃N₄), alúmina (Al₂O₃), vidrios cerámicos, zirconia (ZrO₂) y cemento como fase continua. Los cuales presentan relativa facilidad de procesamiento (Trejos, 2014).

3.2.2. MATERIALES COMPUESTOS SEGÚN TIPO DE REFUERZO

- a) Materiales reforzados con partículas: estos materiales compuestos pueden ser reforzados con partículas grandes y consolidadas por dispersión. El término grande se utiliza para indicar que las interacciones matriz-partícula no se describen a nivel atómico o molecular, sino a nivel macroscópico; mientras que los materiales compuestos consolidados por dispersión emplean partículas muy pequeñas con diámetros entre 10 a 100 nm (Trejos, 2014).
- b) Materiales compuestos estructurales: conformado por materiales compuestos y por materiales homogéneos, cuyas propiedades dependen no solo de los materiales constituyentes sino también de la geometría del diseño de los elementos

estructurales. Los materiales compuestos laminares y los paneles tipo “sándwich” son dos de los compuestos estructurales más comunes (Trejos, 2014).

- c) Materiales reforzados con fibras: son los más usados puesto que al adicionar las fibras a los materiales que sirven como matriz (sea de carácter polimérico, metálico o mineral) se mejoran considerablemente la resistencia, rigidez y/o tenacidad, según la naturaleza de los constituyentes, aunque presentan baja densidad. En estos materiales reforzados con fibras, la matriz une y soporta las fibras protegiéndolas contra agentes externos (Trejos, 2014).

4. CEMENTO PORTLAND

4.1. DEFINICIÓN

Es un conglomerante que mezclado con agua crea una mezcla uniforme, maleable y plástica que fragua y endurece adquiriendo consistencia pétreo. El cemento Portland es el tipo de cemento más utilizado como aglomerante para la preparación del concreto, posee propiedades adherentes que solidifica en algunas horas y endurece progresivamente durante un periodo de varias semanas hasta adquirir su resistencia característica (Carneado, 2009).

4.2. FABRICACIÓN

A partir del año 1845 se desarrolla el procedimiento industrial del cemento Portland moderno, su fabricación consiste en moler rocas calcáreas con rocas arcillosas en cierta composición y someter este polvo a temperaturas de los 1300 °C produciéndose lo que se denomina el “Clinker”, constituido por bolas endurecidas de diferentes diámetros y de color gris oscuro, que después de enfriarse, se tritura hasta convertirlo en un polvo fino al que se añade un poco de yeso para obtener el producto final: Cemento Portland (Pasquel, 1998).

4.3. TIPOS

Los tipos de cemento Portland según Alvares (2008) son los siguientes:

Tipo I: De uso general, donde no se requiere propiedades especiales

Tipo II: De moderada resistencia a los sulfatos, como en suelos y aguas subterráneas

Tipo III: Alta resistencia inicial, usado en climas fríos y edades tempranas

Tipo IV: De bajo calor de hidratación, usado donde se colocan grandes volúmenes de cemento

Tipo V: Alta resistencia a los sulfatos, se usa en un concreto que estará expuesto a altas concentraciones de sulfatos como tuberías de aguas residuales o expuestas a agua de mar

De los 5 tipos de cemento Portland, el que es destinado a obras de concreto en general, así como en la elaboración de tableros fibrocemento es el Portland Tipo I (Noriega, 1996).

4.4. COMPOSICIÓN QUÍMICA

El cemento Portland no es un compuesto químico simple, sino es una mezcla de muchos compuestos químicos, ver Tabla 4.

Tabla 4: Composición química del cemento Portland

<i>Componente químico</i>	<i>Total</i>	<i>Procedencia usual</i>	<i>Porcentaje típico</i>	<i>Abreviatura</i>
Oxido de Calcio (CaO) →Cal	95%	Rocas calizas	61%-67%	C
Oxido de Sílice (SiO ₂) →Sílice		Areniscas	20%-27%	S
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃) →Alúmina		Arcillas	4%-7%	A
Oxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)		Arcillas, mineral de hierro, pirita	2%-4%	F
Oxido de Magnesio, Sodio	5%	Minerales varios	1%-3%	
Potasio, Titanio, Azufre			1%-5%	
Fósforo, Manganeso			0,25%-1,5%	

FUENTE: Pasquel (1998)

Los compuestos químicos presentados en el Tabla 4, se combinan y originan 4 constituyentes principales del cemento Portland (Cerrón, 2009):

Silicato tricálcico (3CaO.SiO₂)→símbolo = C₃S

Silicato bicálcico (2CaO.SiO₂)→ símbolo = C₂S

Aluminato tricálcico (3CaO.Al₂O₃)→ símbolo = C₃A

Ferro aluminato tetracálcico (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃)→ símbolo = C₄AF

4.5. HIDRATACIÓN

La dosificación expresada como el cociente de masa de agua y masa de cemento se llama relación agua/cemento (expresada como A/C); para el caso de una relación A/C de 0,2 el agua disponible es insuficiente para que se genere la hidratación del cemento; en el otro

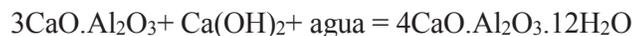
extremo, una relación de 0,6 resulta una cantidad demasiada de agua presente, que cuando es evaporada provoca poros en el concreto reduciendo por consiguiente sus propiedades de resistencia. El valor intermedio de 0,4 es considerado como el óptimo para que se genere la hidratación sin problemas de porosidad y se logre buenas propiedades mecánicas del tablero fibrocemento (Paucar, 2008).

La hidratación del cemento precisa de una cantidad de agua equivalente a 1/5 de la masa del cemento, la misma cantidad es absorbida por la superficie de los huecos del gel, mientras que el agua restante desplaza libremente encontrándose en los poros capilares (Saad, 1969). Otra investigación menciona que la cantidad de agua requerida para la hidratación del cemento debería ser de 0,25 mL/g de cemento y 2,7 mL/g de material lignocelulósicos. Estas cantidades han sido utilizadas en diversos estudios para todo tipo de material lignocelulósicos (Paucar, 2008).

4.6. REACCIONES DEL CONCRETO

El cemento Portland al hidratarlo influye de modo preponderante sobre los procesos parciales de la formación del concreto, estos procesos son el fraguado y el endurecimiento.

- a) Fraguado es un cambio del estado fluido al estado rígido, este periodo presenta una rápida velocidad de reacción del cemento provocado por la reacción química entre los aluminatos del “Clinker” con el hidróxido de calcio y agua. Esta reacción se representa en la siguiente ecuación:



Los compuestos resultantes actúan como verdaderos hidratos solubles en agua que luego se precipitan, formándose cristales de textura fibrosa que constituyen un medio de amarre con las diferentes partículas de la mezcla.

- b) Endurecimiento es un fenómeno posterior al fraguado inicial, por la lenta hidratación de los silicatos de diferentes reacciones frente a los aluminatos cálcicos. Se considera que la cohesión del material mejora con el desarrollo de valencias del tipo iónico, enlaces covalente y enlaces de hidrógeno. El tiempo de este proceso es muy importante en la resistencia del concreto, a 28 días el concreto alcanza el 85 por ciento de su resistencia final (Figura 10), en este punto la curva de desarrollo de resistencia los aumentos de resistencia son bajos y a intervalos cada vez más grandes lo que se conoce como endurecimiento indefinido (Soria, 1972).

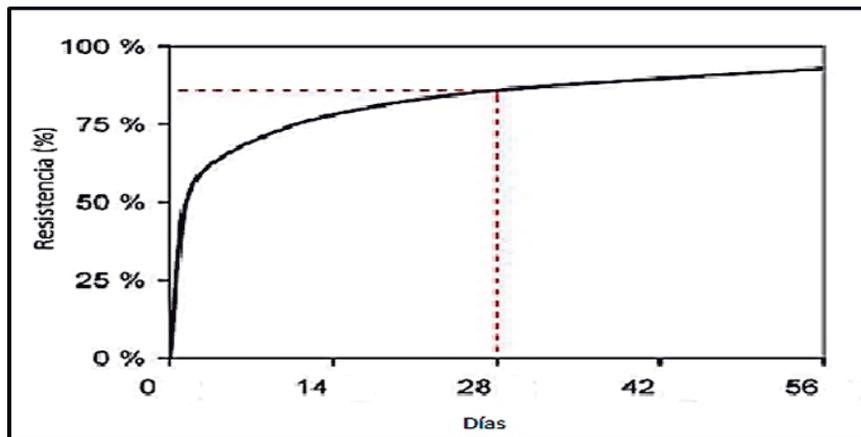


Figura 10: Variación de la resistencia del cemento Portland Tipo I

FUENTE: Soria (1972)

4.7. CURADO

Es el procedimiento que se utiliza para promover la hidratación del cemento, consiste en mantener un control del movimiento de temperatura y humedad hacia dentro y fuera del concreto. El objetivo del curado es mantener el concreto saturado, ya que la hidratación del cemento solo se logra con capilares llenos de agua, por lo que debe evitarse la evaporación excesiva. Además, debe controlarse la temperatura, puesto que la rapidez de hidratación es más lenta a bajas temperaturas y más rápida a temperaturas elevadas (100 °C). La forma más común de evitar la pérdida de agua consiste en recubrir la superficie con paja, arena, plásticos o manteniendo húmeda la superficie mediante riego (Neville, 1989).

4.8. TIEMPO DE MEZCLADO

El tiempo para la preparación de la pasta tiene influencia en la resistencia del concreto, se debe tener en cuenta que todas las partículas del agregado queden completamente cubiertas por la pasta de cemento. Un tiempo de mezclado mayor a 4 minutos, los resultados de resistencia tienden a disminuir, por el contrario un tiempo de mezclado entre 1,5 a 2 minutos es suficiente para lograr un aumento entre el 20 y 35 por ciento en la resistencia. Con respecto a la colocación de la mezcla en obra, se recomienda preparar la mezcla en una sola operación y colocarlo en obra en el menor tiempo posible y en ningún caso después de 60 minutos de hecho la mezcla, porque se obtendría resistencias menores y no uniformes (Saad, 1969).

4.9. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS MORTEROS

4.9.1. PROPIEDADES FÍSICAS

La elaboración de morteros implica la mezcla de cemento, agua y agregados, cuando se habla de cemento implícitamente se alude al cemento Portland y cuando se habla de agregados generalmente se utiliza agregados finos o provenientes de la trituración de rocas, pero puede reemplazarse por fibras vegetales. Al añadir agua se forma una masa plástica que fragua y endurece de acuerdo a la compatibilidad química de las fibras vegetales con la matriz de cemento Portland (Castro *et al.* 2014). A continuación, se describe propiedades físicas de morteros cemento, agua y fibras vegetales en forma de tableros fibrocemento.

- a) Humedad: la retención de agua es la medida de un mortero en estado plástico a retener agua de la mezcla, esta retención se aumenta con altos contenidos de aire, adición de agregados finos y agregados orgánicos. Una determinada cantidad de agua de la mezcla es para activar la hidratación del cemento, y otra cantidad es retenida por los agregados orgánicos (Gonzales, 2013).

Los agregados orgánicos absorben agua de la pasta de cemento, por lo que deberá agregarse una mayor cantidad de agua para preparar la pasta o caso contrario deberá controlarse la humedad de los agregados, ya que un contenido elevado de estos puede alterar algunas propiedades del mortero. El agua restante que existe en la pasta es agua que puede evaporarse en condiciones de sequedad a 110 °C de temperatura (Castro *et al.* 2014; Juárez, 2002).

En los morteros endurecidos, las fibras vegetales pueden intercambiar humedad con el ambiente relativamente fácil, ya sea perder o ganar humedad según las condiciones de exposición (Castro *et al.* 2014; Juárez, 2002) hasta lograr una humedad de equilibrio que se encuentra, dentro de un rango de 7 a 16 por ciento en base húmeda (Noriega, 1996). En la Tabla 5 se presentan valores de humedad de morteros en estado endurecido.

Tabla 5: Valores de humedad de paneles fibrocemento

Mortero	Descripción	Espesor	Contenido de Humedad
Fibrocemento	Se empleó haces fibrosos de bambú (<i>Guadua angustifolia</i> Kunth) mezclados con cemento Portland tipo I	15 mm	14,40 %
Fibrocemento	Se empleó pulpa química de eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i> Labill) mezclados con cemento Portland tipo I	12 mm	16,61 %
Fibrocemento	Se empleó fibras de lechuguilla (<i>Agave lechuguilla</i>) mezclados con cemento Portland tipo I	75 mm	18,00 %

FUENTE: Espinoza (2010), Noriega (1996) y Juárez (2002)

- b) Densidad: la densidad del mortero dependerá de sus componentes, del volumen que estos ocupen en el mortero y del grado de compacidad (vacíos/porosidad). Las fibras vegetales en morteros de cemento tienen un efecto importante en la densidad, un aumento de la cantidad de fibras vegetales, a masa constante del cemento, reduce la densidad del mortero (Gonzales, 2013).

La densidad del mortero en estado endurecido es un indicador de la resistencia del mismo, si se tiene un mortero muy denso es probable que su resistencia sea alta, siendo lo contrario para los morteros menos densos. Se considera que un mortero es ligero cuando su densidad es igual o menor que 1300 kg/m³ (Castro *et al*, 2014). En la Tabla 6 se presentan valores de densidad de morteros en estado endurecido.

Tabla 6: Valores de densidad de paneles fibrocemento

Mortero	Descripción	Espesor	Densidad
Fibrocemento	Se empleó haces fibrosos de madera mezclados con cemento Portland tipo I.	50 mm	0,43 g/cm ³
Fibrocemento	Se empleó pulpa química de eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i> Labill) mezclados con cemento Portland tipo I.	12 mm	0,73 g/cm ³
Fibrocemento	Se empleó partículas de aserrín de eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i> Labill) mezclados con cemento Portland tipo I.	20 mm	1,14 g/cm ³
Fibrocemento	Se empleó haces fibrosos de bambú (<i>Guadua angustifolia</i> Kunth) mezclados con cemento Portland tipo I.	15 mm	1,38 g/cm ³

FUENTE: Cruz (1982), Noriega (1996), Cerrón (2009) y Espinoza (2010)

- c) Absorción de agua: en morteros con agregados de fibras vegetales hay alta capacidad de absorción de agua; un incremento de la cantidad de fibras vegetales permite aumentar la absorción de agua del mortero, por la capacidad de los lúmenes que se llenan y reemplazan parte de los enlaces hidrogeno (-OH) de las holocelulosas y otros carbohidratos (Jarabo, 2013).

La absorción de agua de los morteros endurecidos depende también de la porosidad del mismo, un aumento de fibras vegetales, a masa constante de cemento, aumenta la porosidad del mortero que influye en la absorción de agua por capilaridad (Gonzales *et al.* 2007). En la Tabla 7 se presentan valores de absorción de agua de morteros en estado endurecido.

Tabla 7: Valores de absorción de agua de paneles fibrocemento

Mortero	Descripción	Espesor	Absorción de agua 24 horas de inmersión
Fibrocemento	Se empleó haces fibrosos de bambú (<i>Guadua angustifolia</i> Kunth) mezclados con cemento Portland tipo I	15 mm	16,40%
Fibrocemento	Se empleó haces fibrosos de madera mezclados con cemento Portland tipo I	50 mm	42,60%
Fibrocemento	Se empleó pulpa química de eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i> Labill) mezclados con cemento Portland tipo I	12 mm	55,38%

FUENTE: Cruz (1982), Noriega (1996) y Espinoza (2010)

- d) Hinchamiento volumétrico: en morteros con agregados de fibras vegetales, hay capacidad de hinchamiento; un aumento de la cantidad de fibras, a masa constante de cemento, evidencia el hinchamiento volumétrico del mortero, como consecuencia del hinchamiento de las fibras, aumenta sus dimensiones por sus diversas propiedades físicas-químicas (Jarabo, 2013; Gonzales, 2003).

La disminución del volumen que sufre el mortero con el tiempo, debido a la pérdida parcial de agua; las fibras vegetales permiten mitigar la aparición de grietas durante el fenómeno de retracción (Castro *et al.* 2014).

La retracción o disminución del volumen dependen de factores como morfología de las fibras, condiciones atmosféricas, humedad del concreto, humedad de las fibras y

de la proporción de los componentes del mortero (Castro *et al.* 2014). En la Tabla 8 se presentan los rangos de hinchamiento volumétrico de morteros endurecidos.

Tabla 8: Rango de hinchamiento volumétrico de paneles fibrocemento

<i>Mortero</i>	<i>Hinchamiento volumétrico (24 horas de inmersión)</i>	<i>Espesor</i>	<i>Característica del mortero</i>
Fibrocemento	<4%	10 mm	Buena calidad dimensional
Fibrocemento	4%-8%	10 mm	Moderada calidad dimensional
Fibrocemento	>8%	10 mm	Inadecuada calidad dimensional

FUENTE: Torres (2006), Mariscal (2001) y Ossa (1984)

- e) Porosidad: la porosidad del mortero es un parámetro físico que se clasifica dependiendo del grado de interconexión con el exterior; la porosidad abierta o efectiva es cuando los poros presentan un cierto grado de interconexión con el exterior mientras que la porosidad cerrada no posee conexión con el exterior. La porosidad abierta está relacionada directamente con la absorción de agua del mortero por capilaridad (Torres, 2006; Castro *et al.* 2014).

La porosidad del mortero se origina por consecuencia de la evaporación del agua excedente del amasado y del aire atrapado, este aire atrapado puede producirse por efectos mecánicos o por medio de la aplicación de agregados entradores de aire como es el caso de las fibras vegetales. A medida que aumenta la porosidad se mejora la resistencia a los ciclos hielo-deshielo, el cual es un fenómeno cíclico de congelamiento y descongelamiento del agua contenida en los morteros endurecidos. Pero disminuye la resistencia mecánica y la impermeabilidad (Castro *et al.* 2014). En la Tabla 9 se presentan valores de rango de porosidad de morteros endurecidos.

Tabla 9: Rango de porosidad de paneles fibrocemento

<i>Mortero</i>	<i>Porcentaje de vacíos</i>	<i>Espesor</i>	<i>Característica del mortero fibrocemento</i>
Fibrocemento	<15%	10 mm	Buena calidad y compacidad
Fibrocemento	15%-30%	10 mm	Moderada calidad y compacidad
Fibrocemento	>30%	10 mm	Inadecuada calidad y compacidad

FUENTE: Torres (2006)

4.9.2. PROPIEDADES MECÁNICAS

En morteros cemento con fibras vegetales se consideran los siguientes parámetros: distribución de las fibras, orientación de las fibras, morfología de las fibras, proporción de la fase dispersa, proporción de la fase continua, cohesión de la fase continua, tiempo de fraguado, cantidad de agua utilizada y la adherencia entre las fibras y la matriz (Ramírez y Vergara, 2013).

La interfase cemento-fibra vegetal es la parte más sensible, por lo general los incidentes de fallas ocurren en la interfase antes que en cada uno de los constituyentes del mortero (Ramírez y Vergara, 2013). Los compuestos como sustancias grasas pueden migrar hacia la superficie de las fibras vegetales mientras ocurre el secado del mortero y forman una capa hidrófoba que reduce los puentes de hidrogeno formados en la interfase (Beraldo, 2012).

La pasta endurecida desempeña una función importante en el comportamiento mecánico, y su resistencia es porque intervienen dos clases de adherencia; la atracción cohesiva y atracción química. La atracción cohesiva es del tipo *Vander Wall*, el cual se da entre superficies de sólidos separados únicamente por microscópicos poros. La adherencia química, el cual se da entre sus partículas unidas por fuerzas químicas siendo del tipo iónico y covalente (Ramírez y Vergara, 2013). A continuación, se describe dos propiedades mecánicas de morteros cemento, agua y fibras vegetales en forma de tableros fibrocemento.

- a) Resistencia a la compresión: se puede definir como la máxima resistencia alcanzada de un espécimen a carga axial, la forma de evaluar esta resistencia es mediante una prueba mecánica destructiva de compresión, que consiste en aplicar una carga de compresión axial a probetas en forma de cilindros hasta que ocurra la falla. La

resistencia compresiva es calculada al dividir la carga máxima lograda entre el área de la probeta y generalmente se expresa en kg/cm² (Ramírez y Vergara, 2013).

La resistencia a la compresión depende en mayor grado de la cantidad y cohesión de la fase continua, de la cantidad de agua utilizada para preparar la pasta, del tiempo de fraguado; con respecto a las fibras, distribución, proporción como fase dispersa, orientación y la adherencia entre fibras y la matriz. En la práctica habría que añadir a estos factores el grado de densificación logrado en la mezcla, como ocurre en otros materiales la proporción de vacíos en el mortero endurecido tiene efecto en su resistencia a la compresión (Castro *et al*, 2014; Ramírez y Vergara, 2013).

Los ensayos de resistencia a la compresión muestran que con una determinada cantidad de fibras como agregados se obtiene un valor máximo de resistencia comparando con la resistencia del cemento solo y a partir de allí se experimenta una caída (Gonzales, 2013; Juárez, 2002). En la Tabla 10 se presentan valores de resistencia a la compresión del espesor de tableros fibrocemento.

Tabla 10: Valores de resistencia a la compresión de paneles fibrocemento

<i>Mortero</i>	<i>Descripción</i>	<i>Espesor</i>	<i>Resistencia</i>
Fibrocemento	Se empleó haces fibrosos de madera mezclados con cemento Portland tipo I.	50 mm	4,08 kg/cm ²
Fibrocemento	Se empleó partículas de aserrín de eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i> Labill) mezclados con cemento Portland tipo I.	20 mm	14,44 kg/cm ²
Fibrocemento	Se empleó pulpa química de eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i> Labill) mezclados con cemento Portland tipo I.	12 mm	41,44 kg/cm ²

FUENTE: Cruz (1982), Noriega (1996) y Cerrón (2009)

- b) Resistencia a la flexión estática: se puede definir como la máxima resistencia alcanzada de un espécimen en forma de viga, la forma de evaluar la resistencia a la flexión es mediante una prueba mecánica destructiva, que consiste en aplicar una carga al centro de la probeta hasta que ocurra la falla, en ese momento se determina la deformación máxima. La resistencia a la flexión estática se expresa generalmente en kg/cm² (Ramírez y Vergara, 2013).

