

EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL DISEÑO DE RECUBRIMIENTOS HÍBRIDOS
SOL-GEL SOBRE FIBRAS DE FIQUE CON POTENCIAL APLICACIÓN EN EL
DISEÑO DE CONCRETOS DE ALTO DESEMPEÑO.

SAMANTA MACHADO CEPEDA
JUAN ESTEBAN MONCAYO ORTIZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2014

EVALUACIÓN PRELIMINAR DEL DISEÑO DE RECUBRIMIENTOS HÍBRIDOS
SOL-GEL SOBRE FIBRAS DE FIQUE CON POTENCIAL APLICACIÓN EN EL
DISEÑO DE CONCRETOS DE ALTO DESEMPEÑO.

SAMANTA MACHADO CEPEDA
JUAN ESTEBAN MONCAYO ORTIZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
Químico.

Director
FERNANDO VIEJO ABRANTE
Químico, Ph.D

Codirectores:
ANA EMILSE COY ECHEVERRÍA
Ingeniería Metalúrgica, Ph.D
CLAUDIA NIEVES BARRERA
Ingeniera Química

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2014

DEDICATORIA

Con total agradecimiento dedico este logro al creador de mi vida y de quien siempre y sin ninguna condición recibo de sus bendiciones, a ese ser a quien llamo padre celestial y quien me da la fortaleza y las habilidades para alcanzar mis metas; dedico este, uno más de mis logros a Dios en esta carrera que se llama vida, la vida el más grande de todos los regalos provenientes de él.

Así mismo dedico la culminación de este logro más, a mis padres Myriam Cepeda y Jaime Machado por su apoyo durante toda mi carrera y a mis familiares por estar siempre pendientes de mi progreso y su incondicional confianza en mi capacidad de superación y dedicación.

Especialmente quiero agradecer a Sergio Villegas por su compañía, apoyo y por sus aportes infaltables. Eres una muestra de ayuda desinteresada y de complicidad infinita por impulsarme a perseguir mis sueños, estaré ahí para los tuyos.

Samanta Machado Cepeda

DEDICATORIA

Dedico este logro a mi madre Luz Nelly Ortiz Rivera quien me cuidó, crio y educo para llegar a ser el ser humano que soy, a mi padre Leónidas Moncayo Hidalgo que a pesar de no contar con su presencia física dejó un sin número de enseñanzas que han servido de fundamento durante mi vida.

A mi familia por el apoyo y consejos ofrecidos. Y a todas las personas que de una u otra forma estuvieron implicadas o relacionadas conmigo durante esta etapa.

Juan Esteban Moncayo Ortiz

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos especiales e infinitos al DOCTOR FERNANDO VIEJO ABRANTE por su confianza al habernos conferido su apoyo en la dirección de nuestro trabajo de grado, por su paciencia, dedicación y esfuerzo en esta investigación, gracias a su gran conocimiento este trabajo se resalta por su exitosa culminación.

De igual manera agradecemos a la INGENIERA CLAUDIA NEVES BARRERA por el compromiso mostrado en sus aportes durante el desarrollo de este trabajo.

Ofrecemos inmensas gratitudes a la DOCTORA ANA EMILSE CON ECHEVERRÍA por su colaboración en forma y fondo de la realización de esta tesis.

A los ingenieros de los grupos de investigación GMA7 e NME por sus aportes en conocimiento.

Zuaremos resaltar la ayuda brindada de cada uno de los técnicos en cada dependencia en donde se realizaron los ensayos necesarios.

A nuestros amigos que de una u otra manera nos apoyaron y siempre creyeron en nuestro trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1 METODOLOGÍA.....	23
1.1 MATERIAL OBJETO DE ESTUDIO	23
1.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS FIBRAS DE FIQUE	24
1.2.1 Determinación del Porcentaje de Humedad	25
1.2.2 Caracterización morfológica.....	25
1.2.3 Ensayo de Tensión.....	26
1.3 SÍNTESIS DE RECUBRIMIENTOS SOL-GEL SOBRE LA FIBRA DE FIQUE.....	26
1.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS SOL-GEL	27
1.5 EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LA FIBRA DE FIQUE EN MEDIOS AGRESIVOS SIMULADOS	27
1.6 DISEÑO DE CONCRETOS REFORZADOS CON FIBRA DE FIQUE	27
1.6.1 Materia prima	28
1.6.2 Diseño de mezcla y elaboración de probetas.....	28
1.6.3 Fraguado y curado.	28

1.7	EVALUACIÓN DE LA PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRA DE FIQUE.....	28
1.7.1	Ensayo de resistencia a la tensión	29
1.7.2	Ensayo de resistencia a la compresión	29
2	ANÁLISIS DE RESULTADOS	30
2.1	CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA DE FIQUE:.....	30
2.1.1	Determinación del porcentaje de humedad	30
2.1.2	Caracterización morfológica.....	31
2.1.3	Ensayo de resistencia a la tensión.	32
2.2	SÍNTESIS DE RECUBRIMIENTOS SOL-GEL SOBRE LA FIBRA DE FIQUE..	34
2.3	EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LA FIBRA DE FIQUE EN MEDIOS AGRESIVOS SIMULADOS	37
2.4	ENSAYO A RESISTENCIA A LA TENSIÓN DE LOS CONCRETOS REFORZADOS CON FIBRAS DE FIQUE	39
2.5	ENSAYO A RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LOS CONCRETOS REFORZADOS CON FIBRAS DE FIQUE	40
3	CONCLUSIONES.....	43

4	RECOMENDACIONES	44
	CITAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
	BIBLIOGRAFÍA.....	50
	ANEXOS.....	51

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. DIAGRAMA DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	23
FIGURA 2. MICROGRAFÍAS ELECTRÓNICAS DE LA FIBRA DE FIQUE EN ESTADO NATURAL: A) SECCIÓN LONGITUDINAL; B) SECCIÓN TRANSVERSAL; C) DETALLE SECCIÓN TRANSVERSAL.	31
FIGURA 3. MICROGRAFÍAS ELECTRÓNICAS DE LA FIBRA DE FIQUE EN ESTADO COMERCIAL: A) SECCIÓN LONGITUDINAL; B) SECCIÓN TRASVERSAL; C) DETALLE SECCIÓN TRANSVERSAL.	32
FIGURA 4 COMPORTAMIENTO DE FIBRAS DE FIQUE A ENSAYO DE TENSIÓN.	33
FIGURA 5. MICROGRAFÍAS ELECTRÓNICAS DE FIBRAS DE FIQUE NATURAL Y COMERCIAL CON DIFERENTES RELACIONES MOLARES TEOS:GPTMS.	35
FIGURA 6. DETALLE MICROGRAFÍAS ELECTRÓNICAS DE FIBRAS DE FIQUE NATURAL Y COMERCIAL CON DIFERENTES RELACIONES MOLARES TEOS:GPTMS.....	36
FIGURA 7. MICROGRAFÍAS ELECTRÓNICAS DE LA SECCIÓN LONGITUDINAL DE LA FIBRA NATURAL Y DE LA FIBRA NATURAL CON RECUBRIMIENTO PARA LA PROPORCIÓN MOLAR 1:3 (TEOS:GPTMS) EXPUESTAS A MEDIOS AGRESIVOS.....	38

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE FIBRAS VEGETALES.....	19
TABLA 2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA FIBRA DE FIQUE EMPLEADA EN EL TRABAJO.....	24
TABLA 3 PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LA FIBRA DE FIQUE EN ESTADO NATURAL Y COMERCIAL	30
TABLA 4 EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA A TENSIÓN DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS DE FIQUE CON Y SIN RECUBRIMIENTO.	39
TABLA 5 EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO CON ADICIÓN DE FIQUE.	41

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: REPRESENTACIÓN DE LA CELULOSA, XILEMA Y FLOEMA EN UNA ESTRUCTURA VEGETAL	51
---	----

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LA APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS HÍBRIDOS SOL-GEL SOBRE LA FIBRA DE FIQUE EN EL DISEÑO DE CONCRETOS DE ALTO DESEMPEÑO.*

AUTORES: SAMANTA MACHADO CEPEDA
JUAN ESTEBAN MONCAYO ORTIZ. **

PALABRAS CLAVE: FIQUE, CONCRETO, SOL-GEL.

DESCRIPCIÓN:

El empleo de fibras de fique en el diseño de concretos se ha venido estudiando potencialmente, obteniendo resultados favorables en su innovación, gracias al aporte significativo en el aumento de la resistencia a la tensión debido a que esta propiedad es característica de la fibra de fique. Sin embargo, las fibras al ser de origen natural, disminuye el grado de adhesión al concreto y son susceptibles a degradación, haciendo de su alto desempeño poco perdurable; por esta razón, se plantea una modificación en la superficie de la fibra, diseñando un recubrimiento híbrido sol-gel en el que una adecuada relación entre precursor inorgánico (TEOS)-orgánico (GPTMS) permitiría la obtención de superficies con elevado grado de adhesión con relación al concreto y de carácter hidrofóbico evitando así la degradación de la fibra. La fibra de fique se caracterizó mediante microscopía electrónica de barrido, así mismo se le realizó un ensayo a tensión, posteriormente se sintetizaron recubrimientos híbridos sol-gel sobre la fibra de fique con para la evaluación de su degradación en medios salinos, sulfatados y carbonatados; por otra parte se evaluó la funcionalidad de las fibras recubiertas en el concreto sometiendo probetas diseñadas con porcentajes de fibra de fique a ensayos de tensión y compresión. De este estudio se pudo concluir que a medida que la proporción del precursor orgánico GPTMS aumenta, incrementa la flexibilidad del recubrimiento. Así mismo el recubrimiento sol-gel incrementa el grado de hidrofobicidad de la fibra de fique, ofreciendo significativa protección frente la degradación. De la misma manera, los recubrimientos sobre las fibras de fique aumentan la resistencia a la tensión al concreto y minimiza la disminución de la resistencia a la compresión del mismo.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Ph.D. Fernando Viejo Abrante.

ABSTRACT

TITLE: PRELIMINARY ASSESSMENT OF THE IMPLEMENTATION OF COATINGS HYBRIDS SOL-GEL ON FIBER FIQUE IN THE DESIGN OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE.

AUTHORS: SAMANTA MACHADO CEPEDA
JUAN ESTEBAN MONCAYO ORTIZ. **

KEYWORDS: FIQUE, CONCRET, SOL-GEL.

