

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**Durabilidad de compuestos a base de matrices minerales reforzados
con fibras naturales**

Presenta:

Ing. María del Rosario Leyva Cervantes

TESIS:

Para la obtención del grado de:

Maestro en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción

JUNIO DE 2014

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar de todo corazón mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que fueron parte de este logro, a quienes me brindaron su colaboración y sus conocimientos.

A Dios, por iluminar mi camino, guiarme y protegerme, por todas las bendiciones que me ha dado, por mi madre, mis hermanos y toda mi familia, por las personas que han dejado una marca en mi vida, por las que puso en mi camino y por todo lo que he aprendido a lo largo de este camino.

Agradezco a mi madre por darme la vida, por todo lo que me has dado, por todo el amor que me ha hecho crecer cada día, por guiarme y ayudarme a ser mejor cada día, gracias por estar conmigo en la distancia y porque gracias a ti he llegado hasta aquí, no hay palabras en este mundo para agradecerte, mamá.

A toda mi familia, por sus palabras de aliento y sus buenos deseos, especialmente a mi abuela María y mi tía Carmen, por apoyarme incondicionalmente en todo momento, porque han sido y siempre serán un ejemplo de sabiduría y fortaleza.

A Miguel Flores, por formar parte de mi vida y apoyarme en todo momento, por todo tu cariño y comprensión.

A todos aquellos que contribuyeron en mi formación académica y profesional; especialmente al Dr. César Juárez, director de esta tesis, por su atención, apoyo incondicional, por sus aportaciones y sugerencias para el desarrollo de esta investigación.

A la Dra. Camille, mi admiración y agradecimiento por todo el apoyo que me ha brindado, por su hospitalidad durante mi estancia de investigación en Toulouse, por su interés y sus sugerencias que permitieron complementar esta investigación.

Al Dr. Ricardo Magallanes, que fungió como evaluador de esta investigación, por ser parte de mi educación y formación universitaria, por sus sabios consejos y sugerencias a lo largo de la investigación.

A mis compañeros y amigos de la maestría por su apoyo, por las buenas y malas experiencias que vivimos juntos.

A la Facultad de Ingeniería Civil por darme la oportunidad de formar parte de esta institución.

Al personal administrativo de la Dirección de Posgrado y personal técnico del Instituto de Ingeniería Civil.

Al personal técnico de los laboratorios de Tecnología del Concreto y Laboratorio de Materiales de Construcción.

A la empresa Multiceras S.A de C.V, por el material facilitado para que esta investigación se realizara, sin su aportación este proyecto no se hubiera realizado de la misma manera, muchísimas gracias por todas su atenciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca económica, otorgada durante el periodo de la maestría.

Y a todas aquellas personas que contribuyeron para la culminación de esta etapa.

DEDICATORIAS

*A mi madre, por estar siempre en los momentos importantes de mi vida,
por ser el ejemplo para salir adelante,
por los consejos que han sido de gran ayuda para mi vida y crecimiento.
Gracias por estar conmigo en todo momento aún en la distancia,
por todo el amor que me has dado y por tu apoyo incondicional,
esta tesis es el resultado de lo que me has enseñado en la vida.*

*A mi abuela, por ser mi segunda madre,
porque con tu sabiduría me has enseñado a ser quien soy hoy.
Gracias por tu paciencia,
por enseñarme el camino de la vida.
Gracias por llevarme en tus oraciones porque estoy segura que siempre lo haces.*

*A Miguel Flores, por ser más que mi amigo y compañero,
gracias por estar conmigo en todo momento,
por todo el amor que me das y por compartir tu vida a mi lado.*

CONTENIDO

1.	ANÁLISIS DE LOS FUNDAMENTOS	1
1.1.	Clasificación de las fibras.....	2
1.1.1.	Tipos de fibras naturales.....	2
1.1.2.	Propiedades mecánicas de las fibras naturales.....	4
1.2.	Concreto reforzado con fibras.....	5
1.2.1.	Propiedades de los compuestos reforzados con fibras vegetales.....	7
1.3.	Uso de fibras para reducir agrietamientos.....	8
1.4.	Durabilidad de compuestos reforzados con fibras.....	11
1.4.1.	Identificación de los mecanismos de degradación de los compuestos reforzados con fibras vegetales.....	11
1.4.2.	Métodos para mejorar la durabilidad de los materiales compuestos reforzados con fibras vegetales.....	12
1.5.	ANTECEDENTES.....	14
1.6.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	20
1.7.	NECESIDAD DE LA SOLUCIÓN.....	20
1.8.	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	21
1.8.1.	Objetivo general.....	21
1.8.2.	Objetivos particulares.....	21
1.9.	HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	22
2.	MATERIALES Y PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN	24
2.1.	MATERIALES.....	24
2.1.1.	Cemento.....	24
2.1.2.	Ceniza volante.....	26
2.1.3.	Metacaolín.....	27
2.1.4.	Agregado fino.....	30

2.1.5. Fibras vegetales.....	32
2.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS FIBRAS NATURALES.....	33
2.2.1. Morfología microscópica.....	34
2.2.2. Propiedades Físicas.....	35
2.2.2.1. Porcentaje de absorción de agua.....	35
2.2.2.2. Densidad absoluta.....	36
2.2.3. Propiedades mecánicas.....	37
2.2.3.1. Porcentaje de elongación a la ruptura.....	37
2.2.4. Agentes Protectores.....	38
2.2.5. Método de impregnación de las fibras.....	40
2.2.6. Absorción de agua en fibras tratadas.....	41
2.2.7. Durabilidad de la fibra.....	41
2.3. Fabricación y ensayos de concreto fibroreforzado.....	43
2.3.1. Proporcionamiento de mezclas.....	43
2.3.2. Mezclado, colado y curado.....	46
2.3.3. Medición de las propiedades de los concretos en estado fresco.....	48
2.3.4. Pruebas de durabilidad en los especímenes.....	50
2.3.5. Ensayos mecánicos.....	51
2.4. Observación en el microscopio electrónico de barrido.....	58
3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	60
3.1. Caracterización de las fibras naturales.....	61
3.1.1. Morfología microscópica.....	61
3.1.1.1. Fibra de agave de lechuguilla.....	61
3.1.1.2. Fibra de lino.....	62
3.1.2. Absorción de agua.....	62
3.1.3. Densidad absoluta.....	64
3.1.4. Propiedades mecánicas.....	64
3.1.4.1. Elongación a la ruptura.....	64
3.1.5. Resumen de propiedades físicas.....	65
3.2. Durabilidad de la fibra.....	65

3.2.1. Absorción de agua en fibras tratadas.....	65
3.2.2. Resistencia al medio alcalino.....	67
3.2.2.1. Elongación a la ruptura de las fibras tratadas.....	67
3.3. Fabricación de especímenes fibroreforzados cemento-ceniza volante.....	69
3.3.1. Propiedades en estado fresco.....	69
3.3.2. Comportamiento a la flexión.....	71
3.3.3. Resistencia al impacto.....	76
3.3.3.1. Resistencia al impacto en especímenes reforzados con fibra de lechuguilla.....	76
3.3.3.2. Resistencia al impacto en especímenes reforzados con fibra de lino.....	79
3.4. Fabricación de especímenes Cemento-Metacaolín.....	81
3.4.1. Mediciones de las propiedades en estado fresco.....	81
3.4.2. Medidas de Contracción.....	82
3.4.3. Ensayes a flexión de morteros fibroreforzados.....	85
3.4.3.1. Compuestos reforzados fibra de Agave de Lechuguilla.....	85
3.4.3.2. Compuestos reforzados con fibra de Lino.....	87
3.4.4. Ensayes a compresión de morteros fibroreforzados.....	89
3.4.4.1. Compuestos reforzados con fibra de Agave de lechuguilla.....	89
3.4.4.2. Compuestos reforzados con fibra de Lino.....	90
3.4.5. Porosidad.....	91
3.4.5.1. Porosidad en compuestos reforzados con fibra de lechuguilla.....	91
3.4.5.2. Porosidad en compuestos reforzados con fibra de lino.....	93
3.5. Caracterización por microscopia de los morteros fibroreforzados.....	94
3.5.1. Compuestos base cemento reforzados con fibras de agave expuestas a un deterioro acelerado de 8 ciclos de humedecimiento y secado.....	94
3.5.2. Compuestos con una adición del 15% de metacaolín reforzado con fibras de lechuguilla, expuestas a un deterioro acelerado de 8 ciclos de humedecimiento y secado.....	96

3.5.3. Compuestos base cemento reforzados con fibras de lino expuestas a un deterioro acelerado de 8 ciclos de humedecimiento y secado.....	98
4. CONCLUSIONES	103
5. RECOMENDACIONES	105

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
1. Tipos de fibras naturales.....	4
2. Mecanismo de control del agrietamiento mediante uso de fibras y su influencia en la curva esfuerzo-deformación en función de la iniciación del agrietamiento.....	11
3. Fibra de agave de lechuguilla.....	35
4. Fibra de lino.....	35
5. Equipo para ensaye a tensión de la fibra.....	38
6. Método de impregnación de las fibras: a) Se pesa la fibra, b) Se seca en el horno a una temperatura de 105°C por 24 hrs, c) Después de transcurridas las 24hrs la muestra se saca del horno y se pesa para obtener el peso seco de la fibra, d) Las fibras se sumergen por 5 min en la cera líquida, e) Se retira la fibra de la cera y se deja secar por 24hrs.....	41
7. Metodología experimental de los compuestos fibroreforzados.....	46
8. Cono de asentamiento invertido.....	49
9. Consistencia en morteros fibroreforzados.....	50
10. Elaboración de especímenes.....	50
11. Ciclos de deterioro acelerado.....	51
12. Ensaye de resistencia a la flexión según la norma ASTM C-78.....	52
13. Ensaye de resistencia al impacto.....	54
14. Molde para especímenes de contracción.....	55
15. Probeta recubierta con aluminio.....	55
16. Medición de cambios dimensionales.....	56
17. Esquema utilizado para la resistencia a la flexión.....	58
18. Esquema de ensaye a compresión.....	59
19. Micrografía de la sección transversal de la fibra de lechuguilla.....	61