La resistencia a la flexión estática depende de la cantidad y cohesión de la fase continua, de la cantidad de agua utilizada para preparar la pasta, del tiempo de fraguado. Con respecto a las fibras, también influyen su distribución, orientación, morfología, proporción como fase dispersa y la adherencia entre las fibras y la matriz. A estos factores, se agrega la textura de la superficie de las fibras vegetales, debido a las posibilidades de anclaje mecánico con la pasta endurecida (Ramírez y Vergara, 2013; Quintero y Gonzales, 2006).

El módulo de ruptura (MOR) es el más representativo en el ensayo de la resistencia a la flexión, siendo una medida útil en los tableros donde influye principalmente a flexión; de ahí que, en estos casos, la calidad del mortero se especifique indicando su módulo de ruptura (Ramírez y Vergara, 2013). En la Tabla 11 se presentan algunos valores de resistencia a la flexión estática de morteros en estado endurecido.

Tabla 11: Valores de resistencia a la flexión estática de paneles fibrocemento

<i>Mortero</i>	<i>Descripción</i>	<i>Espesor</i>	<i>MOR</i>
Fibrocemento	Se empleó partículas de aserrín de eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i> Labill), mezclados con cemento Portland tipo I.	20 mm	10,20 kg/cm ²
Fibrocemento	Se empleó haces fibrosos de madera mezclados con cemento Portland tipo I.	50 mm	11,15 kg/cm ²
Fibrocemento	Se empleó pulpa química de eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i> Labill) mezclados con cemento Portland tipo I.	12 mm	15,96 kg/cm ²
Fibrocemento	Se empleó fibrosos de bambú (<i>Guadua angustifolia</i> Kunth) mezclados con cemento Portland tipo I.	15 mm	20,82 kg/cm ²

FUENTE: Cruz (1982), Noriega (1996), Cerrón (2009) y Espinoza (2010)

5. TABLEROS FIBROCEMENTO

5.1. DEFINICIÓN

Son composites de sistema complejo constituido de biomasa vegetal, compatible con la matriz que es el cemento, y con presencia de agua, en una cantidad superior a aquella necesaria para fabricar productos convencionales a base de cemento; modificando la proporción de estos constituyentes, su distribución y tamaño se obtienen una amplia gama de productos (Beraldo, 2012).

5.2. ANTECEDENTES

Los materiales compuestos por fibras vegetales y cemento se remontan a 1908 con la aparición de tableros elaborados con refuerzo de fibras de madera de las especies *Picea abies* (Epicea) y *Pinus sylvestris* (Pino), sin embargo, las primeras aplicaciones comerciales se dieron a partir de los años 50 (Valenzuela *et al.* 1991) y en 1990 ya existían fábricas en más de 28 países. En las últimas décadas se han realizado muchos esfuerzos para el desarrollo de fibrocemento con fibras procedentes de plantas no maderables (Jarabo, 2013). A continuación, se menciona información sobre antecedentes de uso de haces fibrosos con cemento, para elaborar paneles.

- a) Se utilizó las fibras de la palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) con la finalidad de sustituir varillas de acero de refuerzo por este tipo de fibras. Las propiedades mecánicas de las fibras de palma que se comportan son la resistencia última a la tensión entre 150 y 200 MPa y MOE de 18,5 a 21,5 GPa. Se fabricaron losas para techos sustituyendo varillas de acero por fibras de palma a espesor constante, se reportó una adecuada resistencia de la fibra a soluciones químicas con pH de 1 a 13; también el material se obtuvo a un bajo costo y con propiedades de aislamiento térmico (Juárez, 2002).
- b) Se realizaron pruebas para utilizar fibra de coco (*Cocos nucifera*) como refuerzo de placas delgadas de cemento; se ensayaron placas planas y acanaladas, en flexión con un espesor de 10 mm, con una relación A/C de 0,35 y contenidos de fibra de 1 a 6 por ciento respecto a la masa del cemento. Algunas placas se mantuvieron en ambiente natural durante 3, 6 y 12 meses; se reportó que la resistencia a flexión aumenta con la cantidad de fibra en un 4 a 5 por ciento. El comportamiento a flexión resultó ser favorecido con la mayor cantidad de fibras, demostrado en la superficie

de falla donde se observó un aumento de la resistencia post-agrietamiento en un 30 por ciento (Juárez, 2002).

- c) Se usó fibras de coco (*Cocos nucifera*) como refuerzo en morteros a base de cemento Portland; se probaron dos longitudes de fibra 38,2 y 9,7 mm. Se realizaron ensayos de resistencia en cuyos resultados se demostró que la resistencia al impacto aumentó con la fracción de volumen, pero disminuía la resistencia a la compresión. Así mismo, con una fracción de volumen de 3,2 por ciento se logró un valor máximo a flexión. En el ensayo de impacto, con fibrocemento se obtuvo de 1,6 a 4 veces el resultado obtenido solo con cemento. Finalmente se encontró que las fibras largas originaron moldes con mayor resistencia a flexión y compresión (Juárez, 2002).
- d) Se utilizaron fibras de coco (*Cocos nucifera*) en sustitución del asbesto en la fabricación de láminas acanaladas de concreto; se ensayaron láminas acanaladas de 10 mm de espesor. Los mayores valores de módulos de ruptura obtenidos se encontraron en tableros elaborados con 3 por ciento de fibras respecto a la masa de cemento (Juárez, 2002).

5.3. CLASIFICACIÓN

La clasificación de los tableros fibrocemento pueden estar en función de variables como materia prima empleada, método de producción, aplicación y a otros aspectos genéricos, pero la condición más representativa para realizar la clasificación de los tableros fibrocemento es su densidad. Los tableros fibrocemento se clasifican en tres grupos fundamentales de acuerdo a su densidad y espesor, ver Tabla 12 (Noriega, 1996).

Tabla 12: Clasificación de tableros fibrocemento según su densidad

<i>Tipo de tablero</i>	<i>Densidad (kg/m³)</i>
Tablero de baja densidad	250 a 400
Tablero de media densidad	400 a 800
Tablero de alta densidad	>800

FUENTE: Noriega (1996)

5.4. COMPONENTES

- a) Aglomerante: el aglomerante mineral más utilizado es el cemento Portland tipo I.
- b) Agregados: normalmente el concreto reforzado con fibras se fabrica con tamaños de agregados menores a 4,75 mm.
- c) Agua: esta deberá ser potable y debe de estar libre de sustancias que perturben el fraguado tales como algas, humus, microorganismos, etc.; como regla empírica se puede decir que el agua que es apta para el consumo humano también lo es para la hidratación.
- d) Fibras y/o haces fibrosos: en la fabricación de estos paneles se usan fibras de madera o de residuos fibrosos provenientes de la agricultura o agroindustria, recomendándose que estén libres de azúcares solubles y sin señales de ataques de microorganismos
- e) Mineralizante: se usan sales como sulfato de aluminio ($AlSO_4$), cloruro de magnesio ($MgCl_2$), silicato de potasio (K_2SiO_3) y cloruro de calcio ($CaCl_2$), este último es el mineralizante más empleado.

5.5. ELABORACIÓN DE TABLEROS

Para la elaboración de tableros fibrocemento se recomienda utilizar una sola especie, ya que mezclando diferentes especies no se obtiene una reacción uniforme con el cemento por lo que se logran resultados insatisfactorios. Después de obtener las fibras y/o haces fibrosos estos deben de mineralizarse previamente para lograr una mejor adherencia al cemento, los porcentajes usados en mineralización están entre 3 a 5 por ciento en solución (Cerrón, 2009).

Los tableros fibrocemento son elaborados de dos maneras: Moldeo, que consiste en la deposición de la mezcla en moldes sin someterlo a ninguna presión y Compactación, que consiste en la disposición de la mezcla en moldes al cual se le aplica una determinada presión. La eficiencia de los procesos está fuertemente correlacionada con las características propias de las fibras vegetales (distribución de tamaño y morfología), de las proporciones entre sus constituyentes sobre todo la razón agua/materiales secos. En el método de moldeo la introducción de la mezcla en los moldes deber hacerse rápidamente para evitar el secado prematuro, ocasionado por la pérdida de agua (Beraldo, 2012).

El desmolde normalmente es hecho después de un tiempo mucho más largo del que sería necesario en caso de la fabricación de productos convencionales a base de cemento; sin embargo, el empleo de especies vegetales más adecuadas, de cementos especiales o aditivos específicos permite reducir este tiempo, que es uno de los mayores problemas en la industrialización de los materiales fibrocemento (Beraldo, 2012).

El curado es complicado al inicio, pues la pérdida de agua es más acentuada, después ocurre una forma de curado interno cuando las fibras vegetales liberan parte de su agua para el cemento. Un curado alterno, constituido por ciclos de humidificación y secado pueden tener efectos positivos en la estabilidad dimensional de los tableros (Beraldo, 2012).

Finalmente, en la etapa de acabado existe una primera parte que consiste en almacenar los paneles por un periodo de 20 días aproximadamente, afín de concluir el proceso de endurecimiento del cemento; después se realizan los cortes correspondientes para la distribución en el mercado (Beraldo, 2012).

5.6. MATERIAL COMPUESTO FIBRA VEGETAL Y CEMENTO PORTLAND

5.6.1. COMPATIBILIDAD QUÍMICA

Uno de los factores que es de suma importancia para utilizar fibras vegetales como refuerzo es que estas sean compatibles con el cemento, esta compatibilidad se expresa en la facilidad para el fraguado de la mezcla cemento/fibras. La presencia de ciertos compuestos químicos en las fibras vegetales puede hacer inviable la utilización de fibras vegetales como refuerzo (Beraldo, 2012).

Casi todas las biomásas vegetales tienen estos compuestos químicos que provocan reacciones de inhibición para el desarrollo de la resistencia del cemento Portland. Un daño mínimo al fraguado del cemento es la característica fundamental que debe presentar un agregado de origen vegetal. El comportamiento particular de cada especie vegetal en presencia del cemento es denominado compatibilidad química (Beraldo, 2012).

Estos compuestos químicos son conocidos como extractivos y están formadas por mezclas complejas como resinas, ácidos grasos, terpenos, terpenoides, fenoles, taninos, azúcares simples y sales que varían considerablemente en su característica de solubilidad y están contenidas en diferentes proporciones dependiendo del material lignocelulósicos. Dependiendo de su tipo y proporción pueden influir retardando el proceso de hidratación del

cemento Portland lo que pueden repercutir en una baja compatibilidad de la mezcla y bajas propiedades de los tableros resultantes (Paucar, 2008).

Los compuestos que interfieren en el fraguado del cemento no son bien conocidos, pero se sabe con certeza que los azúcares son los principales responsables de este retardo. Durante la interacción entre la pasta de cemento y la biomasa vegetal, el ataque por los álcalis presentes en el cemento puede convertir parcialmente las hemicelulosas en polímeros de azúcar, ocasionando problemas para el fraguado del cemento (Beraldo, 2012). En la Tabla 13 se presenta la clasificación de la aptitud de biomasa vegetal para formar tableros fibrocemento según el contenido de azúcares.

Tabla 13: Aptitud de materiales vegetales para elaboración de fibrocemento de acuerdo a la cantidad de azúcares solubles

<i>Aptitud</i>	<i>Cantidad de azúcares solubles (%)</i>
Apta	0-0,03
Medianamente apta	0,03-0,10
No apta	>0,10

FUENTE: Beraldo, (2012), Alarcón et al (1972)

La reacción química de inhibición del fraguado por azúcares, mediante la formación de sacaratos en la mezcla se representa en la Figura 11. En esta Figura se puede apreciar como el azúcar bloquea las moléculas de hidróxido de calcio que es uno de los componentes principales del cemento, impide una completa combinación con aluminato tricálcico (otro de los componentes de cemento) provocando una lenta e incompleta reacción. (Beraldo, 2012).

Las reacciones inhibitoras se pueden desarrollar en la interfase fibra vegetal-cemento, adelgazando las uniones mecánicas y químicas entre sus constituyentes. Algunos compuestos como terpenos, resinas y sustancias grasas pueden migrar hacia la superficie de la biomasa vegetal mientras ocurre el secado. La formación de esta capa hidrófoba reduce la cantidad de los puentes de hidrogeno formados, lo que implica una reducción de la resistencia de esta capa. En el estudio de la interacción entre la biomasa vegetal y el cemento no se debe de considerar solamente la concentración de las sustancias químicas inhibitoras sino también su naturaleza, siendo las sustancias solubles en agua las más inhibitoras al fraguado de cemento Portland (Beraldo, 2012).

De forma general se puede afirmar que el efecto nocivo de la incompatibilidad química entre la biomasa vegetal y el cemento es un fenómeno de fácil verificación, pero difícil comprensión, pues se trata de algo muy complejo. Hasta ahora ninguna teoría simple fue capaz de explicar los efectos de las varias sustancias contenida en la biomasa vegetal sobre los diferentes constituyentes de cemento Portland (Beraldo, 2012).

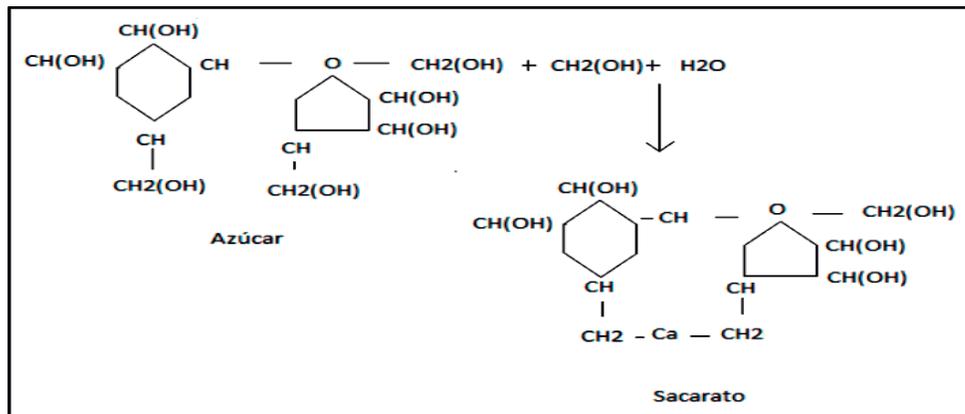


Figura 11: Reacción de inhibición del fraguado del cemento Portland tipo I

FUENTE: Alarcón et al (1972)

La clasificación para predecir la aptitud de fibras maderables para la fabricación de materiales compuesto matriz cemento Portland, se aprecia en la Tabla 14; esta clasificación toma en consideración la concentración de extractivos en dos solventes y su implicancia en el fraguado inicial.

Tabla 14: Aptitud de fibras madereras para elaboración de fibrocemento de acuerdo a la cantidad de extractivos

<i>Aptitud</i>	<i>Contenido de extractivos (%)</i>	
	<i>Agua caliente</i>	<i>Alcohol-benceno</i>
Apta	0-3,25	0-2,25
Medianamente apta	3,26-4,25	2,26-3,50
No apta	>4,25	>3,50

FUENTE: Cruz (1982)

5.6.2. MEJORAMIENTO DE LA COMPATIBILIDAD QUÍMICA

Los tratamientos preliminares efectuados en la biomasa vegetal minimizan el problema de su incompatibilidad con el cemento y se puede entonces lograr la obtención de un material compuesto con adecuada resistencia mecánica. Existen diferentes tratamientos preliminares para mejorar la compatibilidad entre las fibras y el cemento, estos tratamientos pueden ser clasificados en dos categorías: eliminar o extraer las sustancias inhibidoras y la otra es minimizar el efecto de las sustancias inhibidoras. Dentro de estas dos categorías existen tratamientos específicos, entre los más utilizados se encuentran: envejecimiento de las fibras, eliminación de extractivos, secado, recubrimiento y la mineralización. Este último tratamiento es el más empleado en el proceso de elaboración de tableros fibrocemento (Beraldo, 2012).

5.7. VENTAJAS

Las ventajas del uso de paneles fibrocemento es su sobresaliente resistencia al fuego, resistencia a pudrición por hongos, resistencia al ataque de insectos, libres de emisiones tóxicas, trabajables con herramientas de la construcción, en comparación con el concreto son menos quebradizos lo que los favorece ante eventos sísmicos (Paucar, 2008).

5.8. USOS

El principal uso es en la industria de la construcción, generalmente se utilizan para manufacturas de elementos que no están sujetos a cargas (Paucar, 2008 y Cruz, 1982). En la Tabla 15 se presentan los usos recomendados de los tableros fibrocemento de acuerdo al espesor.

Tabla 15: Usos recomendados de tableros fibrocemento según su espesor

<i>Espesor (mm)</i>	<i>Usos recomendados</i>
4	Cielos rasos suspendidos o clavados
6	Cielos rasos, revestimiento de interiores, paredes económicas
8	Paredes interiores, aleros, cielos rasos atornillados, casetas sanitarias
10	Aleros, base para techos, paredes exteriores de poca altura, paredes interiores, fachadas y divisiones
14	Entrepisos y estanterías
20	Entrepisos y estanterías

FUENTE: Eternit (2015)

Las propiedades físicas y mecánica de los tableros fibrocemento de 10 mm de espesor de acuerdo al uso recomendado se presentan a continuación en la Tabla 16.

Tabla 16: Propiedades físicas y mecánica de tableros fibrocemento de 10 mm de espesor

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>
Espesor	10 ± 10%	mm
Peso	13,30 a 14,98	kg/m ²
Humedad	6 a 10	%
Densidad	1,25 a 1,60	g/cm ³
Absorción, dentro de 24 horas de inmersión en agua	< 35	%
Porosidad, dentro de 24 horas de inmersión en agua	< 30	%
Hinchamiento, dentro de 24 horas de inmersión en agua	< 8	%
Resistencia a la flexión (MOR), longitudinal	80 a 90	kg/cm ²

FUENTE: Eternit (2015), Torres et al (2006) y Ossa (1984)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

1. TRABAJO DE CAMPO

El material fibroso del mesocarpio de la palma aceitera donde se colectó se ubica en la región Ucayali, Provincia Coronel Portillo, Distrito Campo Verde, kilómetro 50 de la carretera Federico Basadre (Figura 12); las plantaciones se ubican en los kilómetros 30-40 de la carretera Federico Basadre. Las coordenadas geográficas de donde se colectó la muestra son: 8°32'35" LS, 74°34'38" LO y altitud de 154 msnm.

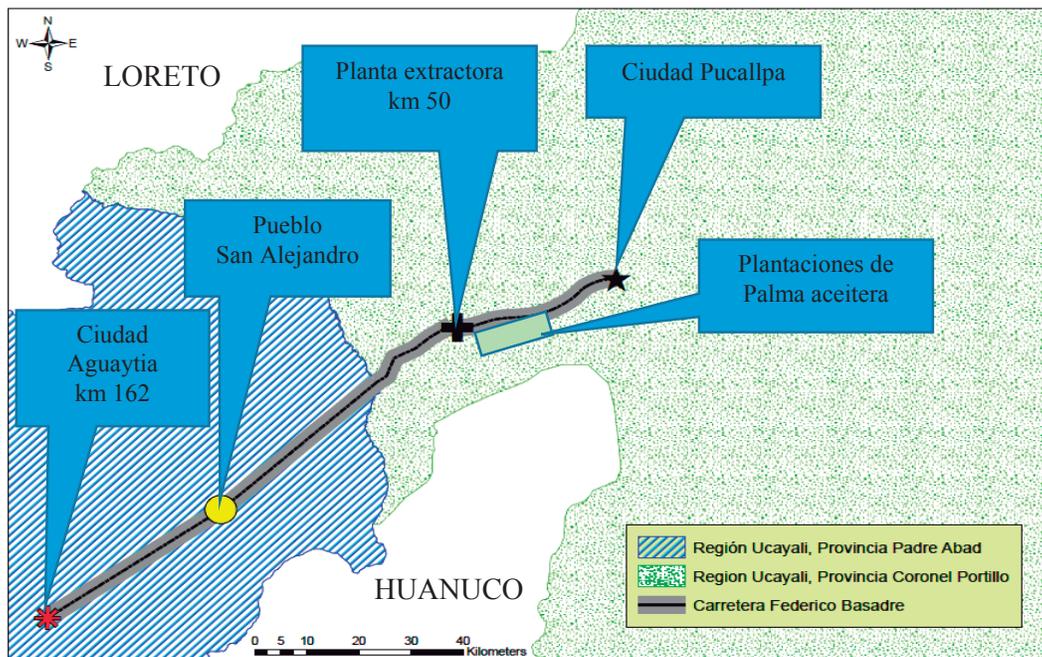


Figura 12: Croquis de ubicación del trabajo de campo

FUENTE: Elaboración propia

2. LUGAR DE EJECUCIÓN

El presente trabajo de investigación se ejecutó en el Laboratorio del Área de Transformación Química, Departamento Académico de Industrias Forestales de la Universidad Nacional Agraria la Molina.

3. MATERIALES Y EQUIPOS

3.1. MATERIALES

- Costales de 20 kg de capacidad
- Pabilo
- Aguja
- Plumón indeleble
- Cuchilla
- Matraz de 250 mL de capacidad
- Crisol
- Papel filtro N°80
- Tamiz #8
- Molde de madera de 350*350 mm
- Cemento Portland tipo I
- Haces fibrosos obtenidos
- Recipiente de plástico
- Bolsas de tela
- Brocha
- Pinza
- Piseta
- Bagueta de vidrio
- Bolsas de polietileno de 75 litros
- Nivel de burbuja de aire

3.2. EQUIPOS

- Cámara fotográfica
- Balanza de 100 kg; 0,2 precisión
- Balanza de 100 g; 0,2 precisión
- Estufa y mufla
- Extractor soxhlet
- Equipo de protección personal
- Bomba de vacío
- Desfibrador de discos Bauer 30 HP
- Desecador con silicagel
- Vernier digital
- Reloj digital
- Prensa universal para ensayos mecánicos

3.3. INSUMOS

- Agua destilada
- Alcohol 96°
- Ácido sulfúrico concentración 72%
- Agua potable
- Cloruro de calcio comercial (CaCl_2)
- Hipoclorito de sodio concentración 1,5%
- Floroglucinol
- Ácido acético concentrado 96%

4. METODOLOGÍA

4.1. PREPARACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Los residuos fibrosos del mesocarpio se secaron al aire libre hasta obtener una humedad que asegure su almacenamiento.

