

**ELABORACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO CON MATRIZ DE YESO Y
REFORZADO CON FIBRA DE FIQUE OBTENIDO POR EXTRUSIÓN**

**FELIPE PARAMO PARRA
JESUS ENRIQUE RIVERA GIRALDO**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MATERIALES
SANTIAGO DE CALI
2017**

**ELABORACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO CON MATRIZ DE YESO Y
REFORZADO CON FIBRA DE FIQUE OBTENIDO POR EXTRUSIÓN**

**FELIPE PARAMO PARRA
JESUS ENRIQUE RIVERA GIRALDO**

**DIRECTOR
Ing. SILVIO DELVASTO ARJONA, MSc., Ph.D.**

**CO-DIRECTOR
Ing. CESAR AUGUSTO COCUY**

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero de materiales

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MATERIALES
SANTIAGO DE CALI
2017**

Nota de aceptación

Director

Co-Director

Evaluador

Evaluador

Tabla Contenido.

RESUMEN.....	8
INTRODUCCIÓN.....	9
OBJETIVOS.....	10
1.1. Objetivo general.	10
1.2. Objetivos específicos.....	10
2. MARCO TEÓRICO.	11
2.1. YESO.....	11
2.1.1. SULFATO CÁLCICO SEMIHIDRATO (SH).	12
2.1.2. ESCAYOLA Y YESO DE PREFABRICADOS.....	12
2.1.3. ADITIVOS.	13
2.1.3.1. RETARDANTES DEL FRAGUADO.	13
2.1.3.2. FLUIDIFICANTES.....	13
2.2 FIBRAS NATURALES.....	14
2.2.1 COMPONENTES DE LAS FIBRAS NATURALES.....	15
2.3. FIBRA DE FIQUE.....	16
2.3.1. USOS DE LA FIBRA DE FIQUE.	17
2.4. CONCEPTOS GENERALES DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MATERIALES REFORZADOS CON FIBRAS.	17
2.4.1. INFLUENCIA DE LA LONGITUD DE LA FIBRA.	17
2.4.2. INFLUENCIA DE LA ORIENTACIÓN Y DE LA CONCENTRACIÓN DE LA FIBRA.	17
2.4.3. COMPATIBILIDAD ENTRE FIBRA Y MATRIZ.....	18
2.4.4. COMPUESTOS FIBROREFORZADOS DE MATRIZ CEMENTICIA.	18
2.5. PROCESO DE EXTRUSIÓN.....	18
2.5.1. Aspectos que influyen la extrusión.....	20
3. ESTADO DEL ARTE.....	21
4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.	22
4.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	22
4.2. SELECCIÓN DE LOS MATERIALES.	22
4.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS.....	23
4.3.1. CARACTERIZACIÓN DEL YESO.	23
4.3.2. CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA.	23
4.3.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MONTMORILLONITA.....	23

4.3.3. DETERMINACION DEL RETARDO DEL FRAGUADO DEL YESO.....	24
4.4. DISEÑO Y PRODUCCIÓN DE MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ DE YESO POR MÉTODO DE EXTRUSIÓN.....	25
4.4.1. EXTRUSION POR REOMETRO CAPILAR.	25
4.4.1.2. ENSAYOS DE RESISTENCIA MECANICA. ENSAYO DE FLEXION Y DE COMPRESION.	26
4.4.1.3. DENSIDAD APARENTE POR MÉTODO DE LA PARAFINA.....	27
4.4.1.4. CALCULO DEL INDICE DE PLASTICIDAD (Método de Moore).	29
4.4.2. EXTRUSORA DE TORNILLO Y PROCESO DE EXTRUSIÓN.....	31
4.4.2.1. ENSAYOS DE RESISTENCIA MECÁNICA DE LAS PROBETAS ELABORADAS POR EXTRUSIÓN DE TORNILLO.....	32
4.5. TECNICAS INSTRUMENTALES Y ANALITICAS.....	33
5. ANÁLISIS Y RESULTADOS.	33
5.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS.....	33
5.1.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MONTMORILLONITA.....	33
5.1.2. CARACTERIZACIÓN DEL YESO.	36
5.1.3. CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA.	36
5.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MATRIZ.....	39
5.2.1. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN AGUA/YESO	39
5.2.2. DENSIDAD APARENTE.	39
5.2.2.1. POROSIDAD ABIERTA.....	41
5.2.3. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL COMPUESTO DE YESO.....	43
5.2.3.1. EVALUACIÓN DE VIGAS DE FLEXIÓN OBTENIDA POR EXTRUSIÓN EN REOMETRO CAPILAR.....	43
5.2.3.2. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN POR EXTRUSIÓN DE TORNILLO.....	46
5.2.3.3. EVALUACIÓN DE CILINDROS A COMPRESIÓN OBTENIDOS POR EXTRUSIÓN EN REOMETRO CAPILAR.	47
5.2.3.4. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN POR EXTRUSIÓN DE TORNILLO.....	48
6.3. ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA. MEB DEL COMPUESTO.....	50
7. CONCLUSIONES.	52
BIBLIOGRAFÍA.....	53

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Energía necesaria en la fabricación de materiales de construcción (Villanueva et al., 2001).....	11
Tabla 2. Caracterización del yeso.	23
Tabla 3. Caracterización de la fibra de fique.	23
Tabla 4. Caracterización de la Montmorillonita.....	24
Tabla 5. Densidad aparente.	28
Tabla 6. Índice de plasticidad de mezclas con fibra al 0,5%*.	29
Tabla 7. Índice de plasticidad de mezclas con fibra al 1%*.	30
Tabla 8. Características de la Extrusora.....	31
Tabla 9. Datos para determinar el Límite Líquido.	34
Tabla 10. Datos para determinar el Límite Plástico.	35
Tabla 11. Características en estado endurecido.	36
Tabla 12. Datos del diámetro de la fibra de fique.	37
Tabla 13. Densidad aparente de las muestras del material compuesto.....	39
Tabla 14. Valores de densidad aparente y resistencia a la flexión de un compuesto de yeso reforzado con fibras de PET reciclado (ERDEM et al., 2016).	41
Tabla 15. Porosidad abierta de las muestras del material compuesto.....	42
Tabla 16. Resultados de resistencia a la flexión de las muestras extruidas por reómetro capilar en la Máquina Universal de ensayos.	43
Tabla 17. Resistencia a la flexión de la muestra R33F05 en la extrusora de tornillo.	46
Tabla 18. Resultados de resistencia a la compresión de las muestras extruidas por reómetro capilar en la Máquina Universal de ensayos.	47
Tabla 19. Resistencia a la compresión de la muestra R33F05 en la extrusora de tornillo. ..	49

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Disposición de las fibrilas, microfibrilas y celulosa en las paredes celulares de una fibra vegetal. (Thomas et al., 2011).	15
Figura 2. Proceso Hatschek (Maldonado, 2010).	19
Figura 3. Esquema de extrusión al vacío (Maldonado, 2010).	19
Figura 4. Curvas del comportamiento reológico de fluidos: (1) newtoniana, (2) Bingham, (3) pseudoplástico (4) pseudoplástico con límite elástico, (5) dilatante; (6) con tensión dilatante de flujo (Maldonado, 2010).	20
Figura 5. Movimiento de las fibras en extrusión (Maldonado, 2010).	21
Figura 6. Cazuela de Casa Grande para determinar el LL y recipientes con muestras de montrillonita para determinar el LP.	24
Figura 7. Ensayo de aguja Vicat para determinar tiempo de fraguado utilizando ácido cítrico.	25
Figura 8. Estructura de reómetro capilar adaptado para extrusión de yeso.	26
Figura 9. Ensayo de flexión.	27
Figura 10. Ensayo de compresión en máquina universal de ensayos.	27
Figura 11. Montaje del método de parafina para hallar densidad aparente.	28
Figura 12. Ensayo de índice de plasticidad.	30
Figura 13. Panel de control, tabla de características del motor y manómetro de la bomba de vacío. (Castaño et al. 2014).	31
Figura 14. Estructura física de la extrusora y componentes (Castaño et al, 2014).	32
Figura 15. Proceso de extrusión de yeso por tornillo con adición e fibra de 0.5% y $R=A/Y=0,33$	32
Figura 16. Ensayos de compresión y flexión de las probetas obtenidas por el proceso de extrusión de tornillo.	33
Figura 17. Gráfica %Humedad vs Número de golpes del ensayo. Limite Líquido.	35
Figura 18. Diagrama de cajas y alambres del Diámetro de la fibra.	37
Figura 19. Curva fuerza vs extensión de la fibra.	38
Figura 20. Diagrama de Cajas y Alambres del Esfuerzo Máximo de tensión de la fibra de fique.	38
Figura 21. Densidad aparente del material compuesto.	41
Figura 22. Porosidad abierta del material compuesto.	43
Figura 23. Resistencia a la flexión de las muestras extruidas por reómetro capilar en la Máquina Universal de ensayos.	44
Figura 24. Vigas de yeso parcialmente fracturadas con adición de 0.5% de fibra de fique y 0,33 de $R=A/Y$	45
Figura 25. Viga de yeso fracturada con adición de 0.5 % de fibra de fique 33% de $R=A/Y$	46
Figura 26. Resistencia a la flexión de probetas obtenidas por extrusión de tornillo.	47
Figura 27. Resistencia a la flexión de las muestras extruidas por reómetro capilar en la Máquina Universal de ensayos.	48
Figura 28. Resistencia a la compresión de probetas obtenidas por extrusión de tornillo.	49
Figura 29. SEM de pieza fabricada por extrusión de tornillo con adición de fibra de 0,5 y $R=A/Y$ de 0,33. (a – b)	50
Figura 30. SEM de piezas obtenidas por extrusión de tornillo (a, b, c) y por extrusión capilar (d) con adición de 0,5 % de fibra y $R=A/Y$ de 33%	51
Figura 31. SEM-fotomicrografías de cristales de FGD-G después de la hidratación (a), FGD-P con 10% en peso de glucosa (b), 0,03% en peso de ácido cítrico (c), 0,4% en peso de NaHCO_3 (d) (Chindaprasirt et al., 2011).....	51

RESUMEN.

En este trabajo de grado se evaluó la factibilidad de emplear la fibra de hoja de fique como reforzante en una matriz adicionada de yeso comercial para la fabricación de elementos constructivos por medio del proceso de extrusión.

Se desarrollaron materiales compuestos de yeso fibrorreforzados con diferentes porcentajes en peso (0,5% y 1%) de fibras cortas (longitud fibra = 6mm) orientadas al azar y 8% en peso de arcilla de alta plasticidad (Montmorillonita). Donde de manera previa se llevó a cabo un proceso de caracterización de las materias primas – fibra de fique, yeso, adiciones.

Las mezclas con posibilidad de extrusión, con relación R, agua/yeso de 0,32 a 0,35, se mezclaron con los porcentajes de fibra en peso (0,5% y 1%) y se extruyeron en el montaje de reómetro capilar de la máquina de ensayos INSTROM 3369. Por medio de la caracterización de estas muestras mediante ensayos mecánicos de resistencia a la flexión y compresión, densidad aparente e índice de plasticidad indirecta por Método Moore, se determinó que la mejor mezcla para extruir en la extrusora de tornillo Ultra Dual Wave Auger de desaireado Pug Mill, es la R33F05, $R=0,33$, adición de fibra en peso de 0,5%. El índice de plasticidad Moore de esta mezcla fue de $I_p=0,32$ y fue el más cercano al índice de plasticidad de una arcilla extruible ($I_p=0,8$) reportado por Gines et al., (1996).

Los resultados de los ensayos de resistencia mecánica a la flexión y compresión de la mezcla R33F05 extruida por reómetro capilar fueron 3,97 MPa y 1,38 MPa respectivamente. La densidad aparente fue de 1,14 gr/cm³. Luego se procedió a extruir esta mezcla (R33F05) en la extrusora de tornillo doble y se caracterizó mediante ensayos mecánicos de resistencia a la flexión y compresión, los resultados de estos ensayos fueron 0,84 MPa y 1,62 MPa. El análisis de la microestructura del material compuesto y la interfaz de la matriz de yeso y la fibra de fique se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). En las imágenes SEM se pudo notar que la matriz del material compuesto de yeso resultante presenta una estructura porosa y que la fibra presenta una buena adherencia a la matriz.

PALABRAS CLAVES: Fibra de fique, Matriz de yeso, Extrusión.

INTRODUCCIÓN.

El crecimiento de la población mundial se corrobora con el aumento del consumo individual promedio principalmente de materias primas que ha llegado a niveles muy altos. Por otra parte, hay una búsqueda creciente de materiales y métodos "verdes" o "ecológicos". Tal tendencia y la conciencia a un comportamiento respetuoso del medio ambiente y el aumento de la demanda han llevado progresivamente al sector primario a buscar sustitutos para los materiales con los atributos de contaminantes y / o de fuentes no renovables de todo el proceso de producción (Sena et al., 2013).

“Recientemente, las preocupaciones de desarrollo sostenible han alentado los esfuerzos hacia el aumento de la utilización eficiente de los recursos obtenidos de materias primas y reducir la producción de desechos. En este contexto, la utilización de productos agrícolas como un recurso alternativo de fibras naturales se ha destacado. La reutilización de estos residuos da lugar a una reducción significativa de los residuos generados, por lo tanto disminuye el impacto ambiental. Aparte de eso, la reutilización de estos productos por otros productos de valor agregado manufacturero se convertirá en una de las fuentes de ingresos adicionales para los agricultores y además, desarrolla la diversificación de la industria agrícola” (Yusofa et al., 2015).

La fibra de fique o cabuya es una fibra natural disponible comercialmente en Colombia con características similares al Sisal y es apropiada para las aplicaciones de vivienda de bajo coste cuando se incorpora en una base de matriz de cemento Portland, que es adecuado para la fabricación de elementos de diversas formas utilizando procesos de producción simples (Tonoli et al., 2011). El fique y su fibra, sus jugos, sus bagazos y su estopa, constituye una variada fuente de ilimitados productos amigables con el medio ambiente, con las necesidades del mercado global y con sus productores. FEDEFIQUE, dice que, la fibra del fique ha sido ampliamente utilizada en el territorio colombiano y ha estado relacionada con las actividades de la vida campesina desde tiempos prehistóricos. Su utilización varía de acuerdo con las condiciones socioeconómicas y culturales del medio, dando como resultado que algunos artículos que se producían en volúmenes como las alpargatas o los costales, hayan disminuido su producción. Es por lo anteriormente mencionado, que este trabajo de grado se enfoca en darle a la fibra de fique un valor agregado como material reforzante en una matriz de yeso adicionada con el fin de mitigar el impacto ambiental que genera la hoja de fique.

Este trabajo de grado contó con el apoyo del proyecto de investigación del Grupo de Materiales Compuestos (GMC) de la Universidad del Valle, proyecto denominado *“Investigación de un material cementicio ecoeficiente para elementos de construcción de bajo costo”* contrato FP44842-399- 2015, financiado por el PATRIMONIO AUTÓNOMO FONDO NACIONAL DE FINANCIAMIENTO PARA LA CIENCIA, LA TECNOLOGÍA Y LA INNOVACIÓN, FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS- COLCIENCIAS”, el cual es dirigido por el profesor Silvio Delvasto Arjona, MSc., Ph.D.

OBJETIVOS.

1.1. Objetivo general.

Desarrollar un material compuesto de matriz de yeso adicionado y reforzado con fibras de fique corta y orientada al azar para su aplicación en elementos constructivos obtenidos por el proceso de extrusión.