20. Sección transversal de la fibra de lino.....	62
21. Absorción de fibras sin tratamiento.....	63
22. Porcentaje de absorción en fibras tratadas.....	66
23. Elongación de fibras a un mes de exposición en una solución alcalina a un pH=12.5.....	67
24. Elongación de fibras a un día de exposición en una solución alcalina a un pH=12.5 a una temperatura de 70°C.....	68
25. Efecto de las fibras de lechuguilla y lino en el tiempo Vebe.....	69
26. Comportamiento de la fibra de lechuguilla en la resistencia a la flexión, debido al volumen, tipo de exposición y tratamientos en la fibra.....	72
27. Comportamiento de la fibra de lino en la resistencia a la flexión, debido al volumen, tipo de exposición y tratamientos en la fibra.....	74
28. Ensaye a flexión: (a) fibra de agave y (b) fibra de lino.....	76
29. Resistencia al impacto a la fractura en concretos reforzados con fibra de lechuguilla sometidos a ciclos de deterioro.....	78
30. Resistencia al impacto a la fractura en concretos reforzados con fibra de lino sometidos a ciclos de deterioro.....	79
31. Efecto del volumen y el tratamiento de las fibras naturales en el tiempo...81	
32. Evolución de la retracción total, por secado y autógena de los morteros control, con 0.7% volumen de fibra de lino tratada y 0.7% volumen de fibra sin tratamiento.....	83
33. Seguimiento de la pérdida de peso de los morteros control, con 0.7 % de fibra de lino tratada y 0.7% de fibra de lino sin tratamiento.....	84
34. Resistencia a la flexión de los compuestos base cemento reforzados con fibras de agave, expuestos a un deterioro acelerado (A).....	85
35. Resistencia a la flexión de los compuestos base cemento con una adición de 15% de metacaolín reforzados con fibras de agave, expuestos a un deterioro acelerado.....	86

36. Resistencia a la flexión de los compuestos base cemento reforzados con fibras de lino, expuestos a un deterioro acelerado y 1.0% expuestos a un deterioro natural.....	87
37. Resistencia a la flexión de los compuestos base cemento con una adición de 15% de metacaolín reforzados con fibras de lino, expuestos a un deterioro acelerado y 1.0% expuestos a un deterioro natural.....	88
38. Resistencia a la compresión: (a) matriz de cemento, (b) matriz 85% cemento + 15%metacaolín.....	89
39. Resistencia a la compresión: (a) matriz de cemento, (b) matriz 85% cemento + 15%metacaolín.....	90
40. Porosidad de los compuestos reforzados con fibra de lechuguilla: (a) matriz de cemento, (b) matriz 85% cemento + 15% metacaolín.....	92
41. Porosidad de los compuestos reforzados con fibra de lino: (a) matriz de cemento, (b) matriz 85% cemento + 15% metacaolín.....	93
42. MEB (LV-BSE) de la sección de ruptura de compuesto reforzado con fibras de agave en una matriz base cemento expuestas a un deterioro acelerado.....	95
43. MEB (LV-BSE) de la sección pulida del compuesto reforzado con fibras de agave en una matriz base cemento expuestas a un deterioro acelerado.....	95
44. MEB (LV-BSE) de la sección de ruptura del compuesto reforzado con fibras de agave.....	96
45. MEB (LV-BSE) de la sección pulida del compuesto reforzado con fibras de agave.....	97
46. MEB (LV-BSE) de la sección de ruptura de compuesto reforzado con fibras de lino en una matriz base cemento expuestas a un deterioro acelerado.....	98
47. MEB (LV-BSE) de la sección pulida de compuesto reforzado con fibras de lino en una matriz base cemento expuestas a un deterioro acelerado.....	99

48. MEB (LV-BSE) de la sección pulida de compuesto reforzado con fibras de lino en una matriz base cemento expuestas a un deterioro acelerado.....	99
49. MEB (LV-BSE) de la sección de ruptura de compuesto reforzado con fibras de lino en una matriz con 15% de adición de metacaolín expuestas a un deterioro acelerado.....	100

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	PÁGINA
1. Composición química de las fibras vegetales.....	5
2. Propiedades físicas y mecánicas de varias clases de fibras.....	6
3. Factores que influyen en las propiedades de concretos reforzados con fibra natural.....	9
4. Composición de óxidos en un cemento portland.....	26
5. Principales fases cristalinas encontradas en el cemento portland.....	26
6. Composición química del CPO 40.....	27
7. Clasificación de la ceniza volante por su contenido de óxidos.....	28
8. Requerimientos para la ceniza volante tipo F de acuerdo a ASTM C-618.....	28
9. Composición química del metacaolín Argicem.....	30
10. Granulometría del agregado calizo.....	31
11. Composición Química.....	32
12. Análisis Granulométrico.....	32
13. Proporcionamiento para morteros reforzados con fibras de agave de lechuguilla y lino en kg/m^3	45
14. Proporcionamiento para morteros reforzados con fibras de agave de lechuguilla g/m^3	46
15. Proporcionamiento para morteros reforzados con fibras de lino g/m^3	46
16. Propiedades físico mecánicas de las fibras.....	65
17. Consistencia del concreto según el tiempo Vebe.....	70

CAPÍTULO I

Introducción

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1. ANÁLISIS DE LOS FUNDAMENTOS.

Desde la antigüedad se utilizaron las fibras para reforzar materiales de construcción, como las fibras minerales de asbesto que se utilizaban en una matriz de cemento, también los egipcios usaron paja para reforzar adobes de arcilla para controlar la tensión por secado y reducir el agrietamiento. La fibra de asbesto fue utilizada para reforzar los postes de arcilla hace aproximadamente 5000 años, sin embargo desde que fueron relacionadas con potenciales peligrosos para la salud, se inició la búsqueda de posibles sustitutos que le proporcionaran al concreto las propiedades favorables que el asbesto le daba, y que además fuesen competitivos en calidad y precio.

En la actualidad, los materiales compuestos a base de matrices de cerámicos, plásticos, cemento y yeso incorporan fibras para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas, tales como la resistencia a la tensión, al agrietamiento, impacto, la abrasión y la tenacidad [1].

El concreto es el material más utilizado en la industria de la construcción, sin embargo posee una desventaja: es frágil, tiene una baja resistencia a la tensión y baja deformación a la rotura. Estas deficiencias han sido superadas mediante la incorporación de algún otro material con mayor resistencia a la tensión dentro del material a base de cemento [2]. El reforzamiento mediante fibras, constituye una alternativa para mejorar este comportamiento. Las fibras de acero, vidrio y las de polipropileno, son alternativas viables para reforzar al concreto. Sin embargo, existe otro grupo conocido como Fibras Naturales (FN) o vegetales.

La utilización de las fibras naturales como refuerzo de materiales de construcción permite ser considerada una alternativa de solución. Las fibras son un material de refuerzo con amplia disponibilidad en los países en vías de desarrollo [3], poseen múltiples cualidades ambientales y sanitarias que permiten ser una alternativa adecuada tanto económica como ecológica en comparación con las fibras sintéticas convencionales (metálicas,

minerales y poliméricas). Las fibras son materias renovables y disponibles localmente, no producen contaminación por emisiones de CO₂ y el gasto de energía es mínimo.

1.1. Clasificación de las fibras.

Las fibras pueden clasificarse en diferentes tipos tales como: naturales, minerales y hechas por el hombre [6]. Las fibras pueden ser de acero, vidrio, sintéticas (acrílicas, aramida, carbono, nylon, poliéster, polietileno, polipropileno) y naturales (coco, sisal, bagaso de caña, etc.). Las fibras naturales tienen abundancia natural, son baratas y su función principal es retrasar y controlar el agrietamiento de la matriz.

El Instituto Americano del Concreto (ACI) clasifica a las fibras naturales en dos categorías: fibra procesada (fibras naturales procesadas) y fibra cruda (fibras naturales sin procesar). Para cada una de estas categorías, los métodos utilizados, los tipos de productos terminados y los niveles de resistencia varían [4].

1.1.1. Tipos de fibras naturales.

La utilización de las fibras naturales, en particular las fibras vegetales como refuerzo en materiales compuestos presentan dos ventajas principales: en primer lugar, estas fibras están ampliamente disponibles a bajo costo y su uso en la construcción es de nuevas salidas para los materiales agrícolas. Por otro lado, el desarrollo de la fibra vegetal ayuda a reducir el impacto ambiental en comparación con materiales compuestos convencionales porque son materias primas renovables y requieren poca energía para ser producidas.

Las fibras naturales se clasifican en dos tipos, las de origen vegetal, obtenidas en las plantas compuestas por celulosa y las de origen animal (Figura 1). Las fibras de origen vegetal pueden provenir principalmente del tallo y de las hojas de las plantas, también puede obtenerse fibra de la cáscara de algunas frutas.

Las fibras que más han sido estudiadas para ser consideradas como refuerzo en el concreto son:

- Provenientes del tallo: el yute, lino, el bambú, la caña de azúcar.
- Provenientes de la hoja: dentro de las fibras más importantes se encuentra el sisal, el henequén, la yucca, el pasto de elefante, el plátano.
- Provenientes de la cáscara: la principal fibra utilizada como refuerzo y que proviene de la superficie exterior de una fruta es la fibra de coco.