- Después se seleccionaron haces fibrosos empleando malla #8.
- Los haces fibrosos seleccionados fueron inmersos en agua durante 24 horas antes de pasarlas por el desfibrador de discos.
- Luego se realizó un tratamiento mecánico empleando el desfibrador de discos Bauer de 30 HP de potencia y 305 mm de diámetro.
- Se realizó el primer desfibrado y de una sola pasada a 10 por ciento de consistencia, la separación entre los discos fue de 0,30 mm. Se introdujo de manera homogénea la mezcla agua+haces fibrosos y simultáneamente se recibió el material desfibrado dentro de un balde.

En la Figura 13 se presenta el flujograma del proceso de producción de haces fibrosos.

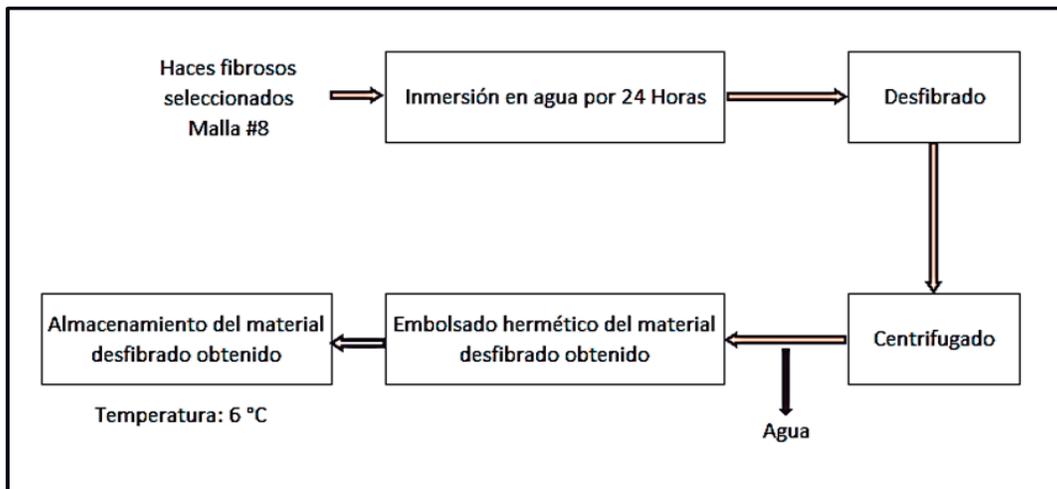


Figura 13: Flujograma de la producción de haces fibrosos

FUENTE: Elaboración propia

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

4.2.1. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

Para la caracterización química de los haces fibrosos obtenidos en el proceso de desfibrado, se emplearon los siguientes métodos:

- El contenido de holocelulosa se obtuvo mediante el método de Jayme-Wise (Anexo 1).
- El contenido de lignina se obtuvo mediante el método Klason (Anexo 2).
- El contenido de extractivos se obtuvo mediante la norma TAPPI T6 WD-73 y TAPPI T1 WD-75 (Anexo 3).
- El contenido de cenizas se obtuvo mediante la norma ASTM D-1762 (Anexo 4).
- El contenido de azúcares se obtuvo mediante el método Fehling (Anexo 5).

4.2.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA

Se midió la longitud y diámetro de 65 haces fibrosos obtenidos después del proceso de desfibrado, empleando un microscopio digital USB modelo XA24. Durante la medición de los haces fibrosos se empleó aumento 60X.

4.3. ELABORACIÓN DE LOS TABLEROS FIBROCEMENTO

4.3.1. MINERALIZACIÓN

Se empleó cloruro de calcio comercial en estado sólido (Cl_2Ca) al 4 por ciento, para tener una rápida disolución de la sal se agregó gua a la sal y no al contrario. Se humedecieron los haces fibrosos en la solución mineralizante durante 15 minutos, y luego se dejó escurrir el exceso durante 30 minutos.

4.3.2. MEZCLADO

Se empleó la relación agua/cemento 0,40 para preparar la pasta de cemento y la cantidad de haces fibrosos a ensayar fue un porcentaje respecto al peso del cemento (Tabla 17).

Tabla 17: Composición de los tableros fibrocemento elaborados

Componentes	Tratamiento 1		Tratamiento 2		Tratamiento 3	
	Valor absoluto (g)	Base cemento (%)	Valor absoluto (g)	Base cemento (%)	Valor absoluto (g)	Base cemento (%)
Cemento (Portland Tipo I)	1560	100	1560	100	1560	100
Haces fibrosos (materia seca)	47	3	94	6	140	9
Aditivo (Cloruro de calcio)	28	2	30	2	33	2
Total	1635		1684		1733	

FUENTE: Elaboración propia

4.3.3. ARMADO Y DESMOLDADO

La mezcla fue transferida a moldes cuadrados de madera de 35 cm de lado y 1 cm de profundidad (Figura 14). Llenadas las hormas se realizó un reacomodo y se dejó reposar por 24 horas. Al cabo de las 24 horas se procedió a desmoldar los tableros.



Figura 14: Moldes de madera para la elaboración de los tableros

FUENTE: Elaboración propia

4.3.4. CURADO Y SECADO

Se realizó el curado de los tableros con riego (mediante uso de un pulverizador), aplicando 100 mL de agua en cada cara del tablero, el curado se realizó los tres primeros días de formado el tablero.

El secado de los tableros se realizó al aire libre y bajo sombra; las condiciones del ambiente fueron temperatura media 20 °C y humedad relativa 87 por ciento; la disposición de los tableros para el secado se detalla en la Figura 15.



Figura 15: Disposición de los tableros para el secado

FUENTE: Espinoza (2010)

En la Figura 16 se presenta el flujograma de la producción de los tableros fibrocemento obtenidos en el presente estudio.

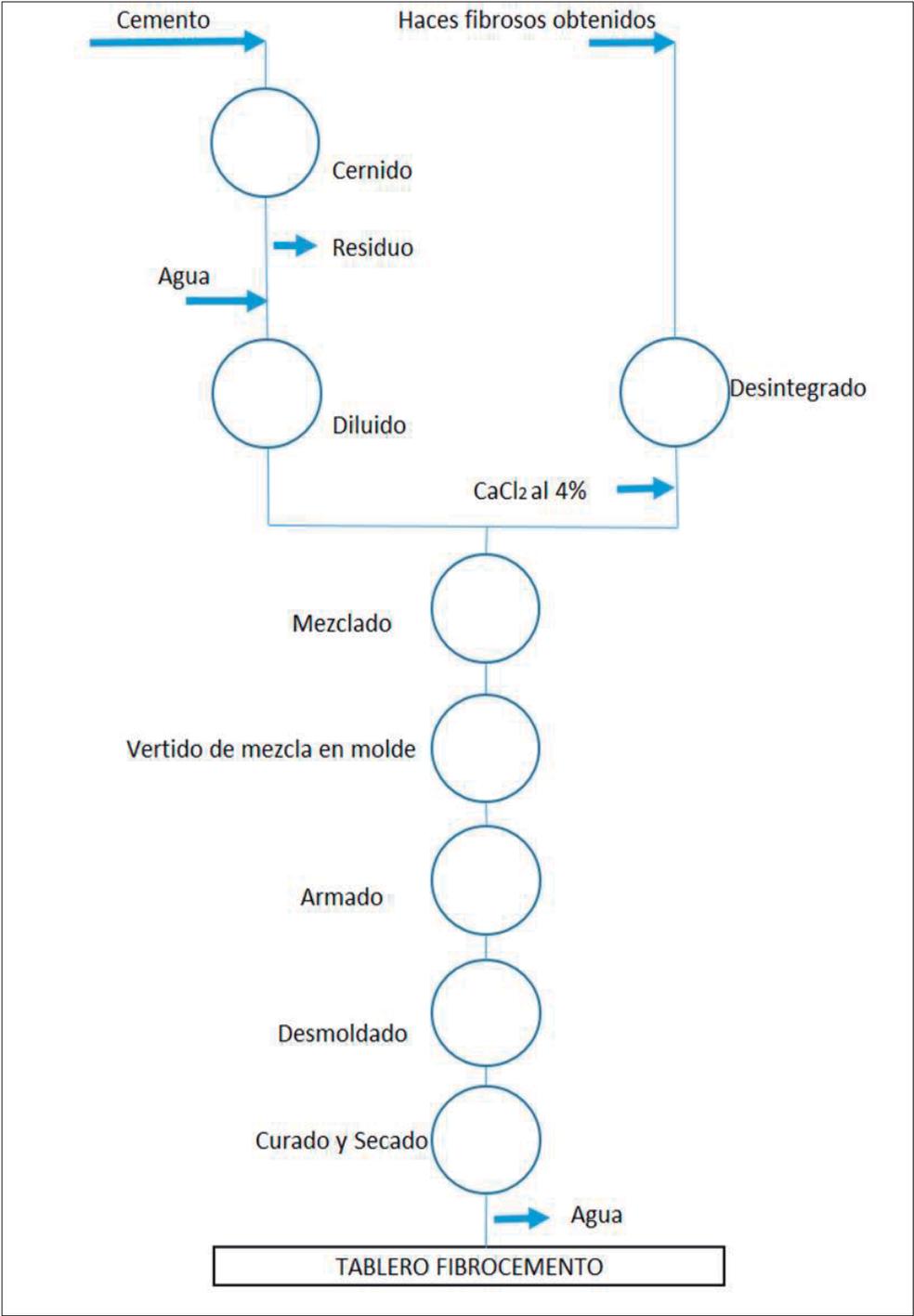


Figura 16: Flujograma de la producción de los tableros fibrocemento

FUENTE: Elaboración propia

4.4. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS TABLEROS

4.4.1. CONTENIDO DE HUMEDAD

Para determinar el contenido de humedad se empleó el método gravimétrico (Anexo 6).

4.4.2. DENSIDAD

Para determinar la densidad se empleó la norma alemana DIN-52361 (Anexo 7).

4.4.3. ABSORCIÓN DE AGUA

Para determinar el porcentaje de absorción de agua dentro de 2 y 24 horas de inmersión se empleó la norma alemana DIN-52364 (Anexo 8).

4.4.4. HINCHAMIENTO VOLUMÉTRICO

Para determinar el porcentaje de variación volumétrica dentro de 2 y 24 horas de inmersión se empleó la norma alemana DIN-52364 (Anexo 8).

4.4.5. POROSIDAD

Para determinar la porosidad, se tomó los datos de absorción de agua dentro de 24 horas de inmersión:

$$\% \text{ Porosidad} = \frac{(M - M_0)}{V} * 100$$

Dónde:

M= masa inicial de probeta (g)

M₀= masa de la probeta saturada 24 horas de inmersión (g)

V= volumen de la probeta (cm³)

4.4.6. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL ESPESOR

Para determinar la resistencia a la compresión del espesor, representada por el porcentaje de reducción de dicho espesor al aplicar la carga, se empleó la norma DIN-53291 (Anexo 9). El procedimiento seguido fue el siguiente:

- Se codificaron las probetas de tamaño 50mm*50mm*espesor
- Se tomaron las medidas de espesor, ancho y largo de cada probeta
- Se calculó la carga para las probetas, el cual fue de 400 kg/cm². Según los requerimientos de la norma los paneles fibrocemento de 25 mm tienen una tolerancia máxima de reducción de su espesor del 20 por ciento al aplicar una carga de 3 kg/cm²

- Se activó la prensa hasta llegar a la carga indicada
- Se retiró la probeta de la prensa y se procedió a medir el espesor, calculando la reducción del espesor después de haber aplicado los 400 kg/cm²
- Los resultados se calcularon mediante la siguiente relación:

$$R = \frac{(E_f - E_i)}{E_i} * 100$$

Donde:

R: reducción del espesor (%)

E_i: Espesor inicial (mm)

E_f: Espesor de la probeta luego de aplicada la carga (mm)

4.4.7. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN ESTÁTICA

Para determinar la resistencia a la flexión estática, representada por el módulo de ruptura (MOR), se empleó la norma DIN-52362 (Anexo 10). El procedimiento seguido fue el siguiente:

- Se codificaron las probetas de tamaño 50mm*250mm*espesor
- La velocidad del ensayo fue de 0,24 pulgadas por minuto (6 mm por minuto) y la luz fue de 200 mm.
- Se colocó las probetas sobre los dos apoyos de la prensa universal, cuya separación fue la luz de 200 mm.
- La escala de lectura fue cada kilogramo
- El ensayo se inició accionando el dispositivo de la prensa y el reloj. La prensa agregaba carga al centro de la probeta hasta que ocurra la falla
- Una vez terminado el ensayo se anotó la carga máxima registrada y la deformación máxima registrada (deflexión máxima registrada).
- Los resultados de la resistencia a la flexión, se obtuvo mediante la siguiente relación:

$$MOR = \frac{3PL}{2ae^2}$$

Donde:

P: carga máxima (kg)

L: luz (mm)

a: ancho (mm)

e: espesor (mm)

En la Figura 17 se aprecia la ubicación de las probetas en los tableros las evaluaciones

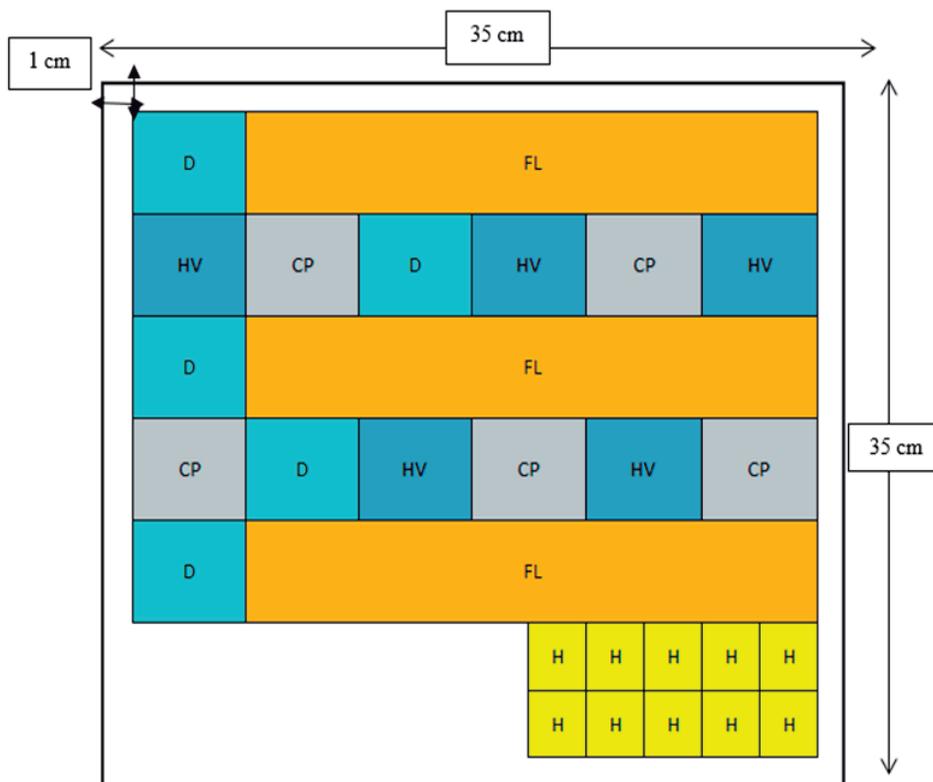


Figura 17: Distribución de las probetas para las evaluaciones. H: humedad; D: densidad; HV: hincharción volumétrica y absorción de agua; CP: resistencia a la compresión del espesor y FL: flexión estática

FUENTE: Elaboración propia

4.5. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental corresponde a un diseño completo al azar (DCA), con 3 tratamientos.

Tratamientos, variable independiente

Cantidad de haces fibrosos en la mezcla con cemento; el porcentaje de haces fibrosos este definido en función de la masa del cemento.

Tratamiento1: cantidad de haces fibrosos en mezcla, 3 por ciento.

Tratamiento2: cantidad de haces fibrosos en mezcla, 6 por ciento.

Tratamiento3: cantidad de haces fibrosos en mezcla, 9 por ciento.

Resultados, variables dependientes

Los resultados del presente estudio serán determinados sobre los tableros obtenidos correspondientes a cada tratamiento aplicado. Los resultados considerados son:

Humedad: contenido de humedad en el tablero, base húmeda (% bmh).

Densidad: masa sobre unidad de volumen del tablero (kg/m^3).

Absorción de agua: masa de agua absorbida por el tablero luego de 2 y 24 horas de inmersión, expresado como porcentaje de absorción (%).

Hinchamiento volumétrico: volumen del tablero aumentado luego de 2 y 24 horas de inmersión, expresado como porcentaje de variación volumétrica (%).

Resistencia a la compresión: expresado como el porcentaje de reducción del espesor (%).

Resistencia a la flexión estática: expresado como el módulo de ruptura del tablero (kg/cm^2).

En la Tabla 18 se mencionan las variables y tratamientos que incluye el diseño experimental.

Tabla 18: Número de probetas y evaluaciones para el diseño experimental (DCA)

<i>Tipo de evaluación</i>	<i>Humedad</i>	<i>Densidad</i>	<i>Hinchamiento volumétrico y absorción de agua</i>	<i>Resistencia a la compresión</i>	<i>Resistencia a la flexión</i>
	(%)	(kg/m ³)	(%)	(%)	(kg/cm ²)
Cantidad de probetas	10	5	5	4	3

FUENTE: Elaboración propia

4.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico se realizó mediante el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar el efecto de los tratamientos sobre los resultados obtenidos. El modelo del diseño experimental se fundamenta en el planteamiento de la hipótesis de investigación:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$$

Donde:

μ_i = Media de los tratamientos aplicados

H_0 = Hipótesis nula

H_1 = Hipótesis alterna

El modelo aditivo lineal para cada tratamiento es el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + e_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} = es la respuesta

μ = es la media empleando el tratamiento

e_{ij} = es el error aleatorio asociado a la respuesta Y_{ij}

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

1.1. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

1.1.1. CONTENIDO DE HOLOCELULOSA

En el presente trabajo se obtuvo 51,34 por ciento de holocelulosa, valor menor que fibras maderables y no maderables, pero cercano a los reportados para paja de trigo (Tabla 2). Valores altos de holocelulosa son adecuados para que materiales fibrosos puedan usarse como refuerzo del cemento Portland, ya que estos compuestos son susceptibles de ser degradados con el tiempo debido a los tratamientos previos o por la matriz misma.

El valor obtenido en el presente trabajo de investigación puede considerarse aceptable; por ende, los haces fibrosos del mesocarpio de la palma aceitera serían aptos para usarse como material de refuerzo del cemento Portland en la elaboración de tableros fibrocemento. La presencia de celulosa, como fibra, es una ventaja debido a la estructura de este componente que le permite una durabilidad y resistencia apropiada durante el uso del producto elaborado.

Lo mencionado en el párrafo anterior coincide con Cruz (1982), ya que sugiere que valores mayores a 50 por ciento de holocelulosa son adecuados para que materiales fibrosos puedan usarse como refuerzo del cemento Portland. El mismo autor indica que no existe relación entre la concentración de holocelulosa y la aptitud para la elaboración de tableros fibrocemento, ya que no influye en el fraguado inicial del cemento Portland.

El valor promedio de holocelulosa del presente estudio se encuentra por debajo del rango de holocelulosa de haces fibrosos del mesocarpio de palma aceitera reportado en Colombia por Rojas (2011), el cual es de 52 a 61 por ciento. Esto podría estar relacionado a factores edafoclimáticos, desarrollo de las palmeras y los tratamientos silviculturales.

1.1.2. CONTENIDO DE LIGNINA

En el presente trabajo se obtuvo 31,03 por ciento de lignina, valor mayor que fibras no maderables, pero semejante a fibras maderables (Tabla 2). La concentración de lignina obtenida otorga a los haces fibrosos rigidez, fuerte cohesión entre sus fibras y protección a la holocelulosa. El proceso de desfibrado no logró vencer este factor de cohesión; a su vez este

tratamiento mecánico brindó mejor rendimiento, 80,37 por ciento, frente al tratamiento químico para eliminar la lignina, cuyo rendimiento fue de 24,43 por ciento.

Cruz (1982) indica que no existe relación entre la concentración de lignina y la aptitud para la elaboración de tableros fibrocemento, ya que no influye en el fraguado inicial del cemento Portland. De acuerdo con el autor la concentración de lignina obtenida en el presente trabajo de investigación se puede considerar admisible.

El valor de lignina del presente estudio se encuentra dentro del rango de lignina de haces fibrosos del mesocarpio de palma aceitera reportado en Colombia por Rojas (2011), el cual es de 28 a 31 por ciento (Tabla2).

1.1.3. CONTENIDO DE EXTRACTIVOS SOLUBLES EN ETANOL

En el presente trabajo se obtuvo 11,77 por ciento de extractivos en etanol, valor que se encuentra por encima del límite máximo que permite mezclar fibras maderables con cemento Portland sin problemas de fraguado (Tabla 14). Considerar que las fibras maderables poseen taninos siendo estos los responsables de la inhibición del fraguado del cemento, además la clasificación del Tabla 14 considera cantidad de extractivos y no la naturaleza de los mismos.

Subramanian (2013) indican que los compuestos químicos presentes en los extractivos solubles en etanol son de naturaleza grasa: ácido palmítico, ácido oleico, ácido linoleico, ácido esteárico que al interactuar con la matriz de cemento Portland tipo I, en apariencia no produjeron algún efecto inhibitor del fraguado.

Lo mencionado en el párrafo anterior se confirma, ya que en el presente trabajo se logró la afinidad de los haces fibrosos del mesocarpio de la palma aceitera con el cemento Portland tipo I después de 24 horas de formado el tablero, se observó que los haces fibrosos se combinaron con el cemento sin problemas de fraguado; probándose esto visualmente y táctilmente por la consistencia y dureza alcanzada por los tableros a las 24 horas, lo que permitió desmoldarse y manipularse con facilidad.