DESCRIPTION:

The use of sisal fibers in designing potentially concrete has been studying, obtaining favorable results innovation, thanks to the significant contribution to the increase in tensile strength because this property is characteristic of sisal fiber. However, the fibers to be of natural origin, reduces the degree of adhesion to concrete and are susceptible to degradation, making your little enduring high performance; for this reason, a change arises in the fiber surface, designing a hybrid sol-gel coating in which an appropriate relationship between -orgánico inorganic precursor (TEOS) (GPTMS) allow obtaining surfaces with a high degree of adhesion with Specifically regarding the hydrophobic character and thereby avoiding degradation of the fiber. Sisal fiber was characterized by scanning electron microscopy, also be performed a tension test, then sol-gel hybrid coatings on sisal fiber with for evaluating degradation in saline environments were synthesized sulfated and carbonated; Moreover the functionality of the coated specimens in particular designed subjecting percentages sisal fiber to tensile and compression tests fibers was evaluated. From this study it was concluded that as the proportion of organic precursor GPTMS increases, increases the flexibility of the coating. Likewise, the sol-gel coating increases the degree of hydrophobicity of sisal fiber, providing significant protection against degradation caused by contact of aggressive media such as carbonates, chlorides and sulfates. Likewise, the coatings on sisal fibers increase the tensile strength and minimizes concrete decreased compressive strength thereof, event related to the increased degree of fiber-concrete adhesion provided by the coating thank a ceramic nature.

** Physical and Chemical Engineering Faculty, Chemical Engineering School Advisor: Ph.D Fernando Viejo Abrante.

INTRODUCCIÓN

La durabilidad de una estructura de concreto depende de la habilidad de resistir la acción de ataques químicos, físicos, biológicos o cualquier tipo de deterioro, muchas veces debido a la exposición a la intemperie; estos efectos son reflejados en el aumento de los costos de mantenimiento y reparación, lo cual exige que se plantee un adecuado diseño de la estructura y de los materiales que se empleen [1]

El concreto simple (sin refuerzo), es decir, la mezcla de cemento y agua con agregados finos o gruesos, es resistente a la compresión pero tiene bajas propiedades mecánicas en tensión, lo que limita su aplicabilidad como material estructural. Para resistir tensiones, se emplea refuerzo de acero (concreto reforzado), generalmente en forma de barras. El acero limita el desarrollo de las grietas originadas por la baja resistencia a la tensión del concreto [2].

Sin embargo, el concreto reforzado sufre daños que alteran su estructura interna y, por lo tanto, surgen defectos en su comportamiento. Algunos pueden ser consecuencia de ataques por corrosión del acero (normalmente en presencia de cloruros o sulfatos, donde encuentran aplicación) o accidentes después de su construcción; y otros pueden ser congénitos por estar presentes desde su concepción. Estos daños se pueden prevenir empleando también refuerzos de fibras que prevengan la disminución de la calidad del concreto durante su vida útil [1]. La introducción de estos refuerzos de forma específica permite alcanzar una resistencia a la tensión superior a la matriz en la que están impregnados y conferir cualidades adicionales que no alcanzaría el concreto sin dicho refuerzo.

Durante los últimos cincuenta años el empleo y estudio de las fibras en la construcción ha llevado al desarrollo y fabricación de tipos específicos de fibras sintéticas que responden a diferentes necesidades [3]. Los beneficios de las fibras

sintéticas se reflejan en el concreto tanto en estado plástico como endurecido, ya que reducen la fisuración por asentamiento y por contracción, disminuyen la permeabilidad del concreto en la primera etapa del curado, incrementan resistencia a la abrasión y al impacto, y aportan resistencia a la fractura [4].

Es bien conocido que en la década de los 60 se desarrollaron concretos reforzados que empleaban fibra de acero, fibra de vidrio, polipropileno y algunas otras fibras sintéticas y, de hecho, la investigación sobre ellos aún continúa. Sin embargo, este tipo de concretos se consideran generalmente inapropiados para países en vías de desarrollo, debido a los elevados costos y el abastecimiento limitado de dichas fibras [5]. Además, otro factor importante a tener en cuenta es la baja biodegradabilidad de este tipo de materiales, que genera un preocupante impacto ecológico, no sólo por su naturaleza química, sino también por su empleo masivo en la industria de la construcción. Es por ello que en la actualidad se comienza a plantear la posibilidad de emplear fibras naturales con el objetivo de aportar un beneficio ecológico a la región y potenciar la economía y competitividad de países con mayores necesidades de desarrollo tecnológico.

Cabe mencionar que el uso de las fibras naturales en materiales de construcción se remonta hasta antes de la aparición del cemento Portland y del concreto. Fibras naturales como pasto, fique, junco y pelo animal han sido tradicionalmente agregadas al adobe para disminuir su tendencia a la fisuración y mejorar el desempeño del material a esfuerzos de tensión [3]. En la tabla 1 se presentan los resultados obtenidos de un estudio realizado sobre las propiedades físicas y mecánicas de algunas fibras naturales actualmente utilizadas en el refuerzo de concretos como son la fibra de coco, de malva, de piasava, de bambú y de fique, destacándose estas dos últimas por su mayor resistencia a la tensión y módulo de elasticidad [6,7,8].

Particularmente, en Colombia, dentro de las fibras naturales de mayor relevancia destaca la fibra de fique debido a su gran disponibilidad. Como dato, en Colombia se producen cerca de treinta mil toneladas de fique al año [9], principalmente en los departamentos de Cauca, Nariño, Santander y Antioquía. Específicamente, en Santander la empresa Ecofibras situada en el municipio de Curití es una de las principales suministradoras de fibra de fique para la fabricación de diferentes productos artesanales. Además, en el cultivo y producción del fique se genera un importante número de puestos de trabajo y sobresale de otro tipo de cultivos destinados a este fin, gracias a su excelente estabilidad y seguridad al agricultor, baja exigencia, resistencia a fenómenos meteorológicos y flexibilidad en los tiempos de cosecha [10].

Tabla 1. Propiedades físicas y mecánicas de fibras vegetales.

<i>Propiedades</i>	<i>Densidad (kg/m³)</i>	<i>Absorción de agua (% en masa)</i>	<i>Porcentaje de elongación</i>	<i>Resistencia a la tensión (MPa)</i>	<i>Módulo de Young (GPa)</i>
<i>Fibra de fique (Agave sisalana)</i>	1370	110	4,3	458	15,2
<i>Fibra de coco (Cocos nucifera)</i>	1177	93,8	23,9-51,4	95-118	2,8
<i>Malva (Urena lobata)</i>	1409	182,2	5,2	160	17,4
<i>Papel periódico desintegrado (P elliottii & E citriodora)</i>	1200-1500	400	<i>na</i>	300-500	10-40
<i>Bambú (Bambusa vulgaris)</i>	1158	145	3,2	575	28,2
<i>Piasava (Attalea funifera)</i>	1054	34,4-108	6,0	143	5,6

Obs: na = no se encontró información disponible.

Según estudios realizados en el país, la adición en un 1% de fibra de fique, aumenta la resistencia a la flexión y a la tensión alrededor de un 19 y 13 por ciento respectivamente [11,12,13]. Sin embargo, existen dos principales desventajas en la inclusión de fibras de fique y otras fibras naturales como refuerzo con relación al

empleo de fibras sintéticas que son: i) su elevado carácter hidrofílico, que conduce a una degradación química temprana dentro de la estructura, debido al carácter agresivo del ambiente que rodea al concreto; ii) y su bajo grado de adherencia debido a la diferente naturaleza química con relación al concreto (orgánico-cerámico), que impide la adecuada transmisión de esfuerzos entre ambos componentes [14].

Las fibras orgánicas contienen celulosa en su composición química como elemento más abundante [15]. La celulosa es capaz de absorber agua y humedad en una proporción de 6 al 20%, produciendo un hinchamiento que da lugar a problemas de inestabilidad dimensional y deficientes características mecánicas. Por otro lado, la existencia de sustancias cerosas en la superficie de la fibra dificulta la capacidad de la fibra para adherirse superficialmente al concreto. Además, la presencia de agua libre y grupos hidroxilo, principalmente en las regiones amorfas, contribuye a esta falta de adhesión fibra-concreto, repercutiendo directamente en la disminución de la resistencia a la compresión del concreto [16].

Es por ello que gran parte de la investigación actual en este campo está enfocada al empleo de tratamientos superficiales de las fibras [17] y al diseño de recubrimientos [18], con objeto de incrementar el carácter hidrofóbico de las fibras y su resistencia química, así como su adherencia con respecto al concreto. En este sentido, se ha mostrado un particular interés por la síntesis de recubrimientos por el método sol-gel, método empleado comercialmente para la preparación de materiales y compuestos de naturaleza cerámica, y que se caracteriza por poseer un excelente control sobre la pureza del producto y su composición, ofreciendo alta flexibilidad en el diseño de diferentes estructuras [19,20].

La síntesis de recubrimientos sol-gel se basa en la polimerización mediante reacciones de hidrólisis y condensación de una solución de precursores

moleculares (sol) que se transforman progresivamente en una red tridimensional (gel) [21]. Para ello existen dos tipos de precursores: los precursores de películas inorgánicas y los precursores de películas orgánicas. Los precursores de películas inorgánicas son del tipo metal-alcóxido de estructura $M(OR)_n$ donde M puede ser Si, Ti, Zr, Al, Fe o B, mientras que R es un grupo alquilo; sin embargo, suelen basarse en Si por su reactividad moderada, que hace más controlable el proceso de síntesis. El precursor de películas inorgánicas más comercialmente empleado es el tetraetoxisilano (TEOS) cuya fórmula química es $Si(OC_2H_5)_4$ [22,23]. Los recubrimientos formados a partir de dichos precursores se caracterizan por su excelente adhesión al material atribuida a la unión por enlaces covalentes que se forman entre los grupos hidroxilo (OH^-) del precursor y los que están presentes en la superficie del material a recubrir. En este sentido se postula la hipótesis de que los recubrimientos sol-gel base TEOS (SiO_2) pueden ser excelentes candidatos para la protección de fibras naturales debido al gran número de grupos hidroxilo presentes en la estructura de la celulosa. Por otro lado, cabe destacar que la naturaleza cerámica del recubrimiento de SiO_2 favorecería el incremento del grado de adhesión fibra-concreto [24]. Además, recientes investigaciones han postulado que la sílice mejora la compacticidad del concreto y, por tanto, sus propiedades mecánicas [25]. No obstante, el comportamiento cerámico del TEOS favorece el agrietamiento cuando se buscan recubrimientos de elevado espesor, y también su implementación es limitada debido a las altas temperaturas de curado requeridas (400-1000°C).