1.2. Objetivos específicos.

- Caracterización física y mecánica de la fibra de fique.
- Evaluar el efecto de la variación en la cantidad de fibra utilizada sobre las propiedades mecánicas del material compuesto.
- Caracterización físico-mecánica del material compuesto desarrollado.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. YESO

“Con la palabra yeso se designan en castellano varios productos diferentes. Por una parte, la piedra natural, compuesta químicamente por sulfato cálcico cristalizado conjuntamente con agua, en la proporción de dos moléculas de agua por cada molécula de sulfato cálcico, o sea *sulfato cálcico dihidrato*, que también se denomina *aljez* o *piedra de yeso*. Por otra parte, el producto en polvo obtenido por calcinación y molienda de la piedra antes descrita, que está compuesto por varias fases anhidras y semihidratadas del sistema sulfato cálcico-agua y que, al amasarse con agua, tiene la propiedad de poder endurecer mediante un proceso físico-químico, denominado fraguado. El producto en estado plástico formado por la mezcla del yeso y el agua se denomina *pasta de yeso*. Y si se le añade arena o carga, se llama de *mortero de yeso*. Por último, una vez endurecido el producto vuelve a transformarse en yeso, o sea en sulfato cálcico dihidrato. Algunos autores emplean el término *rehidrato*, para diferenciarlo del anterior, ya que, aunque la composición química es igual, la estructura física es más porosa. El término *escayola* se utiliza para designar un yeso semihidratado de especial pureza, blancura y finura. Y el término *estuco* se refiere a un revestimiento imitando mármol, realizado con yeso, cal o ambos, generalmente para interiores” (Villanueva et al., 2001).

La piedra de yeso o aljez se encuentra abundantemente en la naturaleza (sulfato cálcico dihidrato). El sulfato cálcico anhidro también se encuentra en estado natural y es denominado anhidrita natural, con el fin de diferenciarla de la obtenida por deshidratación del aljez. En muy raras ocasiones el sulfato cálcico semihidratado se encuentra en la naturaleza, se denomina basanita. Villanueva et al., (2001), mencionan que, la transformación de la piedra de yeso en yeso calcinado requiere un proceso en temperaturas bajas. Menos de 200°C para el semihidrato y entre 400-700°C para las anhidritas. Este proceso requiere comparativamente menores cantidades de energía que otros productos de la construcción, tal como se aprecia en la Tabla 1

Tabla 1. Energía necesaria en la fabricación de materiales de construcción (Villanueva et al., 2001).

PRODUCTO	ENERGÍA NECESARIA (Kw/h por t)
Acero	13.400
Aluminio	84.800
Cemento	2.400
Ladrillo Cerámico	1.760
Vidrio plano	12.000
Yeso	1.200 equivalente a 35 kg de fuel

El desarrollo de todo producto de yeso se inicia con la extracción de un mineral llamado yeso, cuyo color puede ser gris o blanco. El mineral básico está compuesto de sulfato de calcio químicamente combinado con agua de cristalización, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. El agua combinada representa aproximadamente 20% del peso del mineral de yeso. Es esta característica la que da al yeso que su propiedad de perdida al fuego sea elevada y lo haga tan adaptable para la construcción (Leavitt et al, 2000). Este yeso calcinado que se obtiene por el proceso de calcinación y molienda puede utilizarse fácilmente para la fabricación de productos de yeso. Singh et al (1994), dice que, estos productos de yeso además de resistentes al fuego, son baratos, poseen propiedades de aislamiento acústico y térmico y son superiores a un *particleboard* en fuerza y manejabilidad.

2.1.1. SULFATO CÁLCICO SEMIHIDRATO (SH)

“Deshidratando el sulfato cálcico dihidrato (piedra de yeso) por encima de 100°C mediante la rotura de los enlaces más débiles de puente de hidrógeno, se produce el semihidrato, que se abrevia, SH, se presenta en dos formas, alfa y beta con características físicas y microestructurales diferentes.

La forma de SH alfa se produce bajo presión (autoclave) y se caracteriza por tener sus cristales compactos. La forma de SH beta se produce en atmósfera normal y tiene las formaciones cristalinas más fragmentadas y holgadas. Los yesos alfa son caracterizados por necesitar muy bajo factor de agua en el amasado (0.3 - 0.4) y por tanto producir unos rehidratos muy compactos, duros y resistentes. Los yesos beta se caracterizan por tener un factor agua/yeso más elevado (0.8) y dar rehidratos más porosos que los anteriores” (Villanueva et al., 2001).

2.1.2. ESCAYOLA Y YESO DE PREFABRICADOS

“La escayola, yeso semihidratado de alta pureza y finura, se utiliza principalmente en decoración y en productos prefabricados, como la producción de placas de yeso laminado, que tanto se están comenzando a utilizar para la construcción de tabiques, trasdosados y cielorrasos.

El yeso de prefabricados, denominado en las normas como YP, se utiliza en la prefabricación de bloques o paneles para tabiques. Es principalmente yeso semihidrato beta (SH beta). Se le puede añadir DH o piedra de yeso para acelerar el fraguado” (Villanueva et al., 2001).

Por otra parte, los productos de yeso pueden ser prefabricados y son fáciles de montar, los paneles de yeso laminado reforzado con fibras son muy populares en varios países. Estos paneles son de 12 mm de grosor de yeso reforzado con fibra orgánica. Las dimensiones normales de estos boards son 120 x 60 cm. Los boards son conocidos por su ligereza, aislamiento térmico y una elevada perdida al fuego. Estos se producen intercalando las

fibras de sisal entre dos capas de lechada de yeso, seguido de endurecimiento, desmoldeo y finalmente secado en el sol directo o en secadoras. (Singh Manjit y Garg Mridul., 1994).

2.1.3. ADITIVOS

Se consideran aditivos los productos que en pequeño porcentaje entran en la composición final para modificar o añadir alguna propiedad. Para asegurar la correcta dosificación y la homogeneidad del producto se considera hacer la adición en la fábrica o laboratorio, no directamente en la obra. (Villanueva et al., 2001).

2.1.3.1. RETARDANTES DEL FRAGUADO

“Hay tres grupos de productos:

- a) Los *que actúan como coloides y retrasan la formación de cristales*, productos de elevado peso molecular como: colas animales, caseína, pepsina, albúmina, gelatina, proteínas hidroziladas, etc. La mayoría son también espesantes.
- b) Los *que disminuyen la solubilidad del SH en agua*, productos que igualan las solubilidades y disminuye la velocidad de reacción. Alcohol etílico, ácido cítrico, ácido acético, ácido fosfórico, ácido bórico, ácido láctico y sus sales, acetona y carbonato sódico. Son los que utilizan con mayor frecuencia.
- c) Productos *que modifican la estructura cristalina del DH*: acetato de calcio, carbonato de calcio y de magnesio” (Villanueva et al., 2001).

2.1.3.2. FLUIDIFICANTES

“En la rehidratación del yeso se necesita menos agua que la necesaria para su amasado. Por lo que el agua sobrante se evapora dejando una estructura porosa, que disminuye la densidad, la dureza y la resistencia del producto fraguado. Estos productos adicionados pueden disminuir el agua de mezclado, dando la suficiente plasticidad como para permitir el empleo de la pasta, consiguiendo productos más compactos, densos y resistentes.

Los fluidificantes utilizados en el hormigón de cemento, siempre que su color sea compatible, pueden usarse como fluidificantes de los yesos.

La adición de carbonato de calcio en pequeñas cantidades, además de modificar el pH de la pasta, tiene un cierto efecto fluidificante, al mejorar la trabajabilidad” (Villanueva et al., 2001).

2.2 FIBRAS NATURALES

“Las fibras naturales se pueden derivar ya sea a partir de plantas (tales como lino o cáñamo), producidas por animales (como la seda o la seda de araña) o de minerales (como el asbesto). La utilización de fibras naturales como material de refuerzo en materiales compuestos se traduce en mayor resistencia y rigidez específica en comparación con los compuestos reforzados con fibras sintéticas. También presentan un manejo más seguro y las condiciones de trabajo en comparación con los refuerzos sintéticos, debido a sus excelentes propiedades como:

- Son ambientalmente amigables tanto en el proceso, producción y como desecho al final del ciclo.
- Son renovables y se necesitan menor cantidad de energía de entrada por unidad de producción.
- Propiedades similares a aquellos materiales con refuerzo de fibra de vidrio.
- Mejor elasticidad.
- Son menos abrasivos durante el proceso de fabricación.
- Absorben bien las vibraciones y por lo tanto el sonido.

Sin embargo, estos compuestos presentan también algunas desventajas:

- La calidad de las fibras es dependiente de las condiciones naturales.
- Se requieren grandes áreas de cultivo si se empieza una producción a escala.
- La baja densidad se vuelve una desventaja durante el proceso.

Cabe recalcar el aspecto más interesante acerca de las fibras naturales es su impacto positivo con el medio ambiente. Las bio-fibras son un recurso renovable con una producción que requiere bajo consumo de energía" (Castaño et al., 2014).

Las fibras obtenidas a partir de las diversas partes de las plantas se conocen como fibras vegetales. Las fibras vegetales incluyen el líber, hoja y semilla / fibras de frutas. El líber consiste en un núcleo de madera rodeada por un vástago. Dentro del vástago, hay una serie de haces de fibras, cada que contiene células de las fibras o filamentos individuales. Algunos ejemplos son el lino, cáñamo, yute, kenaf y ramio. Fibras de la hoja como el sisal, abacá, plátano y henequén son más gruesas de fibras liberianas. El algodón es la fibra de la semilla más común. Otros ejemplos incluyen coco y aceite de palma. Otra fuente de la lignocelulosa puede ser a partir de residuos agrícolas tales cáscaras de semillas de la flor del sol de un aceite unidad de procesamiento y el bagazo de un ingenio azucarero. Las propiedades de las fibras naturales varían considerablemente dependiendo del diámetro de la fibra, estructura, grado de polimerización, estructura cristalina y la fuente, si las fibras se toman del tallo de la planta, hoja o semilla, y en las condiciones de crecimiento de la planta. (S. Thomas et al., 2011).

Las fibras naturaleza vegetal se han vuelto muy populares entre la comunidad científica como alternativas viables a las fibras de vidrio en plásticos reforzados con fibra. Estas fibras lignocelulósicas tienen densidades más bajas, su costo de producción es relativamente bajo, consumen menos energía durante la producción, no presentan abrasión

en máquinas y no tienen ningún riesgo para la salud cuando son inhaladas; además de ser ampliamente disponibles, son renovables y biodegradables. Algo que las hace aún más atractivas es que muchas de las fuentes de fibra son de desechos agrícolas actuales. (Sapuan et al., 2011).

Una fibra vegetal simple u ordinaria es una sola célula típicamente de una longitud de 1 a 50 mm y un diámetro de alrededor de 10-50 μm . Las fibras vegetales son como tubos microscópicos, es decir, las paredes celulares que rodean el lumen central. El lumen contribuye al comportamiento de absorción de agua de las fibras vegetales. La fibra consta de varias paredes celulares. Estas paredes celulares se forman a partir de refuerzo de microfibrilas de celulosa semi-cristalina orientadas incrustadas en una matriz de hemicelulosa-lignina de composición variable. Estas microfibrilas tienen típicamente un diámetro de aproximadamente 10-30 nm y se componen de 30-100 moléculas de celulosa en la conformación de cadena extendida y proporcionar resistencia mecánica a la fibra. La figura 1, muestra la disposición de las fibrilas, microfibrilas y celulosa en las paredes celulares de una fibra vegetal. (Thomas et al., 2011).

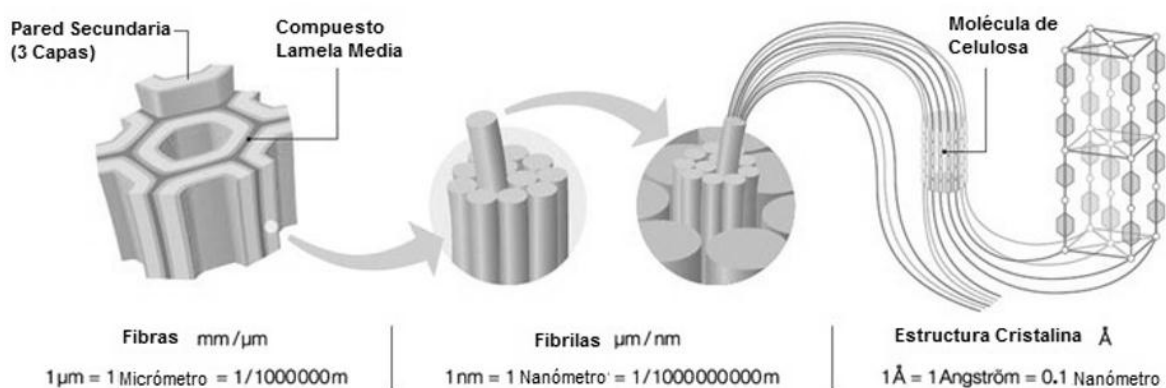


Figura 1. Disposición de las fibrilas, microfibrilas y celulosa en las paredes celulares de una fibra vegetal. (Thomas et al., 2011).

2.2.1 COMPONENTES DE LAS FIBRAS NATURALES

Las fibras de naturaleza vegetal, químicamente se componen principalmente de tres sustancias de base, de naturaleza polimérica: celulosa, hemicelulosa y lignina. También están presentes, en menor cantidad, otras sustancias denominadas extractables. (Castaño et al., 2014).

- **Celulosa**

“La celulosa es un homopolisacárido compuesto de subunidades de glucosa más específicamente formado por la sucesión de una gran cantidad de moléculas de anhidroglucosa, unidas por enlaces (1-4) β -glucosídicos. Es decir moléculas de glucosa que han perdido una molécula de agua. La celulosa es una sustancia físicamente heterogénea, contiene regiones con características físicas distintas: amorfas y cristalinas.

La región amorfa, menos densa, es más accesible a solventes y reactivos químicos, es más blanda y flexible. Las zonas cristalinas son más densas, más cerradas y estables, resisten mejor la penetración de solventes y reactivos. Su propiedad de resistencia se asocia con su carácter cristalino y la reactividad con su carácter amorfo. La cristalinidad varía con la fuente, además, presenta propiedades como hinchamiento, es decir esta se hincha en presencia de todo líquido polar, por su carácter polar (OH)” (Castaño et al., 2014).

- **Hemicelulosa**

“La Hemicelulosa está ligada a la celulosa. Son polímeros de cadena ramificada y corta, tienen bajo grado de polimerización de 50 a 300, más específicamente se trata de heteropolisácaridos constituidos de unidades estructurales, o azúcares, de distinta naturaleza, tales como las hexosas (glucosa, galactosa, mannososa) y las pentosas (xylosa y arabinosa). Al tener una estructura tan similar a la de la celulosa presenta propiedades químicas semejantes, sin embargo, estas son mucho más amorfas que la celulosa, es por esto que la mayoría de los reactivos químicos las atacan más fácilmente”. (Castaño et al., 2014).

- **Lignina**

Esta es una sustancia compleja, altamente polimerizada, amorfa, rica en carbono y que constituye de 20% a 30% materiales lignocelulósicos. Se encuentra principalmente en medio de las fibras. Entre el 60 a 70% forma la lamela media y sirve para mantener unidas las microfibras entre ellas; el resto está contenida en la pared de la fibra. Es de carácter amorfo, hidrofóbico y termoplástico, es decir se reblandece con el calor, y es además soluble en las soluciones alcalinas o de bisulfito. (Castaño et al., 2014).