Se puede inferir entonces que la cantidad de extractivos en etanol, sería principalmente aceite residual de palma, no evidencia efectos negativos en el fraguado del cemento Portland tipo I. Por consiguiente, los haces fibrosos del mesocarpio de la palma aceitera presentan

aptitud para la elaboración de tableros fibrocemento, a pesar de la presencia de extractivos grasos.

El análisis de la aptitud de un material vegetal, sea de origen maderable o no maderable, para elaboración de tableros fibrocemento no solo se debe de considerar la cantidad de materiales extraíbles sino la naturaleza, proporción de los diferentes compuestos químicos que conforman los extractivos y la reacción química de cada compuesto con el fraguado del cemento Portland.

1.1.4. CONTENIDO DE EXTRACTIVOS SOLUBLES EN AGUA

En el presente trabajo se obtuvo 2,78 por ciento de extractivos en agua caliente, dentro de los compuestos solubles en agua que producen la inhibición del fraguado del cemento Portland están los azúcares. En el presente trabajo de investigación la concentración de azúcares reductores iniciales y azúcares totales fue nula, determinada por el método Fehling.

La ausencia de azúcares solubles permite que los haces fibrosos del mesocarpio de la palma aceitera puedan ser utilizados en la elaboración de tableros fibrocemento (Tabla 13). La ausencia de azúcares sería una ventaja que favorece la afinidad de los haces fibrosos del mesocarpio de la palma aceitera sin inhibición de fraguado del cemento utilizado; la evaluación visual y al tacto del producto además del fácil desmoldado y manipulación fueron indicadores favorables.

Alarcón (1972) indica que existe relación entre la concentración de azúcares y la aptitud de un material vegetal para formar tableros fibrocemento, ya que altos porcentajes de azúcares interfieren en el fraguado del cemento Portland.

1.1.5. CONTENIDO DE CENIZAS

En el presente trabajo se obtuvo 5,79 por ciento de cenizas, el cual es mayor que fibras no maderables y fibras maderables (Tabla 2). Las cenizas indican la cantidad de material que queda remanente luego de ser sometido a ignición, este material está formado principalmente por minerales esenciales como magnesio, potasio y calcio.

El valor de cenizas del presente estudio se encuentra por encima del rango de cenizas de haces fibrosos del mesocarpio de palma aceitera reportado en Colombia por Rojas (2011), el cual es de 3 a 3,5 por ciento (Tabla 2). Este elevado contenido de cenizas estaría relacionado a factores de fertilidad del suelo y condiciones del cultivo.

1.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICA

Los valores de dimensiones de los haces fibrosos se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19: Caracterización física de los haces fibrosos obtenidos

<i>Parámetro</i>	<i>Promedio (mm)</i>	<i>Mínimo (mm)</i>	<i>Máximo (mm)</i>	<i>Coefficiente de variabilidad (%)</i>
Longitud	15,8	2,1	33,1	59
Diámetro	0,3	0,1	0,6	42
L/D*	48	17	71	28

*sin unidades

En el presente trabajo se obtuvo un índice de esbeltez promedio (L/D) de 48, el cual es menor que los índices de esbeltez reportados para haces fibrosos maderables y no maderables usados en materiales compuestos de matriz cemento. Pero semejante a los índices de esbeltez de fibras de tallo de palmeras de la Amazonia peruana (Tabla 3).

El índice de esbeltez obtenido en el presente trabajo aparentemente sería malo, ya que es menor a 90, el cual es el valor mínimo reportado en haces fibrosos no maderables que otorga un reforzamiento mecánico significativo a materiales compuestos de matriz cemento (Tabla 3).

La resistencia del material compuesto de matriz cemento se mejora cuando el índice de esbeltez es grande, ya que a mayor esbeltez se posee mayor área de contacto y mayor anclaje por lo que permiten aumentar la resistencia mecánica, específicamente resistencia a la flexión. Quintero y Gonzales (2006) mencionan que los parámetros físicos empleados para caracterizar haces fibrosos son la longitud, el diámetro y en mayor uso el índice de esbeltez, que es la relación entre los dos anteriores (L/D).

2. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LOS TABLEROS

2.1. CONTENIDO DE HUMEDAD

Los valores promedio de humedad de los tableros para cada tratamiento del presente estudio se presentan en la Tabla 20; los valores iniciales se encuentran en el Anexo 11.

Tabla 20: Contenido de humedad de los tableros elaborados

<i>Tratamiento</i>	<i>Contenido de humedad</i>
<i>Haces fibrosos (% respecto a la masa del cemento)</i>	<i>(%)</i>
3%	8,33
6%	8,52
9%	8,60
<i>P value (ANVA)</i>	0,0562

En el análisis estadístico (Anexo 12), según el análisis de varianza con un error (P value) de 0,0562; en apariencia se demuestra que para los resultados obtenidos no hubo influencia significativa de los tratamientos sobre los valores de humedad del tablero.

Sin embargo, al observar la Figura 18, se puede afirmar que los tratamientos tienen una influencia sobre la humedad de los tableros, conforme aumenta la cantidad de haces fibrosos la humedad del tablero aumenta, presentando una tendencia lineal con un coeficiente de correlación de 94,60 por ciento que indica el grado de influencia de la variable independiente sobre la variable dependiente.

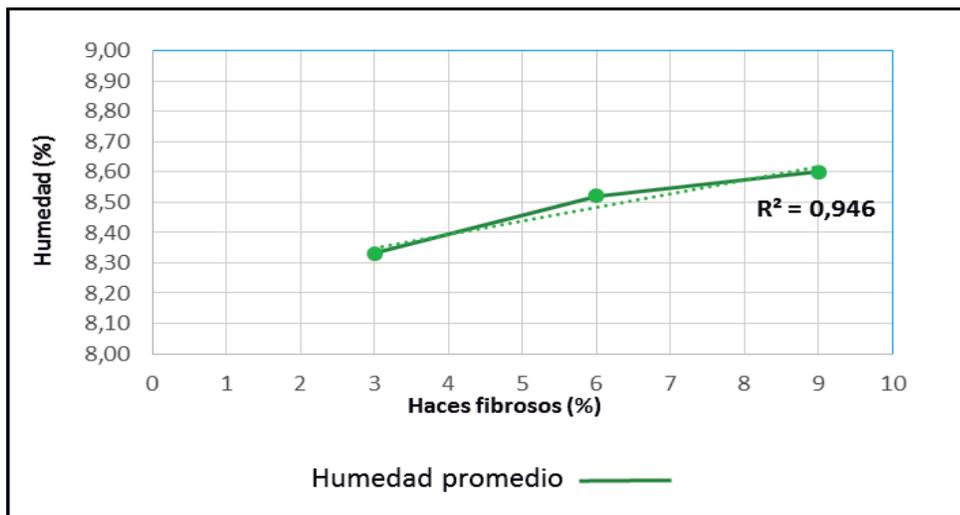


Figura 18: Relación humedad y porcentaje de haces fibrosos

Los haces fibrosos absorben agua de la mezcla, esta absorción aumenta a medida que se aumenta la cantidad de haces fibrosos y manteniendo constante la cantidad de cemento. Entonces la cantidad de agua retenida y absorbida es liberada durante la etapa de estufa donde se aplicó temperaturas de 103 ± 2 °C a los tableros elaborados. El agua restante que existe en la pasta es agua que puede evaporarse a 0 por ciento de humedad relativa y 110 °C de temperatura.

Los valores promedio de humedad de los tableros elaborados son buenos, ya que se encuentran dentro del rango de humedad de tableros fibrocementos de 10 mm de espesor, el cual es de 6 a 10 por ciento en base húmeda (Tabla 16).

Los valores promedio de humedad de los tableros elaborados son menores que los reportados en antecedentes de fibrocemento, por ejemplo, Noriega (1996) obtuvo 16,61 por ciento de humedad promedio, Espinoza (2010) obtuvo 14,40 por ciento de humedad promedio y Juárez (2002) obtuvo 18,00 por ciento de humedad promedio (Tabla 5).

2.2. DENSIDAD

Los valores de densidad promedio de los tableros para cada tratamiento del presente estudio se presentan en la Tabla 21; los valores iniciales se encuentran en el Anexo 13.

Tabla 21: Densidad de los tableros elaborados

<i>Tratamiento</i> <i>Haces fibrosos (% respecto a la masa del cemento)</i>	<i>Densidad</i> <i>(g/cm³)</i>	<i>Densidad</i> <i>(kg/m³)</i>
3%	1,60	1 600
6%	1,48	1 480
9%	1,38	1 380
<i>P value (ANVA)</i>	0,0001	

En el análisis estadístico (Anexo 14), según el análisis de varianza con un error (P value) de 0,0001, se encontró que los resultados tuvieron influencia altamente significativa de los tratamientos sobre los valores de densidad obtenidos.

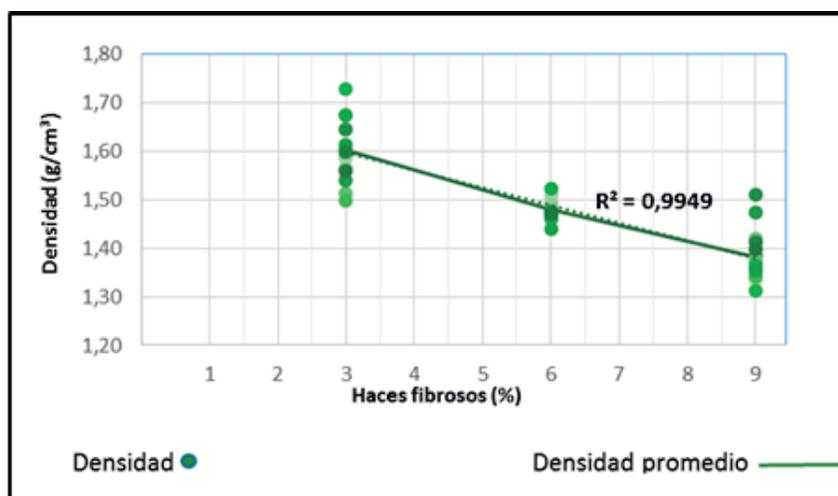


Figura 19: Relación densidad y porcentaje de haces fibrosos

Al observar la Figura 19 se puede afirmar que conforme aumenta la cantidad de haces fibrosos en la mezcla, la densidad del tablero disminuye, presentando una tendencia lineal con coeficiente de correlación de 99,5 por ciento que indica el grado de influencia de la variable independiente sobre la variable dependiente.

La densidad de los morteros depende fundamentalmente de la que tengan sus componentes, de la cantidad que estos ocupen en el mortero y el grado de compacidad (vacíos/porosidad).

La densidad de la fase dispersa (material vegetal) influye en la densidad de la fase continua, por consiguiente, a medida que aumenta la cantidad de haces fibrosos y manteniendo constante la cantidad de cemento, la densidad disminuye, ya que las densidades de los haces fibrosos fluctúan entre 0,11 a 0,16 g/cm³ en comparación con la pasta de cemento endurecido que fluctúan entre 1,52 a 1,55 g/cm³.

Los haces fibrosos del mesocarpio de la palma aceitera son materiales que permiten generar porosidad en los tableros (Figura 21), que se acentúa por falta de prensado en la elaboración de los mismos (Figura 16), además vuelve menos eficiente la capacidad envolvente de la pasta de cemento conforme aumenta la cantidad de haces fibrosos y manteniendo constante la cantidad de cemento (Tabla 17).

Los haces fibrosos del mesocarpio de la palma aceitera por consiguiente tienen un efecto importante en la densidad, un aumento de la cantidad de haces fibrosos en la mezcla mantenido constante la cantidad de cemento y elaborando los tableros por el método de moldeo se obtienen tableros fibrocemento menos densos y más porosos.

Los morteros endurecidos se consideran ligeros cuando su densidad es igual o menor que 1 300 kg/m³; por consiguiente, los tableros elaborados en el presente estudio son considerados como morteros no ligeros. Mientras que considerando la clasificación de tableros fibrocemento según su densidad (Tabla 12) los tableros elaborados son clasificados como tableros de alta densidad.

Los valores promedio de densidad de los tableros elaborados son buenos, ya que se encuentran dentro del rango de densidad de tableros fibrocemento de 10 mm de espesor, el cual es de 1,25 a 1,60 g/cm³ (Tabla 16).

La densidad promedio de los tableros elaborados supera el mínimo descrito por la norma alemana DIN 1101, el cual es de 570 kg/m³ para tableros de 15 mm de espesor. También supera a los reportados en antecedentes de fibrocemento, por ejemplo, Cruz (1982) obtuvo una densidad promedio de 0,43 g/cm³, Noriega (1996) obtuvo una densidad promedio de 0,73 g/cm³, Cerrón (2009) obtuvo una densidad promedio de 1,14 g/cm³ y Espinoza (2010) obtuvo una densidad promedio de 1,38 g/cm³ (Tabla 6).

2.3. ABSORCIÓN DE AGUA

Los valores de la absorción de agua de los tableros dentro de 2 y 24 horas de inmersión para cada tratamiento del presente estudio se presentan en la Tabla 22; los valores iniciales se encuentran en el Anexo 15.

Tabla 22: Absorción de agua de los tableros elaborados

<i>Tratamiento</i> <i>Haces fibrosos (% respecto a la masa de cemento)</i>	<i>Absorción</i> <i>2 horas de inmersión</i> <i>(%)</i>	<i>Absorción</i> <i>24 horas de inmersión</i> <i>(%)</i>
3%	15,00	15,80
6%	15,79	16,54
9%	19,78	20,86
<i>P value (ANVA)</i>	0,0001	

En el análisis estadístico (Anexo 16), el análisis de varianza con un error (P value) de 0,0001; con los resultados obtenidos se demostró que hubo una influencia altamente significativa de los tratamientos sobre los valores de absorción de agua.

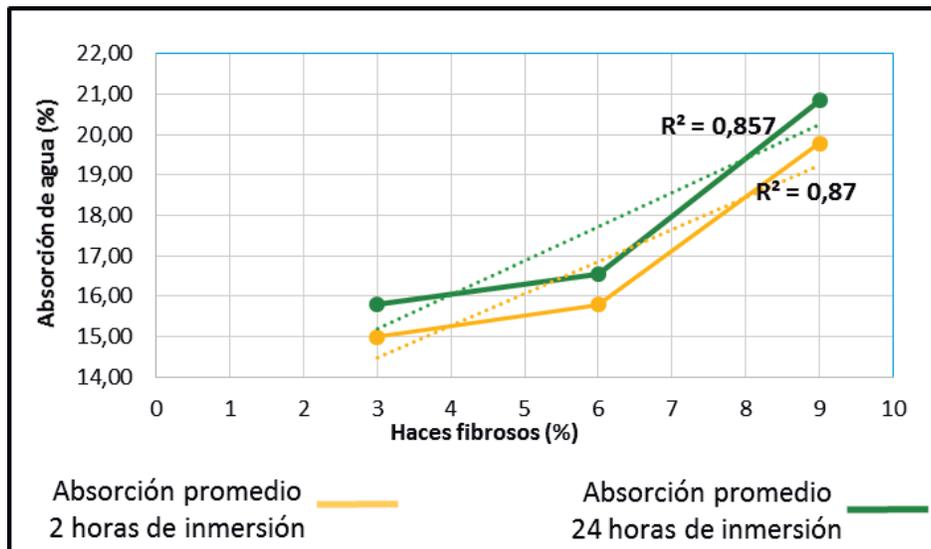


Figura 20: Relación absorción de agua y porcentaje de haces fibrosos

Al observar la Figura 20 se puede afirmar que conforme aumenta la cantidad de haces fibrosos en la mezcla, la absorción de agua de los tableros aumenta a medida que pasa el tiempo; presentando una tendencia lineal con un coeficiente de correlación de 87 por ciento dentro de 2 horas de inmersión y 86 por ciento dentro de 24 horas de inmersión, ambos valores indican el grado de influencia de la variable independiente sobre la variable dependiente.

Los haces fibrosos poseen lúmenes que son responsables de la gran incidencia de poros permeables en las fibras, por consiguiente, estos absorben agua a medida que pasa el tiempo y reemplazan parte de los enlaces hidrogeno entre las macromoléculas de las paredes de la célula construidos por los grupos (-OH) de las holocelulosas.

La absorción de agua es una propiedad física que se relaciona con la propiedad física porosidad. Por consiguiente, se determinó la porosidad de los tableros, cuyos valores promedios para cada tratamiento del presente estudio se presentan en la Tabla 23 y los valores iniciales se encuentran en el Anexo 15.

Tabla 23: Porosidad de los tableros elaborados

<i>Tratamiento</i>	<i>Porosidad</i>
<i>Haces fibrosos (% respecto a la masa de cemento)</i>	<i>(%)</i>
3%	23,84
6%	24,76
9%	27,52
<i>P value (ANVA)</i>	0,0001

En el análisis estadístico (Anexo 17), el análisis de varianza con un error (P value) de 0,0001; con los resultados obtenidos se demostró que hubo una influencia altamente significativa de los tratamientos sobre los valores de porosidad de los tableros.

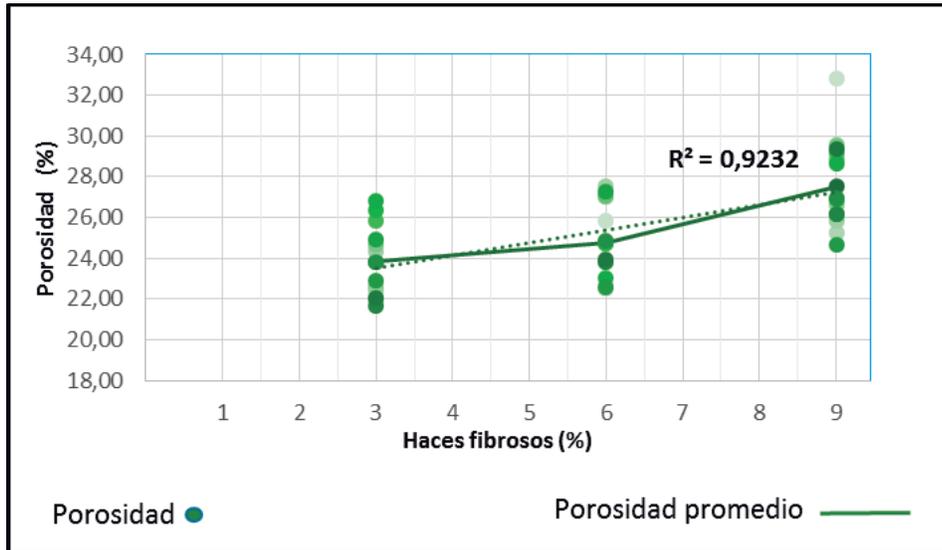


Figura 21: Relación porosidad y porcentaje de haces fibrosos

Al observar la Figura 21 se puede afirmar que conforme aumenta la cantidad de haces fibrosos en la mezcla, la porosidad del tablero aumenta, presentando una tendencia lineal con un coeficiente de correlación de 92,3 por ciento que indica el grado de influencia de la variable independiente (cantidad de haces fibrosos) sobre la variable dependiente (porosidad del tablero).

La porosidad posee interconexión con el exterior y por ende potencial de absorber agua, se demostró que ambas propiedades físicas poseen la misma tendencia (Figura 22).

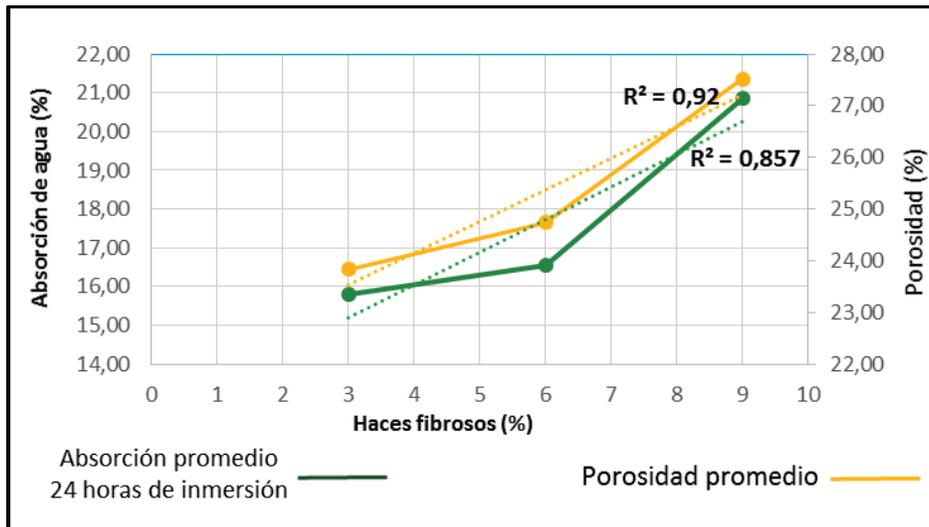


Figura 22: Relación absorción de agua 24 horas de inmersión y porosidad

Los valores promedio de absorción de agua dentro de 24 horas de inmersión obtenidos en el presente trabajo son buenos, ya que se encuentran por debajo del límite máximo de tableros fibrocementos de 10 mm de espesor, el cual es de 35 por ciento (Tabla 16).

Los valores de absorción dentro de 24 horas de inmersión del presente trabajo son menores que los reportados en antecedentes de fibrocemento, por ejemplo, Cruz (1982) obtuvo una absorción promedio de 42,60 por ciento a 24 horas de inmersión, Noriega (1996) obtuvo una absorción promedio de 55,38 por ciento a 24 horas de inmersión. Pero se asemeja a los obtenidos por Espinoza (2010) que fue de 16,40 por ciento a 24 horas de inmersión (Tabla 7).

Los valores promedio de porosidad de los tableros elaborados son buenos, ya que no superan el máximo establecido para tableros fibrocemento de 10 mm de espesor, el cual es 30 por ciento (Tabla 16). Además, estos valores promedio permiten catalogar a los tableros elaborados en el presente estudio como tableros de moderada compacidad (Tabla 9).