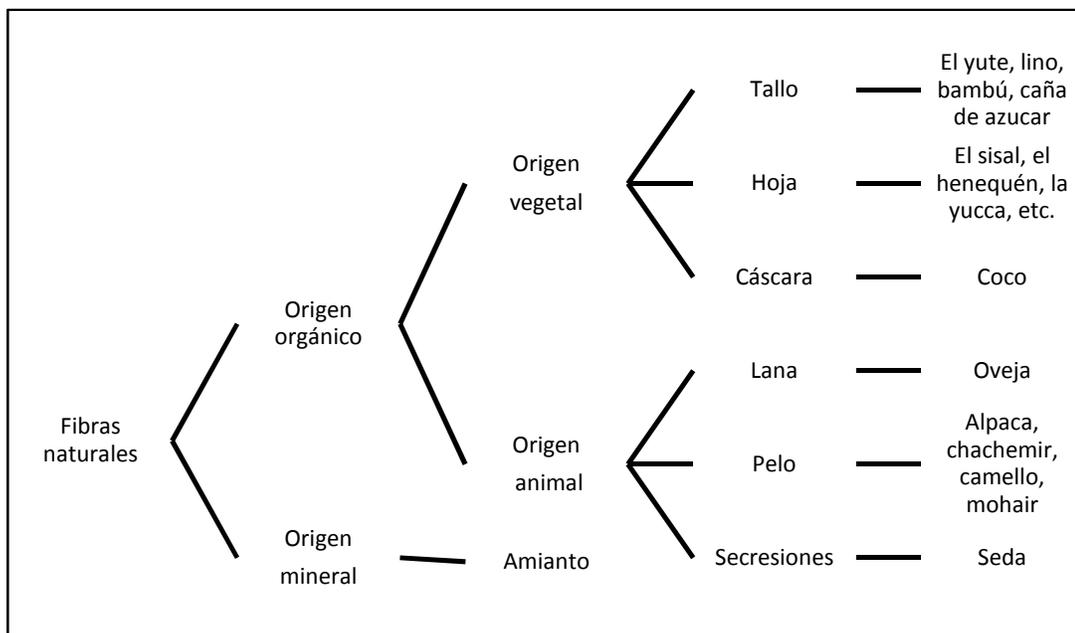


Figura 1. Tipos de fibras naturales [5].

Las fibras vegetales son compuestos naturales con una estructura celular, están compuestas por capas de celulosa, hemicelulosa y lignina. La celulosa es un polímero que contiene unidades de glucosa. La hemicelulosa es un polímero hecho de diversos polisacáridos. En cuanto a la lignina que es una mezcla amorfa y heterogénea de polímeros aromáticos y monómeros de fenilpropano[6].

Las fibras tienen diferentes composiciones (Tabla 1), por lo tanto se espera que su comportamiento dentro de una matriz de cemento pudiera diferir entre ellas.

Tabla 1. Composición química de las fibras vegetales [7].

Fibra	Lignina (%)	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Extractos (%)	Ceniza (%)
Bagazo	21.8	41.7	28	4	3.5
Hoja de plátano	24.84	25.65	17.04	9.84	7.02
Tronco de plátano	15.07	31.48	14.98	4.46	8.65
fibra de coco	46.48	21.46	12.36	8.77	1.05
tejido de coco	29.7	31.05	19.22	1.74	8.39
Eucalyptus	25.4	41.57	32.56	8.2	0.22
Sisal	11	73.11	13.33	1.33	0.33

Las fibras naturales tienen una alta resistencia a la tensión, pueden soportar de manera favorable como material sintético. El comportamiento de los materiales reforzados con fibras depende de la composición de la matriz, mortero o concreto, y del material de la fibra, su geometría, su distribución, orientación y concentración [7].

Las fibras naturales están disponibles en grandes cantidades en muchos países y presentan un recurso continuamente renovable, este tipo de fibras requieren poca energía para su producción en comparación con otros tipos de fibras. Una amplia variedad de fibras pueden ser utilizadas dependiendo de los recursos disponibles en cada región.

1.1.2. Propiedades mecánicas de las fibras naturales.

Las fibras naturales necesitan tener propiedades mecánicas adecuadas para poder ser consideradas como refuerzo en matrices de cemento, ya que las propiedades del concreto reforzado con fibras naturales varía dependiendo del tipo de fibra que se utilice (Tabla 2) [8], en esta tabla se presentan las propiedades físico mecánicas de fibras naturales con mayor uso como refuerzo de concretos.

Tabla 2. Propiedades físicas y mecánicas de varias clases de fibras [8].

Tipo de Fibra	Coco	Sisal	Caña de Azúcar	Bambú	Yute	Lino	Pasto de elefante
Longitud, mm	51 -102	NA	NA	NA	178 – 305	508	NA
Diámetro, mm	0.102-0.407	NA	0.203-0.407	0.051-0.407	0.102-0.203	NA	NA
Densidad	1.12-1.15	NA	1.2-1.3	1.5	1.02-1.04	NA	NA
Módulo de elasticidad, MPa	18960.5-25993.1	12962.1-25993.1	14996-18960.5	32956.8-39989.5	25993.1-31991.6	99973.6	4895.2
Resistencia a la tensión MPa	119.9-200	275.8-568.1	183.8-289.6	349.9-499.8	250-349.9	990	177.9
Absorción de agua, %	130-180	60-70	70-75	40-45	NA	NA	NA

La resistencia última del concreto reforzado con fibras depende principalmente del tipo, de la longitud y del volumen de la fibra en la mezcla. La relación de la longitud y el volumen de la fibra difieren para cada tipo de fibra natural.

1.2. Concreto reforzado con fibras.

El ACI 544 define al concreto reforzado con fibras (FRC) como un material compuesto que está hecho principalmente de cemento hidráulico, agua, agregado fino y grueso, y una dispersión de fibras discontinuas [6].

El concreto base cemento portland reforzado con fibras naturales no procesadas o simplemente concreto reforzado con fibras está constituido por los siguientes materiales: Cemento portland.- se recomienda que cumpla con las normas ASTM C 150 o C 595 o las equivalentes. Puede ser utilizado el ordinario (CPO), el compuesto (CPC) o los cementos con mayor contenido de silicatotricálcico (SiCa_3) y aluminato tricálcicos (AlCa_3) que reducen el efecto retardante del fraguado producido por la glucosa presente en las fibras. Agregados.- es recomendable que cumplan con la norma ASTM C 33 o su equivalente. Normalmente el concreto reforzado con fibras se fabrican con tamaños de agregados menores a 4-75 mm, por lo que también pueden ser llamados morteros. Sin embargo en esta tesis se utilizará el término de concreto.

Agua y aditivos.- el agua a utilizar deberá ser potable, se pueden agregar aditivos acelerantes para disminuir la influencia de la glucosa, aditivos fluidificantes para mejorar la trabajabilidad de la mezcla y también fungicidas para prevenir el ataque de bacterias y hongos.

Fibras Naturales.- pueden ser utilizados diversos tipos de fibras naturales, no puede generalizarse el contenido de fibra ni su longitud, ya que cada tipo tiene sus valores idóneos. Se recomienda que estén libres de carbohidratos y sin señales aparentes de ataque de microorganismos [6].

Las fibras como refuerzo han demostrado una capacidad positiva para mejorar las propiedades del concreto, proporcionan adecuada tenacidad, durabilidad y resistencia al impacto. Una gran ventaja de este tipo de refuerzo es que no está limitado a su uso exclusivo en el concreto, ya que también puede ser utilizado en morteros y en matrices cementantes con adiciones puzolánicas.

Los materiales de construcción reforzados con fibras naturales se utilizan desde la antigüedad. Los bloques de barro reforzado con paja o la incorporación de pelo en morteros de yeso son ejemplos que se remontan hace miles de años [9]. Sin embargo, el desarrollo de los materiales compuestos reforzados con fibras vegetales para su uso en la construcción es relativamente nuevo. Su origen se remonta a la década de 1970, cuando se hicieron los primeros estudios para reemplazar las fibras de asbesto en los elementos prefabricadas de fibra de cemento (revestimiento, baldosas, etc.) [10]. En consecuencia, numerosos estudios se han llevado a cabo en todos los continentes en el uso de fibras de origen vegetal como refuerzo en los materiales de construcción, en particular en los países en desarrollo, debido a su disponibilidad, su bajo costo económico y energético, así como la baja tecnología necesaria para su producción.

1.2.1. Propiedades de los compuestos reforzados con fibras vegetales.

Las propiedades mecánicas de los concretos reforzados con fibras varían cuando está en estado fresco y cuando ha endurecido.

a. Propiedades en estado fresco.

La adición de fibras a la mezcla tiende a reducir la trabajabilidad debido principalmente a la absorción de agua, al incremento del área superficial y especialmente a la forma y tamaño de las fibras en relación con las otras partículas que constituyen la mezcla. La incorporación de fibras también induce un aumento en la cantidad de aire atrapado [11]. Otro aspecto importante es la tendencia que tienen las fibras de aglomerarse entre sí, esto ocurre principalmente cuando se tiene una alta relación de aspecto (longitud/diámetro) de la fibra, al aglomerarse las fibras producen un incremento en la porosidad del concreto, también se ve afectada la resistencia y se producen variaciones entre especímenes de la misma mezcla. Sin embargo, las propiedades del compuesto son afectadas por muchos factores, como el tipo de fibra, su geometría, la forma y la superficie de la fibra, las propiedades de la matriz de cemento, la proporción de la mezcla, el método de mezclado y curado.

b. Propiedades en estado endurecido.

El concreto simple posee una excelente resistencia a la compresión, sin embargo, es frágil. Las fibras proporcionan ductilidad al concreto y permite mejorar propiedades tales como la tensión, la flexión, el impacto y la tenacidad, mientras que la resistencia a la compresión en algunas ocasiones es afectada adversamente con respecto al concreto simple. El microagrietamiento se reduce distribuyendo los esfuerzos internos. El comportamiento plástico posterior al agrietamiento es considerablemente afectado por la adherencia, el volumen y la longitud de las fibras, además de las propiedades mecánicas de éstas. La adherencia puede verse afectada debido a la expansión de la fibra dentro de la mezcla húmeda y la posterior contracción por secado. Otras propiedades que se han evaluado son la absorción de energía (resistencia al impacto) y los aspectos térmicos tales como conductividad, difusividad, calor específico y coeficiente de expansión térmica. Adicionalmente, se han investigado propiedades acústicas como la absorción de agua y las características de expansión – contracción [6,10].

Sin embargo, estas propiedades dependen de muchos factores, que se presentan en la Tabla 3:

Tabla 3. Factores que influyen en las propiedades de concretos reforzados con fibra natural [10].