2.3. FIBRA DE FIQUE

El Fique tiene su origen en la América Tropical, sobre todo en la Región Andina de Colombia y Venezuela. De allí se difundió hacia la costa Oriental del Brasil, luego a todas las Antillas. En Colombia crece espontáneamente en la Hoya del Río Dagua, en el Valle del Cauca, donde el fique se ve fácilmente en los montes junto con otras especies de gramíneas y cactus o curadores de un suelo seco. En otro lugar de nuestro país se encuentra nativamente en compañía de otras especies vegetales, en el Río Cuja, que desde Arbeláez (Cundinamarca), Pandi y Boquerón en el (Tolima) se ven espontáneamente las plantas. En Riohacha se produce de manera silvestre en compañía de otras especies (FEDEFIQUE et al., 2002).

“La fibra de fique es una fibra vegetal constituida principalmente de hemicelulosa, celulosa y lignina. Estructuralmente esta fibra es unidimensional, larga y delgada, lo que les permite doblarse con facilidad y tener una alta resistencia mecánica. Es originaria de la América Tropical, siendo Colombia el principal productor en el mundo por sus condiciones climáticas seguido de Venezuela, Ecuador y Costa Rica. Al estar clasificadas dentro de la misma familia de plantas vegetales la fibra de fique posee una morfología similar a la del sisal, contiene numerosas fibras alargadas individuales llamadas también células. Cada célula se

compone de cuatro partes principales, a saber, la pared primaria, la pared secundaria, la pared terciaria y el lumen. Las células están unidas entre sí por medio de una lámina media, cuya composición no se tiene claro totalmente, algunos autores aseguran que consiste en hemicelulosa y lignina, para otros se trata de pectina con proteínas y otros se refieren a una combinación de lignina, pectina y hemicelulosa.” (Isaza Ruiz Marllory et al., 2015).

2.3.1. USOS DE LA FIBRA DE FIQUE

La fibra de fique se utiliza en la fabricación de empaques, cordeles, textiles, tapetes, artesanías y saponinas entre otros, son una gama de productos que hasta ahora se han elaborado. Las investigaciones que se han venido adelantando en cuanto al aprovechamiento integral de la planta concluyen que el panorama del fique es más amplio y promisorio, y es que el contar con tantas propiedades en una sola planta les permite definirlo y llamar la atención de diversos mercados y países del mundo entero. Isaza (2015), señala que, por muchos años el único uso que se le daba a la fibra de fique era la producción de cabuya y costales, no obstante, en los últimos años se viene utilizando además como biomanto para proteger sembrados y como agrotexil para reducir los daños por erosión en carreteras, vías, oleoductos y gasoductos, así como para reforzar vigas, columnas y tejas.

2.4. CONCEPTOS GENERALES DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MATERIALES REFORZADOS CON FIBRAS

2.4.1. INFLUENCIA DE LA LONGITUD DE LA FIBRA

Las características mecánicas de los compuestos reforzados con fibras dependen no sólo de las propiedades de la fibra, sino también del grado en que una carga aplicada se transmite a la fibra por medio de la fase matriz. En este proceso de transmisión de carga es muy importante la magnitud de la unión en la interfaz de las fases matriz y fibra. Al aplicar un esfuerzo de tracción, la unión fibra-matriz cesa en los extremos de la fibra y en la matriz se genera un patrón de deformación, en otras palabras, en los extremos de la fibra no hay transmisión de carga desde la matriz. Existe una longitud de fibra crítica para aumentar la resistencia y la rigidez del material compuesto. Esta longitud crítica l_c depende del diámetro d de la fibra, de la resistencia a la tracción σ_f y de la resistencia de la unión matriz-fibra (o resistencia al cizalle de la matriz) (Castaño et al., 2014).

2.4.2. INFLUENCIA DE LA ORIENTACIÓN Y DE LA CONCENTRACIÓN DE LA FIBRA

La disposición u orientación relativa de las fibras y su concentración y distribución influyen radicalmente en la resistencia y en otras propiedades de los materiales compuestos reforzados con fibras. Con respecto a la orientación existen dos situaciones extremas: (1) alineación paralela de los ejes longitudinales de las fibras y (2) alineación al azar. Las fibras

continuas normalmente se alinean o bien se pueden orientar al azar o alinearse parcialmente (Castaño et al., 2014).

2.4.3. COMPATIBILIDAD ENTRE FIBRA Y MATRIZ

“En el desarrollo de materiales compuestos reforzados con fibras, es esencial que exista un perfecto anclaje, esto con el fin de lograr un aumento de propiedades mecánicas. Por otro lado, la incorporación de las fibras naturales hidrofílicas en matrices cementicias da lugar a sistemas heterogéneos de propiedades inferiores debido a una pobre adhesión fibra-matriz. Hay que anotar que las fibras naturales forman enlaces por puente de hidrógeno entre ellas que las mantienen unidas, esto provoca una mala dispersión de estas en la matriz (Castaño et al., 2014).

Otro aspecto muy importante en el desarrollo de los materiales compuestos es la degradación, la degradación de las fibras puede dar lugar a una coloración y pérdida de materias volátiles de olor penetrante, seguido por un deterioro de sus propiedades mecánicas. El resultado serían productos porosos, de menor densidad y propiedades inferiores. Lo mismo sucede cuando se incrementa el contenido en humedad, este incremento provocaría variaciones dimensionales afectando las propiedades mecánicas del material. También se obtendrían productos porosos debidos en gran parte a un mal procesamiento. Por tanto, el tratamiento de las fibras se convierte en una etapa esencial en el desarrollo de los materiales compuestos (Castaño et al., 2014).

La compatibilización de las fibras con la matriz cementicia pasa a través de una serie de tratamientos, ya sean físicos o químicos. El uso de estos tratamientos da lugar a cambios en la estructura y en la energía superficial de las fibras” (Castaño et al., 2014).

2.4.4. COMPUESTOS FIBROREFORZADOS DE MATRIZ CEMENTICIA

“Los materiales de naturaleza cementicia presentan ventajas características de los materiales cerámicos como tal, altos valores de rigidez, buena resistencia a la compresión. Además, son altamente trabajables debido a su capacidad de ser moldeados, sin embargo estos presentan deficiencias respecto a propiedades mecánicas como lo son la flexión y resistencia al impacto ya que estos poseen valores de fragilidad elevados. El reforzamiento con fibras vegetales de biomasas, en general, contribuye a la mejora de estas propiedades, observándose su aporte más importante en la ductilidad y en la tenacidad de los compuestos.” (Castaño et al., 2014).

2.5. PROCESO DE EXTRUSIÓN

“El fibrocemento se ha fabricado predominantemente por el proceso Hatschek, como se puede ver en el esquema de la Figura 2. El proceso de extrusión es una tecnología recientemente utilizada en la preparación de fibrocemento y una de sus características principales es la necesidad de utilizar relaciones agua/cemento (a/c) bajas, entre 0.2 y 0.3,

así como también utilizar mezclas que presentan comportamiento reológico pseudoplástico. Esto permite una amplia variedad de secciones transversales de elementos de construcción.

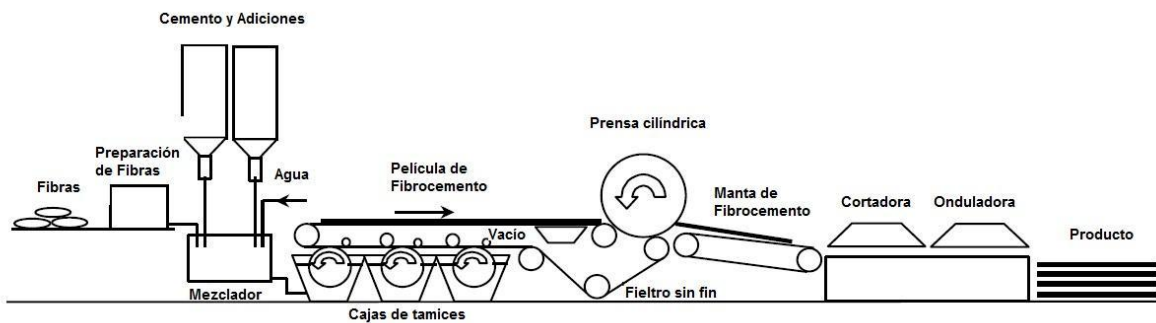


Figura 2. Proceso Hatschek (Maldonado, 2010).

La extrusión consiste en la compresión de un material que tiene un comportamiento pseudoplástico con tensión de fluencia, a través de una abertura, produciendo el flujo de este material y llegar a una configuración geométrica que ofrece la geometría de la boquilla. En este proceso, el material se somete a altas tensiones tangencial y normal.

Los extrusores pueden ser conceptualmente de dos mecanismos: extrusor de pistón (extrusor RAM) y extrusor de tornillo (extrusor de tornillo sinfín). El primero se distingue por el hecho de que su funcionamiento es de régimen intermitente en comparación con el segundo que trabaja en régimen continuo. Los extrusores de tornillo puede ser fabricados con una cámara de vacío con el fin de reducir la cantidad de huecos en la mezcla extruida. Las partes de una extrusora de vacío se muestran en la Figura 3, donde se observan la cámara de mezcla, la cámara de vacío y la cámara de compactación o des-aireación" (Maldonado, 2010).

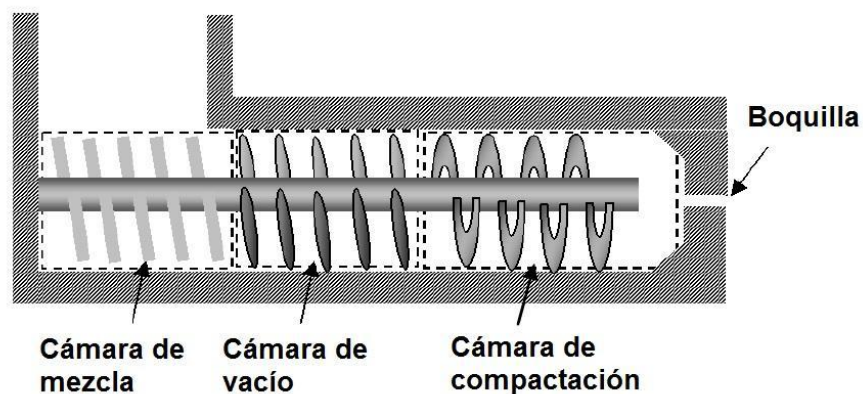


Figura 3. Esquema de extrusión al vacío (Maldonado, 2010).

2.5.1. Aspectos que influncian la extrusión

"El éxito del proceso de extrusión depende del comportamiento reológico de la formulación, las características de la extrusora, la geometría de la boquilla y buena homogeneización de las materias primas. Las características relevantes de la extrusora son: la geometría del tornillo, la longitud de las secciones de alimentación, compactación y des-aireación, velocidad del tornillo y la presión ejercida sobre la sección de des-aireación al vacío.

El propósito es el de promover el extremo de la boquilla de la mezcla de compresión, consolidar y formar la geometría deseada de sección transversal del producto. Para asegurar la producción de productos extruidos con buen acabado, se debe evitar gradientes de velocidad de modo que las formulaciones de cemento fluyan uniformemente a través de la boquilla. Si hay flujo con diferentes velocidades, se generan gradientes de tensión durante la deformación del producto extruido a medida que sale de la boquilla.

El comportamiento reológico de mezcla de cemento es un aspecto de importancia fundamental en el proceso de extrusión. Para el flujo de la mezcla cuando se presiona en la boquilla y después mantener esta configuración que da es necesario que la mezcla tenga un comportamiento pseudoplástico con salidas de tensión inicial, como se muestra en la Figura 4, correspondiente a la curva 4 de la Figura 4(a) y (b). Las curvas se refieren al material que fluye cuando se somete a esfuerzos normales y tangenciales, en la ausencia de los mismos no fluye, lo que requiere una tensión inicial de cizallamiento para que esto ocurra. Este tipo de comportamiento se denomina flujo pseudoplástico con tensión inicial.

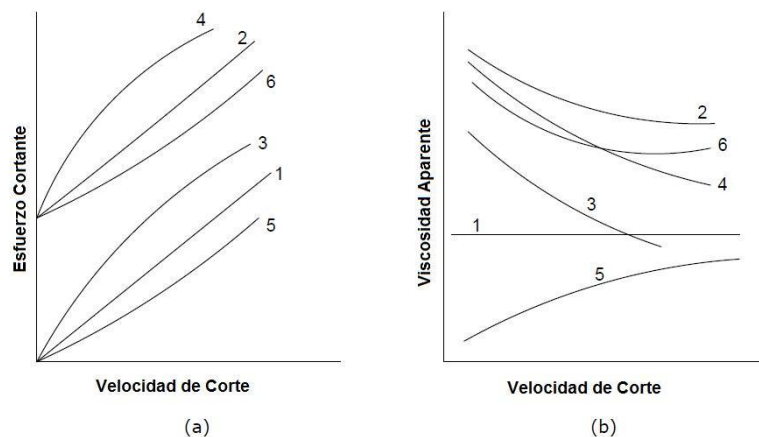


Figura 4. Curvas del comportamiento reológico de fluidos: (1) newtoniana, (2) Bingham, (3) pseudoplástico (4) pseudoplástico con límite elástico, (5) dilatante; (6) con tensión dilatante de flujo (Maldonado, 2010).

La mezcla está influenciada, en cuyo caso, por fase líquida, por fase sólida y por fase fibra. En relación a la mezcla se puede afirmar que:

- En fase sólida hay influencia de distribución granulométrica, de superficie química,

de fracción volumétrica, de morfología de partículas y de densidad de empaquetamiento.

- Las fibras se presentan principalmente como un obstáculo para el movimiento de las otras dos fases. Durante el proceso, que tienden a permanecer alineadas en dirección del flujo de la pasta y que es la posición que menos obstruye el movimiento de las partículas, lo que puede ser observado en la Figura 5.

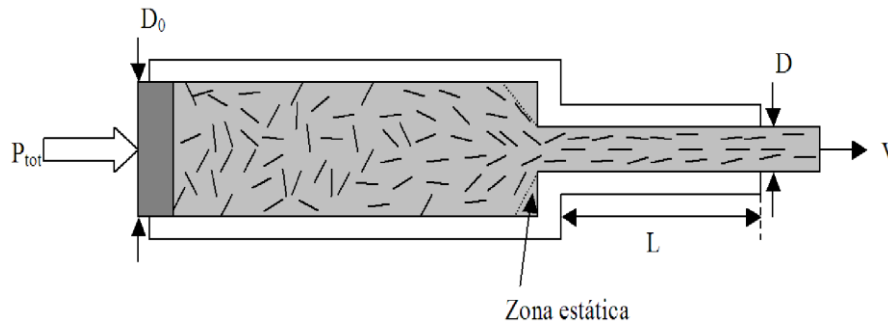


Figura 5. Movimiento de las fibras en extrusión (Maldonado, 2010).

- La fase líquida influencia la extrusión debido a la capacidad de humedecer la superficie de las partículas, reaccionar con el cemento, así como tener su propio comportamiento reológico debido a la presencia de modificadores reológicos en el proceso de mezcla." (Maldonado, 2010).

3. ESTADO DEL ARTE

La producción de materiales compuestos ha ganado importancia debido a las complejas y crecientes necesidades de hoy en día. Los materiales que se utilizan para la fabricación de materiales compuestos, pueden estar compuestos por productos obtenidos a partir de materias primas o productos reciclados. Erdem y Arioğlu, en 2016, elaboraron un material compuesto de matriz de yeso reforzado con fibra de PET de material reciclado y un aditivo que mejora la adherencia basado en PVA. Los resultados de las pruebas que hicieron muestran que con la adición de fibra la resistencia a la flexión del yeso ha disminuido algo, pero la adición del aditivo reforzador de la adherencia ha aumentado considerablemente la resistencia a la compresión y a la flexión. El mejor rendimiento se logró con los compuestos que contienen 0,1% en volumen de fibra. Los valores de resistencia a la flexión y compresión obtenidos fueron 4 N/mm² y 10,52 N/mm² respectivamente y una densidad aparente de 1,13 gr/cm³ (Erdem et al., 2016).