2.4. HINCHAMIENTO VOLUMÉTRICO

Los valores de la variación volumétrica de los tableros dentro de 2 y 24 horas de inmersión en agua se presenta en la Tabla 24; los valores iniciales se encuentran en el Anexo 18.

Tabla 24: Hinchamiento volumétrico de los tableros elaborados

<i>Tratamiento</i> <i>Haces fibrosos (% respecto a la masa del cemento)</i>	<i>Hinchamiento</i> <i>2 horas de inmersión</i> <i>(%)</i>	<i>Hinchamiento</i> <i>24 horas de inmersión</i> <i>(%)</i>
3%	1,54	1,98
6%	1,69	2,15
9%	2,44	2,66
<i>P value (ANVA)</i>	0,1468	

En el análisis estadístico (Anexo 19), según el análisis de varianza con un error (P value) de 0,1468; en apariencia se demuestra que para los resultados obtenidos no hubo influencia significativa de los tratamientos sobre los valores de hinchamiento volumétrico.

Sin embargo al observar la Figura 23 se puede afirmar que los tratamientos tienen una influencia sobre la variación volumétrica de los tableros, conforme aumenta la cantidad de haces fibrosos la variación volumétrica aumenta a medida que pasa el tiempo; presentando una tendencia lineal con un coeficiente de correlación de 87 por ciento dentro de 2 horas de inmersión y 92 por ciento dentro de 24 horas de inmersión, ambos valores indican el grado de influencia de la variable independiente sobre la variable dependiente.

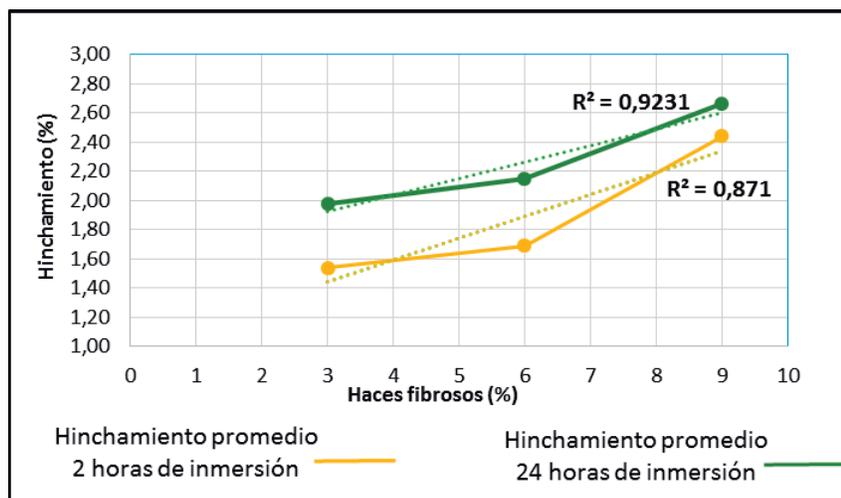


Figura 23: Relación hinchamiento volumétrico y porcentaje de haces fibrosos

El aumento de la cantidad de haces fibrosos manteniendo constante la cantidad de cemento (Tabla 17) permite evidenciar hinchamiento volumétrico de los tableros tal como aprecia en la Figura 23. Ya que los haces fibrosos poseen propiedad física de hinchamiento volumétrico, el cual es la capacidad que tienen de aumentar sus dimensiones al absorber agua.

El hinchamiento volumétrico de los haces fibrosos del presente estudio al absorber agua produjo variación en 51,23 y 15,72 por ciento del diámetro y longitud respectivamente dentro de 24 horas de inmersión en agua, este hinchamiento de los haces fibrosos pudo transmitir al tablero sin que esté presente fallas.

Los valores promedio de hinchamiento volumétrico de los tableros del presente trabajo son buenos, ya que se encuentran por debajo de límite máximo establecido para tableros fibrocemento de 10 mm de espesor, el cual es 8 por ciento (Tabla 16).

2.5. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL ESPESOR

Los valores de resistencia a la compresión del espesor, representada por el porcentaje de reducción se presentan en la Tabla 25; los valores iniciales se encuentran en el Anexo 20.

Tabla 25: Resistencia a la compresión del espesor de los tableros elaborados

<i>Tratamiento</i> <i>Haces fibrosos (% respecto a la masa del cemento)</i>	<i>Espesor inicial</i> <i>(mm)</i>	<i>Espesor final</i> <i>(mm)</i>	<i>Reducción del espesor</i> <i>(%)</i>
0% (testigo)	10,03	9,77	2,55
3%	8,34	8,21	1,54
6%	9,44	9,14	3,20
9%	10,88	10,26	5,72
<i>P value (ANVA)</i>			0,0001

En el análisis estadístico (Anexo 21), según el análisis de varianza con un error (P value) de 0,0001; según los resultados obtenidos hubo influencia altamente significativa de los tratamientos sobre los valores de resistencia a la compresión del espesor.

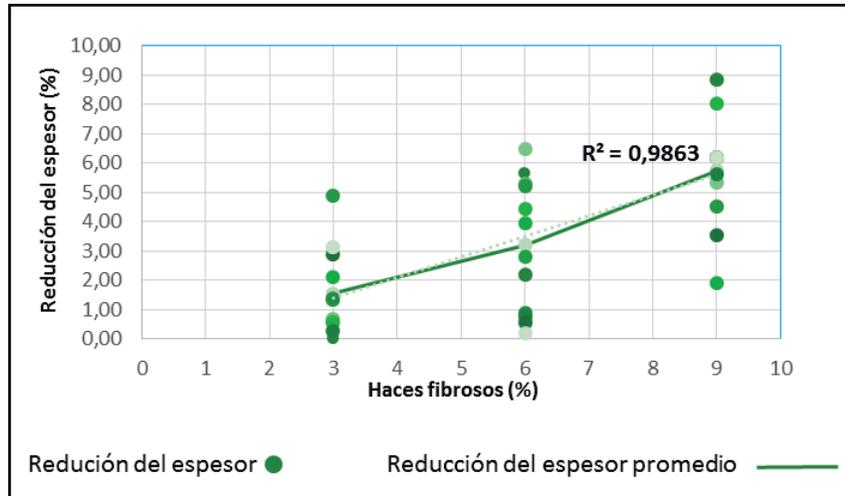


Figura 24: Relación resistencia a la compresión y porcentaje de haces fibrosos

En la Figura 24 se observa que conforme aumenta la cantidad de haces fibrosos en la mezcla la resistencia a la compresión del espesor disminuye, presentando una tendencia lineal con un coeficiente de correlación de 98,6 por ciento que indica el grado de influencia de la variable independiente (cantidad de haces fibrosos) sobre la variable dependiente (resistencia a la compresión).

La propiedad mecánica de resistencia a la compresión en morteros con agregados orgánicos depende en mayor grado de la cantidad y cohesión de la fase continua (pasta de cemento). Al respecto para la preparación de la pasta en el presente trabajo de investigación se empleó una relación de A/C de 0,4; el cual genera buena hidratación y cohesión entre las partículas del cemento.

En el presente trabajo de investigación con el tratamiento de 3 por ciento de haces fibrosos respecto a la masa de cemento, se obtiene el máximo valor de resistencia a la compresión comparada con la de cemento solo (Tabla 25); mayor que 3 por ciento de haces fibrosos respecto a la cantidad de cemento se experimenta una caída en la resistencia a la compresión.

Lo mencionado en el párrafo anterior coincide con Gonzales (2013) que señala que partir de cierta cantidad de haces fibrosos como agregados del cemento se obtiene un valor máximo de resistencia a la compresión comparando con la resistencia del cemento solo y a partir de allí se experimenta una caída.

El valor promedio de resistencia a la compresión de los tableros fue de 400 kg/cm^2 , el cual supera al mínimo de la norma alemana DIN 1101, que indica que paneles fibrocemento de 25 mm de espesor tienen una tolerancia máxima en la reducción de su espesor del 20 por ciento al aplicar una carga de 3 kg/cm^2 . Así mismo supera antecedentes de fibrocemento, por ejemplo, Cruz (1982) obtuvo $4,08 \text{ kg/cm}^2$, Cerrón (2009) obtuvo $14,04 \text{ kg/cm}^2$ y Espinoza obtuvo $41,44 \text{ kg/cm}^2$ (Tabla 10).

La densidad del mortero cemento+fibras vegetales es un indicador de la resistencia a la compresión del mismo, si se tiene un mortero muy denso es probable que su resistencia sea alta, siendo lo contrario para morteros menos denso. Por consiguiente, se estableció la relación entre la densidad y resistencia a la compresión del espesor de los tableros fibrocemento del presente estudio (Figura 25).

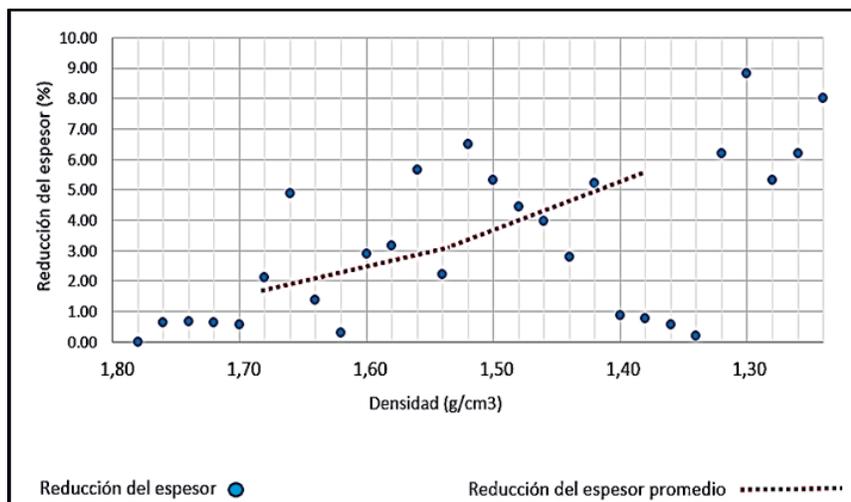


Figura 25: Relación densidad y resistencia a la compresión del espesor

Al observar la Figura 25 se puede afirmar que la densidad de los tableros elaborados es el parámetro físico que permite predecir la resistencia a la compresión del espesor.

2.6. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN ESTÁTICA

Los valores de resistencia a la flexión estática del presente estudio, representada por el MOR se presentan en la Tabla 26, los valores iniciales se encuentran en el Anexo 22.

Tabla 26: Resistencia a la flexión estática de los tableros elaborados

<i>Tratamiento</i>	<i>Carga máxima</i>	<i>MOR</i>
<i>Haces fibrosos (% respecto a la masa de cemento)</i>	<i>(kg)</i>	<i>(kg/cm²)</i>
0% (testigo)	10,28	54,65
3%	6,89	46,19
6%	5,11	29,41
9%	6,56	31,30
P value (ANVA)		0,0001

En el análisis estadístico (Anexo 23) dio como resultado un análisis de varianza con un error (P value) de 0,0001 lo que demuestra que es un resultado donde hubo influencia altamente significativa de los tratamientos sobre los valores de módulo de ruptura (MOR).

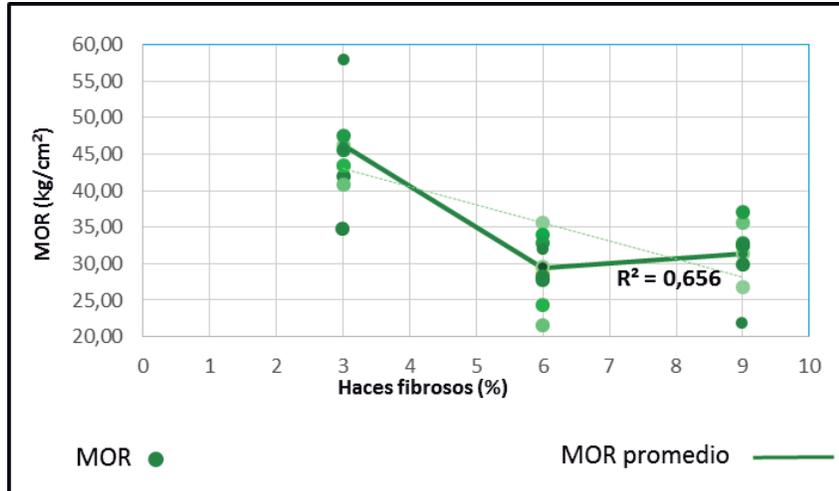


Figura 26: Relación módulo de ruptura (MOR) y porcentaje de haces fibrosos

Al observar la Figura 26 se puede afirmar que conforme aumenta la cantidad de haces fibrosos en la mezcla se disminuye el MOR; presentando una tendencia lineal con un coeficiente de correlación de 66 por ciento que indica el grado de influencia de la variable independiente sobre la variable dependiente. La variable cantidad de haces fibrosos no es la

única que influye en la resistencia a la flexión (MOR), sino que también es afectada por la variable morfología, representada por el índice de forma o índice de esbeltez.

En el presente trabajo se evaluó la morfología de los haces fibrosos mediante el índice de forma o índice de esbeltez (L/D), se obtuvo un índice de 48 el cual es menor que 90, el cual es el mínimo que otorgan un reforzamiento mecánico significativo a materiales compuestos de matriz cemento (Tabla 3); esto se comprueba ya que las resistencias a la flexión de los tableros fibrocemento poseen resistencias (MOR) más bajas en comparación con la de cemento (Tabla 26).

La resistencia del material compuesto de matriz cemento se mejora cuando el índice de esbeltez es grande, ya que a mayor esbeltez se posee mayor área de contacto y mayor anclaje por lo que permiten aumentar la resistencia mecánica, específicamente resistencia a la flexión.

En el presente trabajo de investigación con el tratamiento de 3 por ciento de haces fibrosos respecto a la masa de cemento se obtiene un valor de resistencia a la flexión (MOR) que se aproxima al rango de tableros fibrocemento de 10 mm de espesor, el cual es de 80 a 90 kg/cm^2 (Tabla 16).

Durante los ensayos de flexión los haces fibrosos se mantenían unidos a la matriz después de ocurrida la falla (Figura 27), con potencial de recibir más carga en comparación a las probetas de cemento solo (testigo) donde la falla ocurría de manera irregular e imprevista.

La resistencia a la flexión de los tableros fibrocemento del presente estudio fluctúa entre 29,41 a 46,19 kg/cm^2 (Tabla 26) que supera los requerimientos de la norma DIN 1101, que indica que los paneles fibrocemento de 15 mm de espesor tienen que poseer un valor mínimo de 17 kg/cm^2 . También supera antecedentes de fibrocemento, por ejemplo, Cruz (1982) obtuvo 11,15 kg/cm^2 , Cerrón (2009) obtuvo 10,20 kg/cm^2 , Noriega (1996) obtuvo 15,96 kg/cm^2 y Espinoza obtuvo 20,82 kg/cm^2 (Tabla 11).

3. MEZCLA APROPIADA PARA LA ELABORACIÓN DE LOS TABLEROS FIBROCEMENTO

En la Tabla 27 se presenta el resumen de las propiedades físicas de los tableros elaborados en el presente estudio, las cuales se comparan con los valores adecuados de tableros fibrocemento de 10 mm de espesor.

Tabla 27: Propiedades físicas y mezcla apropiada

Tratamiento <i>(Haces fibrosos = % respecto a la masa de cemento)</i>	Espesor <i>(mm)</i>	Masa <i>(kg/m²)</i>	Humedad <i>(%)</i>	Densidad <i>(g/cm³)</i>	Absorción <i>24 horas de Inmersión (%)</i>	Porosidad <i>24 horas de Inmersión (%)</i>	Hinchamiento <i>volumétrico 24 horas de inmersión (%)</i>	Mezcla
Tratamiento 1 3%	9,04	13,35	8,33	1,60	15,80	23,84	1,98	apropiada
Tratamiento 2 6%	9,75	13,74	8,52	1,48	16,54	24,76	2,15	apropiada
Tratamiento 3 9%	10,98	14,15	8,60	1,38	20,86	27,52	2,66	apropiada
Valores adecuados	10 ± 10%	13,30 a 14,98	6 a 10	1,20 a 1,60	< 35	< 30	< 8	Todas

Al observar el Tabla 27 se puede afirmar que aplicando los tres tratamientos se obtienen mezclas apropiadas para elaborar tableros fibrocemento, ya que los tableros alcanzan características físicas adecuadas. Sin embargo, como la resistencia mecánica ha sido tradicionalmente la propiedad más identificada con su comportamiento como material en uso, a continuación, en el Tabla 28 se presenta las propiedades mecánicas de los tableros elaborados en el presente estudio y se enmarca al tratamiento que permite obtener la mezcla apropiada para elaborar tableros con buenas propiedades mecánicas, la mayor resistencia a la flexión estática y compresión del espesor.

Tabla 28: Propiedades mecánicas y mezcla apropiada

<i>Tratamiento</i> <i>Haces fibrosos = % respecto al peso del cemento</i>	<i>MOR</i> <i>kg/cm²</i>	<i>Compresión del</i> <i>espesor</i> <i>(%)</i>	<i>Mezcla</i>
<i>Tratamiento 1</i> <i>3%</i>	46,19	1,54	apropiada
<i>Tratamiento 2</i> <i>6%</i>	29,41	3,20	inapropiada
<i>Tratamiento 3</i> <i>9%</i>	31,30	5,72	inapropiada
<i>Valores adecuados</i>	80 a 90	< 20	Tratamiento 1

Al observar el Tabla 28 y comparando con el Tabla 27, se puede afirmar entonces que la mezcla 1 es apropiada para elaborar tableros fibrocemento con buenas propiedades físicas y mecánicas.

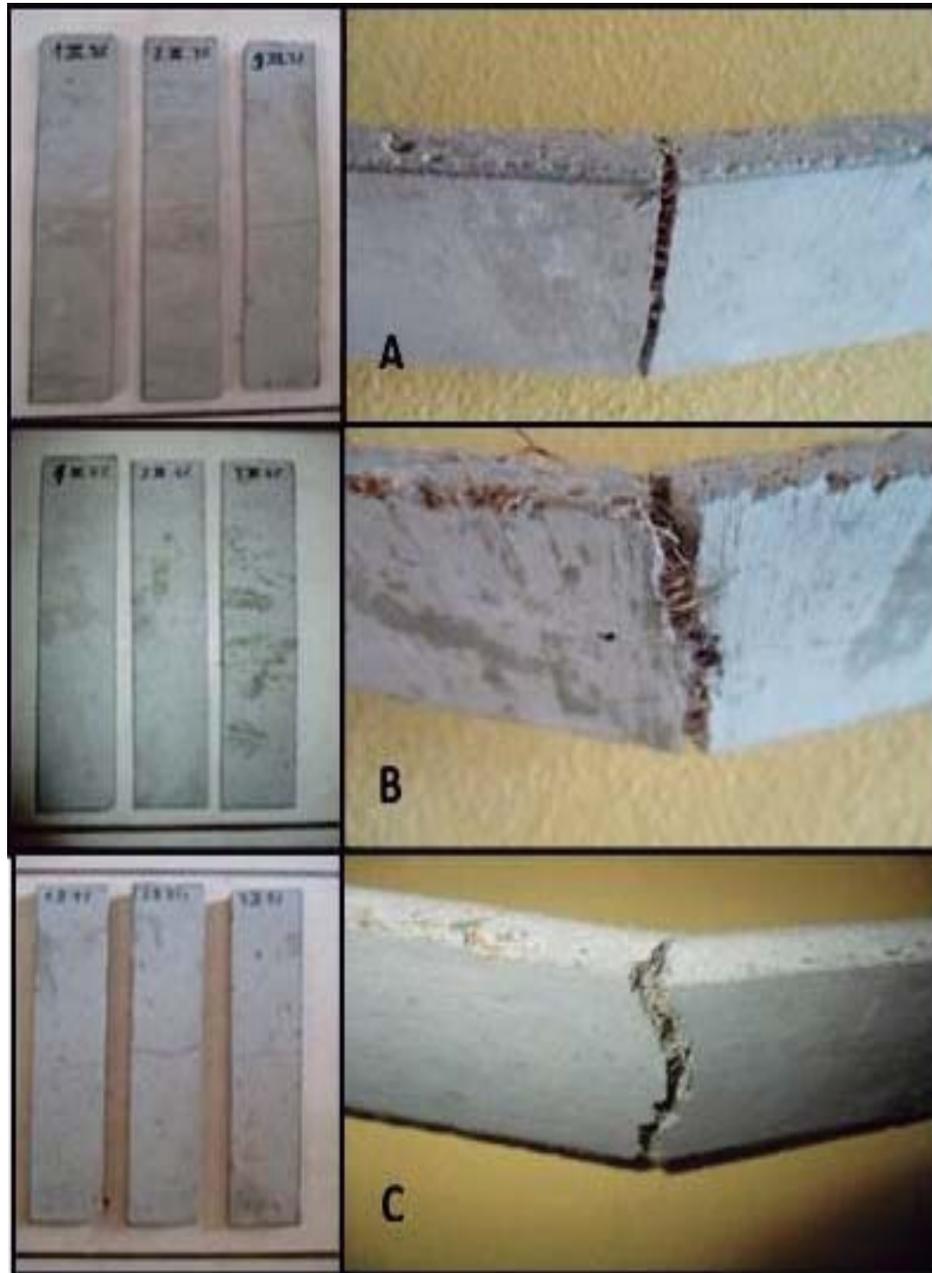


Figura 27: Probetas después de realizar ensayos de flexión estática. A: probetas con 3% de haces fibrosos; B: probetas con 6% de haces fibrosos; C: probetas con 9% de haces fibrosos.

V. CONCLUSIONES

- 1) Las fibras del mesocarpio de la palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) son aptas para la elaboración de tableros fibrocemento, logrando conformar un material con características tecnológicas acordes con la norma alemana DIN 1101.
- 2) Las fibras del mesocarpio de la palma aceitera poseen una composición apropiada de holocelulosa y los extractivos solubles en agua no presentan azúcares.
- 3) El índice de esbeltez es adecuado para aumentar la resistencia a la compresión del espesor y no es adecuado para aumentar la resistencia a la flexión estática del tablero fibrocemento.
- 4) Las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión y a la flexión estática aumentan conforme se utiliza un bajo porcentaje de fibras en la mezcla.
- 5) La absorción de agua de los tableros elaborados dentro de 24 horas de inmersión en agua presenta valores adecuados.
- 6) Los tableros elaborados de fibrocemento son considerados de alta densidad.