Por otro lado, los precursores de películas orgánicas suelen ser del tipo organoalcóxido, de estructura $R_o-Si(OR)_{n-1}$, donde R_o es un grupo funcional orgánico tipo amino, epoxi, vinilo, metacrilato, entre otros; éstos permiten aumentar el entrecruzamiento de la red, proporcionando mayor flexibilidad del recubrimiento y disminuyendo la temperatura de curado por debajo de 150 °C. El precursor glicidiltrimetoxisilano (GPTMS) es el más empleado por su cualidad aislante y carácter hidrofóbico [21], siendo ambas características de vital

importancia para su implementación en la síntesis de recubrimientos sobre fibras naturales. Sin embargo, el GPTMS, al igual que el resto de los precursores de películas orgánicas, presenta un bajo carácter adhesivo, indispensable en la utilización de un recubrimiento por el método sol-gel.

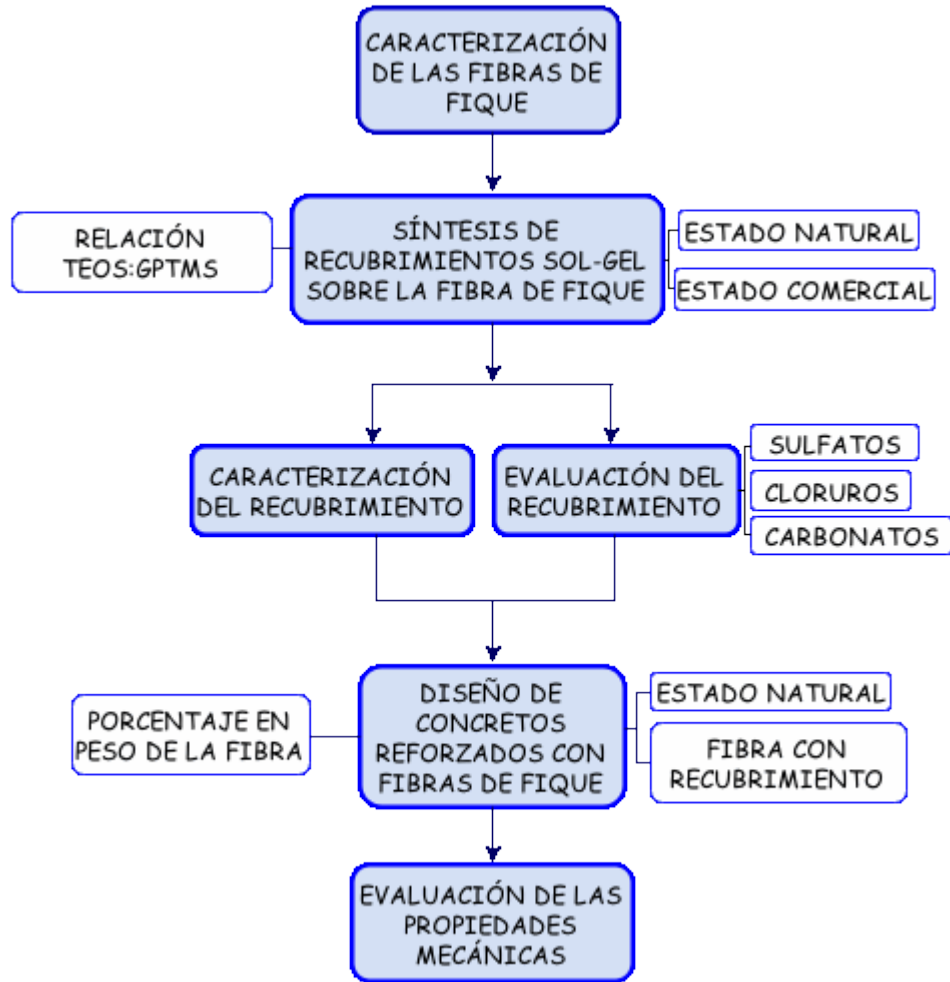
Es por ello que, en la actualidad, se destaca la síntesis de recubrimientos híbridos, (inorgánico-orgánico), en la cual una adecuada relación entre ambos precursores permitiría obtener la debida adhesión del recubrimiento a la fibra de fique a la vez que se alcanza un carácter hidrofóbico adecuado para su protección.

Basado en lo anterior el presente proyecto tiene como objetivo la evaluación preliminar del diseño de recubrimientos híbridos sol-gel sobre fibras de fique para su potencial aplicación en la fabricación de concretos de alto desempeño bajo diferentes variables de síntesis. Con su desarrollo no sólo se pretende mejorar la calidad de los concretos de fabricación nacional, sino que además busca potenciar el desarrollo de empresas relacionadas con la agricultura de fique que, en gran medida, ayudaría a fomentar el desarrollo económico de la región de Santander.

1 METODOLOGÍA

En la Figura 1 se presenta el diagrama del procedimiento experimental.

Figura 1. Diagrama del procedimiento experimental.



1.1 MATERIAL OBJETO DE ESTUDIO

El material de estudio fue la fibra de fique proporcionada por la empresa Fibras Naturales de Santander ECOFIBRAS. Las fibras fueron estudiadas en dos estados diferentes, natural y comercial. La fibra de fique natural (N) se caracteriza por ser separada de la corteza de las hojas y ser sometida a un proceso de lavado con el fin de retirar los residuos de corteza, seguida del secado a temperatura ambiente.

Por otro lado, la fibra de fique comercial (C) se somete al mismo proceso, sin embargo se caracteriza por adicionarle aceite de palma y se finaliza en un proceso de cepillado, con el fin de proporcionar un mejor aspecto como materia prima para la fabricación de artesanías [26]. En la tabla 2 se muestra la composición química de la fibra de fique empleada en el trabajo, donde se resalta que alrededor del 86% de la composición está constituida por celulosa y hemicelulosa [27].

Tabla 2. Composición química de la fibra de fique empleada en el trabajo.

<i>Componentes</i>	<i>Lignina (%)</i>	<i>Celulosa (%)</i>	<i>Hemicelulosa (%)</i>	<i>Extractivos (%)*</i>	<i>Cenizas (%)</i>
<i>Fibra de fique (Agave sisalana)</i>	11,00	73,11	13,33	1,33	0,33

**sales minerales, almidón, galactanos, sustancias pépticas, colorantes y otros azúcares, ceras, grasas, resinas, aceites y taninos (polifenoles).*

El desarrollo del presente proyecto comprende cuatro etapas fundamentales: i) la caracterización de la fibra de fique en estado natural y comercial; ii) el diseño de recubrimientos sol-gel con el fin de evitar la degradación de las fibras y aumentar el carácter hidrofóbico; iii) la evaluación de la degradación de la fibra recubierta en medios agresivos simulados; y, por último, iv), el diseño del concreto reforzado con fibra de fique recubierta y su evaluación mecánica.

1.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS FIBRAS DE FIQUE

La caracterización de la fibra de fique fue realizada mediante ensayos de porcentaje de humedad, caracterización morfológica y ensayos de tensión descritos a continuación.

1.2.1 Determinación del Porcentaje de Humedad: La determinación del porcentaje de humedad de la fibra de fique se llevó a cabo siguiendo la norma NTC-1378 [28]. Mediante este ensayo se determina el porcentaje de humedad según la pérdida de peso de las fibras al ser sometidas a una temperatura de 105°C hasta alcanzar un peso constante. Los ensayos se llevaron a cabo en la balanza de determinación de humedad AND modelo MX-50 ubicada en la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander (UIS). Estos se realizaron por triplicado para garantizar la reproducibilidad de los resultados. El tamaño de la muestra analizada fue de aproximadamente un gramo.

1.2.2 Caracterización morfológica: La caracterización morfológica de las fibras de fique natural y comercial fue realizada mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). Para ello se empleó un microscopio electrónico QUANTA FEG 650 facilitado por el Laboratorio de Microscopía ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará de la UIS, que cuenta con dos tipos de detectores: uno de energías dispersivas de rayos X (EDX), que permite el análisis cualitativo/cuantitativo en cualquier tipo de muestra; y un detector de electrones retrodispersados (BSE), que permite el análisis de superficies mediante contraste de número atómico promedio (Z-contrast) de las fases presentes, ya que la fibra de fique es un material no conductor, éstas fueron recubiertas con oro mediante la técnica “sputtering”.

1.2.3 Ensayo de Tensión: Previo al ensayo de tensión se determinó el diámetro de las diferentes fibras de fique mediante el microscopio óptico OLYMPUS GX71 ubicado en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la UIS. Se tomaron diferentes medidas para cada muestra y se consiguió un diámetro promedio que fue tenido en cuenta para el análisis del ensayo de tensión. Para llevar a cabo el ensayo de tensión a las fibras de fique se estableció una velocidad de ensayo de 1mm/s y una longitud efectiva de muestra de 20mm, estos parámetros fueron adoptados de acuerdo a la norma ASTM D 3822. Las fibras de fique fueron articuladas en grupos de 15, 20 y 25 fibras, elegidos de esta manera puesto que no había a disposición un tipo de mordazas indicado para un número menor de fibras y con el objeto de evaluar la influencia del aumento de fibras en la resistencia a la tensión. El ensayo se realizó con el equipo de tensión Tinius olsen H25KS dentro del Grupo de Investigación en Desarrollo y Tecnología de Nuevos Materiales (GIMAT) de la UIS.

1.3 SÍNTESIS DE RECUBRIMIENTOS SOL-GEL SOBRE LA FIBRA DE FIQUE

Los soles fueron preparados a partir del precursor de películas inorgánicas tetraetoxisilano (TEOS) y el precursor de películas orgánicas glicidiltrimetoxisilano (GPTMS). Con el fin de estudiar la influencia de los precursores inorgánicos y orgánicos sobre las propiedades de los recubrimientos se fijaron las relaciones molares TEOS/GPTMS de 3:1, 1:1 y 1:3. Se empleó etanol como solvente y medio ácido como catalizador para dar inicio a las reacciones de hidrólisis y condensación. El proceso se llevó a cabo a temperatura ambiente y a una velocidad de agitación constante de 250 rpm por 15 minutos; a continuación el sol se cubrió y se dejó envejecer por 24 horas [29,30].

Las fibras de fique fueron posteriormente recubiertas por inmersión. Para ello se prepararon fibras de fique natural y comercial con una dimensión de 1,5 cm, la determinación de esta longitud se basó en datos encontrados en un artículo científico sobre el refuerzo de concretos con fibras naturales [17] y se sumergieron

en el sol envejecido por un tiempo de 10 min. A continuación, las fibras fueron extraídas y sometidas a un tratamiento térmico que consistió en una primera etapa 30 minutos a temperatura ambiente, seguida de 4 horas a 60°C y, por último, 2 horas a 120°C.