En el 2015, Iucolano et al., presentó un trabajo de *Comportamiento mecánico de yeso reforzado con fibras de abacá*, en esa investigación se estudió la interacción entre las fibras de abacá y la matriz de yeso con el fin de producir placas de yeso reforzadas con fibra con mejores resultados de tenacidad. Las fibras naturales fueron tratadas químicamente con 3 diferentes tratamientos (solución de agua destilada, solución de NaOH y solución de EDTA) para modificar su estructura superficial y se adicionaron porcentajes en peso de fibra de 1%, 2%, y 3%. Los resultados mostraron que la adición de fibra en 1% y 2% mejoran la

resistencia a la flexión con respecto al yeso sin fibra y que el 3% de adición de fibra presenta disminución de la resistencia con respecto a la muestra referencia sin fibra.

En el 2014, Castaño y Reyes, hicieron caracterización de la fibra de hoja de piña y su aplicación en la fabricación de un compuesto extruido basado en matriz cementicia, realizaron la caracterización química, física y mecánica de la fibra con el fin de obtener sus propiedades y analizar su posterior comportamiento. Para seleccionar la mezcla ideal de extrusión, realizaron análisis de plasticidad, probando diversos tipos de mezclas que incluían la variación de componentes como arena, fibra de hoja de piña, carbonato de calcio, agua y un aditivo impermeabilizante denominado Plastocrete®; hasta obtener así una mezcla óptima, cuyo comportamiento fuera reproducible en el proceso de extrusión. Finalmente, realizaron placas de fibrocemento por extrusión con contenido de fibra de 1% en peso y longitud de fibra de 5mm, las cuales fueron evaluadas a ensayos de flexión (Castaño y Reyes., 2014).

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para cumplir con los objetivos específicos planteados se llevaron a cabo unos pasos, los cuales siguieron la metodología que se presenta a continuación.

4.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se llevó a cabo la búsqueda de información, revisión y continua retroalimentación de lo que corresponde al marco teórico y estado del arte con temas relacionados con este proyecto de trabajo de grado. Para el desarrollo de la investigación se realizó una búsqueda de información en diferentes bases de datos. La Universidad del Valle cuenta con el acceso a bases de datos de ingeniería, entre las bases de datos más frecuentadas para esta investigación están: SCOPUS y SCIEDIRECT. Además, la biblioteca de La Universidad del Valle cuenta con una colección de libros especializados en materiales cerámicos, trabajos de grado, revistas de difusión nacional e internacional y trabajos expuestos en congresos nacionales e internacionales.

La búsqueda de la información se centró específicamente hacia los materiales compuestos de matriz cerámica reforzados con fibras naturales, microestructura de las fibras y procesos de extrusión que son utilizados para obtener materiales compuestos de matriz cerámica.

4.2. SELECCIÓN DE LOS MATERIALES

En la selección de materiales para el desarrollo de este proyecto, se escogieron materiales con el fin de garantizar el cumplimiento de las especificaciones finales en cuanto al diseño y propiedades del material a elaborar.

Estos materiales son: Escayola o Yeso para prefabricados, Montmorillonita arena de gato (molida hasta pasar el tamiz #400), Cabuya o fibra natural de hoja de fique, ácido cítrico y agua proveniente del acueducto de la ciudad de Cali.

La fibra de fique fue extraída en una finca del departamento del Cauca y fue entregada con tratamientos posteriores estando lista para ser utilizada en el proyecto.

4.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

4.3.1. CARACTERIZACIÓN DEL YESO

La caracterización del polvo de yeso está contenida en la ficha técnica del producto utilizado en esta investigación, Escayola Modelo, marca Corona (Tabla 2).

Tabla 2. Caracterización del yeso.

ENSAYO	NORMA EMPLEADA	RESULTADO
Color	UNE-EN 13279:2	Blanco
Consistencia de la pasta de yeso	UNE-EN 13279:2	Cremosa
Tiempo de fraguado	UNE-EN 13279:2	6 min inicial -30 min final
Densidad	UNE-EN 13279:2	0,6 ± 0,05 gr/cm ³
Retardo del tiempo de fraguado	ASTM C – 187	Por 0,1% en peso – 10 min

4.3.2. CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA

Las propiedades mecánicas de la fibra de fique y las pruebas que se realizaron se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Caracterización de la fibra de fique.

ENSAYO	NORMA
Resistencia a la tracción	ASTM D 3822
Módulo de Young	ASTM D 3822

El diámetro de las fibras se determinó por medio del Proyector de perfiles Nikon Modelo 6C N° 6148 del taller de Ingeniería Mecánica.

4.3.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MONTMORILLONITA

Para la caracterización de este agregado, se pasó el material por el molino de discos aproximadamente 3 veces hasta que este pasara por el tamiz #400.

Se tomó una muestra de 100 gr del material molido para realizar un ensayo de Límites de consistencia o más conocido Límites de Atterberg según la norma ASTM D 4318-95a. En la Figura 6 se muestra la cazuela de Casa Grande para determinar el LL y recipientes con muestras de montmorillonita para determinar el LP.

Tabla 4. Caracterización de la Montmorillonita.

ENSAYO	NORMA
Límites de Atterberg o de Plasticidad	ASTM D 4318-95a



Figura 6. Cazuela de Casa Grande para determinar el LL y recipientes con muestras de montmorillonita para determinar el LP

4.3.3. DETERMINACION DEL RETARDO DEL FRAGUADO DEL YESO

Para el retardo del fraguado del yeso se determinó la cantidad de ácido cítrico necesario para un retardo de 30 minutos. Esto se determinó mediante el ensayo de Vicat, basado en la norma ASTM C – 187, el montaje del ensayo se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Ensayo de aguja Vicat para determinar tiempo de fraguado utilizando ácido cítrico.

4.4. DISEÑO Y PRODUCCIÓN DE MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ DE YESO POR MÉTODO DE EXTRUSIÓN

Villanueva (2001), señala que, la relación agua/yeso de las escayolas o yeso semihidrato beta es caracterizada por ser alta, 0,8. Partiendo de esta relación agua/yeso, se realizaron diferentes mezclas disminuyendo la relación agua/yeso con el fin de obtener una consistencia parecida a la de la arcilla extruible. Estas mezclas fueron evaluadas por medio de revisión visual y tacto, y se consideró que la mezcla óptima estaba en un rango de relación agua/yeso entre 0,32 y 0,35.

Para determinar la mezcla óptima para ser extruida en la extrusora de tornillo modelo Ultra Dual Wave Auger de desaireado Pug Mill se realizaron ensayos de índice de plasticidad por método Moore, densidad aparente por parafina y ensayos mecánicos de compresión y flexión. Con base en estos resultados se discutió cuál debía ser la mezcla óptima.

- **Longitud de la fibra del material compuesto**

Investigaciones desarrolladas por el grupo de materiales compuestos de las Universidad del Valle, determinó que la longitud de fibra apropiada para trabajar es de 6 mm.

- **Porcentaje de fibra en peso en el material compuesto**

Investigaciones desarrolladas por el grupo de materiales compuestos de las Universidad del Valle, determinó que el porcentaje de fibra en peso apropiado para trabajar es en un rango de 0,5 - 1%.

4.4.1. EXTRUSION POR REOMETRO CAPILAR

Primero se utilizó el método de extrusión por medio de reómetro capilar utilizando como base la máquina universal de ensayos INSTROM 3369 con una carga de celda máxima de 50 KN y una velocidad de 1 mm/minuto, en la Figura 8 se muestra el montaje.



Figura 8. Estructura de reómetro capilar adaptado para extrusión de yeso

El proceso se realizó alimentando el cilindro por la parte superior con 300 gr de material, mientras el material adicionado se debe compactar para garantizar que no queden espacios vacíos dentro del cilindro.

NOTA: El método de extrusión por medio de reómetro capilar utilizando como base la máquina universal de ensayos INSTROM 3369 se realizó con el fin de determinar que muestra se escogería para extruir en la maquina extrusora de tornillo de acuerdo con los resultados obtenidos en: Densidad aparente, Resistencia a la flexión y compresión e Índice de Plasticidad.

4.4.1.2. ENSAYOS DE RESISTENCIA MECANICA. ENSAYO DE FLEXION Y DE COMPRESION.

Una vez realizadas las vigas por extrusión se ensayaron en la Maquina Universal de ensayos INSTROM 3369 con una carga de celda máxima de 50 KN - y una velocidad de 1 mm/minuto, en la Figura 9 se muestra el montaje del ensayo.



Figura 9. Ensayo de flexión.

Se obtuvieron cilindros por extrusión y luego se ensayaron en la Máquina Universal de ensayos INSTRON 3369 (Figura 10) con una carga máxima de 50 KN y una velocidad de 1 mm/minuto. En la Figura 10 se muestra el montaje del ensayo.



Figura 10. Ensayo de compresión en máquina universal de ensayos.

4.4.1.3. DENSIDAD APARENTE POR MÉTODO DE LA PARAFINA.

Para el ensayo de densidad aparente se realizaron 16 probetas cilíndricas que salieron de un proceso extrusión en la Máquina Universal de ensayos INSTRON 3369 y posteriormente fueron cortadas por una següeta de alambre.

Para la realización del ensayo primero se pesó cada una de las probetas en seco (P_o), luego se procedió a calentar la parafina en un recipiente lo suficientemente profundo para que las probetas a ensayar al ser sumergidas en la parafina quedaran totalmente cubiertas en toda su superficie. Se amarró un hilo a cada probeta y después se sumergieron en la parafina, como se puede ver en la Figura 11.



Figura 11. Montaje del método de parafina para hallar densidad aparente.

Posteriormente, cada probeta cubierta de parafina se sumergió en una probeta graduada con un volumen fijo de agua (200ml) para determinar el volumen desplazado (V_d), después se pesó cada probeta en la balanza hidrostática (P_s). Con los datos obtenidos se determinó la densidad aparente de cada mezcla como lo muestra la Tabla 5.

NOTA: La denominación de las muestras se basa en: (R) es relación agua-yeso, $R=A/Y$. El número seguido después de la R hace referencia al valor de esta relación sin el signo de porcentaje (R33), (F) es fibra y el número seguido después de F hace referencia al porcentaje de fibra en peso que tiene la muestra (F05). Todas las muestras contienen Ácido cítrico, 0,2% en peso del yeso, y Montmorillonita, 8% en peso del yeso.

Ejemplo: *R34F05* es una muestra con $R=A/Y=0,34$ y con un 0,5% de peso en fibra.

Las probetas después de la fabricación se dejaron curar por 24 horas a temperatura ambiente y después se colocaron en el horno por 24h a 60°C antes de ser ensayadas.

Tabla 5. Densidad aparente.

muestras	densidad aparente(g/cm ³)
R32	1,26
R32F05	1,12
R32F1	1,10

R33	1,27
R33F05	1,14
R33F1	1,32
R34	1,35
R34F05	1,22
R34F1	1,21
R35	1,36
R35F05	1,20

4.4.1.4. CALCULO DEL INDICE DE PLASTICIDAD (Método de Moore).

Para estimar la plasticidad de un material existen numerosos procedimientos. Estos métodos se dividen en dos grupos: métodos directos y métodos indirectos. Entre los indirectos, el más utilizado es el Método de Moore. En este método se define un índice de plasticidad como el cociente entre las presiones necesarias para deformar una probeta cilíndrica un 10% y un 50 % en su altura (Gines et al., 1997). Para el cálculo del índice de Moore, se emplean probetas cilíndricas de 1,5 pulgadas de altura y 1,1 pulgadas de diámetro. Estas probetas se comprimen axialmente a una velocidad constante de 1 pulgada/minuto entre dos platos paralelos. Finalmente, a partir del registro de las curvas carga-deformación, se determinan los esfuerzos de compresión necesarios para deformar la probeta un 10 y 50% (Gines et al., 1997).

Se diseñaron 8 mezclas diferentes para determinar su índice de plasticidad por medio del Método de Moore como lo muestra la Tabla 6 y Tabla 7. Se utilizaron probetas como las descritas anteriormente, probetas cilíndricas de 1,5 pulgadas de altura y 1,1 pulgadas de diámetro. Las cuales fueron comprimidas en los platos de la Máquina Universal de ensayos INSTRON 3369. A una velocidad de 1 pulgada/min y a una carga de 50kN.

Tabla 6. Índice de plasticidad de mezclas con fibra al 0,5%*.

Composición		R35F05	R34F05	R33F05	R32F05
Yeso	%	100	100	100	100
Agua*	%	35	34	33	32

Montmori*	%	8	8	8	8
A. Cítrico*	%	0,2	0,2	0,2	0,2
F.Fique*	%	0,5	0,5	0,5	0,5
Índice Plasticidad		0,16	0,28	0,32	0,25

* Con base en el peso del yeso

Tabla 7. Índice de plasticidad de mezclas con fibra al 1%*.

Composición		R35F1	R34F1	R33F1	R32F1
Yeso	%	100	100	100	100
Agua*	%	35	34	33	32
Montmori*	%	8	8	8	8
A. Cítrico*	%	0,2	0,2	0,2	0,2
F.Fique*	%	1	1	1	1
Índice Plasticidad		0,22	0,27	0,29	0,31

* En base al peso del yeso

Para que un material sea extruible se recomienda que tenga un índice de plasticidad similar al de la arcilla. Gines et al. (1997), menciona que este índice es 0,88. Aunque el índice de plasticidad más alto que se obtuvo no es ni la mitad del reportado por Gines et al. (1997), se escogió la R33F05 debido a que su índice (0,32) es el que más acerca a dicho valor del índice de plasticidad de la arcilla, además de eso, esta mezcla presentó la manejabilidad y conformación más parecida a la arcilla que las demás 7 mezclas.

En la figura 12 se muestra el molde, las probetas y ensayo para determinar el índice de plasticidad por el método Moore.



Figura 12. Ensayo de índice de plasticidad.

4.4.2. EXTRUSORA DE TORNILLO Y PROCESO DE EXTRUSIÓN

Para el proceso de extrusión se utilizó una extrusora modelo Ultra Dual Wave Auger de desaireado Pug Mill. Cuyas características se observan en la Tabla 8.

Tabla 8. Características de la Extrusora.

DETALLES DEL PRODUCTO	
Modelo	Ultra Dual Wave Auger de desaireado Pug Mill
Motor	2 HP
Bomba de Vacío	300 Watts
Rendimiento	1.600 lb/hr
Peso	265 lb
Dimensiones	60"Lx23"Wx25"H (Embalaje) 45"Lx21"Wx15"H (Sin embalaje)

El panel de control, la tabla de características del motor y el manómetro de la bomba de vacío, se observan en la Figura 13.



Figura 13. Panel de control, tabla de características del motor y manómetro de la bomba de vacío. (Castaño et al. 2014).

Especificaciones y características

- ✓ Alta calidad, manómetro de vacío lleno de aceite.
- ✓ El Barril está hecho de aluminio de alta resistencia.
- ✓ Dos tornillos de acero inoxidable - uno largo y uno corto.
- ✓ Cámara de vacío con filtro para evitar que la mezcla obstruya las líneas de vacío.
- ✓ Motor de Conducción: 2HP con caja de cambios de alta capacidad industrial.
- ✓ Bomba de vacío: 300 vatios.
- ✓ Mezcladora y bomba de vacío trabajan entre 208 a 220 voltios, bifásico.
- ✓ Clavija NEMA 6-20P, se ajusta a un estándar de salida de 20 A y 220 V.
- ✓ Interruptor de protección de sobrecarga.
- ✓ Pantalla de trituración y aireación de Acero Inoxidable.