Factores	Variables
Tipo de fibra	Coco, sisal, maguey, caña de azúcar, bambú, yute, madera, pasto de elefante, plátano.
Geometría de la fibra	Longitud, diámetro, sección transversal, anillos y puntas.
Conformación de la fibra	Monofilamento, multifilamento, rizado y nudos simples.
Condiciones superficiales	Hongos, presencia de recubrimientos
Propiedades de la matriz	Tipo de cemento, tipo de agregado y granulometría, tipo de aditivos.
Diseño de la matriz	Contenido de agua, relación agua/cemento, trabajabilidad y contenido de fibra.
Método de Mezclado	Tipo de mezcladora, secuencia al agregar los materiales, método de adición de fibras, duración y velocidad de mezclado.
Método de compactación	Vibración convencional, por presión y por impacto.
Técnica de colado	Convencional, lanzado o por extrusión.
Método de curado	Convencional, métodos especiales.

Es difícil comparar resultados de trabajos realizados con diferentes tipos de fibra ya que el número de variables que influyen en las propiedades finales del material compuesto es importante.

1.3. Uso de fibras para reducir agrietamientos.

El concreto es susceptible a agrietarse, debido a la baja resistencia a la tensión y casi nula resistencia al agrietamiento, las grietas son el resultado de una deformación en el concreto en estado fresco o bien endurecido. Una de las principales causas del agrietamiento en las primeras horas se debe a la contracción.

La contracción, es una deformación que se presenta por un cambio de volumen. Se debe a la pérdida de agua que sufre el concreto una vez que es colado y puesto a temperatura ambiente, así como a la humedad y al consumo de agua debido a las reacciones de hidratación. Las deformaciones por contracción son críticas para el concreto porque

cuando se les restringe se manifiestan en forma de esfuerzos de tensión, ya que el concreto es débil en tensión para este tipo de esfuerzo, se agrieta.

a. Contracción por secado.

La contracción secado se define como la deformación lineal, que depende del tiempo a una temperatura constante medida en una muestra que se seca, sin aplicación de carga [12]. Este fenómeno empieza a desarrollarse en la superficie del concreto, donde se lleva a cabo la evaporación. El progreso de este fenómeno dentro del concreto, depende de la compacidad de la microestructura del concreto y del desequilibrio entre la humedad relativa del ambiente y de los capilares del concreto. Mientras el agua se sigue evaporando se crea un menisco en los capilares más finos y las tensiones capilares que se desarrollan dentro del concreto se vuelven más fuertes [13]. Mientras estos esfuerzos capilares sean menores que la resistencia a la tensión del concreto, el concreto se contrae de manera plástica. Si las fuerzas capilares son mayores que la resistencia a la tensión del concreto, la pasta se agrieta [14].

b. Contracción autógena.

La contracción autógena es un problema, ya que se produce a muy edades tempranas, antes de que el concreto haya desarrollado una resistencia estructural suficiente, incapaz de resistir las tensiones de tracción, por lo que producen agrietamientos internos, que son susceptibles a la penetración del agua y el ataque químico, lo que conduce a problemas de durabilidad. Se desarrolla como consecuencia de la contracción química en el concreto.

c. Contracción química.

La ASTM en su norma C-1608-06 [15], define a la contracción química como “la variación de volumen (interno) absoluto resultante de la hidratación del cemento, debido al hecho de que los productos de hidratación ocupan menos volumen físico que los reactivos”.

d. Contracción plástica.

El comité del ACI 116 define al agrietamiento por contracción plástica como aquel que ocurre en la superficie del concreto en estado fresco tan pronto como es colocado y cuando aún se encuentra en estado plástico. Son características del concreto fresco y son producidos por la tensión capilar en los poros llenos de agua apareciendo como consecuencia de un retraso en el curado o protección del concreto [16].

La adición de fibras de celulosa o naturales, mejoran el agrietamiento por contracción plástica y la contracción por secado[17], las fibras naturales tienen la capacidad de absorber y liberar agua, por lo que pueden ser consideradas como una alternativa para el curado interno, además de proporcionar resistencia al agrietamiento[18].

Estudios demuestran que la adición de pequeñas cantidades de fibras de acero, polipropileno y celulosa puede reducir la contracción plástica y el agrietamiento por contracción de los materiales a base de cemento [19]. Por otra parte se ha reportado que las fibras de vidrio reducen en un 20-30% la contracción en matrices de mortero [20]. La eficacia de las fibras en la reducción de la contracción debe ser evaluada a partir de ensayos de contracción total y autógena [21].

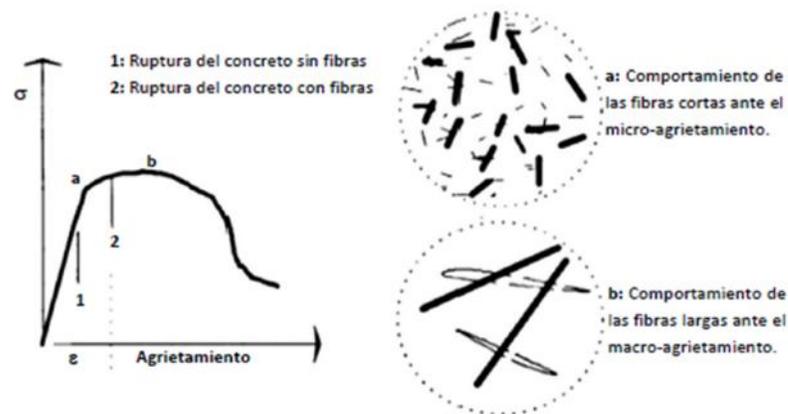


Figura 2. Mecanismo de control del agrietamiento mediante uso de fibras y su influencia en la curva esfuerzo-deformación en función de la iniciación del agrietamiento [22].

Las fibras tienen la función de controlar el ancho de grieta y su propagación (Figura 2), evitando así que agentes agresivos ingresen al concreto exponiendo su durabilidad del compuesto [22].

1.4. Durabilidad de compuestos reforzados con fibras.

La durabilidad de los compuestos reforzados se relaciona con la capacidad de resistir tanto a agentes externos (variaciones de humedad y temperatura, ataque por sulfatos o cloruros, etc) y el daño interno (compatibilidad entre las fibras y la matriz de cemento, cambios volumétricos, etc).

1.4.1. Identificación de los mecanismos de degradación de los compuestos reforzados con fibras vegetales.

El primer mecanismo de la pérdida de ductilidad de las fibras en el material compuesto es la degradación de estas fibras en el medio alcalino de la matriz. Esta degradación de las fibras inmersas en la matriz de cemento Portland se debe principalmente a la alta alcalinidad que disuelve las fases de lignina y hemicelulosa, debilitando así la estructura de la fibra [23].

La inmersión en una solución de hidróxido de calcio induce la degradación más intensa de las fibras debido a la precipitación de hidróxidos o carbonatos de calcio en la superficie o en los poros de las fibras que les causa rigidez y por lo tanto su fragilidad. Sin embargo, estos fenómenos son muy dependientes de la naturaleza de las fibras vegetales considerados.

Otro mecanismo que se presenta es en la interface fibra/matriz.

La capacidad de fibras naturales para absorber el agua es otra manera de disminuir la durabilidad de la fibra dentro del concreto reforzado. La absorción de agua conduce a cambios de volumen que pueden inducir grietas concretas [24,25].

Las variaciones de volumen de fibras tienden a debilitar la zona, y por lo tanto las propiedades de la matriz, pero el compuesto conserva un modo de fallo dúctil y por desgarramiento de las fibras.

Tipos de falla.

Las propiedades del material compuesto se correlacionan con el modo de fallo, Bentur y colaboradores [26] distinguen tres modos de falla y determinan la influencia de la carbonatación en este mecanismo:

-Modo1: las muestras no deterioradas se rompen por desgarramiento de las fibras de la zona de transición y su falla es dúctil.

-Modo2: muestras envejecidas por ciclos de humedecimiento/secado son ambas fibras arrancadas y se observa en las fibras rotas una sección transversal hueca. La matriz alrededor de las fibras es densa. Es un modo de fractura frágil debido a la mineralización de las fibras.

-Modo3: muestras deterioradas por ciclos de humedecimiento/secado en una atmósfera rica en CO₂, también son quebradizos, pero la mayoría de las fibras se rompen y su sección se llena con productos de hidratación densos, es decir las fibras se encuentran petrificadas.

1.4.2. Métodos para mejorar la durabilidad de los materiales compuestos reforzados con fibras vegetales.

Con el fin de mejorar la durabilidad de los materiales compuestos reforzados con fibras de cemento dos métodos de solución se podrían utilizar:

- a) Modificación de la matriz: La primera opción para mejorar el comportamiento a largo plazo de los materiales compuestos reforzados con fibras vegetales es transformar la matriz para reducir su agresividad. Esta agresividad se debe en parte a un pH muy básico del medio intersticial y la presencia de hidróxido de calcio en las fibras, haciendo que se precipiten y mineralicen.

Varios autores han elegido por tanto para sustituir parte de la matriz de cemento por puzolanas para reducir su alcalinidad.

Gram [27] a prueba la sustitución parcial de cemento por humo de sílice, escorias, cenizas volantes o puzolanas naturales, ya que la alcalinidad de la matriz se ve disminuida.

- b) Tratamiento de la fibra: Las fibras naturales presentan una alta absorción de agua, como consecuencia se producen variaciones dimensionales en la fibra y estas a su vez una pérdida de adherencia entre la interface fibra-matriz. La impregnación de la fibra mediante tratamientos hidrofóbicos permite ser una alternativa para disminuir este efecto, es decir el revestimiento de fibras naturales permite disminuir la absorción de agua y álcalis libres.

Ghavami [28] informó que la utilización de un agente repelente al agua en las fibras de bambú redujo la absorción de agua a un 4%. El uso de compuestos orgánicos como aceites vegetales reduce el proceso de fragilización, pero no completamente [29]. Toledo y colaboradores recomiendan la inmersión de la fibra en una lechada de humo de sílice antes de añadir a la mezcla [27]. Otros autores mencionan que el uso de fibras procesadas puede mejorar el rendimiento de durabilidad [30].

Uno de los principales factores que debilitan a la fibra se debe a los cambios de temperatura y humedad. Los ciclos de congelamiento y deshielo se han utilizado para evaluar la durabilidad de los materiales compuestos reforzados con fibra expuestos a estas condiciones. La congelación del agua dentro de la estructura porosa de la matriz hace que la presión que se genera desarrolla esfuerzos de tensión en el interior que conducen a la propagación de microfisuras y formación de nuevas grietas. Para evitar este tipo de daño, las pequeñas burbujas de aire, uniformemente espaciados son arrastradas en el concreto para proporcionar " rutas de escape " para la congelación del agua.