1.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS SOL-GEL

Los recubrimientos obtenidos fueron caracterizados empleando el mismo microscopio electrónico de barrido (MEB) empleado en la caracterización inicial de las fibras de fique. De este estudio se seleccionó el tipo de fibra y la relación TEOS/GPTMS con el mejor desempeño, para los estudios posteriores de degradación y diseño de concreto reforzado.

1.5 EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LA FIBRA DE FIQUE EN MEDIOS AGRESIVOS SIMULADOS

De acuerdo a estudios realizados al concreto [31,32], se conocen tres ambientes agresivos en donde la estructura de concreto sufre degradación: ambientes sulfatados, salinos (clorurados) y carbonatados. Debido a esto, las fibras de fique con y sin recubrimiento fueron sumergidas en medios que simulan dichos ambientes: Na_2SO_4 en una concentración de 6000 ppm para simular ambientes sulfatados, NaCl al 3,5% en peso para simular el ambiente salino y CaCO_3 al 1% en peso para simular el efecto de la carbonatación. Los ensayos se realizaron por un tiempo de inmersión de 24 horas. Posteriormente, el estado final de las fibras fue evaluado empleando el mismo microscopio electrónico de barrido ambiental (MEB) usado en la caracterización inicial de las fibras de fique.

1.6 DISEÑO DE CONCRETOS REFORZADOS CON FIBRA DE FIQUE

Para el diseño de las probetas de concreto se tuvo en cuenta la materia prima a utilizar, el diseño de mezcla empleada y el método de fraguado y curado.

1.6.1 Materia prima: Para la elaboración de las muestras se utilizaron los siguientes materiales: agua, cemento Cemex, grava como agregado grueso con tamaño máximo de 19 mm o $\frac{3}{4}$ " y arena como agregado fino con módulo de finura de 3,0. Los materiales y su caracterización fueron obtenidos en el Centro de Caracterización de Materiales ubicado en edificio Álvaro Beltrán Pinzón en la UIS.

1.6.2 Diseño de mezcla y elaboración de probetas: Se realizó el diseño de mezcla siguiendo el método ACI 211 con el cual se obtiene la dosificación del concreto, con una relación agua/cemento (a/c) de 0,5. Se fabricaron probetas cilíndricas de concreto en moldes de 10 cm de diámetro y 20 cm de alto con un peso resultante de aproximadamente 4 Kg cada una. Se llevaron a cabo cinco prototipos que comprendieron concreto sin fibras, concreto con fibras sin recubrimiento en proporciones de 0,1 y 0,25 % en peso y concreto con fibras recubiertas en proporciones de 0,1 y 0,25 % en peso. La elaboración de las probetas se llevó a cabo según norma NTC 1377 [33].

1.6.3 Fraguado y curado: El proceso de fraguado consistió en dejar los moldes con concreto 24 horas a temperatura ambiente. Una vez cumplido el tiempo, se procedió al desencofrado de las probetas por medio de un compresor de aire. Seguido a esto, para la etapa de curado los cilindros de concreto se llevaron a una pila con agua garantizando el 100% de humedad, y temperatura ambiente conforme lo establecido en la norma anteriormente citada, donde permanecieron por 14 días.

1.7 EVALUACIÓN DE LA PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO REFORZADO CON FIBRA DE FIQUE

Para evaluar la influencia de la fibra de fique recubierta en el diseño de concretos, se sometieron las probetas a ensayos de tensión y compresión.

1.7.1 Ensayo de resistencia a la tensión: El ensayo de resistencia a la tensión de las probetas de concreto diseñadas, se llevó a cabo según la norma NTC 722 con el equipo Astred J. AMSLER Y CIA. SCHAFFHAUSEN ubicado en el edificio Álvaro Beltrán Pinzón de la UIS. Este se realizó por triplicado para garantizar la reproducibilidad de los resultados.

1.7.2 Ensayo de resistencia a la compresión: El ensayo de resistencia a la compresión de las probetas de concreto diseñadas, se llevó a cabo con el mismo equipo del ensayo de tensión y según la norma ASTM C39 Y NTC 673. Con este ensayo se buscó evaluar la influencia del recubrimiento en la resistencia a la compresión, la que en estudios previos se veía afectada por la adición de fibras de fique [11,13]. Este se realizaron por triplicado para garantizar la reproducibilidad de los resultados.

2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA DE FIQUE:

Se analizaron los métodos empleados para el análisis del material de estudio, tales como porcentaje de humedad, morfología, ensaya a tensión.

2.1.1 Determinación del porcentaje de humedad: El análisis del porcentaje de humedad para los dos tipos de fibras estudiadas mostró que la fibra comercial contiene $9,8 \pm 0,6$ %, mientras que la fibra natural contiene $10,8 \pm 1,0$ %. Los resultados de humedad obtenidos de dicho ensayo se encuentran en la tabla 3.

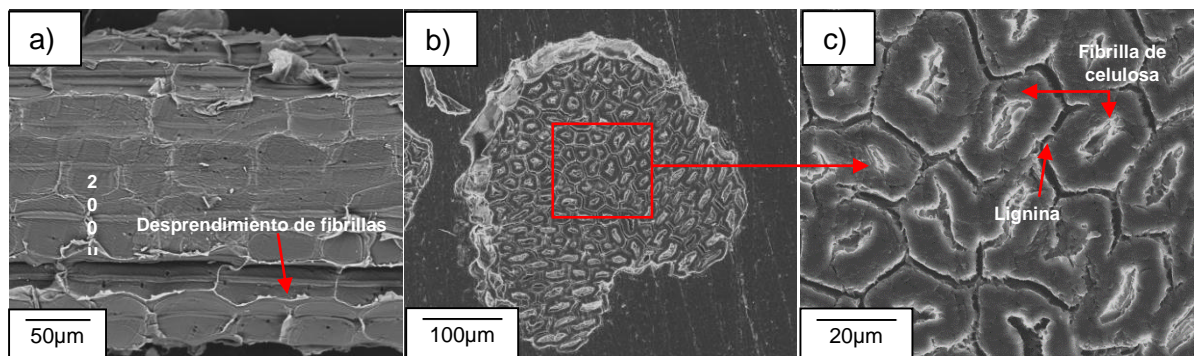
Tabla 3 Porcentaje de humedad de la fibra de fique en estado natural y comercial.

<i>Muestras</i>	<i>N1</i>	<i>N2</i>	<i>N3</i>	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>
<i>Peso Inicial [g]</i>	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
<i>Peso final [g]</i>	1.05	1.05	1.07	1.06	1.07	1.06
<i>% de Humedad</i>	11.82	10.73	9.90	9.89	9.11	10.30
<i>Promedio del porcentaje de humedad</i>		10.8			9.8	

Aunque la diferencia del porcentaje de humedad no es muy significativa, las fibras comerciales contienen una menor cantidad de agua, debido probablemente a la adición de aceite vegetal, proceso necesario para la manufactura de artesanías. Así mismo, es importante resaltar que el secado de las fibras no es un proceso controlado, dado a que se realiza a condiciones climáticas y sin tecnificación, por lo que el contenido de humedad entre fibras puede variar.

2.1.2 Caracterización morfológica: En la Figura 2 se presentan las micrográficas electrónicas de la sección transversal y longitudinal de la fibra de fique en estado natural. Se puede apreciar que las fibras de fique presentan un diámetro promedio de alrededor de 200 μm ; sin embargo, cabe resaltar el desprendimiento de fibrillas que ocurre de manera ocasional en algunas de las fibras de fique, posiblemente debido a la manipulación y tratamiento de las mismas durante su recolección (Figura 2(a)).

Figura 2. Micrográficas electrónicas de la fibra de fique en estado natural: a) sección longitudinal; b) sección transversal; c) detalle sección transversal.

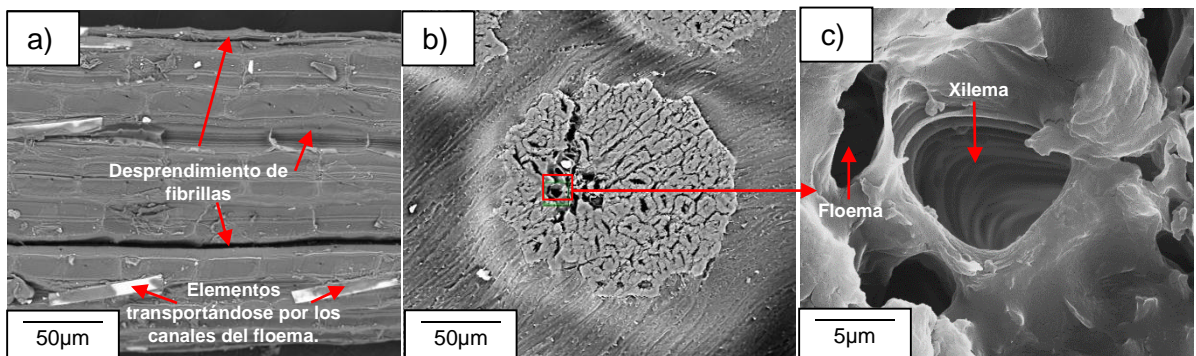


Por otro lado, en la Figura 2(b) se puede observar que la fibra está conformada por fibrillas de celulosa, que presentan una estructura interna característicamente porosa que explica la gran capacidad que tienen estas fibras de absorber humedad. Así mismo, en la Figura 2(c) se presentan con mejor detalle las fibrillas de celulosa, donde se puede apreciar su estructura hexagonal y cuyas paredes, de acuerdo a la bibliografía consultada, se encuentran soldadas por la presencia de lignina que actúa como adhesivo [34,35].

De igual manera, en la Figura 3 se presenta las micrográficas electrónicas de la sección transversal y longitudinal de la fibra de fique en estado comercial. Es de resaltar que al hacer una comparación con la fibra de fique natural, se observa que la fibra comercial presenta un mayor desprendimiento de fibrillas. Esto es debido

probablemente a que la fibra comercial es sometida a un proceso posterior de cepillado, ocasionando un desprendimiento de los fragmentos de las fibrillas y, por lo tanto, la pérdida de uniformidad de la superficie de la fibra (Figura 3(a)). Además, en la sección transversal de la fibra de fique comercial se evidencian los canales característicos de la estructura vegetal, xilema y el floema que conforman el sistema vascular ubicado en las fibras de la planta de fique, los cuales conducen agua, nutrientes y minerales [36]. Estos conductos aumentan aún más la porosidad y, por tanto, la capacidad de absorción de humedad (Figuras 3(b-c)).