La extrusora tipo Auger posee un doble tornillo sin fin y puede observarse en la Figura 14.



Figura 14. Estructura física de la extrusora y componentes (Castaño et al, 2014)

El proceso de extrusión se observa en la Figura 15, este proceso consiste en alimentar mezcla en la tolva de alimentación de la extrusora, mientras al otro lado un operario se encarga de recibir el material saliente de la boquilla y depositarlo en unas bandejas planas para conservar la forma de la placa que se conformó por extrusión.



Figura 15. Proceso de extrusión de yeso por tornillo con adición de 0.5% de fibra y $R=A/Y= 0,33$.

4.4.2.1. ENSAYOS DE RESISTENCIA MECÁNICA DE LAS PROBETAS ELABORADAS POR EXTRUSIÓN DE TORNILLO

Después de obtener el material compuesto por el proceso de extrusión en la extrusora de tornillo modelo Ultra Dual Wave Auger de desaireado Pug Mill. Se evaluaron sus propiedades mecánicas de resistencia a la flexión y a la compresión.

- Resistencia a la flexión

Se ensayaron las probetas obtenidas por extrusión de tornillo en la Maquina Universal de ensayos INSTROM 3369 con una carga de celda máxima de 50 KN - y una velocidad de 1 mm/minuto.

- Resistencia a la compresión

Se ensayaron las probetas obtenidas por extrusión de tornillo en la Maquina Universal de ensayos INSTROM 3369 con una carga de celda máxima de 50 KN - y una velocidad de 1 mm/minuto.



Figura 16. Ensayos de compresión y flexión de las probetas obtenidas por el proceso de extrusión de tornillo.

NOTA: Las condiciones de mezclado en los dos procesos de extrusión fue la misma. El mezclado se realizó de forma manual a una temperatura aproximada de 25°C (condiciones de laboratorio).

Las probetas después de la fabricación se dejaron curar por 24 horas a temperatura ambiente y después se colocaron en el horno por 24h a 60°C antes de ser ensayadas.

4.5. TECNICAS INSTRUMENTALES Y ANALITICAS

• MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO (MEB)

El microanálisis de los materiales compuestos de yeso y la interfaz entre el yeso y la fibra de fique se llevó a cabo mediante microscopio electrónico de barrido (MEB). Antes de la revisión de las muestras en el microscopio, estas se adhieren sobre una cinta de carbono y después se realizó un metalizado superficial con oro en el equipo Denton Vacuum Modelo Desk IV), con el fin de generar una superficie que fuera conductora. Posteriormente se realizó la inspección en un microscopio JEOL Modelo JSM 6490 LV en el modo de electrones retrodispersados mediante un voltaje de aceleración de 20kV. Las magnificaciones a las cuales se tomaron las imágenes fueron 100X y 300X.

5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

5.1.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MONTMORILLONITA

Para caracterizar este agregado, se realizó un ensayo de Límites de Atterberg según la norma ASTM D 4318-95a. Se pasó el material por el molino de discos aproximadamente 3

veces hasta que este pasara por el tamiz #400. Luego se tomó una muestra de 100g del material molido para realizar el ensayo de Límites de consistencia según lo descrito en la norma ASTM D 4318-95a.

Los límites de consistencia para este material se determinaron de la siguiente manera: Por medio del ensayo de la Cazuela de Casa Grande se encontró el Límite Líquido (LL) el cual fue de 266,45% Humedad (LL=266,45%) y el Límite Plástico (LP) se encontró por medio de la realización de cilindros delgados de la muestra de Montmorillonita de 1 a 2mm de diámetro o hasta que se fracturaran dichos cilindros, se pesaron al instante y posteriormente después de secarlos, el Límite Plástico fue de 25,19% Humedad (LP=25,19%).

Tabla 9. Datos para determinar el Límite Líquido.

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO (LL)		
RECIPIENTE	43	262	236
PESO RECIPIENTE	15,05	19,38	17,09
RECIPIENTE + SUELO HUMEDO	34,49	41,81	40,01
RECIPIENTE + SUELO SECO	20,36	25,49	23,34
PESO DEL AGUA	14,13	16,32	16,67
PESO DEL SUELO SECO	5,31	6,11	6,25
% HUMEDAD	266,11	267,10	266,72
NUMERO GOLPES	28	21	17

Con los datos reportados en la Tabla 9 se procedió a realizar una curva semilogaritmica, % Humedad vs Numero de golpes, en la gráfica se traza una línea perpendicular al eje X en el valor 25 de Número de golpes y en el punto que esta línea perpendicular se intercepta con la linealización de la curva, su imagen en Y es el valor del Límite Líquido según la norma ASTM D 4318-95a y como se muestra en la Figura 17.

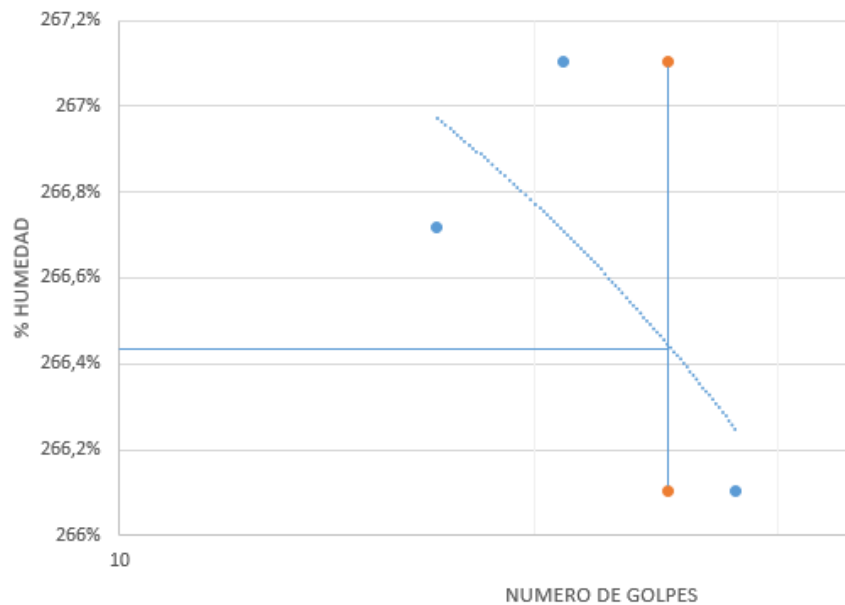


Figura 17. Gráfica %Humedad vs Número de golpes del ensayo. Limite Líquido.

Después de que se determinaron los límites de consistencia, se procedió a calcular el Índice de Plasticidad por medio de la siguiente ecuación: $IP = LL - LP$. El Índice de Plasticidad de la montmorillonita fue 241,25% de humedad. Según la carta de plasticidad que permite caracterizar un material por medio de los límites de Atterberg esta Montmorillonita está en el grupo MH o OH. Debido a que la Montmorillonita es de la familia de las arcillas, la clasificaremos como OH. La denominación OH hace referencia a las arcillas orgánicas de media y alta plasticidad. El límite plástico de la mezcla se aprecia en la Tabla 10.

Tabla 10. Datos para determinar el Límite Plástico.

DESCRIPCIÓN	LÍMITE PLÁSTICO (LP)	
RECIPIENTE	2	3
PESO RECIPIENTE	15,23	15,12
RECIPIENTE + SUELO HUMEDO	20,22	20,02
RECIPIENTE + SUELO SECO	19,22	19,03
PESO DEL AGUA	1	0,99
PESO DEL SUELO SECO	3,99	3,91
% HUMEDAD	25,06	25,32

PROMEDIO	25,19
-----------------	-------

La adición de Montmorillonita en la mezcla con yeso actuó como un espesante y retenedor de agua, aumentando la consistencia de la pasta y mejorando la manejabilidad y conformidad. Al tener un índice de plasticidad elevado alrededor de 246% Humedad da a entender que este material puede absorber casi dos veces y medio su peso en agua. Dicho lo anterior, este material además puede actuar como un retenedor de agua, reteniendo cierta cantidad de agua en la pasta evitando la evaporación o absorción de ésta por otro material o por el soporte, permitiendo la hidratación normal del yeso hasta el final del fraguado.

Villanueva et al., (2001), dice que el yeso en ausencia de retenedores de agua y simplemente retardado, puede solidificar normalmente sin el efecto retardante al aplicarse sobre una superficie absorbente o en nuestro caso el proceso de extrusión que genera un leve aumento de la temperatura en la mezcla debido al cizallamiento del material-tornillo.

5.1.2. CARACTERIZACIÓN DEL YESO

La escayola que se utilizó fue de la marca CORONA la caracterización se tomó de la ficha técnica de la empresa CORONA, Sus propiedades se pueden observar en la Tabla 11.

Tabla 11. Características en estado endurecido.

ENSAYO	RESULTADO
Resistencia de superficie en seco	> 500 Kg/ cm ²
Resistencia a la flexión	> 50 Kg/ cm ²
Resistencia a la compresión	> 150 Kg/cm ²

5.1.3. CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA

Para caracterizar la fibra se determinó su diámetro por medio del Proyector de perfiles Nikon Modelo 6C N° 6148 del taller de Ingeniería Mecánica y se realizó un ensayo de tracción basado en la Norma ASTM D 3822. Con el fin de determinar el esfuerzo máximo de tracción y el módulo de elasticidad de la fibra.

Para determinar el diámetro de las fibras se tomaron 6 muestras de 3 fibras a las cuales se les halló su diámetro por medio del Perfilometro, se realizó el promedio de los valores de diámetro de cada muestra y después estos fueron promediados para determinar el valor aproximado del diámetro de la fibra de fique utilizada en este proyecto. Como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Datos del diámetro de la fibra de fique.

Muestra 1(mm)	Muestra 2(mm)	Muestra 3 (mm)	Muestra 4 (mm)	Muestra 5(mm)	Muestra 6 (mm)
0,153	0,058	0,283	0,301	0,152	0,183
0,232	0,21	0,155	0,299	0,131	0,223
0,22	0,119	0,207	0,305	0,099	0,263
Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio
0,202	0,0893	0,215	0,301	0,127	0,223
Promedio					
0,19 mm					

El valor del diámetro de la fibra de fique en este trabajo fue de 0,19 mm. Con un rango entre 0,08 – 0,30 mm. Este valor es muy similar comparado con el resultado de Muñoz et al. (2014), quienes utilizaron fibra de fique para reforzar un polímero, y su valor fue de 0,24 mm. Con un rango de 0,16 – 0,42 mm.

La variabilidad de los diámetros medidos anteriormente se puede ver mejor en la Figura 18.

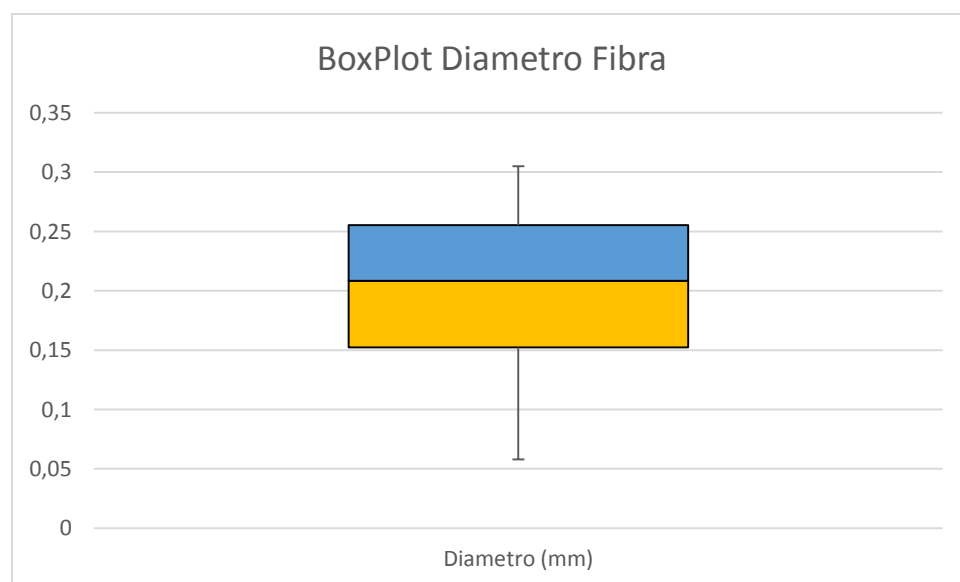


Figura 18. Diagrama de cajas y alambres del Diámetro de la fibra.

Para determinar el esfuerzo máximo de tensión de la fibra de fique se realizó un ensayo de tracción bajo la norma ASTM D 3822 en la Máquina Universal de ensayos INSTRON 3369. Los resultados de fuerza máxima se muestran en la Figura 19.

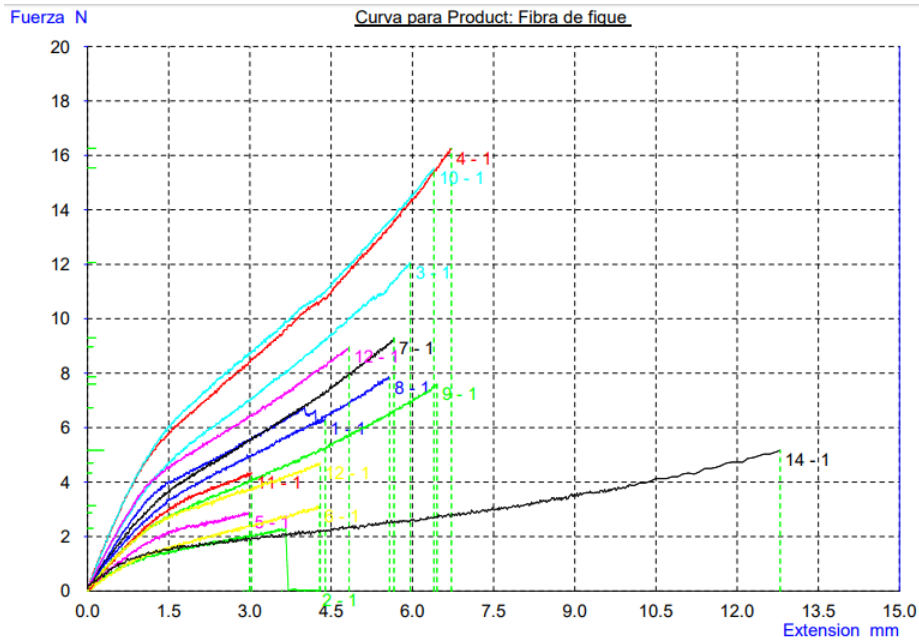


Figura 19. Curva fuerza vs extensión de la fibra.

Con las fuerzas mostradas en la Figura 19 y el diámetro promedio de la fibra (0,19 mm) se halló el esfuerzo máximo, que se aprecia en la Figura 20, en forma de presentación de diagrama de cajas y alambres.