1.5. ANTECEDENTES

El uso de fibras como refuerzo es tan antiguo como la civilización humana. Los rastros de fibras naturales tales como es el lino, algodón, seda, lana y se han ubicado en las antiguas civilizaciones de todo el mundo. Por ejemplo, el uso registrado de lino se remonta a 5000 a.C, se considera la fibra textil natural, más antigua. Más recientemente, el uso de fibras naturales en la construcción se ha limitado a elementos delgados para techos, revestimiento, y paredes divisorias internas y externas, los cuales han sido producidos en un esfuerzo para desarrollar materiales de bajo costo y como un sustituto para el asbesto [31,32]. Estos materiales compuestos de cemento se reforzaron principalmente por fibras de celulosa cortas. Sin embargo, la aplicación de estos materiales en el sector de la construcción sigue siendo bastante menor debido a una falta de comprensión de cómo aumentar su durabilidad, este problema se asocia con un aumento de la fragilización de la fibra y una disminución en la extracción debido al debilitamiento por el ataque alcalino, la mineralización de la fibra es debido a la migración de productos de hidratación en los lúmenes y la variación de volumen debido a su alta absorción de agua. La capacidad de la industria de la construcción para producir un compuesto de cemento resistente reforzado por la fibra natural está todavía lejos de la realidad. Sin embargo, Silva y colaboradores han demostrado que el desarrollo de materiales compuestos de cemento reforzada por fibra de sisal para los propósitos semi - estructurales y estructurales es posible [33].

Hoy en día, el déficit de viviendas es un problema importante tanto en las sociedades desarrolladas como en los países en desarrollo. El desarrollo de un material de bajo costo con una durabilidad elevada y un alto rendimiento mecánico se convierte en un verdadero desafío para los ingenieros del siglo 21. Por otro lado, los aspectos ambientales tales como el efecto invernadero también se han convertido en las principales preocupaciones, un sistema compuesto con bajo contenido de cemento presenta una solución adecuada [34].

Fibras orgánicas naturales tienen un papel muy importante y único en la solución para aliviar el problema de la vivienda. No sólo se producen en abundancia en muchas partes del mundo, también pueden conducir directamente aun ahorro de energía, conservación

de los recursos más escasos del mundo y proteger el medio ambiente. Las fibras que se utilizaron para realizar esta tesis son las fibras lechuguilla y lino.

La fibra de lechuguilla se usa desde 1741, de acuerdo con algunas evidencias arqueológicas, la fibra de lechuguilla se ha usado desde hace miles de años. En algunas excavaciones realizadas en la “Caverna del Espanto”, en el centro de Coahuila, México, se encontraron gran cantidad de cordeles, sandalias y tapetes hechos de Lechuguilla y Yucca. El nombre técnico de la lechuguilla es Agave de Lechuguilla Torrey, y pertenece a la familia Amarilidácea, es una planta rosetófila con marcadas características de agave o maguey. El sistema radicular se extiende superficialmente y de los rizomas se originan hijuelos o retoños que se propagan vegetativamente. La fibra de lechuguilla es de alta calidad, y tiene una fuerte demanda en el mercado mexicano e internacional [35].

La fibra de Lino es procedente de Francia, comercializada por “Centrale linière cauchoise”. Las fibras de lino están contenidos en los tallos de la planta y englobadas o reunidas por una materia gomosa a base de pectina. Vistas al microscopio presentan una forma cilíndrica que se adelgaza hacia los extremos, acabados en punta, su superficie es lisa. Tiene canal interior muy reducido, un aspecto muy característico de la fibra es la presencia de nudosidades que le dan aspecto de caña. Se trata de una fibra fuerte y flexible, muy resistente, aunque su elasticidad es menor que la del algodón. Este tipo de fibra, junto con la de cáñamo, yute y ramio, forman lo que se conoce como fibras liberianas, la mayoría de ellas de naturaleza fuerte pero muy bastas, por lo que tienen usos industriales. El lino se compone principalmente de celulosa (más de un 60%), hemicelulosa y lignina [36].

En 1950 aparecen estudios y patentes de aglomerados de cemento con fibras distribuidas al azar, y en los años sesenta diversos científicos publican artículos que despiertan el interés de la investigación académica e industrial sobre el tema. A partir de ese momento ha existido una actividad muy intensa de investigación sobre estos materiales debido al uso que se pueda brindar en la construcción [37].

En la década de 1970, las fibras de celulosa se experimentaron con éxito como un reemplazo para fibras de asbesto en la producción industrial de productos de lámina

delgada [38]. Una de las primeras obras y más amplia tratando con la mejora de durabilidad de las fibras naturales en matrices de cemento se realizó por Gram, donde el llegó con sus resultados experimentales a que la forma más eficiente es reducir la alcalinidad del agua de los poros, esto puede lograrse mediante la sustitución de 40 a 50 por ciento del cemento Portland con humo de sílice [39].

Mohr llegó a la conclusión que cuando se usa la celulosa Kraft de madera, la mayoría de las pérdidas en la resistencia del compuesto se deben al proceso de envejecimiento acelerado debido al aumento de enlace fibra-matriz. El mecanismo de este aumento temprano de unión fibra-cemento es desconocido, sin embargo, se cree que esto es debido a la formación de cal o etringita densificada en la zona de transición alrededor de las fibras [40].

Silva estudio la adición de fibras de sisal de concreto e informó de que la resistencia a compresión fue menor que las muestras de concreto sin las fibras. La explicación para ese comportamiento parece estar relacionada con una trabajabilidad baja del compuesto [41].

No obstante, Savastano comparó el rendimiento mecánico de los materiales compuestos de cemento reforzado con sisal, plátano y las fibras de eucalipto. Sisal y plátano fueron las fibras con mayores longitudes (1,65 cm y 1,95 cm) que las del eucalipto (0,66 cm) y se mostró un comportamiento más estable a la fractura las de mayor longitud, lo que confirma que la longitud de fibra influye en el proceso por el cual la carga es transferida desde la matriz a las fibras. Componentes de fibra de azúcar, hemicelulosa y lignina puede contribuir para evitar la hidratación del cemento, la explicación se basa en el hecho de que la pectina (un componente de fibra) puede fijar el calcio evitando la formación de estructuras de CSH [42]. Existen mecanismos complejos que explican este fenómeno [43], como las investigaciones que atribuyen la demora a la presencia de compuestos disueltos, derivados de la degradación de los componentes de la pared celular de las fibras en el medio alcalino. Sedan [44] se opone a la idea de que el retraso del fraguado sea efecto únicamente de la presencia de azúcares neutros ácidos de la degradación de la fibra natural. Hace énfasis en la determinación de iones de calcio de las pectinas, un mecanismo que, según él, inhibe la precipitación C-S-H debido a la disminución en el

contenido de calcio en la solución de los poros. El estudio de estos mecanismos, que siguen siendo en gran medida dependientes de la naturaleza de las fibras naturales y de la matriz mineral, por lo que se requiere más estudio de los compuestos.

Cabe mencionar algunas propiedades de los materiales reforzados con fibras naturales:

- Utilizando fibras vegetales pequeñas se encontró que el uso de la fracción de volumen 0,2% de 25 mm de longitud de fibras de sisal conduce a la reducción de la contracción plástica libre.
- En el uso combinado de fibras coco y de sisal de longitudes cortas se tiene un retraso moderado en la contracción plástica para controlar el desarrollo de grietas a edades tempranas [42].
- Al - Oraimi y Seibi [45] informó que el uso de un bajo porcentaje de fibras naturales mejora las propiedades mecánicas y la resistencia al impacto del concreto y tienen un rendimiento similar en comparación con las fibra sintéticas. El uso de fibras de coco muestra una mayor resistencia a la flexión de fibras sintéticas (vidrio y carbono).
- Li y colaboradores [46] informan de que la resistencia a la flexión de los materiales compuestos de cemento con fibra de coco se incrementaron en más de 10 veces.

Los estudios realizados en materiales compuestos a base de fibras naturales muestran una modificación del comportamiento mecánico del material compuesto. Mientras que la matriz de cemento simple presenta un comportamiento elástico lineal frágil, el compuesto reforzado con fibras ensayado a flexión en tres puntos puede mantener su capacidad de carga, incluso más allá de la carga máxima, y sigue soportando una carga importante posterior a la máxima [47].

El comportamiento de los compuestos dependen principalmente del volumen y la longitud de la fibra, sin embargo, estudios previos han demostrado que su concentración y longitud óptima varían según la naturaleza de las fibras naturales y el método de colado de la mezcla [48][44][47]. La incorporación de fibras naturales dentro de una matriz frágil permite mejorar su resistencia al impacto. El estudio de la resistencia al impacto de morteros de cemento reforzados por fibras naturales de coco, sisal, yute, realizado por

Ramakrishna [49], llegó a la obtención de resistencias 3 a 18 veces más altas para los materiales reforzados que para la matriz pura. Estas propiedades confieren a los compuestos fibroreforzados un gran interés para la realización de pequeños elementos prefabricados o placas de acabado para los cuales las destrucciones accidentales causadas por impactos son bastante importante [47].

Algunos investigadores han tratado de superar el problema de la durabilidad de las fibras como es el caso de Toledo Filho que utilizó fibras de sisal como refuerzo en una matriz Cemento Portland Ordinario (OPC), y las técnicas que utilizó fueron:

- ✓ Carbonatación de la matriz
- ✓ Inmersión de las fibras de sisal en humo de sílice y además de usarse como sustituto parcial del Cemento Portland Ordinario, también uso sustituciones de escoria de alto horno. La sustitución del cemento de 40% (en masa) por escoria no redujo la fragilización del compuesto. La adición del 10% de humo de sílice fue eficaz para frenar la pérdida de resistencia y la fragilidad del sisal en los compuestos reforzados.
- ✓ La inmersión de la fibra de sisal en la suspensión de humo de sílice y la carbonatación, también presentan una alternativa para aumentar la durabilidad.