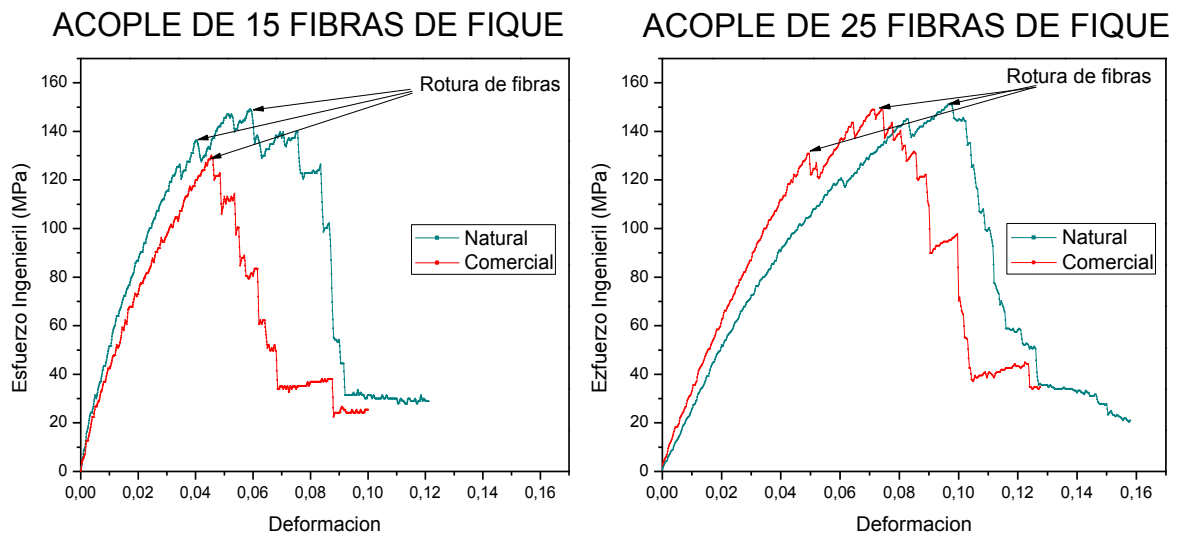
Figura 3. Micrografías electrónicas de la fibra de fique en estado comercial: a) sección longitudinal; b) sección trasversal; c) detalle sección trasversal.



En el anexo A se hace una representación ilustrativa de una fibra de fique, donde se comprende de mejor manera su estructura interna, la unión entre fibrillas y la explicación de su forma hexagonal debido a su composición en celulosa [33].

2.1.3 Ensayo de resistencia a la tensión: En la Figura 4 se presenta el comportamiento de las fibras de fique en el ensayo de tensión.

Figura 4. Ensayo de tensión de las fibras de fique comercial y natural bajo diferentes acoples.



Se puede observar como las fibras de fique presentaron un comportamiento netamente elástico, cediendo a la ruptura inmediatamente después de este comportamiento. Se destaca que el límite elástico de las fibras se encuentra en el rango de 127-146 MPa para el fique natural y entre 125-136 MPa para el fique comercial. El menor valor de resistencia a la tensión de las fibras comerciales posiblemente sea debido a que éstas son sometidas al proceso de cepillado lo que afecta su estructura superficial facilitando su ruptura. Por otro lado, el módulo de elasticidad de las fibras se estima entre 2-4 GPa, independiente del tipo de fibra, ya que la rigidez de las mismas se encuentran estrictamente relacionada con la estructura celulosa-hemicelulosa-lignina, principales componentes de la fibra de fique y no del tratamiento que se da a las mismas. Finalmente, el % de elongación, anterior al punto de ruptura alcanza valores entre 3,5-6,5 %. Es de aclarar que el valor de modulo elástico se determinó con la pendiente de la deformación elástica y el % de elongación con la ruptura de la primera fibra o conjunto de fibras. Dicho criterio se estableció con el fin de descartar el comportamiento descendente después de la máxima tensión alcanzada en el ensayo, ya que las fibras que

presentaron rotura posterior presentaron problemas en su sujeción alterando el resultado de elongación y, consecuentemente, de módulo de elasticidad.

En datos obtenidos en otra prueba de tensión [37] realizada al fique, la resistencia a la tensión promedio fue de 305,15 MPa superando de esta forma al valor generado por este ensayo, la diferencia radica en que las muestras para el ensayo mencionado fueron hilos calibre N° 1, los que comprenden un número de 15-20 fibras entrecruzadas generando así mayor resistencia a la fractura debido al entrecruzamiento. La capacidad que tiene el material a deformarse elásticamente arrojó un valor menor que los investigados, que cuentan con un módulo de elasticidad promedio de 7,52 GPa, de esto se infiere que la torsión generada por el entrecruzamiento de las fibras de fique poseen mayor capacidad de resistencia a la deformación del material. En cuanto al porcentaje de elongación los valores arrojados por este ensayo presentan una similitud con los datos consultados, que cuentan con un valor de elongación promedio de 4,96%, lo que significa que el entrecruzamiento de las fibras de fique no produce un cambio significativo en la capacidad de deformación anterior al punto de ruptura.

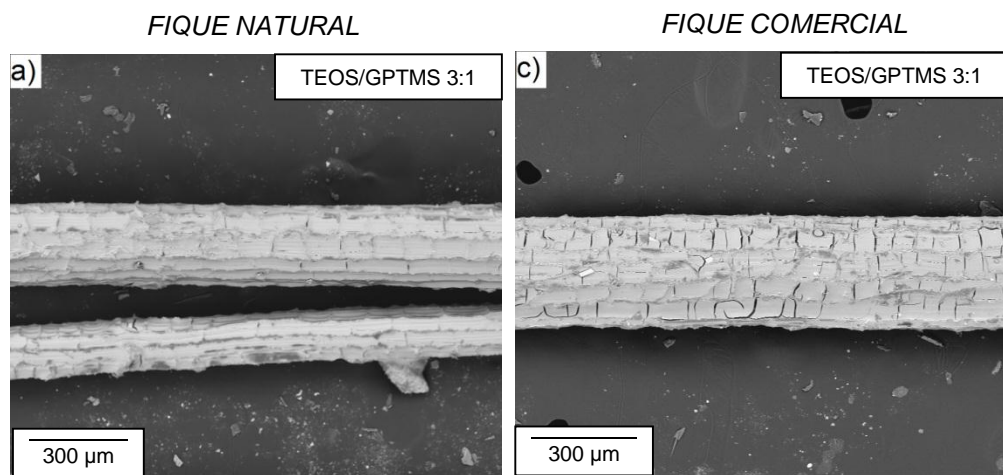
2.2 SÍNTESIS DE RECUBRIMIENTOS SOL-GEL SOBRE LA FIBRA DE FIQUE

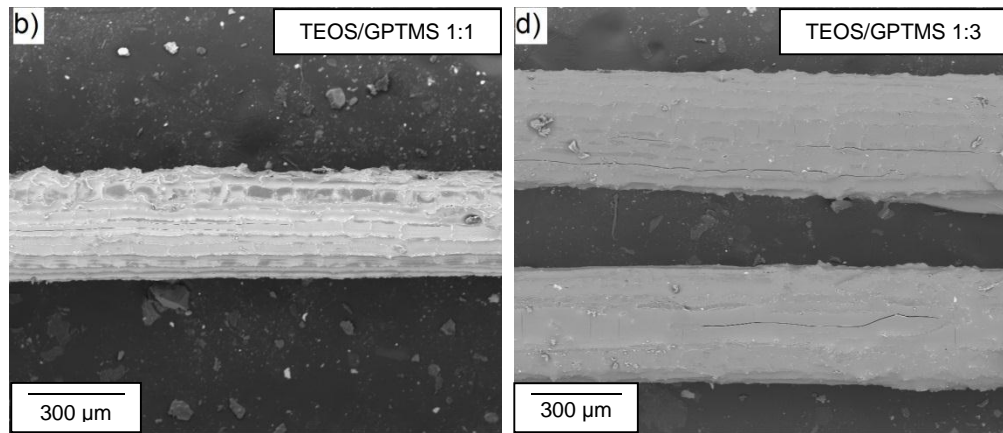
En la figura 5 se presentan las micrografías electrónicas de los recubrimientos obtenidos sobre las fibras de fique para diferentes relaciones molares TEOS:GPTMS estudiadas.

Es posible observar que las fibras presentan recubrimiento en toda su superficie sin importar la relación molar TEOS:GPTMS utilizada, dejando ver que el proceso de inmersión del fique en el sol sintetizado fue efectivo. Sin embargo, también se hace evidente que las películas, pese a adherirse en toda la superficie de la diferentes fibras estudiadas, presentan serias diferencias morfológicas.

En este sentido, observando con mayor detalle las micrografías electrónicas de los recubrimientos (figura 6), se aprecia que la calidad del recubrimiento varía de forma ostensible con el tipo de fibra y relación TEOS/GPTMS empleados. En primer lugar, es de resaltar que las mejores características morfológicas se obtienen para los recubrimientos sintetizados sobre la fibra de fique natural, obteniéndose recubrimientos homogéneos y uniformes. Sin embargo, el maltrato generado a la fibra de fique comercial en el proceso de peinado de la fibra comercial genera formas irregulares en su superficie, que podrían estar generando tensiones en el recubrimiento y causando una mayor susceptibilidad a la aparición de grietas. Por otro lado, a medida que la proporción del precursor de películas orgánico GPTMS aumenta, el recubrimiento mejora disminuyendo la aparición de imperfecciones, especialmente para la relación TEOS/GPTMS (1:3) que no presentó evidencia significativa de grietas (aunque algunas aparecen ocasionalmente (figuras 6(e) y 6(f)). Este hecho es debido probablemente a la mayor flexibilidad que otorga el precursor GPTMS al recubrimiento [21,23], reflejándose en una mejor deposición del recubrimiento sobre la superficie irregular de la fibra de fique.