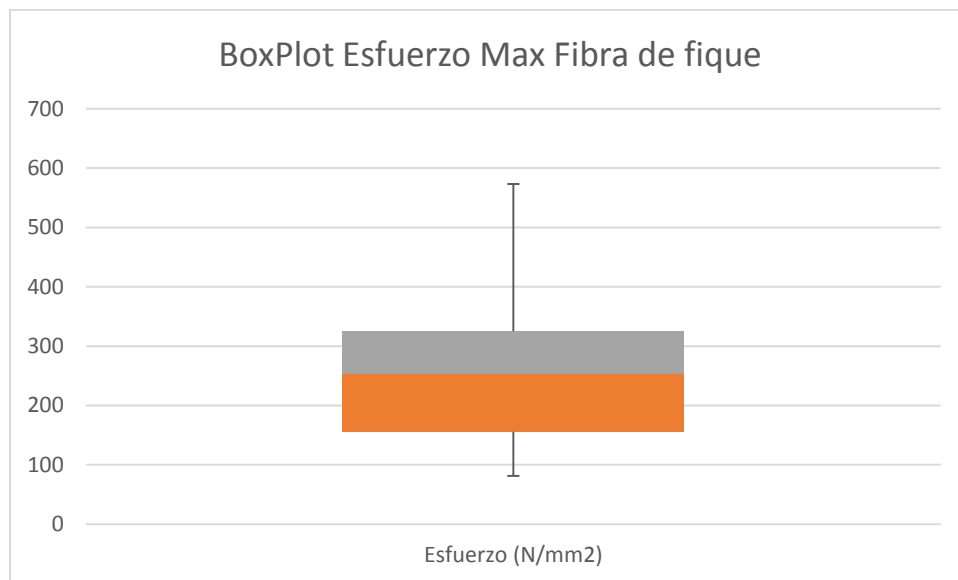


Figura 20. Diagrama de Cajas y Alambres del Esfuerzo Máximo de tensión de la fibra de fique.

Se obtuvo un esfuerzo máximo promedio de 269,13 MPa. Muñoz et al. (2014) obtuvo en su proyecto un rango de esfuerzos entre 43 – 571 MPa, con un promedio 132,4 MPa, por otro lado, Gañan et al. (2002) obtuvo un esfuerzo máximo promedio de 237 MPa en su fibra de fique. La fibra de fique utilizada en este proyecto tiene un esfuerzo máximo de tensión similar o mayor a la fibra de fique que se utilizó como ente reforzante en los trabajos mencionados.

5.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MATRIZ

5.2.1. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN AGUA/YESO

Villanueva (2001), señala que, la relación agua/yeso (A/Y) de las escayolas o yeso semihidrato beta es 0,8 caracterizada por ser alta. La ficha técnica del producto Escayola Modelo de Corona muestra que la relación A/Y óptima para este producto es de 0,75.

La relación agua/yeso de 0,75 es utilizada para la elaboración de moldes y placas, la pasta con esta relación presenta una buena consistencia si el método de fabricación fuera por vaciado, (P. Chindaprasirt et al 2011). Señala que “La pasta con A/Y = 0,6 es gruesa y difícil Para moldear por vaciado mientras que la pasta con A/Y = 0,8 era demasiado delgada. La Pasta con A/Y = 0,7 dio una buena consistencia”, pero este análisis no es acertado para este trabajo ya que el proceso de fabricación es por extrusión y la pasta de yeso es semi líquida, de baja viscosidad y poco consistente. Para que el material fuera extruido con éxito, se necesitaba que tuviera una consistencia parecida a la arcilla.

Para determinar la relación A/Y óptima para que el material compuesto pudiera ser extruido se utilizó un método indirecto de hallar la plasticidad. El Índice de Moore, cómo se realizó en el trabajo de Castaño et al., (2014). Este ensayo se realizó a mezclas con 4 diferentes relaciones a/y con el fin de escoger la que se acercara más a la plasticidad de la arcilla por medio de este ensayo, La relación agua/yeso óptimo que se eligió para el material compuesto fue un rango entre 0,32 - 0,35.

5.2.2. DENSIDAD APARENTE

Para el ensayo de densidad aparente se realizaron 16 probetas cilíndricas que resultaron de un proceso extrusión en la Máquina Universal de ensayos INSTROM 3369 y posteriormente fueron cortadas por una segueta de alambre. Posteriormente cada probeta, cubierta de parafina, se sumergió en una probeta graduada con un volumen fijo de agua (200 ml) para determinar el volumen desplazado (Vd), después se pesó cada probeta en la balanza hidrostática (Ps). El cálculo de la densidad aparente de las muestras se determinó según la norma española UNE-EN 993-1. Los resultados de este ensayo se muestran en la Tabla 13.

NOTA: La denominación de las muestras se indica así: (R) es relación agua-yeso, $R=A/Y$. El número seguido después de la R hace referencia al valor de esta relación sin el signo de porcentaje (R33), (F) es fibra y el numero seguido después de F hace referencia al porcentaje de fibra en peso que tiene la muestra (F05). Todas las muestras contienen Ácido cítrico 0,2% en peso del yeso y Montmorillonita, 8% en peso del yeso.

Las probetas después de la fabricación se dejaron curar por 24 horas a temperatura ambiente y después se colocaron en el horno por 24h a 60°C antes de ser ensayadas.

Tabla 13. Densidad aparente de las muestras del material compuesto

MUESTRA	PESO SECO	PESO RECUBIE	PESO SUMERGI	VOL. FIJO	VOL. FINAL	VOL. YESO	DENSIDAD APARENTE
---------	-----------	--------------	--------------	-----------	------------	-----------	-------------------

	(g)	RTO (g)	DO (g)	(ml)	(ml)	(ml)	(g/ml)
R32	15,6	16	4,9	230	240	10	1,26
R32F05	12,4	13,1	3,1	230	239	9	1,12
R32F1	11,9	12,5	2,8	230	239	9	1,10
R33	15,2	15,8	5	200	210	10	1,27
R33F05	12,8	13,4	3,3	230	240	10	1,14
R33F1	15,8	16,2	5,4	230	240	10	1,32
R34	15,2	15,8	5,7	230	240	10	1,35
R34F05	13,8	15,3	5,1	230	240	10	1,22
R34F1	14,4	15,1	4,4	220	230	10	1,21
R35	14,7	15	5,3	200	210	10	1,36
R35F05	12,5	14,1	4,7	230	238	8	1,20
R35F1	13	14,4	5	230	240	10	1,24

La densidad aparente promedio de las muestras de yeso que fueron extruidas en el reómetro capilar usando la Máquina Universal de ensayos INSTRON 3369 fue de $1,23 \text{ g/cm}^3$. En la Tabla 13 se puede observar que en la mayoría de las muestras sin fibra la densidad aparente fue más alta que las muestras con la misma relación de agua pero con adición de fibra al 0,5% o 1%. Por ejemplo, la muestra R34 tiene una densidad aparente de $1,35 \text{ g/cm}^3$ y su densidad disminuye al adicionar fibra, en R34F05 es $1,22 \text{ g/cm}^3$ y en R34F1 es $1,21 \text{ g/cm}^3$. El comportamiento de los datos obtenidos se observa en la Figura 21.

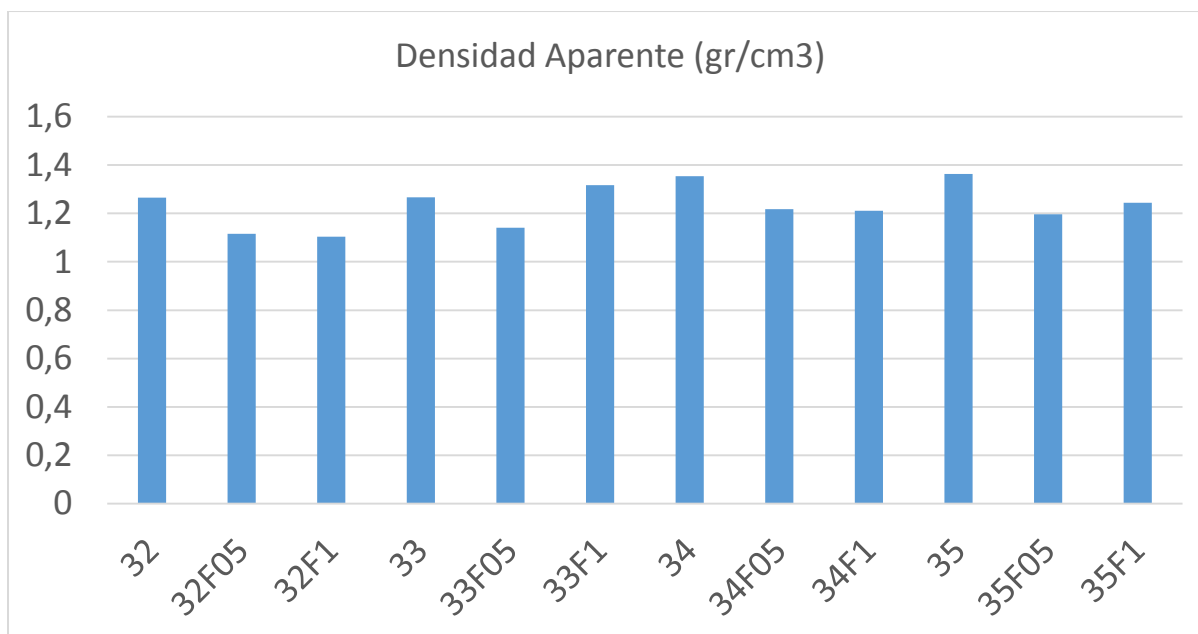


Figura 21. Densidad aparente del material compuesto.

ERDEM et al., (2016), menciona que la densidad aparente del yeso sin fibra es 1,16 g/cm³ y que la densidad aparente de los compuestos de yeso decrece debido al incremento en la adición de fibras y el incremento en la longitud de la misma como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. Valores de densidad aparente y resistencia a la flexión de un compuesto de yeso reforzado con fibras de PET reciclado (ERDEM et al., 2016)

Longitud fibra (mm)	Relación Volumen fibra (%)	Densidad aparente (g/cm ³)	Resistencia a la flexión (N/mm ²)
0	0	1,16	4,43
10	1	1,12	4,51
20	1	1,09	3,57

5.2.2.1. POROSIDAD ABIERTA

Para realizar este ensayo se utilizaron las mismas probetas del ensayo de densidad debido que estos parámetros se determinan con los mismos datos, por lo tanto, las probetas se fabricaron por proceso de extrusión en reómetro capilar en la Máquina Universal de ensayos INSTROM 3369 y posteriormente fueron cortadas por una segueta de alambre.

Para este cálculo se utilizaron las mismas muestras que en el ensayo de Densidad aparente. El cálculo de la porosidad abierta de las muestras se determinó según la norma española UNE-EN 993-1. Los resultados de este ensayo se muestran en la Tabla 15.

NOTA: La denominación de las muestras se es la siguiente: (R) es relación agua-yeso, $R=A/Y$. El número seguido después de la R hace referencia al valor de esta relación sin el signo de porcentaje (R33), (F) es fibra y el numero seguido después de F hace referencia al porcentaje de fibra en peso que tiene la muestra (F05). Todas las muestras contienen Ácido cítrico 0,2% en peso del yeso y Montmorillonita, 8% en peso del yeso.

Las probetas después de la fabricación se dejaron curar por 24 horas a temperatura ambiente y después se colocaron en el horno por 24h a 60°C antes de ser ensayadas.

Tabla 15. Porosidad abierta de las muestras del material compuesto

MUESTRA	PESO SECO (g)	PESO RECUBIERTO (g)	PESO SUMERGIDO (g)	Porosidad abierta (%)
R32	15,6	16	4,9	3,60
32F05	12,4	13,1	3,1	7
32F1	11,9	12,5	2,8	6,19
33	15,2	15,8	5	5,56
33F05	12,8	13,4	3,3	5,94
33F1	15,8	16,2	5,4	3,70
34	15,2	15,8	5,7	5,94
34F05	13,8	15,3	5,1	14,70
34F1	14,4	15,1	4,4	6,54
35	14,7	15	5,3	3,09
35F05	12,5	14,1	4,7	17,02
35F1	13	14,4	5	14,89

La Tabla 15 muestra que la adición de fibra tiene el efecto contrario que mostró en la densidad aparente. En este caso, la porosidad abierta de las muestras sin fibra es menor que la de las muestras con adición de fibra de 0,5% y 1%. Este fenómeno lo explica Lucolano et al., (2013), el cual dice que, “esto es debido, en general, a la interrupción de la microestructura del material, como resultado de la inclusión de heterogeneidades en un cuerpo homogéneo. El comportamiento de los datos obtenidos se observa en la Figura 22.

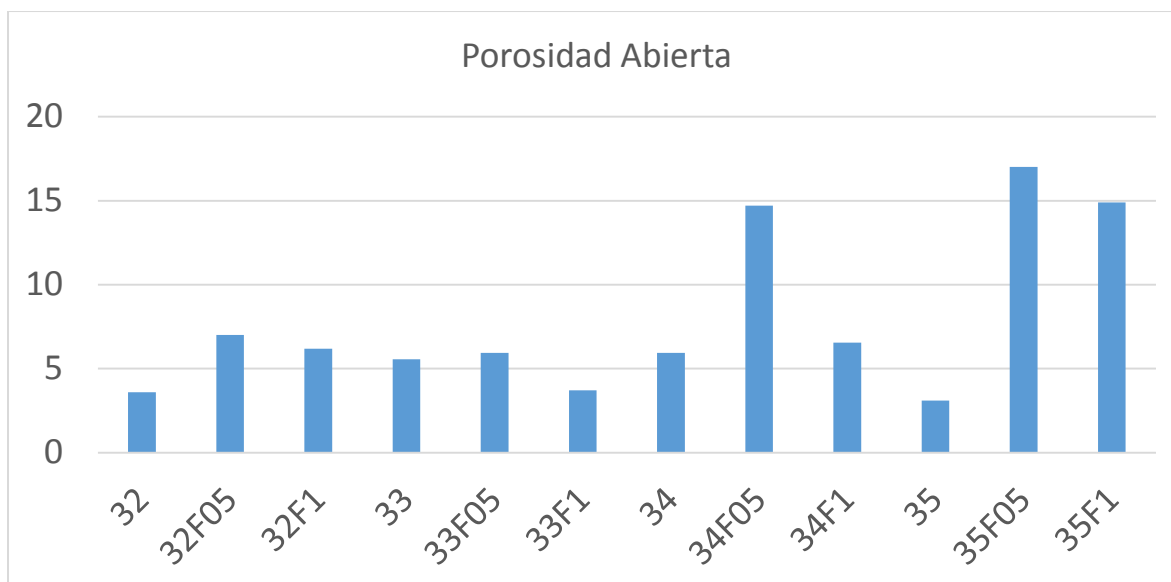


Figura 22. Porosidad abierta del material compuesto.

5.2.3. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL COMPUESTO DE YESO

La resistencia mecánica de los materiales compuestos reforzados con fibras cambia en relación con la adherencia entre la matriz y la fase. A través de la matriz, los principales elementos portadores de carga son las fibras, y estas cargas son transferidas a las fibras por la matriz. La eficiencia de esta transferencia está relacionada con la calidad del enlace entre la fibra y la matriz. La adherencia entre la superficie de las fibras y la matriz debe ser fuerte y la matriz debe ser capaz de transformar la tensión de cizalla. (ERDEM et al.,2016).

5.2.3.1. EVALUACIÓN A LA FLEXIÓN DE VIGAS OBTENIDAS POR EXTRUSIÓN EN REOMETRO CAPILAR

Las probetas para este ensayo se elaboraron por un proceso de extrusión en la Máquina Universal de ensayos INSTRON 3369 y por la extrusora modelo Ultra Dual Wave Auger de desaireado Pug Mill, posteriormente fueron cortadas por una segadora de alambre. Las probetas después de la fabricación se dejaron curar por 24 horas a temperatura ambiente y después se colocaron en el horno por 24 h a 60°C antes de ser ensayadas. Se ensayaron 3 probetas por cada muestra, el valor reportado en la siguiente Tabla es el promedio. Los resultados se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Resultados de resistencia a la flexión de las muestras extruidas por reómetro capilar en la Máquina Universal de ensayos.