Toledo Filho [50] investigó la durabilidad de las fibras de sisal y coco cuando se sumergen en soluciones alcalinas. Fibras de sisal y coco inmersas en una solución de hidróxido de sodio retienen respectivamente el 72,7 % y el 60,9 % de su resistencia inicial después de 420 días. En cuanto a la inmersión de las fibras en una solución de hidróxido de calcio, se observó que resistencia original se perdió completamente después de 300 días. La explicación para el ataque superior en Ca(OH)_2 puede estar relacionada con una cristalización de la cal en los poros de las fibras.

Ghavami [51] informó el caso de un bambú en una viga de concreto reforzado con 15 años de edad y sin signos de deterioro. Lima y colaboradores [52] estudiaron las variaciones de resistencia a la tracción y módulo de Young de la fibra de bambú en

concreto reforzado expuesto a ciclos de humedecimiento y secado, presentan informes de cambios insignificantes, confirmando así su durabilidad.

También de acuerdo a las investigaciones realizadas la durabilidad se puede mejorar mediante el recubrimiento de la fibra con productos químicos adecuados tales como ácido fórmico y ácido esteárico, cabe mencionar que la durabilidad y el rendimiento de la fibra natural procesada están documentados mejor que los concretos reforzados con fibra sin procesar [53].

Para evaluar la durabilidad también se han hecho pruebas de algunos ensayos de envejecimiento debido a los problemas de la degradación de la fibra y la absorción de humedad como son; ciclos de humedecimiento y secado, inmersión de agua caliente, intemperie natural.

Las fibras naturales tienen una resistencia menor a la tensión cuando ocurre la fragilización de las mismas por la alcalinidad de la matriz, por lo que la modificación de la matriz parece ser una mejor alternativa que el tratamiento de la fibra [54]. Las matrices libres de hidróxido de Calcio muestran una alternativa para desarrollar una base duradera de los compuestos FRC [41].

Por lo tanto las opciones disponibles para mejorar la durabilidad a largo plazo de las fibras naturales que se mencionan son:

- ✓ Impregnación de fibra con los agentes hidrofóbicos.
- ✓ El sellado del sistema de poros de la matriz
- ✓ Reducción de Ca(OH)_2 contenido en la matriz
- ✓ Una combinación de impregnación de fibras y modificación de la matriz.

El uso de hidrofugantes también conduce a una buena unión entre fibras naturales y el concreto. El tratamiento mecánico de las fibras también mejora la unión entre la fibra - matriz y el tratamiento alcalino de fibras mejora su resistencia.

Cualquier material de refuerzo puede ser afectado por la solución altamente alcalina de la pasta de cemento, resultado de las reacciones durante la hidratación del cemento, que liberan una gran cantidad de hidróxido de calcio [55].

1.6. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

A pesar de los resultados obtenidos sobre las características y en particular las propiedades mecánicas de los materiales de construcción reforzados con fibras naturales, los estudios realizados ponen en evidencia la inadecuada durabilidad de las fibras dentro de la matriz cementante alcalina a lo largo del tiempo.

La alcalinidad disuelve la lignina, rompiendo la unión de las microceldas individuales las cuales absorben el hidróxido de calcio. La descomposición química de la lignina y la hemicelulosa por el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es la principal causa del deterioro por fragilización de la fibra en concreto. La capacidad de las fibras naturales para absorber el agua es otra manera de disminuir la durabilidad de la fibra en los concretos reforzados, ya que esta absorción conduce a cambios de volumen que pueden inducir pérdidas de adherencia entre la fibra-matriz.

1.7. NECESIDAD DE LA SOLUCIÓN.

Para poder proponer compuestos cementantes reforzados con fibras naturales durables, es necesario hacer estudios de tratamiento de las fibras para encontrar soluciones adecuadas y obtener un mejor mecanismo de interacción físico-química de la matriz mineral a través de la fibra vegetal, es un gran desafío para el desarrollo de soluciones constructivas basadas en un material perdurable en la construcción.

En esta investigación, se utilizarán dos tipos de fibras naturales (de lino y de lechuguilla), estas fibras se tratarán con productos a base de ceras, para evaluar el efecto de los tratamientos hidrofóbicos dentro de la matriz cementante.

1.8. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.

1.8.1. Objetivo general.

Evaluar el efecto de los tratamientos hidrofóbicos a base de ceras en las fibras naturales mediante la reducción en su capacidad hidrofílica para incrementar su durabilidad dentro de la matriz cementante y conservar adecuadas propiedades mecánicas, las variables que se presentan son las matrices minerales, el tipo de fibras y volumen, así como la exposición a una condición adversa para evaluar su durabilidad.

1.8.2. Objetivos particulares.

- Evaluar el efecto de los tratamientos hidrofóbicos en las fibras naturales mediante la reducción en su capacidad hidrofílica.
 - Determinar qué tipo de tratamiento reduce de manera efectiva la absorción de agua y aumenta la durabilidad dentro de la matriz alcalina.
 - Fabricar un material compuesto reforzado con fibras naturales (lino y agave) a partir de cemento portland con adición de ceniza volante y metacaolín.
 - Desarrollar una prueba de deterioro acelerado para los compuestos reforzados por fibras naturales.
 - Evaluar la efectividad del compuesto sometido a variaciones de humedad, en relación a los compuestos deteriorados al ambiente natural, por medio de ensayos mecánicos como resistencia a la flexión e impacto.
 - Investigar la microestructura por microscopía electrónica de barrido para identificar los mecanismos de interacción fisicoquímicos al interface fibras/matriz.
-
- ✓ Sobre secciones de falla con el fin de explicar los mecanismos de falla de los compuestos, su evolución con el tiempo y el eventual beneficio de los métodos de tratamiento de las fibras o de incorporación de puzolanas.
 - ✓ Sobre secciones planas de compuestos, con el fin de estudiar la evolución con el tiempo del interface fibras/matriz y en particular la migración de las especies minerales en la porosidad de las fibras naturales y las variaciones de volumen.

1.9. HIPÓTESIS DE TRABAJO.

El compuesto cementante reforzado con fibras naturales de lino y lechuguilla tienen propiedades mecánicas adecuadas, además de ser durable ante los efectos de la temperatura y de humedad, debido a que la fibra es protegida por los tratamientos hidrofóbicos a base de cera (Mulprox 2047 y Emulwax 3060) y la matriz más densa, por lo que el concreto reforzado tendrá la capacidad de mantener su resistencia y durabilidad.

CAPÍTULO 2

Materiales y procedimientos de investigación

CAPÍTULO 2.

2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN.

En este capítulo se describen los materiales y el procedimiento utilizado durante el desarrollo de esta investigación. El programa experimental fue orientado fundamentalmente a investigar las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de las fibras de agave de lechuguilla y lino tratadas con agentes hidrofóbicos. Así como el comportamiento mecánico y de durabilidad del concreto base cemento portland con adiciones minerales (ceniza volante y metacaolín), reforzado con este tipo de fibras. El trabajo experimental se dividió en las siguientes etapas: caracterización de las fibras, tratamientos protectores, durabilidad de la fibra, fabricación de especímenes reforzados con fibras tratadas, durabilidad de concretos con fibras, ensayos mecánicos, observación por microscopia de los mecanismos de interacción fibra-matriz.

2.1. MATERIALES.

2.1.1. Cemento.

El cemento portland es un cemento hidráulico compuesto de silicatos hidráulicos de calcio. Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen por la reacción química con el agua. Durante la reacción conocida como hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una masa similar a una piedra llamada pasta.

Composición.

La composición del cemento portland tiene gran influencia en su comportamiento, así como en su cinética de hidratación. Su composición normalmente se reporta en cuanto al contenido en porcentaje de óxidos, siendo el óxido de calcio (CaO) y el óxido de silicio (SiO₂) los que tiene en mayor porcentaje.

La tabla 4 muestra la composición de óxidos de un cemento portland, donde vemos en menor cantidad pero no de menor importancia algunos óxidos de los cuales, cabe mencionar, tienen un efecto en el proceso de hidratación del cemento. Los cuatro óxidos principales son CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃.

Tabla 4. Composición de óxidos en un cemento portland [56].

Óxidos	Contenido máximo (%)	Contenido promedio (%)
CaO	60-69	65
SiO ₂	18-24	21
Al ₂ O ₃	4-8	6
Fe ₂ O ₃	1-8	3
MgO	<5	2
K ₂ O,Na ₂ O	<2	1
SO ₃	<3	1

El cemento se encuentra formado por cuatro fases cristalinas, resultado de la combinación de los óxidos antes mencionados.

Tabla 5. Principales fases cristalinas encontradas en el cemento portland [56].

Fase pura	Nombre	Escritura simplificada	Fase impura
3CaO.SiO₂	Silicato tricálcico	C ₃ S	Alita
2CaO.SiO₂	Silicato dicálcico	C ₂ S	Belita
3CaO.Al₂O₃	Aluminato tricálcico	C ₃ A	Algunas veces celita
4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃	Ferroaluminato tetracálcico	C ₄ AF	Algunas veces felita
CaSO₄	Sulfato de calcio	CS	
CaSO₄.2H₂O	Yeso	CS2H	
	Silicato de calcio hidratado	C-S-H	
	Hydróxido de calcio	CH	

El cemento utilizado en la experimentación fue un Cemento Portland Ordinario 40 (CPO 40) de una marca disponible en la región, cumple con la norma NMX C 414 [57], con una composición del 90 al 95% de clínker y yeso, marcando el resto como componentes minoritarios.

De acuerdo a su clase resistente CPO 40 tiene una resistencia a la compresión mínima de 40 MPa a los 28 días.

En la siguiente tabla se muestra la composición química obtenida por medio de FRX del cemento utilizado.

Tabla 6. Composición química del CPO 40.