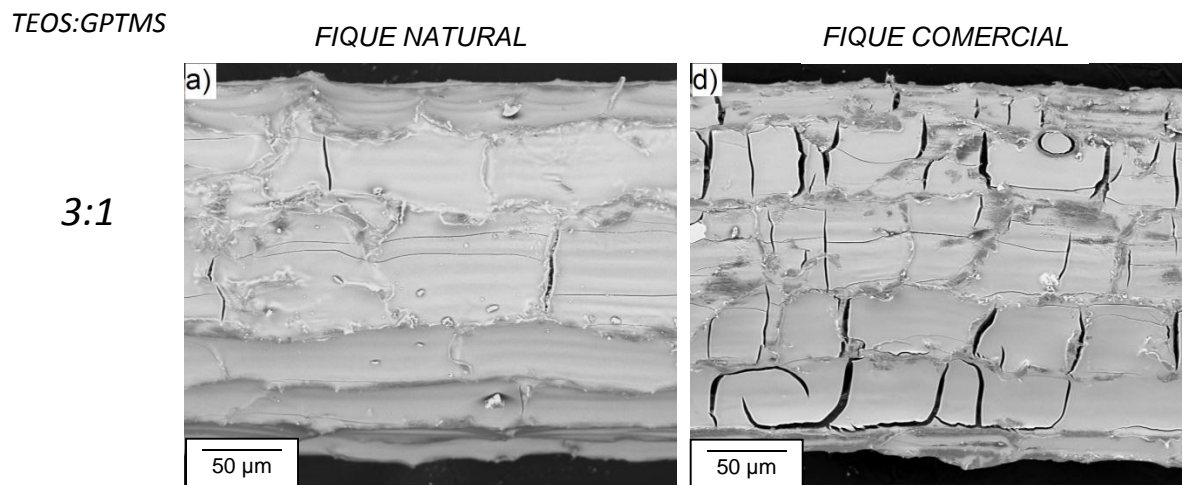
Figura 5. Micrografías electrónicas de fibras de fique natural y comercial con diferentes relaciones molares TEOS:GPTMS.

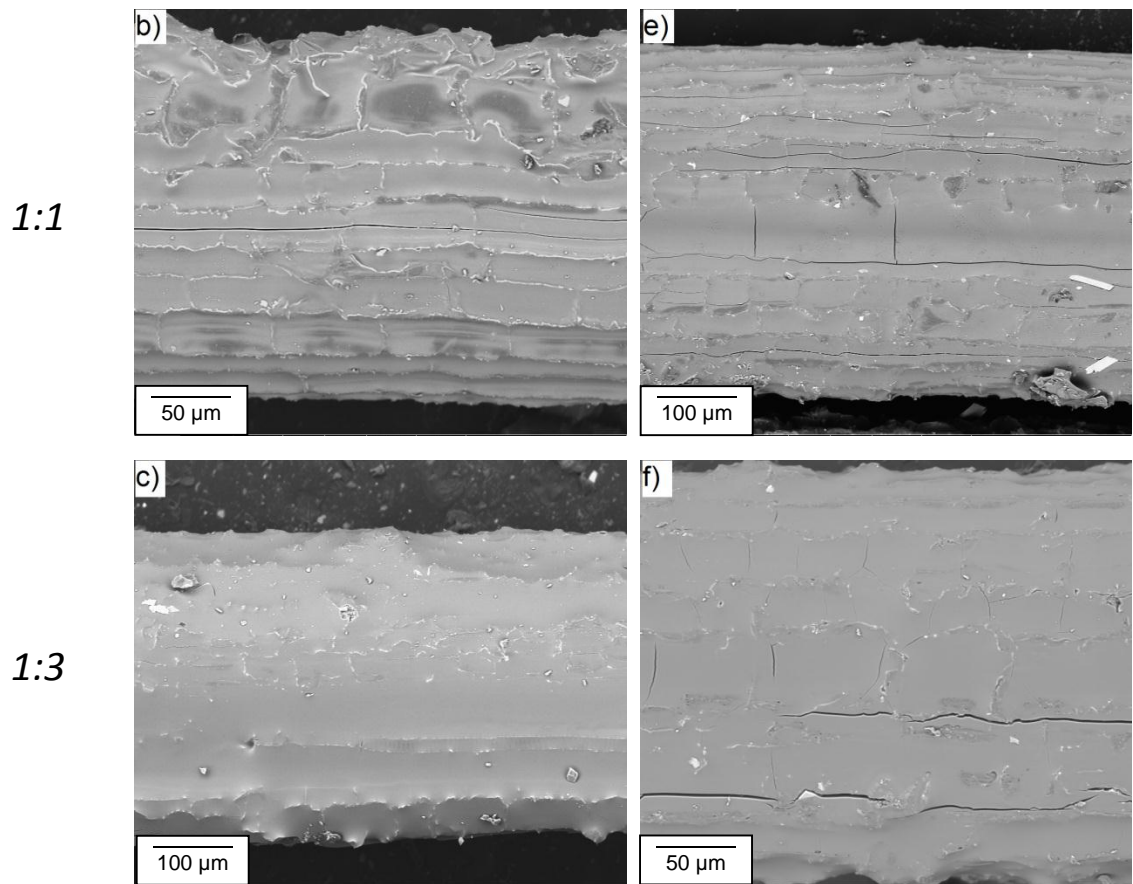




Así mismo, el incremento del precursor de películas orgánicas, parece no afectar a la adhesión del recubrimiento de la fibra, puesto que aunque ésta se genera por la mayor presencia de los grupos hidroxilo (OH^-) en el precursor de películas inorgánicas [20], el material (fibra de fique) posee un gran número de grupos OH^- debido a su carácter orgánico, lo que hace más fuerte la unión entre el recubrimiento y la fibra.

Figura 6. Detalle micrografías electrónicas de fibras de fique natural y comercial con diferentes relaciones molares TEOS:GPTMS.





Basado en los anteriores resultados se decidió seguir el resto de la investigación empleando fibras naturales y recubrimientos con soles de relación TEOS/GPTMS 1:3, por presentar en conjunto las mejores características superficiales.

2.3 EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN DE LA FIBRA DE FIQUE EN MEDIOS AGRESIVOS SIMULADOS

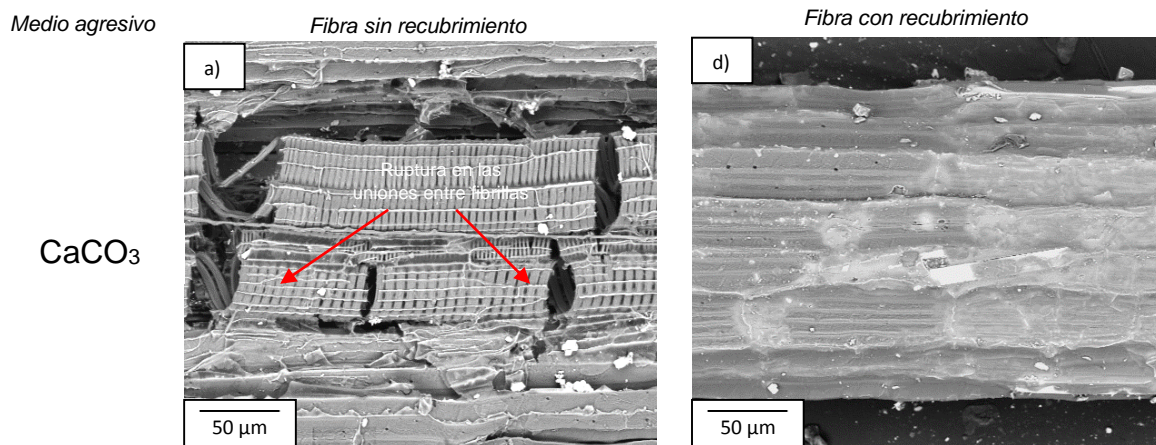
En la figura 7 se presentan las micrografías electrónicas obtenidas en la sección longitudinal de la fibra natural con y sin recubrimiento para la relación molar 1:3 (TEOS:GPTMS) expuestas a soluciones de CaCO_3 , NaCl y Na_2SO_4 .

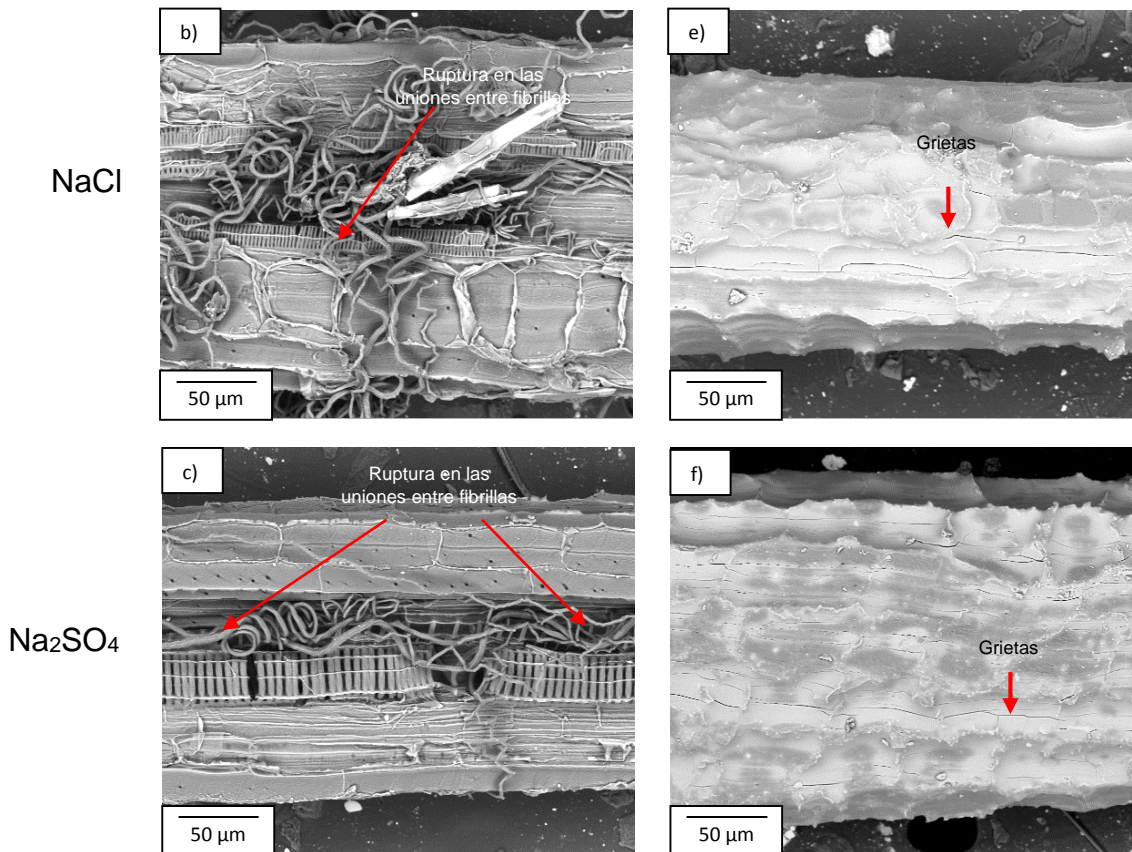
Es posible observar claramente el grave daño sufrido por las fibras sin recubrimiento como consecuencia de su alto carácter hidrofílico, independientemente de la solución a la que se estuvo expuesta (figuras 7(a)-7(c)).