Muestra	Resistencia a la flexión (MPa)
R32	3,81
R32F05	3,73

R32F1	1,18
R33	2,31
R33F05	3,97
R33F1	1,36
R34	2,24
R34F05	3,00
R34F1	0,81
R35	3,51
R35F05	3,86
R35F1	1,17
Desviación Estándar	1,2137

Con base en la Norma EN 13279-1, la resistencia a la flexión en yesos sin fibra es de 1 MPa y con fibra es de 3 MPa. Para las probetas fabricadas sin fibra se cumple la norma ya que el valor promedio de resistencia a la flexión fue de 2,99 MPa, en las probetas con adición de 0,5% de fibra de fique, también se cumple ya que el valor promedio de flexión es de 3,64 MPa. Pero para las muestras con adición de fibra de 1% no se cumplió por que el valor promedio fue 1,12 MPa. Esto se puede ver mejor en la Figura 23.

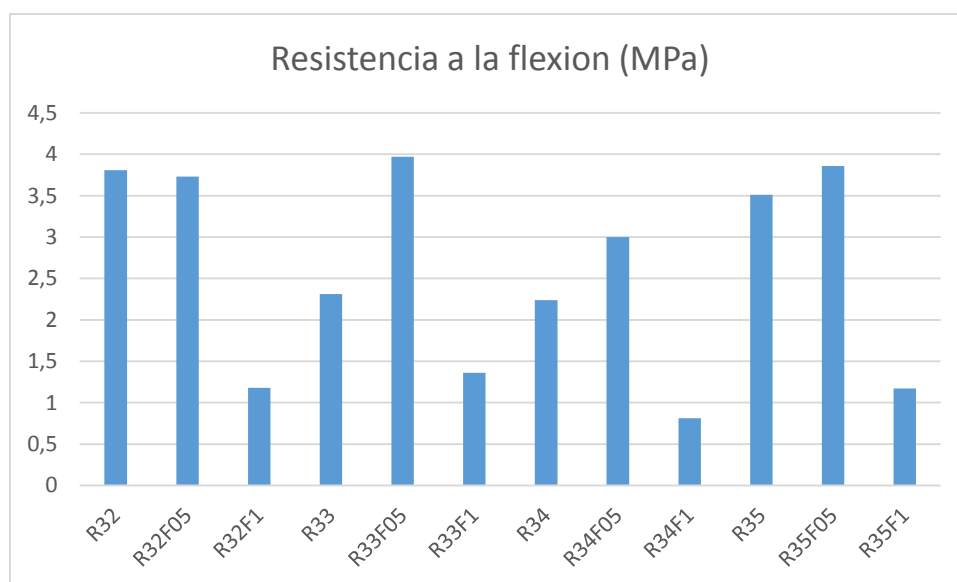


Figura 23. Resistencia a la flexión de las muestras extruidas por reómetro capilar en la Máquina Universal de ensayos.

Este fenómeno de disminución en la resistencia a la flexión puede deberse al aumento de la fibra natural, notamos que las mejores resistencias se obtuvieron con adición de 0,5% de fibra de fique, y las resistencias más bajas con adición de 1% de fibra de fique. Este argumento está basado en trabajo de (Chindaprasirt et al., 2011) donde dice que “se

obtuvieron mejores resistencias cuando se incorporan fibras naturales entre 0,2 y 0,3% en peso. La fibra juega un papel importante en el refuerzo de la matriz de yeso y en el desarrollo de las propiedades mecánicas. Con una incorporación mayor de fibra natural la resistencia se vio afectada negativamente y la densidad fue bajando”.

“La resistencia a la flexión muestra una modesta mejora de la resistencia de los ejes reforzados con adiciones de fibra natural, además de la ligereza que le provee yeso, las fibras generan cambios de comportamiento incluso si se añaden en pequeñas cantidades. De hecho, la rotura se hace más controlada y el compuesto se vuelve dúctil ya que la propagación de las microfisuras se retrasa por la presencia de fibras que sirven para puentear grietas y para soportar parte de la carga aplicada” (Sabrine Hamza et al 2013).

En la Figura 24 se muestra viga producida por la extrusora modelo Ultra Dual Wave Auger de desaireado Pug Mill, que a pesar de ya estar fractura la pieza, todavía se mantiene unida por la fibra lo que da muestra del incremento en la flexibilidad y tenacidad del material.



Figura 24. Vigas de yeso parcialmente fracturadas con adición de 0.5% de fibra de fique y 0,33 de $R = A/Y$.

“observamos una caída en la resistencia a la flexión con el aumento de fibra, Esto podría explicarse por la creación de porosidad en el material debido a un vacío de fibra intra y extra” (Bentchikouet al., 2007) “Que reduce la compacidad compuesta y la cohesión” (Sabrine Hamza et al 2013) esto puede verse en la Figura 25 donde se aprecia una alta porosidad.



Figura 25. Viga de yeso fracturada con adición de 0.5 % de fibra de fique 33% de $R = A/Y$.

La resistencia a la flexión también está controlada por la calidad, la longitud (Morlier y Khenfer, 1991) y la orientación de las fibras (Djoudiet al., 2009). Según Morlier y Khenfer (1991), la longitud de la fibra aumenta significativamente la resistencia a la flexión y afecta el modo de falla. Para nuestro caso se utiliza fibra de 6 mm de largo lo que es considerado fibra corta.

5.2.3.2. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN POR EXTRUSIÓN DE TORNILLO

Las probetas después de la fabricación se dejaron curar por 24 horas a temperatura ambiente y después se colocaron en el horno por 24h a 60°C antes de ser ensayadas.

NOTA: Las muestras para este ensayo se metieron en horno a secar a una temperatura de 60°C y pasadas las 24h cuando se fueron a retirar del horno la temperatura se encontraba a 110°C. Se ensayaron 2 muestras R33F05.

Tabla 17. Resistencia a la flexión de la muestra R33F05 en la extrusora de tornillo.

MUESTRA	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (MPa)
R33F05-1	0,84
R33F05-2	0,85
PROMEDIO	0,84
DESVIACION ESTANDAR	0,007

Basados en los datos obtenidos en la Tabla 17 se aprecia que la resistencia de la mezcla R33F05 obtenida por extrusión de tornillo es de 0,8446 MPa y que en comparación con la

misma muestra R33F05 extruida por reómetro (3,971 MPa) capilar es menor. Podemos decir que la resistencia a la flexión se vio afectada por este aumento en la temperatura de secado y que el material se tornó más frágil. El comportamiento de los datos obtenidos se observa en la Figura 26.

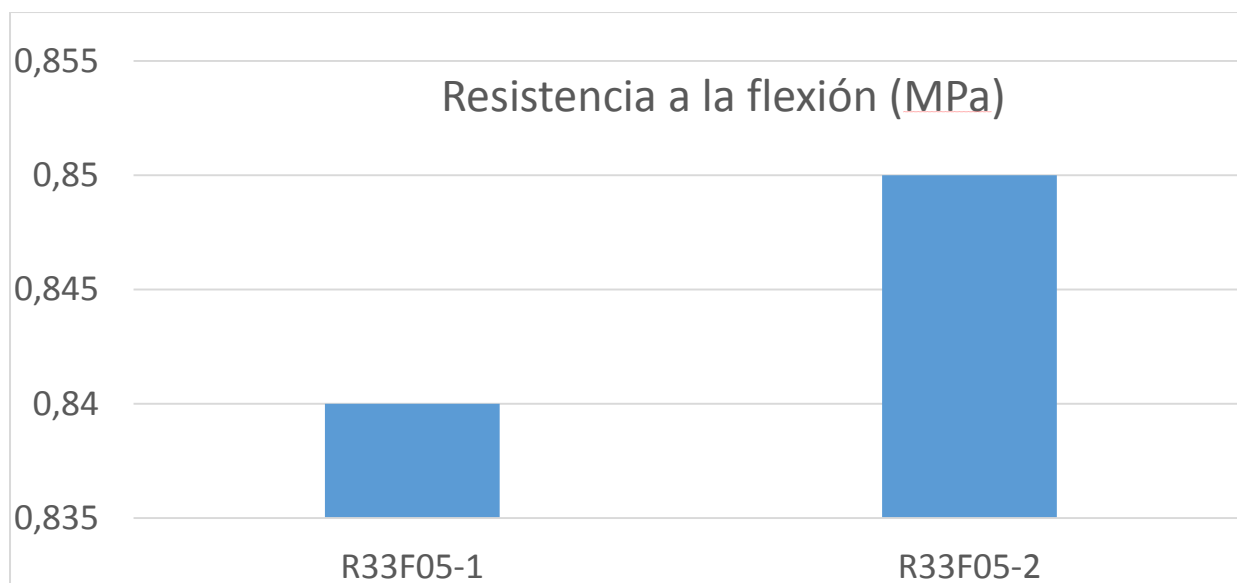


Figura 26. Resistencia a la flexión de probetas obtenidas por extrusión de tornillo.

5.2.3.3. EVALUACIÓN DE CILINDROS A COMPRESIÓN OBTENIDOS POR EXTRUSIÓN EN REOMETRO CAPILAR

Las probetas para este ensayo se elaboraron por un proceso de extrusión en la Máquina Universal de ensayos INSTROM 3369 y posteriormente fueron cortadas por una següeta de alambre.

Las probetas después de la fabricación se dejaron curar por 24 horas a temperatura ambiente y después se colocaron en el horno por 24 h a 60°C antes de ser ensayadas. Se ensayaron 5 probetas por cada muestra, el valor reportado en la Tabla 18 es el promedio.

Tabla 18. Resultados de resistencia a la compresión de las muestras extruidas por reómetro capilar en la Máquina Universal de ensayos.

Muestra	Resistencia a la compresión (MPa)
R32	8,69
R32F05	1,43
R32F1	2,77
R33	8,66

R33F05	1,39
R33F1	4,60
R34	6,57
R34F05	1,49
R34F1	3,86
R35	7,71
R35F05	2,20
R35F1	5,06
Desviación Estándar	2,805

La Tabla 18 nos muestra que las muestras sin adición de fibra tienen mayores valores de resistencia a la compresión que las muestras que tienen adición de fibra de 0,5% y 1 %. Los bajos valores obtenidos en la resistencia a la compresión pueden deberse a la adición de Montmorillonita porque al ser un material arcilloso disminuye la densidad, y debido a su característica de alta porosidad lo hace absorber más agua y por ende genera pérdida en la resistencia a la compresión como se denota en el trabajo de Chindaprasirt et al., (2011). Los resultados de la Tabla 18 se muestran en el grafico de la Figura 27.

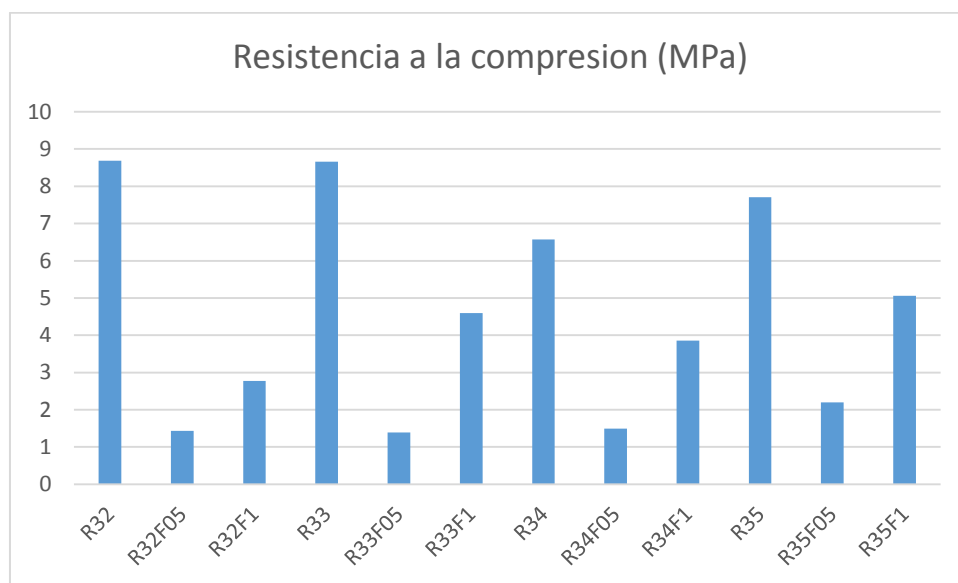


Figura 27. Resistencia a la flexión de las muestras extruidas por reómetro capilar en la Máquina Universal de ensayos.

5.2.3.4. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN POR EXTRUSIÓN DE TORNILLO

Las probetas después de la fabricación se dejaron curar por 24 horas a temperatura ambiente y después se colocaron en el horno por 2 4h a 60°C antes de ser ensayadas. Las

muestras para este ensayo se metieron en horno a secar a una temperatura de 60°C y pasadas las 24 h cuando se fueron a retirar del horno la temperatura se encontraba a 110°C. Se ensayaron 4 muestras de R33F05.

Basados en los datos obtenidos presentados en la Tabla 19, la resistencia de la mezcla R33F05 obtenida por extrusión de tornillo es de 1,62 MPa y que en comparación con la misma muestra R33F05 extruida por reómetro (1,39 MPa) capilar es mayor. Situación contraria a la que se presentó en los ensayos de resistencia a la flexión. El comportamiento de los datos obtenidos se observa en la Figura 28.

Tabla 19. Resistencia a la compresión de la muestra R33F05 en la extrusora de tornillo.

MUESTRA	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)
R33F05-1	1,99
R33F05-2	1,36
R33F05-3	1,30
R33F05-4	1,84
PROMEDIO	1,62
DESVIACION ESTANDAR	0,344

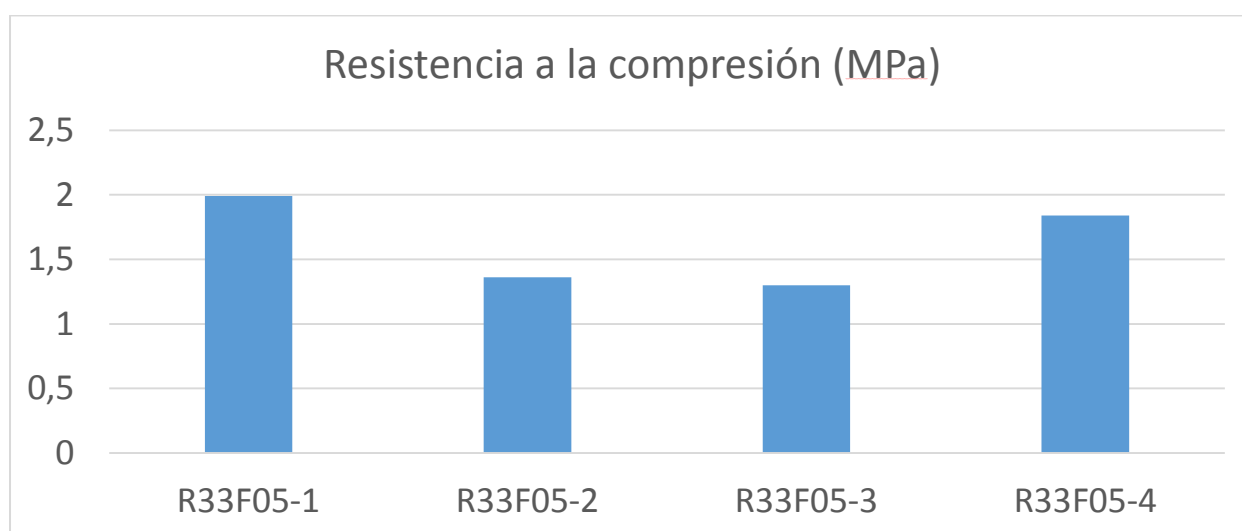


Figura 28. Resistencia a la compresión de probetas obtenidas por extrusión de tornillo.