VI. RECOMENDACIONES

- Realizar un análisis cromatográfico de los compuestos químicos que conforman los extractivos de las fibras del mesocarpio de la palma aceitera.
- Realizar estudios de espectros con luz infrarroja para evaluar las características de los tableros obtenidos entre haces fibrosos y matriz de cemento Portland.
- Evaluar el tratamiento de prensado, como variable, para la elaboración de los tableros fibrocemento.
- Evaluar la modificación de la textura de los haces fibrosos y su comportamiento en el anclaje con la pasta de cemento “Portland”.
- Evaluar la aplicación de tratamiento químico - mecánico sobre las fibras del mesocarpio de la palma aceitera, en la obtención de tableros fibrocemento.
- Evaluar la durabilidad de los haces fibrosos dentro de la matriz de cemento Portland.
- Investigar el comportamiento del material fibrocemento en la obtención productos ondulados, tuberías, etc.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alarcón, G. 1972. Comportamiento del concreto con azúcar. Tesis Ingeniero Civil. Lima, PE. Universidad Nacional de Ingeniería. 126 p.
- Alfaro, M.; Ortiz, E. 2006. Proceso de producción de aceite de palma. Ed. Rev. Costa Rica. Consejo Nacional de Producción y Servicio de Información de Mercados. 10 p.
- Álvarez, A.; García, E. 2012. Aprovechamiento integral de los materiales lignocelulósicos. Revista Iberoamericana de Polímeros. 13(4): 140-150.
- Álvarez, D. 2008. Caracterización físico-mecánica de morteros fibrorreforzados de matriz cementicia y fibra de coco. Tesis Ingeniero Civil. San Carlos, GT. Universidad de San Carlos de Guatemala. 112 p.
- Araujo, V. 1982. Pulpa química y semiquímica al sulfato de hojas de palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) y de peciolos de aguaje (*Mauritia flexuosa* L.). Tesis Ingeniero Agrónomo. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 107 p.
- Barrena, V.; De Celis, R.; Guillen, R. 2014. Monitoreo de la deforestación por monocultivos agroindustriales en la Amazonia Peruana. Ed. Rev. La Molina, Lima-Perú. Sociedad Peruana de Ecodesarrollo. 78 p.
- Bayer, J. 2013. Valoración de materiales compuestos de HDPE reforzados con fibras de *Agave sisalana*: aproximación a un paradigma de geometría fractal para las fibras. Tesis Doctor en Tecnología. Cataluña, ES. Universitat de Girona. 211 p.
- Beraldo, A. 2012. Aprovechamiento de residuos agro-industriales como fuente sostenible de materiales de construcción. Ed. Rev. Brasil. Editorial Universitat Politècnica de València. 326 p.
- Bledzki, A. 2002. Natural and wood fibre reinforcement in polymers. Rapra Technology Limited. 13 (8): 24-38.
- Carneado, A. 2009. Estudio técnico-económico de una fábrica de cemento Portland para la obtención de 1 000 000 de TM al año. Ed. Rev. España, s.e. 154 p.
- Castillo, G.; Gonzales, V. 2010. Formulación de un fertilizante a partir de los residuos de la agroindustria de la palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.). Tesis Ingeniero Agrónomo. Guanacaste, CR. Universidad Earth. 43 p.
- Castro, W. 2014. Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de un mortero polimérico no convencional. Tesis Ingeniero Mecánico. Barquisimeto, VE. Universidad Centro Occidental. 143 p.
- Ceccarelli, R. 2004. Elaboración de tableros de fibras obtenidos con fibras recicladas de periódico. Tesis Ingeniero Forestal. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 114 p.

- Cerrón, R. 2009. Influencia de la geometría de partículas de los residuos provenientes del aserrío con cierra circular y de banda de *Eucalyptus globulus* Labill en la fabricación de tableros aglomerados con cemento. Tesis Ingeniero Forestal. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 112 p.
- Cruz, T. 1982. Aptitud de la madera de cinco especies forestales del Perú para la fabricación de paneles de fibrocemento. Tesis Ingeniero Forestal. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 164 p.
- Dammert, J. 2014. Cambio de uso de suelos por agricultura a gran escala en la Amazonia Andina: el caso de la palma aceitera. 2 ed. San Borja, Lima-Perú. International Resources Group. 78 p.
- Del Hierro, E. 1993. Aprovechamiento de los sub-productos de la palma de aceite. Revista Palmas. 14: 149-153.
- Dongo, J. 2014. Proceso de extracción, purificación y refinación del aceite crudo de palma aceitera y obtención de productos derivados. Tesis Ingeniero Industrial. Lima, PE. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 107 p.
- Espinoza, A. 2010. Aptitud de *Guadua angustifolia* Kunth en la elaboración de tableros aglomerados con cemento. Tesis Ingeniero Forestal. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 105 p.
- Estrada, M. 2010. Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos. Tesis Magister en Ingeniería. Bogotá, CO. Universidad de los Andes. 124 p.
- Garay, A. 2004. Factibilidad de uso de la madera *Hevea brasiliensis* (caucho) en la fabricación de tableros con pajilla y cemento. Revista Forestal Latina. 36: 45-58.
- Garcés, I.; Cuellar, M. 1997. Productos derivados de la industria de la palma de aceite: usos. Revista Palmas. 18 (1): 33-48.
- Gonzales, A. 2005. Factibilidad de uso de fibras de raquis de palma aceitera para elaborar papel. Tesis Ingeniero Agrónomo. Guácimo, CR. Universidad Earth. 40 p.
- Gonzales, E. 2003. Recursos fibrosos de plantas no maderables para la industria papelera. Ed. Rev. La Molina, Lima-Perú. s.e. 73 p.
- Gonzales, L. 2013. Influencia de los componentes del concreto reforzado con fibras en sus propiedades mecánicas. Palmira, Colombia. Ed. Rev. s.e. 30 p.
- Gonzales, M.; Astudillo, J. 2007. Estudio experimental de un material fibrocemento utilizando fibras de rastrojos de trigo. Ed. Rev. Santiago, Chile. s.e. 22 p.
- Hartley, C. 1986. La Palma del aceite. 2 ed. Distrito Federal, MX. Edit. Continental. 232 p.
- Jarabo, R. 2013. Efecto de la sepiolita y de nuevas fibras alternativas celulósicas en el comportamiento de suspensiones de fibrocemento. Tesis Grado de Doctor. Madrid, ES. Universidad Complutense de Madrid. 221 p.

- Juárez, C. 2002. Concreto base cemento Portland reforzados con fibras naturales (*Agave lechuguilla*), como material para construcción en México. Tesis Ingeniero Mecánico. San Nicolás de los Garza, MX. Universidad Autónoma de Nuevo León. 320 p.
- Libby, C. 1974. Ciencia y tecnología sobre pulpa y papel. 2 ed. Distrito Federal, México. Editorial Continental S.A. 534 p.
- Lucana, D. 2008. Diseño de un molde para la fabricación de probetas de materiales compuestos de matriz plástica y refuerzos de fibras naturales mediante compresión térmica. Tesis Ingeniero Mecánico. Lima, PE. Pontificia Universidad Católica del Perú. 111 p.
- MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego). 2012. Palma aceitera, principales aspectos de la cadena productiva. Ed. Rev. Lima, Perú. Dirección de Información Agraria. 113 p.
- Misra, D. 1990. Producción y blanqueo de pulpa de fibras no leñosas. Revista Tecnología de Pulpa y Papel. 1: 602-674.
- Neville, A. 1989. Tecnología del concreto. 2 ed. Distrito Federal, México. Editorial Limusa. 549 p.
- Noriega, M. 1996. Aptitud del *Eucalyptus globulus* en la preparación de tableros de fibrocemento. Tesis Maestría en Ingeniería. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 89 p.
- Novoa, M. 2005. Elaboración y evaluación de tableros aglomerados a base de fibra de coco y cemento. Tesis Maestro en Arquitectura. Colima, MX. Universidad de Colima. 115 p.
- Ortiz, J. 1998. La múltiple identidad del hormigón. Revista informes de la construcción. 49 (454): 77-83
- Osorio, U. 2007. Investigación en cultivos oleaginosos. (diapositivas). Ed. Rev. Lima, PE, s.e. 23 diapositivas.
- Ossa, M. 1984. Retracción de pastas de cemento en estado plástico y en la primera etapa de endurecimiento. Revista materiales de construcción. 34 (194): 132-144.
- Paniagua, C. 1988. Estudio preliminar del proyecto palma aceitera de Pucallpa. Tesis Ingeniero Agrónomo. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 154 p.
- Pasquel, E. 1998. Tópicos de tecnología del concreto. 2 ed. Lima, PE. Editorial Colegio de Ingenieros del Perú. 380 p.
- Paucar, J. 2008. Determinación de la compatibilidad de mezclas de aserrín de *Pinus* spp. y cemento Portland para la potencial manufactura de tableros cemento-madera. Tesis Maestría Ciencias de Productos Forestales. Jalisco, MX. Universidad de Guadalajara. 101 p.
- Perry, R. 1986. Biblioteca del ingeniero químico. 5 ed. Distrito Federal, MX. Editorial McGraw Hill. 28 p.

- Prinsen, P. 2010. Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial y análisis estructural de sus ligninas. Tesis Máster Estudios Avanzados en Química. Universidad de Sevilla. 92 p.
- Quintero, S.; Gonzales, L. 2006. Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. Ingeniería y Desarrollo. Revista Ingeniería & Desarrollo. No 20: 134-150.
- Ramírez, D.; Vergara, M. 2013. Evaluación de la resistencia mecánica del concreto modificado con residuo de granalla de silicato de aluminio. Tesis Ingeniero Civil. Cartagena, CO. Universidad de Cartagena. 98 p.
- Ramírez, M. 2011. Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite. Ed. Rev. Bogotá, CO. Editorial Molher. 46 p.
- Reyes, S.; Ortiz, J. 2008. Aprovechamiento de los residuos de la palma africana. Tesis Ingeniero Agrónomo. Bogotá, CO. Universidad Cooperativa de Colombia. 68 p.
- Rodríguez, L. 2014. Elaboración de un material biocompuesto a partir de la fibra de plátano. Tesis Ingeniero Industrial. Manizales, CO. Universidad Nacional de Colombia. 105 p.
- Rojas, L. 2011. Producción de azúcares fermentables a partir de fibra prensada de palma de aceite, pretratada biológicamente por *Pleurotus ostreatus* y *Phanerochaete chrysosporium*. Revista Ion. 24(2): 29-35.
- Saad, A. 1969. Tratado de la construcción. 3 ed. Lima, PE. Editorial Continental S.A. 293 p.
- Saldívar, V. 2005. Estudio de tres variables en la obtención de pulpa celulósica, con proceso de alto rendimiento, a partir del tallo de arroz (*Oryza sativa* L.). Tesis Ingeniero Forestal. Lima, Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina. 126 p.
- Saval, S. 2012. Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro. Revista Biotecnología. 16 (2): 14-46.
- Simbaña, A.; Mera, M. 2010. Fibras naturales y residuos agroindustriales: fuente sostenible de materia prima. Revista Informativa de Docencia, Investigación y Proyección Social. Enero 2010: 15-16
- Sokolova, M. 2014. Bambú, el gigante de acero: nuevas estéticas, materiales naturales y sustentabilidad. Tesis Diseñador de Interiores. Buenos Aires, AR. Universidad de Palermo. 117 p.
- Subramanian, V. 2013. Nueva tecnología para la recuperación de aceite de la fibra de prensa. Revista Palma. 34 (3): 19-24.
- Torres, J. 2006. Evaluación de la influencia de plantaciones adultas sobre cultivos jóvenes en la calidad de conformación de racimos en el híbrido CIRAD de Palma Aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) en Quindé. Tesis Ingeniero

- Agropecuario. Santo Domingo de los Colorados, EC. Escuela Politécnica del Ejército. 115 p.
- Trejos, J. 2014. Propiedades mecánicas de una matriz de poliéster reforzada con fibra de coco comparadas con la misma matriz reforzada con fibra de vidrio. Tesis Ingeniero Mecánico. Pereira, CO. Universidad Tecnológica de Pereira. 116 p.
- UNAD (Universidad Nacional Abierta y a Distancia). 2011. Generalidades de la palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) Ed. Rev. Valle del Cauca, CO. s.e. 5 p.
- Valenzuela, W.; Cruz, T. 1982. Aptitud de la madera de cinco especies forestales para fabricar tableros de fibrocemento. Revista Forestal del Perú. 11(1-2): 1-17.
- Valenzuela, W. 1991. Paneles fibrocemento: fabricación, características y uso. Tesis Ingeniero Forestal. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 132 p.
- Vargas, E.; Zumbado, M. 2003. Composición de los subproductos de la industrialización de la palma africana en la alimentación animal en Costa Rica. Revista Agronomía Costarricense. 27 (1): 7-18.
- WRM (Movimiento Mundial para los Bosques Tropicales). 2006. Palma aceitera de la cosmética al biodiesel: la colonización continúa. 2 ed. Uruguay. 127 p.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HOLOCELULOSA MÉTODO JAYME-WISE

Equipo:

- Erlenmeyer de 250 mL
- Baño maría
- Crisoles de capa filtrante
- Termómetro
- Pipetas
- Vidrio de reloj

Reactivos:

- Clorito de Sodio NaClO_2
- Ácido acético CH_3COOH

Muestra:

- Pesar 2 +/- 0,1 gramos de fibras secas, libre de extractivos.

Procedimiento:

Deposite la muestra en el Erlenmeyer y trátela con 150 ml de solución de clorito de sodio al 1,5% y 10 gotas de ácido acético concentrado, cubra con un vidrio de reloj y deje a baño maría a 70°C durante 1 hora agitando de vez de en cuando.

Después de la hora añada 10 gotas de ácido acético concentrado y 1,5 g de clorito de sodio. Repita esta operación, cada hora por cuatro 4 horas.

Terminando el tratamiento, enfríe en agua helada y filtre en un crisol tarado, lave el residuo 5 veces con 40 ml de agua destilada helada, seque a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ hasta peso constantes, enfríe en un desecador y se pesé.

Cálculos:

$$\text{Holocelulosa} = \frac{R * 100}{W}$$

R: Peso seco del residuo holocelulosa (g)

W: Peso seco de la muestra (g)

Expresa los resultados como un porcentaje de holocelulosa en base seca, libre de extractivos, promedio de tres determinaciones, con una variación no mayor de 0,1%.

ANEXO 2

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE LIGNINA MÉTODO KLASON

Equipo:

- Vasos de precipitados de 50 ml
- Erlenmeyer de filtración
- Crisoles de capa filtrante
- Baño a temperatura constante
- Erlenmeyer de 1 000 y 2 000
- Condensador de reflujo
- Varillas de vidrio

Reactivos:

- Ácido sulfúrico al 72% o solución $24 \pm 0,1$ N

Vierta cuidadosamente 665 ml de ácido sulfúrico concentrado (95,5-96,5%, gr. esp. 1,84) en 300 ml de agua, enfríe y diluya a 1 litro. Hale la concentración del ácido valorando con NaOH tipo, usando metil naranja como indicador y ajuste la solución a $24 \pm 0,1$ N con agua o ácido.

Muestra:

- Pesar $1 \pm 0,1$ gramos de fibras secas, libre de extractivos.

Procedimiento:

Coloque la muestra en un vaso de 50 ml, agregue el ácido sulfúrico frío, (15 ml para madera, 40 ml para pulpa) lentamente y macerando el material con una varilla de vidrio. Mantenga el

recipiente en un baño a $20\pm 1^\circ\text{C}$ durante la dispersión de la muestra; cúbralo con un vidrio de reloj y déjelo en el baño a $20\pm 1^\circ\text{C}$ por 2 horas agitando frecuentemente.

Al cabo de las 2 horas, pase cuantitativamente el contenido del vaso al Erlenmeyer; diluya con agua hasta obtener una concentración de ácido de 3% (correspondiente a un volumen total de 575 ml para madera y 1540 ml para pulpa)

Hierva durante 4 horas a reflujo para mantener el volumen constante. Deje que el material insoluble (lignina) se sedimente, durante la noche o más tiempo si es necesario; decante el líquido sobrenadante, sobre el crisol filtrante previamente tarado; transfiera luego la lignina cuantitativamente al filtro usando agua caliente y una varilla de vidrio. Lave el residuo con agua caliente hasta quitar completamente el ácido; séquelo a $105\pm 3^\circ\text{C}$ hasta peso constante. Enfríe en un desecador y pesé.

Cálculos:

$$Lignina = \frac{R * 100}{W}$$

R: Peso seco de residuo lignina (g)

W: Peso seco de la muestra (g)

Expresé los resultados como un porcentaje de lignina en base seca, libre de extractivos, promedio de tres determinaciones, con una variación no mayor de 0,1%.

ANEXO 3

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE EXTRACTIVOS NORMA TAPPI T6 WD-73 Y TAPPI T1 WD-75

Equipo:

- Extractor Soxhlet
- Papel filtro
- Calentador eléctrico
- Balones de vidrio
- Estufa eléctrica

Reactivos:

- Alcohol etílico de 96°
- Agua destilada

Muestra:

- Pesar 5+/- 0,1 gramos de fibras seleccionadas secas.

Procedimiento:

Se coloca la muestra dentro de papel filtro, empaquetándolo de tal manera que no haya pérdidas posteriores. Al momento de colocar el paquete dentro del extractor Soxhlet se debe tener que quede por debajo del nivel del líquido extractor.

Se debe de extraer por 4 horas para el caso del alcohol, hasta que el solvente sea incoloro, que indica que la extracción ha terminado. En cada extracción se debe descargar el Soxhlet por lo menos 4 veces por hora.

Una vez terminada la extracción se debe retirar la muestra del extractor, reservándola para la extracción con agua caliente. El balón de vidrio, conteniendo el solvente con el material extraído debe ser dejado en una estufa para que el solvente evapore. Con el solvente disuelto se debe pesar el balón con los restos de extractivos, restando el peso del balón se puede calcular el porcentaje de extractivos de la muestra utilizada.

Luego se repite el procedimiento para el caso de agua caliente para calcular el total de extractivos de la muestra.

Cálculos:

$$\text{Extractivo} = \frac{R * 100}{W}$$

R: Peso del extractivo (g)

W: Peso seco de la muestra (g)

Nota: calcule el peso seco mediante la siguiente relación:

$$\text{Peso húmedo} * \left(\frac{100 - H}{100} \right)$$

H=porcentaje de humedad de la muestra

ANEXO 4

NORMA ASTM D – 1762 CONTENIDO DE HUMEDAD Y CENIZAS

Pesar 1 +/- 0,1 gramos de fibras y colocarlas en crisoles. Poner la muestra a estufa a 105° C por 3 horas hasta tener un peso constante. Trascurrido el tiempo se deja enfriar el crisol en el desecador y luego se pesa.

Por diferencia de peso se determina el contenido de humedad expresado en porcentaje:

$$CH = \frac{(Ph - Ps) * 100}{Ph}$$

CH: contenido de humedad (%)

Ph: Peso húmedo de la muestra (g)

Ps: Peso seco en gramos de la muestra (g)

Pesar 2 +/- 0,1 gramos de fibras y colocarlas en crisoles destapados usadas para análisis de volátiles. Colocar las muestras en la mufla a 750°C durante 6 horas. Trascurrido el tiempo enfriar los crisoles con las tapas en el desecador por una hora y pesar.

Repetir el calentamiento de la muestra por una hora, poner en el desecador por 1 hora con su respectiva tapa y pesar, debiendo arrojar una pérdida menor a 0,0005 gramos.

Expresar los resultados en porcentaje mediante la siguiente relación:

$$Cz = \frac{PCz * 100}{Ps}$$

Cz: Contenido de cenizas (%)

PCz: Peso de las cenizas (g)

Ps: Peso seco de la muestra (g)

ANEXO 5

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AZÚCARES SOLUBLES MÉTODO FEHLING

Determinación de azúcares reductores iniciales (ARI):

Primero se preparó 30 gramos de muestra y lo aforamos en una fiola de 100 mL, filtramos y lo llevamos a la bureta para titular la solución Fehling.

Para preparar la solución Fehling se tomó en un matraz 5 mL de Fehling A, 5 mL de Fehling B y 15 mL de agua, lo mezclamos y lo llevamos a ebullición por un tiempo de 2 minutos, al cabo del cual agregamos 4 gotas de azul de metileno, para luego titular con la solución preparada anteriormente, experimentando un cambio de azul hasta rojo ladrillo.

Determinación de azúcares reductores totales (ART):

Del filtrado se tomó 10 mL y lo transferimos a una fiola de 100 mL, al cual se agregó aproximadamente 10 mL de agua destilada, se mezcló suavemente y se agregó 5 mL de HCl 6,35 N. Seguidamente se llevó la mezcla a un baño maría hasta llegar a una temperatura de 65-70 °C al cabo del cual se agregó nuevamente 5 mL de HCl 6,35 N.

Se retiró del baño maría y se dejó reposar por 30 minutos al cabo del cual se agregó 4 gotas de fenolftaleína para después neutralizar con NaOH al 20%.

Se dejó enfriar y luego se neutralizó el exceso con HCl 0,1 N hasta llegar a una decoloración (inoloro), aforamos a 100 mL, se mezcló para luego usarla para titular la solución de Fehling.