La degradación es tan fuerte que la disolución de la lignina y la hemicelulosa provoca la ruptura de las uniones entre las fibrillas que conforman la fibra lo que conlleva a la disminución de la firmeza y la pérdida de cohesión interna de la estructura. Debido a dicha degradación, las fibrillas se enrollan perdiendo su tensión característica.

Por el contrario, analizando el ataque producido específicamente por cada una de las soluciones sobre las muestras recubiertas (figuras 7(d)-7(f)), se observa que el recubrimiento presenta una resistencia muy significativa en todos los medios siendo más efectiva en las soluciones de NaCl y Na₂SO₄. En este sentido, el recubrimiento ofrece un elevado grado de protección a la fibra de fique, aumentando la hidrofobicidad de la misma y evitando la entrada de cualquier sustancia perjudicial que provoque el mismo tipo de degradación observada para las fibras en estado de recepción. En este sentido, es de resaltar que la presencia de grietas en la superficie no pareció afectar en el grado de protección del recubrimiento sobre la fibra, al menos para el tiempo de ensayo establecido (24 horas).

Figura 7. Micrografías electrónicas de la sección longitudinal de la fibra natural y de la fibra natural con recubrimiento para la proporción molar 1:3 (TEOS:GPTMS) expuestas a medios agresivos.





2.4 ENSAYO A RESISTENCIA A LA TENSIÓN DE LOS CONCRETOS REFORZADOS CON FIBRAS DE FIQUE

En la tabla 4 se presentan los valores de la resistencia a la tensión obtenidos para las diferentes probetas de concreto analizadas, con adición de fique recubierto para una relación molar 1:3 TEOS:GPTMS y sin recubrimiento.

Tabla 4 Evolución de la resistencia a tensión del concreto reforzado con fibras de fique con y sin recubrimiento.

Muestra de concreto	Sin fique	0,1% sin recubrimiento	0,1% con recubrimiento	0,25% sin recubrimiento	0,25% con recubrimiento
Resistencia a la tensión (MPa)	$2,45 \pm 0,1$	$2,52 \pm 0,6$	$2,63 \pm 0,3$	$2,66 \pm 0,2$	$2,90 \pm 0,3$

Se observa que las probetas diseñadas en presencia de fique como refuerzo presentan una resistencia a la tensión mayor a las probetas sin refuerzo, incrementando su valor desde 2,45 *MPa* para la probeta sin refuerzo a 2,52 *MPa* para las probetas con 0,1% de fique y 2,66 *MPa* para la probeta con 0,25% de fique como refuerzo. Así mismo, la presencia del recubrimiento sol-gel sobre las fibras de fique incrementan aún más dichos valores de resistencia, para alcanzar un valor máximo de 2,63 y 2,90 *MPa* para los concretos reforzados con 0,10% y 0,25% de fibra de fique recubierta, respectivamente, lo que supone un aumento de la resistencia a la tensión de 7,3% y 18,4% con respecto al concreto sin reforzar. Este hecho, en principio, debería estar relacionado con el incremento del grado de adhesión fibra-concreto originado por el recubrimiento al ser éste de naturaleza cerámica y, particularmente con alto contenido en SiO₂, componente empleado en forma de nanopartículas y escorias, por dar un carácter pucelánico (vítreo) al concreto y que se traduce en una mejora significativa en el grado de cohesión de la estructura interna del mismo [25].

2.5 ENSAYO A RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LOS CONCRETOS REFORZADOS CON FIBRAS DE FIQUE

En la tabla 5 se resumen los resultados del ensayo de la resistencia a la compresión para las diferentes probetas de concreto diseñadas con adición de fique como refuerzo y diferentes porcentajes en peso de fique con y sin recubrimiento para una relación molar TEOS:GPTMS 1:3. En primer lugar, la resistencia a la compresión del concreto sin refuerzo alcanzó un valor de 21,9 *MPa* que se sitúa dentro del rango de los concretos de resistencia moderada [40]. Es de mencionar que el valor esperado para un concreto con buena resistencia a la tensión, tiene que estar dentro del 10% de la resistencia a la compresión requerida [41] evidenciando, de esta manera, que el concreto fabricado en esta investigación cumple con una buena resistencia a la compresión y tensión situándose en el rango de los concretos de resistencia moderada (17- 40 *MPa*) como se mencionó anteriormente.

Tabla 5 Evolución de la resistencia a la compresión del concreto con adición de fique.

<i>Probetas con proporciones de fique (% peso)</i>	<i>Sin fique</i>	<i>0,1% sin recubrimiento</i>	<i>0,1% con recubrimiento</i>	<i>0,25% sin recubrimiento</i>	<i>0,25% con recubrimiento</i>
<i>Resistencia a la compresión (MPa)</i>	21,89±2,6	18,02±0,8	19,53±2,6	15,04±1,6	17,83±0,3

Por otro lado, al contrario de lo observado en el ensayo de tensión, la resistencia a la compresión disminuye a medida que se emplea un mayor porcentaje de fibra de fique, alcanzando un valor final de 18,02 y 15,04 MPa para los concretos reforzados con 0,10% y 0,25% peso de fibra de fique respectivamente (reducción de 17,7% y 31,3%). Este hecho tiene sentido si se entiende que la fibra de fique no presenta resistencia adecuada bajo este tipo de esfuerzo. Sin embargo, se puede observar como el fique con recubrimiento sol-gel mejora sustancialmente los valores de resistencia que, aunque no llega a evitar la reducción de la resistencia a la compresión, sí amortigua significativamente el impacto negativo de la inclusión de la fibra de fique sobre dicha propiedad. Como dato, los concretos reforzados con 0,10% y 0,25% de fibra de fique recubierta alcanzaron valores de resistencia a la compresión de 19,53 y 17,83 MPa, que supone una disminución de resistencia a la compresión de 10,7% y 18,5% con respecto al concreto sin refuerzo de fique, pero un aumento de 7% y 12,8% con respecto a los concretos reforzados con fibra de fique sin recubrimiento. De nuevo, se confirma entonces que el recubrimiento sintetizado ofrece a las fibras un carácter adhesivo y protector que incrementa el grado de cohesión de la estructura fibra-concreto y permite un mejor desempeño mecánico al favorecer la trasmisión de esfuerzos entre ambos componentes.

Finalmente, cabe aclarar que el objetivo del presente proyecto fue llevar a cabo un estudio preliminar para determinar la viabilidad de emplear fibras de fique como refuerzo de concretos con objeto de mejorar su resistencia a la tensión y

determinar el efecto que proporcionaría el diseño de recubrimientos sol-gel, sobre la degradación de la fibra de fique y sobre el grado de adhesión fibra-concreto. En ese sentido, los resultados obtenidos son muy prometedores teniendo en cuenta que sólo se llevó a cabo un estudio preliminar con condiciones relativamente de síntesis sol-gel, tamaño de fibra y porcentajes, etc., por lo que queda todavía un gran margen de mejora. Por otro lado, con relación al impacto negativo de la fibra de fique en la resistencia a la compresión del mismo, es importante resaltar que el presente proyecto se encuentra enmarcado dentro de un proyecto que pretende la mejora de las propiedades mecánicas del concreto (entre ellas compresión) y que incluye el empleo de nanopartículas cerámicas, sustancias químicas y residuos industriales para mejorar diferentes tipos de propiedades de la estructura del mismo. Se aclara que las probetas de concreto reforzado se fabricaron empleando el mismo procedimiento utilizado para el desarrollo de concretos convencionales, procedimiento que muy probablemente no sea el más satisfactorio para concretos reforzados y necesite ser optimizado.

3 CONCLUSIONES

- El empleo de fibra de fique natural en la fabricación de concretos reforzados permite incrementar la resistencia a la tensión del concreto. Por el contrario, la fibra comercial es sometida a un proceso de cepillado con aceite vegetal que provoca el desprendimiento de fibrillas, hecho que disminuye su resistencia a la tensión y la uniformidad superficial, impidiendo la adecuada adhesión del recubrimiento sol-gel.
- El diseño de recubrimientos sol-gel sobre las fibras de fique se encuentra afectado por la relación entre precursores TEOS:GPTMS de manera que a medida que disminuye dicha relación y la proporción del precursor orgánico GPTMS aumenta, se incrementa la flexibilidad del recubrimiento. En este sentido, los recubrimientos sintetizados con relación de precursores 1:3 permite la obtención de recubrimientos uniformes y prácticamente libres de agrietamiento (sobre la fibra de fique natural).
- El recubrimiento sol-gel (relación TEOS:GPTMS 1:3) incrementa el grado de hidrofobicidad de la fibra de fique, ofreciendo significativa protección frente la degradación causada por el contacto de medios agresivos como carbonatos, cloruros y sulfatos. Así mismo, aumenta la resistencia a la tensión al concreto y minimiza la disminución de la resistencia a la compresión del mismo, hecho relacionado con el incremento del grado de adhesión fibra-concreto que proporciona el recubrimiento gracias a su naturaleza cerámica.

4 RECOMENDACIONES

- Se recomienda para estudios posteriores hacer un pre tratamiento a la fibra de fique con el fin de disminuir su carácter hidrofílico y capacidad de absorción, con objeto de optimizar la cantidad de solución de sol-gel empleada para su recubrimiento.
- Analizar el efecto del tiempo de envejecimiento del sol en la calidad del recubrimiento obtenido con relación a su uniformidad, espesor y posibilidad de agrietamiento. Así mismo, analizar el efecto del empleo de nanopartículas cerámicas en la mejora de la resistencia a la compresión del concreto.
- Emplear un proceso de fabricación más adecuado para el diseño de concretos reforzados con fibras naturales y evaluar su comportamiento frente al ensayo a compresión.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SANCHÉZ, Diego. Durabilidad y patología del concreto. 2 ed. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto – ASOCRETO, 2011. 182 p. ISBN: 9789588564081.
- [2] ARQHYS ARQUITECTURA. Concreto Simple y Reforzado. (Disponible en: <http://www.arqhys.com/casas/concreto-simple-reforzado.html>. Consultado el: 30 de abril de 2014).
- [3] SUBCOMITÉ DE FIBRAS ICONTEC. 2007. Explorando el Concreto Reforzado con Fibras (CRF). Noticreto. 84.
- [4] NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION. El Concreto en la Práctica (Disponible en: <http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/cip24es.pdf>. Consultado el: 30 de abril de 2014).
- [5] STULZ, Roland y MUKERJI, Kiran. Materiales de construcción apropiados; Catálogo de soluciones potenciales revisado edición ampliada. Londres: SKAT & IT Publications, 1981. p. 442.
- [6] OSORIO, J.; VARÓN, F. y HERRERA, J. Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar. Medellín, Dyna 2007., No. 153, p. 69-79. ISSN 0012-7353.
- [7] QUINTERO, S. y GONZÁLEZ, L. Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. Universidad del Norte, Ingeniería y Desarrollo, 2006. No. 20, p. 134-150. ISSN: 0122-3461.
- [8] ARSÈNE M-A, SAVASTANO Jr H, ALLAMEH SM, GHAVAMI K, SOBOYEJO W. Cementitious Composites Reinforced with Vegetable Fibers. En: Proceedings of the first interamerican conference on non-conventional materials and technologies in the eco-construction and Infrastructure. En: 13–16 November 2003, Joao-Pessoa Brazil, IAC-NOCMAT 2003, Procedimientos, And ISBN: 85-98073-02-4; 2003.