Compuesto o característica	Contenido (%)
CaO	65.49
SiO ₂	20.71
Fe ₂ O ₃	2.35
Al ₂ O ₃	5.84
K ₂ O	0.01
Na ₂ O	0.37
MgO	1.68
SO ₃	1.99
P ₂ O ₅	0.12
TiO ₂	0.22
Cr ₂ O	0.07
MnO	0.06
NiO	0.01
ZrO ₂	0.00
HfO ₂	0.00
PPI	0.00

2.1.2. Ceniza Volante

Las puzolanas como la ceniza volante son materiales sílicos o sílico-aluminosos (que contienen sílice y/o aluminio) que por sí mismos poseen un poco o ningún valor cementicio, pero en una mezcla reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas normales para formar compuestos que poseen propiedades cementantes, se le llama reacción puzolánica [58].

La ceniza volante, la escoria granulada de alto horno, el humo de sílice (sílice activa o microsílice) y las puzolanas naturales, como esquistos calcinados, arcilla calcinada o metacaolinita, son materiales que mejoran las propiedades del concreto endurecido.

Características químicas de la ceniza volante.

La ceniza volante se clasifica de acuerdo a su contenido de óxidos y a su potencial puzolánico el cual es un indicador de su reactividad para formar compuestos que aporten resistencia al concreto.

Tabla 7. Clasificación de la ceniza volante por su contenido de óxidos [59].

Característica o compuesto	Clase	
	F	C
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%min.)	70.0	50.0
SO ₃ (%máx.)	5.0	5.0
Contenido de humedad (%máx.)	3.0	3.0
PPI (%máx.)	6.0	6.0

La ceniza volante utilizada en esta investigación fue de tipo F de acuerdo a la norma ASTM C 618 [60]. Donde se describe como: “Ceniza normalmente producida de la quema de antracita o carbón bituminoso”. De acuerdo a dicha norma, esta ceniza cuenta con las siguientes características:

Tabla 8. Requerimientos para la ceniza volante tipo F de acuerdo a ASTM C-618 [60].

Compuesto químico	Contenido (%)
Dióxido de silicio (SiO ₂), más óxido de aluminio (Al ₂ O ₃), más óxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	70.0 (min.)
Trióxido de azufre (SO ₃)	5.0 (máx.)
Contenido de humedad	3.0 (máx.)
Pérdida por ignición	6.0 (máx.)

2.1.3. Metacaolín

El metacaolín (MK) es un material puzolánico, que se obtiene por medio de la calcinación de la arcilla caolinítica a una temperatura comprendida entre 650°C y 800°C [61]. MK se compone básicamente de sílice (SiO₂) y alúmina (Al₂O₃) en estado amorfo, que reacciona con el hidróxido de calcio (CH) producido por la hidratación del cemento Portland para formar silicatos de calcio hidratados (C-S-H) y silico-aluminatos de calcio hidratados (esencialmente gehlenita –C₂ASH₈)[62].

MetacaolínArgicem.

El metacaolín utilizado en este estudio es el producto “Argicem” comercializado por Argeco, que se encuentra ubicado en Fumel en el Lot et Garonne, Francia. La planta se encuentra en funcionamiento desde el año 2006, tiene una capacidad de producción de 10 ton/hora.

El tipo de calcinación y el método de producción del metacaolín presentan diferentes particularidades en comparación con los metacaolines convencionales:

- Método tradicional de calcinación: se lleva a cabo en horno rotatorio “lecho fijo”, la arcilla se introduce en forma de bolas y se calcina durante 5 horas a 750°C para una deshidroxilación completa de la caolinita, después de la calcinación se debe efectuar un triturado por lo que este método requiere gran consumo de energía.
- Al contrario, Argeco desarrolló una tecnología que se lleva a cabo por un proceso específico llamado “calcinación flash”, este método consiste en triturar la arcilla caolinítica, luego se lleva a cabo una rápida calcinación por medio de una corriente de gas que es inyectado a la partícula, el tiempo de exposición es de unas pocas décimas de segundo, utiliza alrededor del 40% de la energía consumida en el método tradicional, por lo que es una tecnología más económica y más verde con el medio ambiente [63].

En efecto, con la “calcinación flash”, ocurre un aumento rápido de la temperatura, el cual conduce a la formación de vapor de agua en las partículas. Este vapor no debe ser eliminado por difusión a través de las paredes de las partículas que causan la ruptura de la estructura química y la liberación de moléculas de agua a presión (efecto “pop corn”) [64]. Las partículas se enfrían rápidamente lo que hace que mantengan su apariencia.

Propiedades físicas.

De acuerdo a la ficha técnica, MK Argicem tiene una densidad aparente de 700 ± 100 kg/m^3 , el tamaño de la partícula fina se caracteriza por pasar más del 70% la malla 0.063mm, al tener una mayor finura que el cemento, mejora la compacidad del concreto debido a la densificación de la matriz. El área específica es mayor que $12.5 \text{ m}^2/\text{g}$ por lo que es un factor importante en la reactividad del metacaolín en comparación con el cemento [65].

Debido a la producción de “calcinación flash” el metacaolín argicem presenta una morfología más redondeada que permite un mayor flujo en estado fresco, mientras que los metacaolines de calcinación tradicional (de “lecho fijo” u horno rotatorio), presentan morfologías más planas o angulares que interrumpen el flujo.

Composición química.

La principal diferencia entre los distintos tipos de metacaolines es su relación ($\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$). Los porcentajes de la composición del metacaolín se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 9. Composición química del metacaolín Argicem [66].

Elemento	Contenido (%)
SiO_2	67.1
Al_2O_3	26.8
Fe_2O_3	2.6
CaCO	1.1
MgO	0.1
K_2O	0.1
Na_2O	0.0
Pérdida	0.8

La composición química del metacaolín muestra un alto contenido de sílice. La relación en peso ($\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$)=2.5, es mayor que la relación de la fórmula pura estructural AS_2 ($\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$)=1.2, por lo que el MK Argicem es impuro y contiene una cantidad significativa de cuarzo.

Mecanismos de reacción.

La reacción principal que se lleva a cabo es entre el AS₂ y el CH derivada de la hidratación del cemento, en presencia de agua, forma el gel C-S-H, así como los productos cristalinos, como los hidratos de aluminato de calcio e hidratos de aluminio-silicato (C₂ASH₈, C₄AH₁₃ Y C₃AH₆).

Los productos cristalinos dependen principalmente de la reacción AS₂/CH y la temperatura de reacción.

Sin embargo la reactividad del metacaolín depende de una gran cantidad de factores, composición química, granulometría y morfología, naturaleza del caolín y procesos utilizados en su fabricación. Otros factores importantes dependen de la mezcla, es decir, la sustitución parcial del cemento, la naturaleza del cemento [64].

La reacción de hidratación depende del nivel de reactividad de MK, y ésta a su vez, depende de las condiciones de procesamiento y de la pureza en la fabricación de la arcilla.

2.1.4. Agregado Fino.

En este trabajo se utilizó un agregado fino de dos regiones diferentes, uno de tipo calizo y un agregado fino típico en Francia.

Agregado fino de caliza.

La distribución del agregado fino de piedra caliza se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 10. Granulometría del agregado calizo.

Malla	% Retenido	%Pasa
3/8	0.00	100.00
4	0.73	99.27
8	21.65	77.61
16	25.65	51.96
30	21.04	30.91
50	11.76	19.15
100	1.47	17.68
Pasa	17.68	0.00

Agregado típico en Francia.

La arena para la fabricación de los morteros que se utilizó fue de acuerdo a la norma XP P 18-545. Es fabricada por La Farge Granulats, es una arena con un contenido de sílice de 68.91% y un módulo de finura de 2.7, de tipo A [67].

Tabla 11. Composición Química.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO
68.91	11.93	2.66	5.68	0.98	0.02	2.19	2.85	0.32	0.04

Tabla 12. Análisis Granulométrico.

	63 μm	0.125	0.250	0.500	1.00	2.00	2.80	4.00
Maximum	10.00	13.50	21.00	46.60	77.80	96.70	99.90	100.00
XI' + k sf	5.10	9.00	17.80	44.90	77.70	96.60	99.90	100.00
sf	1.90	2.20	2.40	2.70	1.80	0.60	0.00	0.00
Xf	2.70	6.30	14.80	41.60	75.40	95.90	99.90	100.00
Xf – k sf	0.30	3.60	11.80	38.30	73.20	95.10	99.80	100.00
Minimum	0.60	4.20	11.80	38.20	71.60	94.30	99.80	100.00

2.1.5. Fibras Vegetales.

Las fibras vegetales o fibras naturales (NF), se utilizan para reforzar varios materiales de construcción, como el caso de la producción de material textil. Sin embargo, hace pocos años los científicos comenzaron a estudiar la aplicación de este tipo de fibras como refuerzo en el concreto.

En este estudio, se analizaron dos tipos de fibras, agave de lechuguilla y lino. El agave de lechuguilla fue seleccionado por que se encuentra entre los productos forestales no maderables que son una fuente importante de ingresos para los habitantes de las regiones áridas y semiáridas de México [67].

El lino es una fibra que se cultiva en Rusia, China y Europa Occidental, esta fibra fue seleccionada porque se dispone en Francia y su obtención requiere de pocos insumos y es conocida por su buen comportamiento mecánico, además de que ya se ha utilizado en la construcción de paneles de lana de aislamiento.

Fibra de Agave.

La lechuguilla es una planta rosetófila con marcadas características de agave o maguey. El sistema radicular se extiende superficialmente y de los rizomas se originan hijuelos o retoños que se propagan vegetativamente. La fibra de lechuguilla es de alta calidad, y tiene una fuerte demanda en el mercado mexicano e internacional.

Este tipo de fibra es muy común en el desierto de Chihuahua, abarca grandes extensiones de las tierras áridas y semiáridas del norte de México y sur de Estados Unidos. Se utiliza en cepillos para metal pulido, en muebles, como relleno en asiento de coches, alfombras y cepillos de limpieza [68]. Como material de construcción en combinación con resinas termoplásticas [69] y como refuerzo en el concreto [70].

Según Cepeda A. [71] la utilización de la fibra de lechuguilla data del año 1741. Este autor opina que la calidad de la fibra decrece cuando la lechuguilla se desarrolla en suelos con alto contenido de materia orgánica.

Fibra de Lino.

Pertenciente a la familia Linaceae, el lino es una planta anual, cuyo tallo alcanza de 0.6 a 1.20m de altura y de 1 a 3mm de diámetro, es el mayor productor de semillas de lino utilizadas en la producción de aceites, cosméticos, medicamentos, pinturas, etc [72].