6.3. ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA. MEB DEL COMPUESTO

En la Figura 29b se muestra buena fijación de la matriz de yeso y la fibra de fique teniendo en cuenta que la fibra no había tenido tratamiento químico. En la Figura 29a se observa una superficie con alta porosidad generada por la adición de Montmorillonita porque al ser un material arcilloso disminuye la densidad, y debido a su característica de alta porosidad lo hace absorber más agua y por ende genera pérdida en la resistencia a la compresión como se denota en el trabajo de (P. Chindaprasirt et al 2011). La fibra interrumpe el crecimiento de los cristales generando concentradores de esfuerzo que pueden generar grietas como se ve en la Figura 29a y en la Figura 29b.

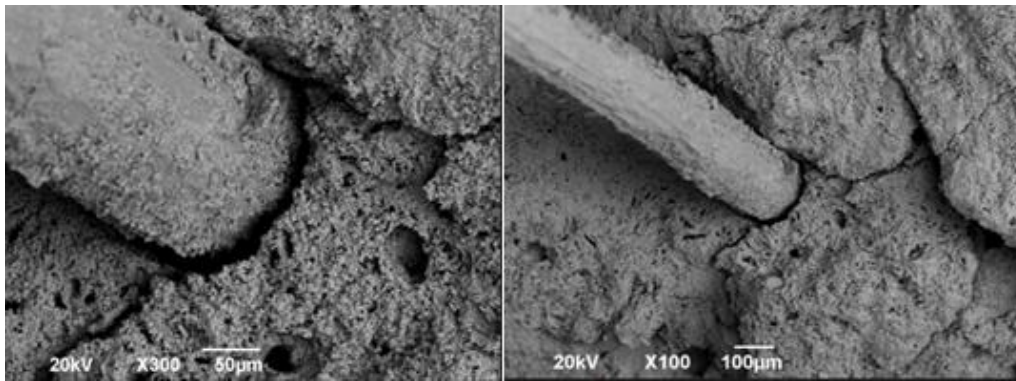


Figura 29. SEM de pieza fabricada por extrusión de tornillo con adición de fibra de 0,5 y $R=A/Y$ de 0,33. (a – b)

Con la adición de ácido cítrico como retardante “absorbe más agua y retarda el crecimiento de los cristales además hace que los precipitados de yeso sean particulados y aglomerados”(Chindaprasirt et al., 2011), como se muestra en la Figura 30 (a,b,c,d).

El comportamiento normal del yeso es el crecimiento de cristales en forma de agujas como se ve en la Figura 31 “La forma de cristal en el yeso es delgado y alargado resultado de un rápido crecimiento” (Lioliou et al., 2012). Con la adición de fibra se genera deformación de los cristales y al igual que el ácido cítrico genera material particulado y aglomerado como lo aclara Chindaprasirt et al., (2011) en su trabajo “Plaster materials from waste calcium sulfate containing chemicals, organic fibers and inorganic additives”.

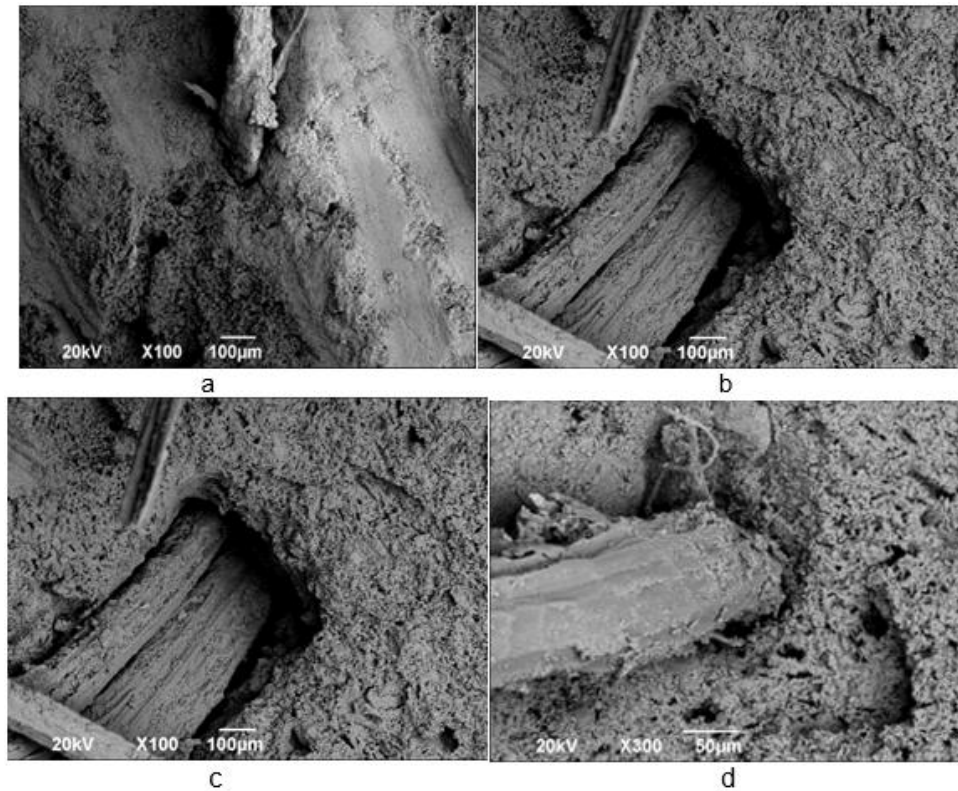


Figura 30. SEM de piezas obtenidas por extrusión de tornillo (a, b, c) y por extrusión capilar (d) con adición de 0,5 % de fibra y $R=A/Y$ de 33%

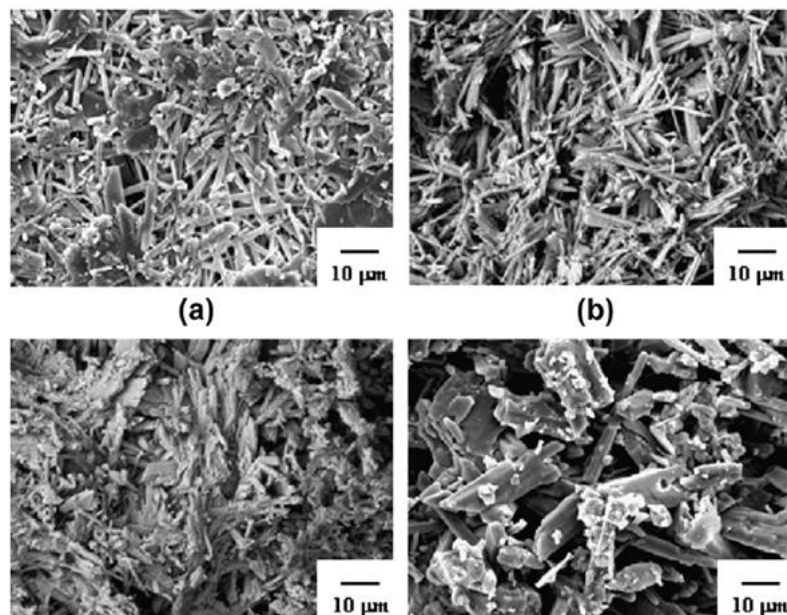


Figura 31. SEM-fotomicrografías de cristales de FGD-G después de la hidratación (a), FGD-P con 10% en peso de glucosa (b), 0,03% en peso de ácido cítrico (c), 0,4% en peso de NaHCO_3 (d) (Chindaprasirt et al., 2011)

7. CONCLUSIONES.

El trabajo contribuyó a la elaboración de una mezcla que permitió la fabricación de piezas con matriz de yeso por proceso de extrusión, las propiedades mecánicas de flexión y de compresión debían cumplir los requerimientos básicos establecidos en la norma CSN EN 13279-1 para placas reforzadas con fibra, pero no fueron el factor determinante por que la intención del trabajo era lograr la extrusión de yeso por eso fue seleccionado el que se consideró óptimo basado en el índice de Moore más alto que fue de 0,32 para la mezcla R33F05

Las características bases del yeso no le permiten tener una buena plasticidad por si solo para ser una material extruible, por lo fue imprescindible la adición de una arcilla expandible como la Montmorillonita, con la capacidad de retener agua y mantenerla durante el proceso de extrusión, además le permitió tener una mejor plasticidad calculado por método indirecto de índice de Moore de 0,32 que permite extruir el material.

Con las adiciones de ácido cítrico, fibra de fique y Montmorillonita se generaron cambios en la microestructura de la matriz, como se mostró en las imágenes del MEB donde se aprecia el cambio en la forma de la partícula, que pasó de una forma de aguja a una forma de partícula con aglomeración. Estas adiciones generaron porosidad debido a capacidad de absorción de agua. En el caso del ácido cítrico retrasa el crecimiento de los cristales generando un fraguado lento. En el caso de la fibra interfiere en el crecimiento de cristales creando puntos de concentración de esfuerzo que pueden generar fisuras.

El uso de la fibra no estaba enfocado en lograr un incremento sustancial de las propiedades de flexión, sin embargo se aprecia que la probetas fabricadas por extrusión capilar con adición de 0,5% presentaron mejores propiedades a la flexión que con adición de 1% de fibra, dado que el promedio aritmético de las muestras con 0,5% de fibra fue de 3,64 MPa y las muestras con adición de 1% fue de 1,13 MPa.

BIBLIOGRAFÍA

A. Hassan and Z. Othman. 2011. Malaysian Agricultural Research and Development Institute (MARDI), Malaysia and J. Siriphanich, Kasetsart University, Kamphang Saen, Thailand. Pineapple (*Ananas comosus* L. Merr.). Woodhead Publishing Limited. P-194.

Bentchikou, M., Hanini, S., Silhadi, K., Guidoum, A., 2007. Elaboration et étude d'un mortier composite à matrice minérale et fibres cellulosiques: application à l'isolation thermique en bâtiment. Can. J. Civil Eng. 34, 37–45.

Castañó C. Lina y Reyes O. Felipe. 2014. Caracterización de la fibra de hoja de piña y aplicación en la fabricación de un compuesto extruido basado en matriz cementicia.

CSN EN 13279-1. Gypsum binders and gypsum plasters - Part 1: Definitions and requirements. 2008.

Djoudi, A., Khenfer, M.M., Bali, A., 2009. Etude d'un nouveau composite en plâtre renforcé avec des fibres végétales du palmier dattier. In: SBEIDCO – 1st International Conference on sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria), October 12–14.

Erdem Seda, Arioglu Nihal. 2016. Un análisis de las propiedades de materiales compuestos de yeso y fibra de PET reciclado.

FEDEFIQUE, Ministerio del medio ambiente, Sociedad de agricultores de Colombia. 2002. Guía ambiental para el subsector: fiqueero. Ministerio del medio ambiente. PDF

GAÑAN, P. & MONDRAGÓN. 2002, I. Surface modification of fique fibers: effects on their physico-mechanical properties. Polymer Composites, 23, p. 383-394.

Gines, F.; Feliu, C.; Garcia-ten, J.; Sanz, V. 1997. Análisis de los métodos tradicionales utilizados para evaluar la plasticidad. Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio.

Isaza Ruiz Marllory, Restrepo Osorio Adriana, Betancourt Parra Santiago, Álvarez López Catalina, Fernández Morales Patricia. 2015. Caracterización mecánica y morfológica de fibras de fique con potencial uso acústico. VIII Congreso Internacional de Materiales.

Leavitt William y Grupe Bob. 2000. Manual de Construcción con yeso. Quinta Edición. USG Corporation. p-ix.

Lucolano, F., Liguori, B., Colella, C. 2013. Morteros a base de cal de fibra: Un posible recurso para la restauración de mampostería antigua. Construction and Building Materials 38.

Lucolano Fabio, Caputo Domenico, Leboffe Flavio, Liguori Barbara. 2015. Comportamiento mecánico de yeso reforzado con fibras de abacá. Construction and Building Materials 99.

MALDONADO S, Y. (2010). ADEQUAÇÃO DE FORMULAÇÕES PARA A PRODUÇÃO DE PLACAS DE FIBROCIMENTO POR EXTRUSÃO.

MARIO FERNANDO MUÑOZ VELEZ, MIGUEL ANGEL HIDALGO SALAZAR, JOSE HERMINSUL MINA HERNANDEZ. 2014. FIBRAS DE FIQUE UNA ALTERNATIVA PARA EL REFORZAMIENTO DE PLÁSTICOS. INFLUENCIA DE LA MODIFICACIÓN SUPERFICIAL. Rev.Bio.Agro vol.12 no.2 Popayán.

Morlier, P.M.M., Khenfer, M.M., 1991. Effet de la longueur des fibers sur les propriétés mécaniques des ciments renforcés de fibers cellulosiques. Mater. Struct.24, 185–190.

Munirah. 2007. Characterization and treatments of pineapple leaf fibre thermoplastic composite for construction application.

P. Chindaprasirt a,c, K. Boonserm b,c, T. Chairuangsrri b,c, W. Vichit-Vadakan c,d, T. Eaimsin b,c, T. Sato c,e,K. Pimraksa b,c,†. 2011. Plaster materials from waste calcium sulfate containing chemicals, organic fibers and inorganic additives. 4 p.

Sabrine Hamzaa,1, Houda Saada,b,1, Bertrand Charrierb,*,Naceur Ayeda, Fatima Charrier-El Bouhtouryb. Physico-chemical characterization of Tunisian plant fibers and its utilization as reinforcement for plaster based composites. 7p.

Sandoval Ignacio y Aldeazar Torres. 2011. Guía Técnica del cultivo de piña. Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal Enrique Álvarez Cordova.

S. Thomas, S.A. Paul, L.A. Pothan, and B. Deepa. 2011. Natural Fibres: Structure, Properties and Applications. Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites. P-6,7.

Sena Neto Alfredo R, Araujo Marco, D. Souza Fernanda, Mattoso Luiz, Marconcini Jose M. 2013. Characterization and comparative evaluation of thermal, structural, chemical, mechanical and morphological properties of six pineapple leaf fiber varieties for use in composites. Industrial Crops and Products 43. P-529.

Singh Manjit y Garg Mridul. 1994. Gypsum-based fibre-reinforced composites: an alternative to timber. Construction and Building Materials. Volume 8. Number 3. P-156.

S.M. Sapuan, A.R. Mohamed, J.P. Siregar, and M.R. Ishak. 2011. Pineapple Leaf Fibers and PALF-Reinforced Polymer Composites. Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites. P-326.

Tonoli G.H.D, Santos S.F, Savastano Jr. H, Delvasto. S, Mejia de Gutierrez. R, Lopez de Murphy. M del M. 2011. Effects of natural weathering on microstructure and mineral composition on cementitious roofing tiles reinforced with fique fibre. Cement and concrete composites. Volume 33. p. 225-232

Villanueva Dominguez, Luis de y Garcia Santos, Alfonso. 2001. Manual del yeso. España. Asociación Técnica y Empresarial del Yeso (a.t.e.d.y). 231 p.

Yusofa Yusri, Yahyaa Siti Asia, Adama Anbia. 2015. Novel technology for sustainable pineapple leaf fibers productions. 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing. P-756.