- [9] ECOFIBRAS LTDA. Los Mil Usos del Fique. (Disponible en: <http://ecofibrascuriti.com/razones-para-querer-y-creer-en-el-cultivo-del-fique/>. Consultado el: 30 de abril de 2014).
- [10] ECOFIBRAS LTDA. Razones Para Querer y Creer en el Cultivo del Fique. (Disponible en: <http://ecofibrascuriti.com/razones-para-querer-y-creer-en-el-cultivo-del-fique/>. Consultado el: 30 de abril de 2014).
- [11] JIMENEZ, B. Jonny. Uso de materiales alternativos para mejorar las propiedades mecánicas del concreto (fibra de fique). Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C.: Universidad La Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil, 2011. 62 p.
- [12] PARRA, Andres Guillermo y PARRA, Marco Fidel. Comportamiento del concreto hidráulico con adiciones de fibra. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, 2007. 75 p.
- [13] PINZÓN, S. Análisis de la resistencia a la compresión y flexión del concreto modificado con fibra de fique. Ingenierías, 2013. Vol. XVI, No. 61.
- [14] PACHECO TORGAL, F.; JALALI S. Cementitious Building Materials Reinforced with Vegetable Fibres. Elsevier 25, 2011. p. 575–581.
- [15] RIQUELME SÁNCHEZ, M. Química aplicada a la industria textil, Tomo II: Blanqueamiento de fibras textiles, tercera edición, 1983, p. 103-104.
- [16] YAN, L.; YIU-WING, M.; LIN, Y. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. En: composites Science and Technology. Sydney. Vol. 60, No. 11, Abr. 2000; 19p.
- [17] WEI, Jianqiang y MEYER, Christian. Improving degradation resistance of sisal fiber in concrete through fiber surface treatment. En: Elsevier B.V. Noviembre, 2013. Vol. 289, p. 511-523.
- [18] WANG, D.; WIERGAGEN, P. 2009. Sol–gel coatings on metals for corrosion protection. En: Progress in Organic Coatings. Pp 327-338.
- [19] BARRY, C.; GRANT, M. 2007. Sols, Gels and Organic Chemistry. En: Ceramic Materials Science and Engineering. Pp. 400-411.

- [20] ZHENG, S.; LI, J. 2010. Inorganic–organic sol gel hybrid coatings for corrosion protection of metals. *Journal of SOL-GEL Science and Technology*. Vol. 54. No. 2: p. 174-187.
- [21] SIMON, B.; TOMŠI, B.; OREL, B. JERMAN, I. Sol-gel Technology for Chemical Modification of Textiles. En: Department of Textiles, Faculty of Natural Sciences and Engineering, University of Ljubljana. National Institute of Chemistry, Ljubljana Slovenia; p. 17.
- [22] NIEVES, C. 2012. Caracterización y evaluación de la resistencia a la corrosión de recubrimientos híbridos sol-gel base TEOS/MPS sobre la aleación de aluminio AA2050-T8 bajo distintas variables de síntesis. Tesis Ing. Química. Univ. Industrial de Santander. 43 p.
- [23] VIEJO, F.; Coy, A.; Hernandez, L.; Peña, D.; Duarte, N.; Hernandez, C. 2013. Síntesis, caracterización y evaluación de recubrimientos híbridos porosos sol-gel dopados con acetato de cerio sobre la aleación de magnesio WE54-AE. *ITECKNE* Vol. 10 Número 2: p. 249-258.
- [24] CASTELLANO, M.; GANDINI, A.; FABBRI, P.; BELGACEM M. 2004. Modification of Cellulose Fibres with Organosilanes: Under What Conditions Does Coupling Occur? *J Colloid Interf Sci* 2004. p. 273-505.
- [25] ROMERO, H. L., et al. Durabilidad y propiedades mecánicas del hormigón autocompactante con adición de microsilíce y nanosilíce. En: 3 er Congreso Iberoamericano sobre hormigón autocompactante (3-4, diciembre: Madrid, España). Avances y oportunidades, 2012. p. 301.
- [26] COOHILADOS DEL FONCE LTDA; ECOFIBRAS-CURITI; SECRETARÍA DE AGRICULTURA DE SANTANDER. 2005. Hablemos de Fique en Santander y Colombia; Manual para el Cultivo. Santander, Graficad-Litografía. p. 18.
- [27] ARSÈNE M-A, SAVASTANO Jr H, ALLAMEH SM, GHAVAMI K, SOBOYEJO W. Cementitious Composites Reinforced with Vegetable Fibers. En: Proceedings of the first interamerican conference on non-conventional materials and technologies in the eco-construction and Infrastructure. En: 13–

16 November 2003, Joao-Pessoa Brazil, IAC-NOCMAT 2003, Procedimientos, And ISBN: 85-98073-02-4; 2003.

- [28] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Materiales textiles. Determinación de la humedad. NTC 1378. Bogotá, D.C. ICONTEC, 1978. 8 p.
- [29] CONTRERAS, G. 2011. Protección contra la corrosión de aleaciones ligeras mediante recubrimiento sol-gel. Tesis Ing. Meta. Univ. Simón Bolívar. 68 p.
- [30] HERNÁNDEZ, C., PARADA N. 2011. Desarrollo de recubrimientos sol-gel dopados con inhibidores de corrosión para la protección de aleaciones de magnesio. Tesis Ing. Químico. Univ. Industrial de Santander. 55 p.
- [31] GONZÁLES DE LA COTERA, Manuel. Ataque químico al concreto. EN:Exposición en el ciclo organizado por el ACI, Capítulo Peruano sobre Corrosión en Estructuras de Concreto (Diciembre: Perú) p. 17.
- [32] MOLINA MEDINA, Gustavo Carlos. Evaluación de la corrosión del acero en embebido en concreto con adición de microsilíce en solución acuosa de sulfato y cloruro. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2010. p.79.
- [33] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (INCONTEC). Elaboración y curado de muestras en el laboratorio. NTC 1377. Bogotá, D.C. ICONTEC, 1995. p.8.
- [34] DIRECCIÓN DEL DESARROLLO SECTORIAL SOSTENIBLE. 2006. Bogotá. Guía Ambiental del Subsector Fiquero; Cadena Productiva Nacional del Fique. Segunda Edición. Panamericana Formas e Impresos S.A. p. 21-25.
- [35] SAKA, B. Hemicellulose bioconversion. En: J Ind Microbiol Biot., 2003. Vol No. 30 p. 279-291.
- [36] BOTANIPEDIA. 2012. Plantas Vasculares y No Vasculares. (Disponible en: http://www.botanipedia.org/index.php?title=PLANTAS_VASCULARES_Y_NO_VASCULARES. Consultado el: 11 de septiembre de 2014)

- [37] Y, Sanabria, M. F. Contreras; “Fibra de fique como refuerzo para materiales compuestos -Universidad de los Andes”, IV Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica -Innovación Tecnológica, Energética y de Procesos con miras al TLC. Abril de 2008.
- [38] HPC MARKET CIENCIA, TECNOLOGÍA, NEGOCIOS, OCIOS. 2011. Xilema y floema: redes de interconexión y la evolución de las plantas. (Disponible en: www.ireneses.wordpress.com/2011/06/21redes-de-interconexion-y-la-evolucion-de-las-plantas/. Consultado el: 6 de septiembre de 2014).
- [39] SELECTIVIDAD. 2011. Polisacáridos estructurales. (disponible en: www.prepararlaselectividad.com/2011/06/polisacaridos-estructurales.html. Consultado el: 6 de septiembre de 2014).
- [40] LOPEZ, H., MONTEJI, L. 2001. Determinación de las propiedades mecánicas del concreto endurecido usadas en el diseño estructural para los concretos elaborados en la ciudad de Cali con materiales de la región. Tesis Ing. Civil. Univ. Del Valle. 113p.
- [41] RIVERA, G. Concreto Simple. Resistencia del Concreto. Universidad del Cauca. (Disponible en: <http://civilgeeks.com/2013/08/28/libro-de-tecnologia-del-concreto-y-mortero-ing-gerardo-a-rivera-l/> consultado el 8 de noviembre del 20014.)

BIBLIOGRAFÍA

HERNÁNDEZ, C., PARADA N. 2011. Desarrollo de recubrimientos sol-gel dopados con inhibidores de corrosión para la protección de aleaciones de magnesio. Tesis Ing. Químico. Universidad Industrial de Santander. 55 p.

PACHECO TORRAL, F.; JALALI S. Cementitious Building Materials Reinforced with Vegetable Fibres. Elsevier Vol.25, 2011. p. 575–581.

PARRA, Andres Guillermo y PARRA, Marco Fidel. Comportamiento del concreto hidráulico con adiciones de fibra. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, 2007. 75 p.

PINZÓN, S. Análisis de la resistencia a la compresión y flexión del concreto modificado con fibra de fique. Ingenierías, 2013. Vol. XVI, No. 61.

SANCHÉZ, Diego. Durabilidad y patología del concreto. 2 ed. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto – ASOCRETO, 2011. 182 p. ISBN: 9789588564081.

WEI, Jianqiang y MEYER, Christian. Improving degradation resistance of sisal fiber in concrete through fiber surface treatment. En: Elsevier B.V. Noviembre, 2013. Vol. 289, p. 511-523.

YAN, L.; YIU-WING, M.; LIN, Y. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. En: composites Science and Technology. Sydney. Vol. 60, No. 11, Abr. 2000; 19p.

ANEXOS

ANEXO A: Representación de la celulosa, xilema y floema en una estructura vegetal [38,39]

a) Celulosa

b) Floema y xilema