ANEXO 6

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS TABLEROS

El procedimiento seguido fue el siguiente:

- Se codificaron las probetas de tamaño 1cm*1cm*espesor
- Se procedió a pesar las probetas
- Luego se colocó las probetas en una estufa eléctrica a 103±2°C, y se pesó cada dos horas hasta alcanzar un hasta peso constante.
- Los resultados se calcularon mediante la siguiente relación:

$$M = \frac{Mh - Mo}{Mo}$$

M: contenido de humedad en base seca (g)

Mh: peso de la probeta húmeda (g)

Mo: peso de la probeta seca al horno (g)

ANEXO 7

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE LOS TABLEROS

Se utilizó como referencia la Norma DIN 52361, el procedimiento seguido fue el siguiente:

- Se codificaron las probetas de tamaño 5cm*5cm*espesor
- Se tomaron de las medidas de longitud y espesor de cada probeta, con ayuda de un vernier digital para determinar el volumen.
- Los resultados se calcularon mediante la siguiente relación:

$$D = \frac{P}{V}$$

D: densidad (g/cm³)

P: Peso húmeda (g)

V: Volumen (cm³)

ANEXO 8

DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE AGUA E HINCHAMIENTO DE LOS TABLEROS

Se utilizó como referencia la Norma DIN 52364, el procedimiento seguido fue el siguiente:

Absorción de agua

- Se codificaron las probetas de tamaño 5cm*5cm*espesor
- Las probetas fueron pesadas y medidas según el procedimiento descrito para el ensayo de densidad, luego fueron introducidas en un recipiente con agua destilada, disponiéndola en forma vertical por debajo de nivel superficial del agua.
- Al cabo de 2 horas se sacaron del recipiente, dejándolo escurrir durante 10 minutos. Fueron pesados y medidos nuevamente, anotando los resultados porque se volverán a introducir las mismas probetas al recipiente con agua destilada.
- Al cabo de 24 horas las probetas fueron sacadas nuevamente del recipiente, repitiéndose el procedimiento anterior, pesándolas y midiéndolas.
- Los resultados se calcularon mediante la siguiente relación:

$$A = \frac{(Pf - Pi)}{Pi} * 100$$

A: Absorción de agua (%)

Pf: Peso final después de la inmersión (g)

Pi: Peso inicial (g)

Hinchamiento volumétrico

- Se codificaron las probetas de tamaño 5cm*5cm*espesor
- Las probetas ensayadas por inmersión a 24 horas fueron pesadas y medidas. Realizadas en simultaneo
- El espesor de las probetas fue medido en la intersección de las diagonales antes y después de su inmersión en agua
- Los resultados se calcularon mediante la siguiente relación:

$$H = \frac{(V_f - V_i)}{V_i} * 100$$

H: Hinchamiento (%)

Vf: Volumen final (mm³)

Vi: Volumen inicial (mm³)

ANEXO 9

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL ESPESOR DE LOS TABLEROS

Se utilizó como referencia la Norma DIN 53291, el procedimiento seguido para los ensayos de compresión perpendicular fue el siguiente:

- Se codificaron las probetas de tamaño 5cm*5cm*espesor
- De cada tablero se cortaron 4 probetas de 5cm* 5cm* espesor
- Se tomaron las medidas de espesor, ancho y largo de cada probeta
- Se calculó la carga necesaria para cada probeta. Según los requerimientos de la Norma DIN 1101 los paneles de fibrocemento de 25 mm tienen una reducción de su espesor del 15% con una tolerancia de ±10%, al ser aplicada una carga de 3 kg/cm²
- Se activó la prensa hasta llegar a la carga indicada para cada probeta.
- Se retiró la probeta de la prensa y se procedió a medir el espesor, calculando la reducción del espesor.
- Los resultados se calcularon mediante la siguiente relación:

$$R = \frac{(E_f - E_i)}{E_i} * 100$$

R: reducción del espesor (%)

E_i: Espesor inicial (mm)

E_f: Espesor de la probeta luego de aplicada la carga (mm)

ANEXO 10

DETERMINACIÓN DEL MODULO DE RUPTURA (MOR) DE LOS TABLEROS

Se utilizó como referencia la Norma DIN-52362, el procedimiento seguido para los ensayos flexión fue el siguiente:

- Se codificaron las probetas de tamaño 5cm*25cm*espesor
- Velocidad de ensayo: 0,24 pulgadas por minuto (0,5996 centímetros por minuto)
- Se colocó las probetas sobre los apoyos de la prensa
- Se eligió la escala adecuada de lectura para el ensayo (cada 1 kg)
- El ensayo se inicia accionando el dispositivo de la prensa y el reloj. Se anotó la deformación por cada kilogramo se siguió hasta la carga máxima y se tomó los datos de formación registrad en la carga máxima.
- Una vez terminado el ensayo de cada probeta se anotó el tipo de falla presentado, el tiempo de duración de cada ensayo y la carga máxima registrada.
- Los resultados se calcularon mediante la siguiente relación:

$$MOR = \frac{3PL}{2ae^2} * 100$$

P: carga máxima (kg)

L: luz (cm)

a: ancho (cm)

e: espesor (cm)

ANEXO 11

DATOS PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE HUMEDAD PROMEDIO DE LOS TABLEROS

CODIGO	REP	CONTROL1 (g)	CONTROL2 (g)	CONTROL3 (g)	CONTROL4 (g)	CH (%)
I 1H 3%	1	10.1086	9.6086	9.5449	9.2617	8.38
I 2H 3%	2	10.5955	10.0525	10.0068	9.7167	8.29
I 3H 3%	3	11.2942	10.7168	10.6537	10.3568	8.30
I 4H 3%	4	11.2358	10.6474	10.5761	10.2813	8.50
I 5H 3%	5	10.9883	10.4143	10.3770	10.0992	8.09
I 6H 3%	6	10.7114	10.1448	10.0927	9.8325	8.21
I 7H 3%	7	10.6229	10.0688	9.9995	9.7204	8.50
I 8H 3%	8	10.7418	10.1884	10.1269	9.8059	8.71
I 9H 3%	9	9.1406	8.7312	8.6983	8.3977	8.13
I 10H 3%	10	10.2826	9.7803	9.7195	9.4275	8.32
II 1H 3%	1	11.4615	10.8638	10.8049	10.5100	8.30
II 2H 3%	2	10.9294	10.3819	10.3385	10.0006	8.50
II 3H 3%	3	12.1490	11.5493	11.4964	11.1398	8.31
II 5H 3%	5	11.7374	11.1549	11.1031	10.8075	7.92
II 6H 3%	6	9.4731	8.9989	8.9650	8.7006	8.15
II 7H 3%	7	11.1965	10.6038	10.5607	10.2640	8.33
II 8H 3%	8	11.3515	10.7717	10.7444	10.3387	8.92
II 9H 3%	9	9.6359	9.1571	9.1242	8.7702	8.98
II 10H 3%	10	10.4681	9.8895	9.8441	9.5794	8.49
III 1H 3%	1	11.7703	11.1835	11.1272	10.8115	8.15
III 2H 3%	2	11.4889	10.9270	10.8892	10.4975	8.63
III 3H 3%	3	11.4509	10.8573	10.8297	10.5199	8.13
III 4H 3%	4	11.4041	10.8054	10.7673	10.5504	7.49
III 5H 3%	5	11.6599	11.0596	11.0228	10.6704	8.49
III 6H 3%	6	10.6033	10.0833	10.0657	9.7118	8.41
III 7H 3%	7	11.2240	10.6473	10.6104	10.2926	8.30
III 8H 3%	8	12.7392	12.0847	12.0324	11.6017	8.93
III 10H 3%	10	11.1459	10.5768	10.5395	10.2175	8.33

Continuación

CODIGO	REP	CONTROL1 (g)	CONTROL2 (g)	CONTROL3 (g)	CONTROL4 (g)	CH (%)
I 1H 6%	1	11.8315	10.9214	10.8462	10.8113	8.62
I 2H 6%	2	11.9008	10.9759	10.9016	10.8601	8.74
I 3H 6%	3	10.5100	9.8118	9.7121	9.6634	8.06
I 4H 6%	4	11.3595	10.5170	10.4412	10.3653	8.75
I 5H 6%	5	12.0200	11.1732	11.0316	10.9862	8.60
I 6H 6%	6	11.3071	10.5601	10.4288	10.3279	8.66
I 7H 6%	7	11.4661	10.5996	10.5221	10.4820	8.58
I 8H 6%	8	12.5040	11.6701	11.5381	11.4242	8.64
I 9H 6%	9	10.8392	10.0114	9.9821	9.9246	8.44
I 10H 6%	10	10.7698	9.9736	9.9046	9.8728	8.33
II 1H 6%	1	10.7384	9.9090	9.8456	9.8092	8.65
II 2H 6%	2	11.5884	10.6695	10.5843	10.5458	9.00
II 3H 6%	3	11.1546	10.2799	10.2097	10.1670	8.85
II 5H 6%	5	11.2219	10.3914	10.1673	9.9836	11.03
II 6H 6%	6	11.1825	10.4013	10.3022	10.2070	8.72
II 7H 6%	7	12.0035	11.0492	11.0020	10.9301	8.94
II 8H 6%	8	11.4057	10.5744	10.4929	10.4199	8.64
II 9H 6%	9	10.7311	10.0012	9.8924	9.8346	8.35
II 10H 6%	10	10.5001	9.7010	9.6718	9.6296	8.29
III 1H 6%	1	11.7547	10.9312	10.8221	10.7303	8.71
III 2H 6%	2	10.4216	9.6390	9.6021	9.5102	8.75
III 3H 6%	3	10.6600	9.8501	9.7823	9.7483	8.55
III 4H 6%	4	11.0325	10.2826	10.1524	10.0990	8.46
III 5H 6%	5	10.9297	10.6155	10.3019	10.2661	6.07
III 6H 6%	6	10.4374	10.2101	9.7831	9.5625	8.38
III 7H 6%	7	10.4299	9.6270	9.5566	9.5145	8.78
III 8H 6%	8	11.5787	10.6913	10.6221	10.5758	8.66
III 10H 6%	10	10.8635	10.0361	10.0832	9.9258	8.63

Continuación

CODIGO	REP	CONTROL1 (g)	CONTROL2 (g)	CONTROL3 (g)	CONTROL4 (g)	CH (%)
I 1H 9%	1	11.9272	10.9423	10.9214	10.8845	8.74
I 2H 9%	2	11.8252	10.9800	10.9178	10.8803	7.99
I 3H 9%	3	11.4026	10.5970	10.4521	10.4012	8.78
I 4H 9%	4	12.0566	11.4828	11.3382	11.0983	7.95
I 5H 9%	5	11.9167	11.0322	10.9463	10.8849	8.66
I 6H 9%	6	12.3000	11.4435	11.3802	11.3202	7.97
I 7H 9%	7	13.1435	12.1821	12.0010	11.9778	8.87
I 8H 9%	8	11.4782	10.6991	10.5311	10.4734	8.75
I 9H 9%	9	11.9622	11.3320	11.0826	11.0172	7.90
I 10H 9%	10	12.7348	12.0028	11.7215	11.6383	8.61
II 1H 9%	1	10.9397	10.1239	10.0731	10.0376	8.25
II 2H 9%	2	10.5962	9.8455	9.7994	9.7322	8.15
II 3H 9%	3	11.0494	10.2635	10.1720	10.1164	8.44
II 5H 9%	5	10.2495	9.5825	9.4670	9.4024	8.26
II 6H 9%	6	10.8783	10.1755	10.0529	9.9007	8.99
II 7H 9%	7	11.0521	10.4643	10.2111	10.1153	8.48
II 8H 9%	8	12.2888	11.4492	11.2890	11.1865	8.97
II 9H 9%	9	10.0030	9.2069	9.1663	9.1344	8.68
II 10H 9%	10	10.9567	10.2256	10.1275	9.9960	8.77
III 1H 9%	1	10.4663	9.7200	9.6102	9.5537	8.72
III 2H 9%	2	12.6451	11.8365	11.6220	11.5227	8.88
III 3H 9%	3	10.9314	10.0644	9.9991	9.9623	8.87
III 4H 9%	4	12.8520	11.7765	11.7091	11.6714	9.19
III 5H 9%	5	12.0653	11.0805	11.0177	10.9802	8.99
III 6H 9%	6	13.2479	12.3892	12.0900	12.0367	9.14
III 7H 9%	7	12.4945	11.5556	11.4910	11.4118	8.67
III 8H 9%	8	11.3164	10.5877	10.4023	10.3589	8.46
III 10H 9%	10	11.3950	10.5622	10.4410	10.3970	8.76

ANEXO 12

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE RESPUESTA HUMEDAD DE LOS TABLEROS

Class	Levels	Values			
Tratamiento	3	T3%	T6%	T9%	
Number of Observations Read		84			
Number of Observations Used		84			
Dependent Variable: Humedad					
		Sum of			
Source	DF	Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Tratamiento	2	1.07021667	0.53510833	2.98	0.0562
Error	81	14.52566429	0.17932919		
Corrected Total	83	15.59588095			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Humedad Mean		
0.068622	4.991120	0.423473	8.484524		
T Grouping					
	Mean	N	Tratamiento		
A	8.6011	28	T9%		
BA	8.5207	28	T6%		
B	8.3318	28	T3%		

ANEXO 13

DATOS PARA DETERMINAR LA DENSIDAD PROMEDIO DE LOS TABLEROS

CÓDIGO	REP	ESPESOR (mm)								ESPESOR PROMEDIO (mm)	LADO1 (mm)	LADO2 (mm)	PESO (g)	VOLÚMEN (cm ³)	DENSIDAD (g/cm ³)
		1	2	3	4	5	6	7	8						
I 1D 3%	1	8.60	8.83	9.12	9.33	9.08	8.88	8.64	9.03	8.94	53.87	53.09	43.49	25.56	1.60
I 2D 3%	2	8.96	8.89	9.17	9.69	9.44	9.40	8.88	9.04	9.18	53.11	53.85	43.20	26.27	1.64
I 3D 3%	3	9.80	8.85	8.94	8.78	9.97	8.56	9.94	9.80	9.33	53.71	54.59	43.39	27.36	1.59
I 4D 3%	4	9.84	9.69	9.53	9.22	9.14	9.09	9.44	9.04	9.37	52.69	52.81	41.37	26.08	1.59
I 5D 3%	5	9.11	8.96	9.91	10.41	10.49	10.23	10.05	8.84	9.75	52.25	53.82	42.92	27.42	1.57
II 1D 3%	1	8.89	8.64	8.78	8.83	8.91	9.02	8.88	8.88	8.85	52.31	52.83	41.00	24.47	1.68
II 2D 3%	2	9.61	9.52	9.37	9.45	9.74	9.34	9.40	9.38	9.48	54.18	53.39	41.45	27.41	1.51
II 3D 3%	3	9.18	9.02	9.07	9.00	9.11	9.20	9.55	9.46	9.20	52.02	53.61	38.47	25.65	1.50
II 4D 3%	4	8.77	9.12	9.10	8.93	8.65	8.76	8.58	8.81	8.84	54.15	53.35	44.17	25.54	1.73
II 5D 3%	5	8.58	8.66	8.69	8.43	8.73	8.40	8.56	8.31	8.55	52.07	53.36	39.77	23.74	1.67
III 1D 3%	1	8.63	8.72	8.69	8.69	8.27	8.63	8.51	8.58	8.59	53.67	54.78	40.77	25.25	1.61
III 2D 3%	2	8.81	8.70	8.36	8.37	9.07	8.56	8.43	8.88	8.65	53.20	53.11	43.65	24.43	1.54
III 3D 3%	3	9.44	9.21	9.03	9.09	8.94	9.10	9.09	9.25	9.14	52.71	54.85	43.49	26.44	1.65
III 4D 3%	4	8.77	8.94	8.96	8.61	8.34	8.47	8.52	8.88	8.69	54.00	54.18	40.62	25.41	1.60
III 5D 3%	5	9.19	9.05	8.91	9.06	9.11	9.29	9.24	8.93	9.10	53.66	55.06	41.94	26.88	1.56

Continuación

CÓDIGO	REP	ESPESOR (mm)								ESPEJOR PROMEDIO (mm)	LADO1 (mm)	LADO2 (mm)	PESO (g)	VOLÚMEN (cm ³)	DENSIDAD (g/cm ³)
		1	2	3	4	5	6	7	8						
I 1D 6%	1	9.92	9.90	9.98	9.73	10.09	9.77	9.71	9.99	9.89	50.99	52.09	39.27	26.26	1.50
I 2D 6%	2	10.56	10.64	10.37	10.60	10.48	10.42	10.27	10.43	10.47	51.20	51.43	41.57	27.57	1.51
I 3D 6%	3	10.23	10.11	10.32	10.54	10.25	10.39	10.27	10.18	10.29	52.47	51.59	42.07	27.84	1.51
I 4D 6%	4	9.31	9.69	9.50	9.09	8.94	9.14	9.33	9.73	9.34	52.08	52.03	36.96	25.31	1.46
I 5D 6%	5	9.24	8.91	9.41	9.31	9.29	9.09	8.94	9.06	9.16	51.15	51.86	36.24	24.29	1.49
II 1D 6%	1	9.80	9.75	9.82	10.02	9.40	9.44	9.69	9.53	9.68	51.35	52.87	38.52	26.28	1.47
II 2D 6%	2	9.58	9.40	9.33	9.38	9.84	9.61	9.60	9.41	9.52	51.46	52.39	37.70	25.66	1.47
II 3D 6%	3	9.53	9.03	9.17	8.88	9.41	9.60	9.50	9.78	9.36	51.68	52.38	37.17	25.34	1.47
II 4D 6%	4	9.77	9.70	9.97	9.89	10.12	10.41	10.44	9.87	10.02	50.75	52.35	38.94	26.62	1.46
II 5D 6%	5	9.86	10.60	10.66	10.63	10.54	10.10	10.46	10.10	10.37	53.20	51.23	43.01	28.26	1.52
III 1D 6%	1	9.81	9.45	9.65	9.51	9.44	9.39	9.22	9.58	9.51	52.07	53.65	38.23	26.56	1.44
III 2D 6%	2	9.74	9.48	9.88	10.01	9.98	9.91	10.04	9.79	9.85	53.31	52.85	41.01	27.76	1.48
III 3D 6%	3	9.06	9.28	9.32	9.35	9.42	9.08	9.55	9.47	9.32	53.03	50.86	36.93	25.13	1.47
III 4D 6%	4	9.58	9.84	9.55	9.42	9.60	9.72	9.78	9.70	9.65	52.08	52.68	38.97	26.47	1.47
III 5D 6%	5	9.76	9.78	9.71	10.40	9.97	9.81	9.86	9.63	9.87	52.95	52.08	40.11	27.20	1.47

Continuación

CÓDIGO	REP	ESPESOR (mm)								ESPEJOR PROMEDIO (mm)	LADO1 (mm)	LADO2 (mm)	PESO (g)	VOLÚMEN (cm³)	DENSIDAD (g/cm³)
		1	2	3	4	5	6	7	8						
I 1D 9%	1	10.23	9.86	9.98	9.97	10.52	10.45	10.13	10.21	10.17	54.39	54.33	40.30	30.05	1.34
I 2D 9%	2	11.21	11.28	11.79	11.18	10.98	11.33	11.03	11.16	11.25	52.95	53.43	42.48	31.81	1.34
I 3D 9%	3	11.27	10.88	11.59	11.67	11.62	11.74	11.65	11.25	11.46	52.41	53.25	43.99	31.98	1.38
I 4D 9%	4	11.57	11.64	11.53	11.52	11.99	11.55	11.61	11.70	11.64	53.31	53.32	44.95	33.08	1.36
I 5D 9%	5	11.76	11.57	11.33	11.39	11.71	11.25	11.76	11.40	11.52	52.96	53.44	44.82	32.61	1.37
II 1D 9%	1	10.82	10.60	11.13	10.83	10.98	10.78	10.82	10.91	10.86	53.45	52.11	42.99	30.24	1.42
II 2D 9%	2	11.06	10.78	10.88	10.64	10.90	10.87	11.05	10.93	10.89	53.75	52.41	42.04	30.67	1.37
II 3D 9%	3	10.67	10.81	10.76	10.69	10.76	10.81	10.73	10.73	10.75	52.75	53.42	40.65	30.28	1.34
II 4D 9%	4	11.08	10.91	11.04	11.14	11.28	11.09	11.07	10.94	11.07	53.21	53.55	41.39	31.54	1.31
II 5D 9%	5	10.70	10.75	10.74	10.86	10.34	10.74	10.75	10.55	10.68	53.52	53.56	41.77	30.61	1.36
III 1D 9%	1	11.67	11.10	11.71	11.18	11.53	11.26	11.08	11.08	11.33	52.57	53.01	42.77	31.56	1.36
III 2D 9%	2	10.91	11.24	11.10	11.20	11.03	11.21	11.00	11.01	11.09	53.60	52.75	46.20	31.35	1.47
III 3D 9%	3	10.80	10.46	10.61	10.61	10.43	10.68	11.13	10.92	10.71	52.98	53.25	45.62	30.20	1.51
III 4D 9%	4	11.40	11.26	11.59	11.44	11.18	11.49	11.52	11.53	11.43	54.02	52.38	45.67	32.33	1.41
III 5D 9%	5	10.18	9.84	9.76	9.63	9.72	9.95	9.86	9.93	9.86	52.88	53.23	38.80	27.75	1.40

ANEXO 14

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE RESPUESTA DENSIDAD DE LOS TABLEROS

Class Level Information					
Class	Levels	Values			
Tratamiento	3	T3%	T6%	T9%	
Number of Observations Read					
45					
Number of Observations Used					
45					
Dependent Variable: Densidad					
Sum of					
Source	DF	Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Tratamiento	2	0.36477778	0.18238889	74.75	<.0001
Error	42	0.10248000	0.00244000		
Corrected Total	44	0.46725778			
R-Square					
0.780678					
Coeff Var					
3.319152					
Root MSE					
0.049396					
Densidad Mean					
1.488222					
T Grouping					
	Mean	N	Tratamiento		
A	1.60267	15	T3%		
B	1.47933	15	T6%		
C	1.38267	15	T9%		

ANEXO 15

DATOS PARA DETERMINAR LA ABSORCIÓN DE AGUA Y POROSIDAD PROMEDIO DE LOS TABLEROS

CÓDIGO	PESO INICIAL (g)	PESO 2 HORAS (g)	PESO 24 HORAS (g)	ABSORCIÓN 2H (%)	ABSORCIÓN 24H (%)	POROSIDAD 24H (%)
I 1 3%	42.7942	48.9590	49.1276	14.41	14.80	24.77
I 2 3%	40.2440	45.9333	46.1816	14.14	14.75	22.61
I 3 3%	41.0698	46.9558	47.1874	14.33	14.90	22.36
I 4 3%	41.8980	47.9638	48.2403	14.48	15.14	24.32
I 5 3%	41.5015	47.4530	47.6842	14.34	14.90	22.55
II 1 3%	37.5936	43.3342	43.6320	15.27	16.06	24.68
II 2 3%	37.2949	42.9848	43.3307	15.26	16.18	22.02
II 3 3%	40.8827	47.2120	47.5123	15.48	16.22	25.84
II 4 3%	41.1680	47.5616	47.9057	15.53	16.37	26.38
II 5 3%	39.2348	45.2732	45.5952	15.39	16.21	26.79
III 1 3%	37.2922	43.2203	43.5818	15.90	16.87	24.90
III 2 3%	35.0864	40.3130	40.6834	14.90	15.95	22.91
III 3 3%	38.4897	44.3785	44.7840	15.30	16.35	23.81
III 4 3%	34.3684	39.5379	39.8704	15.04	16.01	21.65
III 5 3%	36.3092	41.8624	42.2299	15.29	16.31	22.03

Continuación

CÓDIGO	PESO INICIAL (g)	PESO 2 HORAS (g)	PESO 24 HORAS (g)	ABSORCIÓN 2H (%)	ABSORCIÓN 24H (%)	POROSIDAD 24H (%)
I 1 6%	41.6912	48.1001	48.4705	15.37	16.26	25.82
I 2 6%	39.7242	45.5613	45.9280	14.69	15.62	22.50
I 3 6%	38.8247	44.7515	45.1328	15.27	16.25	22.66
I 4 6%	44.1111	50.7246	51.0753	14.99	15.79	27.51
I 5 6%	41.0878	47.2844	47.6517	15.08	15.98	27.02
II 1 6%	35.9775	41.9342	42.2292	16.56	17.38	23.79
II 2 6%	42.9815	49.7227	49.9317	15.68	16.17	27.08
II 3 6%	36.9866	43.0462	43.2474	16.38	16.93	24.70
II 4 6%	38.5483	44.8469	45.1531	16.34	17.13	24.81
II 5 6%	38.6235	44.8875	45.1404	16.22	16.87	23.06
III 1 6%	43.0514	49.9933	50.2932	16.12	16.82	27.27
III 2 6%	37.7238	43.7814	44.0010	16.06	16.64	22.61
III 3 6%	37.7830	43.7982	44.0285	15.92	16.53	24.86
III 4 6%	37.1397	43.1305	43.4409	16.13	16.97	23.80
III 5 6%	38.9245	45.1759	45.4409	16.06	16.74	23.95
CÓDIGO	PESO INICIAL (g)	PESO 2 HORAS (g)	PESO 24 HORAS (g)	ABSORCIÓN 2H (%)	ABSORCIÓN 24H (%)	POROSIDAD 24H (%)
I 1 9%	45.6737	55.1940	55.5305	20.84	21.58	32.80
I 2 9%	37.8374	45.6195	46.0837	20.57	21.79	25.92
I 3 9%	36.0880	43.7136	44.1601	21.13	22.37	25.24
I 4 9%	41.3247	49.4046	49.8732	19.55	20.69	25.84
I 5 9%	40.2310	48.4829	48.9119	20.51	21.58	26.62
II 1 9%	42.9147	51.3967	51.8468	19.76	20.81	29.53
II 2 9%	41.9892	50.4002	50.8337	20.03	21.06	28.83
II 3 9%	42.1704	50.5445	51.0092	19.86	20.96	29.19
II 4 9%	42.2172	50.1844	50.7018	18.87	20.10	26.90
II 5 9%	42.3229	50.6315	51.0979	19.63	20.73	28.67
III 1 9%	40.1869	48.0227	48.4396	19.50	20.54	26.15
III 2 9%	38.7373	46.1554	46.4772	19.15	19.98	24.69
III 3 9%	40.1149	47.8659	48.2544	19.32	20.29	26.95
III 4 9%	42.0309	49.9179	50.4898	18.76	20.13	26.16
III 5 9%	40.2675	47.9905	48.4153	19.18	20.23	29.36

ANEXO 16

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE RESPUESTA ABSORCIÓN DE AGUA A 2 Y 24 HORAS DE INMERSIÓN DE LOS TABLEROS

Class Level Information					
Class	Levels	Values			
Tratamiento	3	T3%	T6%	T9%	
Number of Observations Read	45				
Number of Observations Used	45				
Dependent Variable: Absorción 2 horas de inmersión					
		Sum of			
Source	DF	Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Tratamiento	2	196.4640044	98.2320022	260.57	<.0001
Error	42	15.8336267	0.3769911		
Corrected Total	44	212.2976311			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	absorcion2h Mean		
0.925418	3.642260	0.613996	16.85756		
T Grouping					
	Mean	N	Tratamiento		
A	19.7773	15	T9%		
B	15.7913	15	T6%		
C	15.0040	15	T3%		

Class Level Information					
Class	Levels	Values			
Tratamiento	3	T3%	T6%	T9%	
Dependent Variable: Absorción 24 horas de inmersión					
		Sum of			
Source	DF	Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Tratamiento	2	223.6634133	111.8317067	269.13	<.0001
Error	42	17.4525067	0.4155359		
Corrected Total	44	241.1159200			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	absorcion24h Mean		
0.927618	3.635353	0.644621	17.73200		
T Grouping					
	Mean	N	Tratamiento		
A	20.8560	15	T9%		
B	16.5387	15	T6%		
C	15.8013	15	T3%		

ANEXO 17

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE RESPUESTA POROSIDAD DE LOS TABLEROS

Class Level Information						
Class	Levels	Values				
Tratamiento	3	T3%	T6%	T9%		
Dependent Variable: Porosidad						
		Sum of				
Source	DF	Squares	Mean Square	F Value	Pr > F	
Tratamiento	2	110.1362978	55.0681489	15.45	<.0001	
Error	42	149.7042000	3.5643857			
Corrected Total	44	259.8404978				
R-Square Coeff Var Root MSE porosidad Mean						
0.423861	7.440001	1.887958	25.37578			
T Grouping						
	Mean	N	Tratamiento			
A	27.5233	15	T9%			
B	24.7627	15	T6%			
B	23.8413	15	T3%			

ANEXO 18

DATOS PARA DETERMINAR EL HINCHAMIENTO VOLUMÉTRICO PROMEDIO DE LOS TABLEROS

CÓDIGO	VOLÚMEN INICIAL (mm³)	VOLÚMEN 2 HORAS (mm³)	VOLÚMEN 24 HORAS (mm³)	HINCHAMIENTO VOLUMÉTRICO 2 HORAS (%)	HINCHAMIENTO VOLUMÉTRICO 24 HORAS (%)
I 1 3%	26876.88	26973.64	27004.14	0.36	0.47
I 2 3%	24830.34	25648.86	25470.71	3.30	2.58
I 3 3%	25387.04	25777.77	25813.75	1.54	1.68
I 4 3%	26565.91	26969.35	27119.05	1.52	2.08
I 5 3%	25915.41	26342.44	26588.88	1.65	2.60
II 1 3%	22467.95	22885.51	23002.88	1.86	2.38
II 2 3%	23152.29	23707.57	23599.65	2.40	1.93
II 3 3%	25775.98	25578.22	25797.32	-0.77	0.08
II 4 3%	25636.37	26176.28	26246.22	2.11	2.38
II 5 3%	24263.58	24726.39	24928.13	1.91	2.74
III 1 3%	23031.23	23508.50	23783.38	2.07	3.27
III 2 3%	21996.47	21943.15	22007.27	-0.24	0.05
III 3 3%	24307.42	25010.95	25025.13	2.89	2.95
III 4 3%	21395.14	21605.32	21789.09	0.98	1.84
III 5 3%	22683.09	23017.09	23275.23	1.47	2.61

Continuación

CÓDIGO	VOLÚMEN INICIAL (mm³)	VOLÚMEN 2 HORAS (mm³)	VOLÚMEN 24 HORAS (mm³)	HINCHAMIENTO VOLUMÉTRICO 2 HORAS (%)	HINCHAMIENTO VOLUMÉTRICO 24 HORAS (%)
I 1 6%	28193.17	28846.76	28995.50	2.32	2.85
I 2 6%	26996.67	27573.47	27368.96	2.14	1.38
I 3 6%	26703.17	27024.14	27013.01	1.20	1.16
I 4 6%	29207.87	29369.05	29379.02	0.55	0.59
I 5 6%	27771.39	28106.15	28185.39	1.21	1.49
II 1 6%	24484.95	25247.67	24875.85	3.12	1.60
II 2 6%	28502.79	28598.54	29103.44	0.34	2.11
II 3 6%	25533.83	25886.74	26199.42	1.38	2.61
II 4 6%	26613.62	26821.78	26380.84	0.78	-0.87
II 5 6%	26298.28	26655.90	26643.18	1.36	1.31
III 1 6%	29396.73	29732.70	29803.98	1.14	1.39
III 2 6%	25434.45	26101.37	26280.67	2.62	3.33
III 3 6%	25634.28	26046.06	26302.86	1.61	2.61
III 4 6%	25525.35	26394.97	27352.07	3.41	7.16
III 5 6%	26486.32	27061.97	27434.61	2.17	3.58
CÓDIGO	VOLÚMEN INICIAL (mm³)	VOLÚMEN 2 HORAS (mm³)	VOLÚMEN 24 HORAS (mm³)	HINCHAMIENTO VOLUMÉTRICO 2 HORAS (%)	HINCHAMIENTO VOLUMÉTRICO 24 HORAS (%)
I 1 9%	33636.90	33895.75	33927.32	0.77	0.86
I 2 9%	27635.36	28471.67	28488.75	3.03	3.09
I 3 9%	27171.42	27872.75	27480.63	2.58	1.14
I 4 9%	27162.84	28826.78	29009.58	6.13	6.80
I 5 9%	29594.23	30337.59	30552.18	2.51	3.24
II 1 9%	31222.67	31343.68	31587.50	0.39	1.17
II 2 9%	30647.30	30925.40	30776.15	0.91	0.42
II 3 9%	30129.99	31817.10	31252.85	5.60	3.73
II 4 9%	30114.10	30387.08	30405.47	0.91	0.97
II 5 9%	30529.23	31118.96	30966.88	1.93	1.43
III 1 9%	29303.52	29463.19	29601.69	0.54	1.02
III 2 9%	27216.19	28398.22	28750.83	4.34	5.64
III 3 9%	29078.19	29940.30	30634.49	2.96	5.35
III 4 9%	30814.27	31306.82	31313.61	1.60	1.62
III 5 9%	29090.90	29769.61	30071.78	2.33	3.37

ANEXO 19

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE RESPUESTA HINCHAMIENTO VOLUMÉTRICO A 2 Y 24 HORAS DE INMERSIÓN DE LOS TABLEROS

Class Level Information					
Class	Levels	Values			
Tratamiento	3	T3%	T6%	T9%	
Number of Observations Read					45
Number of Observations Used					45
Dependent Variable: Hinchamiento volumétrico a 2 horas de inmersión					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Tratamiento	2	6.93317333	3.46658667	2.01	0.1468
Error	42	72.48050667	1.72572635		
Corrected Total	44	79.41368000			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	hinchamiento2h Mean		
0.087305	69.60451	1.313669	1.887333		
T					
Grouping					
	Mean	N	Tratamiento		
A	2.4353	15	T9%		
A	1.6900	15	T6%		
A	1.5367	15	T3%		

Class Level Information					
Class	Levels	Values			
Tratamiento	3	T3%	T6%	T9%	
Number of Observations Read		45			
Number of Observations Used		45			
Dependent Variable: Hinchamiento volumétrico a las 24 horas de inmersión					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Tratamiento	2	3.74049333	1.87024667	0.68	0.5116
Error	42	115.3356267	2.7460863		
Corrected Total	44	119.0761200			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	hinchamiento24h Mean		
0.031413	73.25959	1.657132	2.262000		
T Grouping					
	Mean	N	Tratamiento		
A	2.6567	15	T9%		
A	2.1533	15	T6%		
A	1.9760	15	T3%		

ANEXO 20

**DATOS PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL
ESPESOR DE LOS TABLEROS**

CÓDIGO	LADO 1 (cm)	LADO 2 (cm)	ÁREA (cm²)	CARGA (kg)	ESPESOR INICIAL (mm)	ESPESOR FINAL (mm)	REDUCCIÓN (%)
1 I 0%	5.00	5.10	25.50	10289.86	10.00	9.75	2.50
2 I 0%	5.15	5.20	26.78	10308.20	10.10	9.95	1.49
3 I 0%	5.00	5.10	25.50	10331.64	10.00	9.85	1.50
4 I 0%	5.00	5.00	25.00	10246.05	10.00	9.75	2.50
1 II 0%	4.95	5.10	25.25	10247.06	10.00	9.60	4.00
2 II 0%	5.05	5.10	25.76	10674.03	10.15	9.80	3.45
3 II 0%	5.00	5.10	25.50	10431.50	10.00	9.82	1.80
4 II 0%	5.05	5.00	25.25	10364.25	10.00	9.60	4.00
1 III 0%	5.10	5.00	25.50	10324.51	10.10	9.99	1.09
2 III 0%	5.00	5.10	25.50	10510.99	10.00	9.82	1.80
3 III 0%	5.05	5.05	25.50	10510.99	10.00	9.81	1.90
4 III 0%	5.10	5.00	25.50	10237.89	10.00	9.54	4.60
CÓDIGO	LADO 1 (cm)	LADO 2 (cm)	ÁREA (cm²)	CARGA (kg)	ESPESOR INICIAL (mm)	ESPESOR FINAL (mm)	REDUCCIÓN (%)
1 I 3%	5.10	5.30	27.03	10584.35	10.00	10.00	0.00
2 I 3%	5.10	5.20	26.52	11127.48	8.05	8.00	0.62
3 I 3%	5.25	5.00	26.25	10569.07	9.05	8.99	0.66
4 I 3%	5.15	5.20	26.78	10699.50	8.05	8.00	0.62
1 II 3%	5.20	5.30	27.56	10255.22	9.00	8.95	0.56
2 II 3%	5.05	5.20	26.26	10580.28	8.50	8.32	2.12
3 II 3%	5.20	5.15	26.78	10927.76	9.10	8.98	1.32
4 II 3%	5.25	5.15	27.04	10960.36	9.00	8.56	4.89
1 III 3%	5.35	5.15	27.55	11103.02	7.95	7.84	1.38
2 III 3%	5.30	5.20	27.56	10990.93	7.05	7.03	0.28
3 III 3%	5.00	5.20	26.00	10579.26	7.30	7.09	2.88
4 III 3%	5.20	5.10	26.52	10601.68	7.00	6.78	3.14

Continuación

CÓDIGO	LADO 1 (cm)	LADO 2 (cm)	ÁREA (cm²)	CARGA (kg)	ESPELOR INICIAL (mm)	ESPELOR FINAL (mm)	REDUCCIÓN (%)
1 I 6%	5.00	5.15	25.75	11166.20	9.20	8.68	5.65
2 I 6%	5.00	5.00	25.00	10441.69	10.00	9.78	2.20
3 I 6%	5.05	5.00	25.25	10423.35	8.80	8.23	6.48
4 I 6%	5.05	5.10	25.76	10364.25	9.80	9.28	5.31
1 II 6%	5.10	5.20	26.52	10481.43	9.00	8.6	4.44
2 II 6%	5.05	5.20	26.26	10465.13	9.60	9.22	3.96
3 II 6%	5.20	5.05	26.26	10543.59	10.00	9.72	2.80
4 II 6%	5.20	5.00	26.00	10384.63	10.00	9.48	5.20
1 III 6%	5.15	5	25.8	10516.1	9.2	9.12	0.87
2 III 6%	5.00	5.20	26.00	10426.41	9.10	9.03	0.77
3 III 6%	5.10	5.20	26.52	10530.35	9.00	8.95	0.56
4 III 6%	5.15	5.20	26.78	10417.24	9.62	9.6	0.21
CÓDIGO	LADO 1 (cm)	LADO 2 (cm)	ÁREA (cm²)	CARGA (kg)	ESPELOR INICIAL (mm)	ESPELOR FINAL (mm)	REDUCCIÓN (%)
1 I 9%	5.20	5.10	26.52	10442.71	11.00	10.32	6.18
2 I 9%	5.00	5.10	25.50	10370.36	11.10	10.12	8.83
3 I 9%	5.15	5.20	26.78	10809.55	10.90	10.32	5.32
4 I 9%	5.10	5.10	26.01	10542.57	11.00	10.32	6.18
1 II 9%	5.20	5.30	27.56	10507.93	11.22	10.32	8.02
2 II 9%	5.20	5.20	27.04	10479.40	10.52	10.32	1.90
3 II 9%	5.20	5.20	27.04	10564.99	11.00	10.32	6.18
4 II 9%	5.15	5.10	26.27	10839.10	10.42	9.95	4.51
1 III 9%	5.00	5.00	25.00	10442.7	11.00	10.32	6.18
2 III 9%	5.10	5.20	26.52	10370.36	10.72	10.12	5.60
3 III 9%	5.10	5.10	26.01	10809.55	10.70	10.32	3.55
4 III 9%	5.10	5.05	25.76	10542.57	11.00	10.32	6.18

ANEXO 21

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE RESPUESTA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL ESPESOR DE LOS TABLEROS

Class	Levels	Values			
Tratamiento	3	T3% T6% T9%			
Number of Observations Read			36		
Number of Observations Used			36		
Dependent Variable: Reducción del espesor					
		Sum of			
Source	DF	Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Tratamiento	2	106.2794000	53.1397000	15.11	<.0001
Error	33	116.0666750	3.5171720		
Corrected Total	35	222.3460750			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Reducción Mean		
0.477991	53.77527	1.875412	3.487500		
T Grouping					
	Mean	N	Tratamiento		
A	5.7192	12	T9%		
B	3.2042	12	T6%		
C	1.5392	12	T3%		

ANEXO 22

DATOS PARA DETERMINAR EL MODULO DE RUPTURA (MOR) DE LOS TABLEROS

CÓDIGO	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	DEFLEXIÓN MÁXIMA (mm)	CARGA MÁXIMA (kg)	MOR (kg/cm²)
1 I 0%	300	50.63	10.03	0.55	16	94.24
2 I 0%	300	50.22	10.27	0.24	11	62.30
3 I 0%	300	50.93	10.92	0.27	10	49.40
1 II 0%	300	51.63	10.77	0.32	6	30.06
2 II 0%	300	51.70	10.77	0.55	7	35.02
3 II 0%	300	50.96	10.60	0.48	8	41.92
1 III 0%	300	50.80	10.70	0.63	13	67.06
2 III 0%	300	50.97	10.62	0.75	11.5	60.01
3 III 0%	300	50.87	10.66	0.53	10	51.90
CÓDIGO	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	DEFLEXIÓN MÁXIMA (mm)	CARGA MÁXIMA (kg)	MOR (kg/cm²)
1 I 3%	266	53.24	9.87	0.37	6.00	34.71
2 I 3%	258	52.40	9.05	0.59	6.00	41.94
3 I 3%	256	53.82	8.78	0.70	6.00	43.39
1 II 3%	261	54.43	9.73	0.43	7.00	40.75
2 II 3%	263	52.54	9.60	0.42	7.00	43.37
3 II 3%	262	53.35	8.63	0.63	8.00	60.40
1 III 3%	260	53.60	9.08	0.42	7.00	47.52
2 III 3%	260	52.32	9.38	0.55	7.00	45.62
3 III 3%	258	52.15	8.91	0.60	8.00	57.97

Continuación

CÓDIGO	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	DEFLEXIÓN MÁXIMA (mm)	CARGA MÁXIMA (kg)	MOR (kg/cm²)
1 I 6%	261	52.98	10.44	0.52	5.50	28.57
2 I 6%	257	53.00	10.60	0.78	5.50	27.71
3 I 6%	259	52.23	10.23	0.97	6.50	35.67
1 II 6%	259	51.65	10.39	0.51	4.00	21.52
2 II 6%	260	51.78	9.77	0.41	4.00	24.28
3 II 6%	262	52.35	8.71	0.55	4.50	33.99
1 III 6%	261	52.55	9.78	0.89	5.50	32.83
2 III 6%	261	52.75	10.04	1.03	5.00	28.21
3 III 6%	261	51.47	10.02	0.99	5.50	31.93
CÓDIGO	LONGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ESPESOR (mm)	DEFLEXIÓN MÁXIMA (mm)	CARGA MÁXIMA (kg)	MOR (kg/cm²)
1 I 9%	267	53.90	11.31	0.35	5.00	21.76
2 I 9%	263	54.30	11.37	0.53	7.00	29.92
3 I 9%	267	54.19	11.15	0.31	6.00	26.72
1 II 9%	262	53.47	11.22	0.97	8.00	35.65
2 II 9%	262	54.10	10.92	0.98	7.00	32.55
3 II 9%	261	53.15	10.98	0.89	7.00	32.77
1 III 9%	263	53.70	10.27	2.00	7.00	37.08
2 III 9%	261	52.65	10.26	1.59	6.00	32.48
3 III 9%	260	52.20	10.25	1.79	6.00	32.82

ANEXO 23

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LA VARIABLE RESPUESTA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN ESTÁTICA (MOR) DE LOS TABLEROS

Class	Levels	Values			
Tratamiento	3	T3% T6% T9%			
Number of Observations Read			27		
Number of Observations Used			27		
Dependent Variable: Modulo de ruptura (MOR)					
		Sum of			
Source	DF	Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Tratamiento	2	1518.931443	759.465722	20.62	<.0001
Error	24	883.816369	36.825682		
Corrected Total	26	2402.747812			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	MOR Mean		
0.632164	17.02969	6.068417	35.63433		
T Grouping					
	Mean	N	Tratamiento		
A	46.185	9	T3%		
B	31.305	9	T9%		
B	29.413				