La fibra de Lino es procedente de Francia, comercializada por “Centrale linière cauchoise”. Las fibras de lino están contenidas en los tallos de la planta y englobadas o reunidas por una materia gomosa a base de pectina.

Vistas en el microscopio, presentan una forma cilíndrica que se adelgaza hacia los extremos acabados en punta, su superficie es lisa y brillante. Un aspecto muy característico de la fibra es la presencia de nudosidades que le dan aspecto de caña.

Una de las aplicaciones más grandes para el lino es en materiales compuestos con matriz polimérica, promovida en parte por las preocupaciones ambientales y como un reemplazo de la fibra de vidrio [72].

En la construcción, el lino ya se utiliza como un aislante y se fabrica en rollos, paneles y fieltros. Las fibras utilizadas son fibras cortas que no pueden ser utilizados por la industria textil, reciben el tratamiento de materia prima con sales minerales (sales de boro y silicatos de sodio para su retardación a la llama), se lleva a cabo el peinado y desenredado con el fin de producir capas que se superponen y luego que se unirán térmicamente para formar la guata de poliéster [66].

2.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS FIBRAS NATURALES.

Se caracterizaron las propiedades físicas y mecánicas de ambos tipos de fibras por medio de pruebas de laboratorio. Las fibras utilizadas en esta investigación no tenían ningún tratamiento químico previo.

La fibra de lechuguilla es procedente de México, y fue adquirida a una empresa Ixtlera del estado de Nuevo León, la fibra fue comprada sin procesar, con una longitud aproximada de 600mm. Fue lavada con agua potable para eliminar los residuos de la

pulpa de la planta, posteriormente se dejó secar durante 24 horas al sol, para evitar la formación de microorganismos, fue cortada a una longitud de 45 mm.



Figura 3. Fibra de agave de lechuguilla.

La fibra natural de lino utilizada es procedente de Toulouse, Francia. La longitud original de la fibra era de aproximadamente 800mm y fue cortada a una longitud de 25mm.



Figura 4. Fibra de Lino.

2.2.1. Morfología microscópica.

Las fibras son de dimensiones relativamente pequeñas en comparación con el material que refuerzan, su microestructura es fundamental para determinar el comportamiento que caracteriza al material fibroreforzado, la microscopia se realizó para conocer la morfología de cada tipo de fibra y para tratar de determinar su diámetro.

Para poder observar la sección transversal de las fibras, se tomaron dos muestras representativas de cada tipo de fibra, y se colocaron de manera vertical sobre resina acrílica, evitando en la medida posible que se aglomeraran unas sobre otras. La resina acrílica permitió que la fibra pudiera ser observada en el microscopio electrónico de

barrido (MEB), para hacer conductora la muestra, esta fue recubierta con una capa de oro sobre la cara a observar.

Al observar las micrografías, se pudo constatar que la geometría de la sección transversal de las fibras no era circular, por lo tanto, se tuvo que obtener un diámetro equivalente. La definición de diámetro equivalente se hizo de acuerdo al comité del ACI 544 y se define como el diámetro de un círculo equivalente con la misma área de la sección transversal de la fibra.

2.2.2. Propiedades Físicas.

Las propiedades físicas de las fibras se determinaron para optimizar su uso como refuerzo dentro de la matriz cementante.

2.2.2.1. Porcentaje de absorción de agua.

La absorción de agua es una de las propiedades físicas que tienen una importante influencia en el comportamiento mecánico, así como en la interacción fibra-matriz. Es necesario conocer esta cantidad de agua para ser considerada dentro del diseño de mezclas en la relación a/c.

Para evaluar el porcentaje de absorción, las fibras se cortaron a una longitud de 40 mm aproximadamente y se formaron 5 muestras de 1 gr cada una. Las 5 muestras fueron secadas al horno a temperatura de 100 °C durante 24 horas, posteriormente se pesaron en una balanza de 0.001 gr de precisión, obteniendo el peso seco (PS). Se saturaron en agua destilada, cada muestra con un respectivo tiempo de saturación de 5, 15, 30, 60 minutos y 24 horas. Al término de cada periodo se obtuvo la condición saturada superficialmente seca, frotando las fibras ligeramente con papel absorbente hasta que su apariencia fuera opaca, sin presencia de gotas entre ellas. Después se pesaron las muestras obteniendo el peso saturado superficialmente seco (PSSS). De esta manera el porcentaje de absorción se obtuvo usando la Ecuación 1.

$$\% \text{ Absorción} = \frac{PSSS-PS}{PS} \times 100 \quad (1)$$

2.2.2.2. Densidad absoluta.

La densidad de la fibra es otra propiedad física de interés y está definida por la relación entre el peso y el volumen de una masa determinada, lo que significa que depende directamente de las características de la fibra. Este factor es muy importante para tener un buen diseño de mezclas y para poder determinar la cantidad de fibra requerida para un volumen unitario de mortero.

Para obtenerla, se tomaron 3 muestras de cada tipo de fibra de aproximadamente 3 gr cada una. Se secaron las muestras en un horno a 100 °C durante 24 horas, posteriormente se pesaron en una báscula con una precisión de 0.001 gr, obteniendo así el peso seco (W_1). Para obtener el volumen seco de las muestras, se utilizó un picnómetro el cual se pesó seco (W_1), se le agregó agua hasta la marca de aforo y se volvió a pesar (W_2), la diferencia entre ellos es el peso del volumen de agua sin fibras. A continuación, se colocó en el picnómetro vacío, la muestra de fibra previamente saturada superficialmente seca de acuerdo al procedimiento descrito en el punto anterior y se pesó (W_3), se le fue agregando agua paulatinamente hasta llegar a la marca de aforo tratando de evitar en la medida posible dejar aire atrapado y la flotación de las fibras, enseguida se hizo vacío y se tomó el último peso (W_4). La diferencia entre W_4 y W_3 es el peso del volumen de agua con fibras. El peso de volumen de agua (W_a) que fue desalojado por la fibra se calculó con la Ecuación 2. Este procedimiento se realizó por triplicado para las muestras de agave y lino.

$$W_a = (W_2 - W_1) - (W_4 - W_3) \quad (2)$$

El volumen de las fibras saturadas superficialmente secas se obtendrá dividiendo el resultado de la ecuación 2 entre la densidad del agua y para determinar el volumen seco de las muestras se obtendrá restando el volumen de las fibras saturadas superficialmente secas con el volumen de agua de absorción de acuerdo con el porcentaje calculado.

2.2.3. Propiedades mecánicas.

2.2.3.1. Porcentaje de elongación a la ruptura.

El alargamiento a la rotura del Agave de lechuguilla y de lino se determinó por ensayos de tensión, por medio del equipo que se muestra en la figura 6, debido a la dificultad para aislar una sola fibra de lino, las pruebas se realizaron en haces de fibras, se ensayaron 10 especímenes por tipo de fibra, el ensaye se llevó a cabo por medio de una placa de calibración con un extremo móvil y uno fijo, las fibras se sujetaron a los extremos fijo y móvil, se tensó ligeramente de tal manera que al poner en movimiento el extremo móvil se obtuviera una determinada elongación, se tomó la lectura inicial en un micrómetro de carátula de precisión de 0.01mm y la longitud libre de la fibra por medio de un vernier digital de 0.01mm de precisión, posteriormente se continuó con el movimiento del extremo móvil hasta llegar a la ruptura de la fibra, se registró la lectura final en el micrómetro. Por diferencia de la lectura final y la inicial se obtuvo la elongación última, dividiendo la elongación última entre la longitud libre de la fibra obtenemos el porcentaje de elongación a la ruptura de la fibra, como se indica en la ecuación 3.

$$\% \text{Elongación} = \frac{\text{Lectu}(\text{inicial}-\text{final})}{\text{Longitudlibre}} \times 100 \quad (3)$$



Figura 5. Equipo para ensaye a tensión de la fibra.

2.2.4. Agentes Protectores.

El objetivo fundamental, fue seleccionar el agente protector más efectivo, que reduzca significativamente la absorción de agua en la fibra y le permita conservar sus propiedades de trabajabilidad. Se buscaron tratamientos hidrofóbicos de fácil disposición en el mercado y que no fueran tóxicos, que le permitieran a las fibras reducir su alta absorción y mejorar su durabilidad en un ambiente alcalino. Estudios por Juarez, et al. muestran una reducción en la absorción de agua y la durabilidad con fibras tratadas con parafina.

Los tratamientos que se decidió utilizar son a base de ceras, proporcionadas por la empresa Multiceras S.A. de C.V., empresa mexicana que se dedica al diseño, manufactura y comercialización de ceras naturales, sintéticas, derivadas del petróleo y productos relacionados para usos industriales. La planta se localizan en el municipio de García, Nuevo León, a 20 km. de la ciudad de Monterrey.

A continuación se describen los productos utilizados:

- a. Parafina Refinada. Es un producto de cera derivado del petróleo, compuesta principalmente de hidrocarburos de cadena recta sin ramificaciones, con un peso molecular promedio entre 360 y 420 y con cadenas de 18 a 40 átomos de carbono, su temperatura de fusión es de 58-61°C.
- b. Cera para crayón lavable. Es una cera derivada del petróleo, compuesta de hidrocarburos principalmente, su temperatura de fusión es de 62 – 68°C.
Las parafinas son ampliamente utilizadas para manufactura de velas, protección de empaques de cartón, recubrimiento de quesos y frutas, así como en el encerado de papel.
- c. Candelilla. Es una sustancia 100% natural, dura, estable, protectora, plástica y fácilmente moldeable. Con un color que oscila entre café y amarillo claro, su superficie puede alcanzar altos niveles de brillo, siendo ésta una de sus propiedades más apreciadas en algunas aplicaciones de especialidad, su temperatura de fusión es de 69 – 73°C.

Presenta una gran diversidad de aplicaciones, siendo utilizada actualmente en más de 20 industrias distintas en todo el mundo, principalmente en la Unión Europea, los Estados Unidos y Japón.

Sus propiedades distintivas le confieren la categoría de material esencial para la fabricación de cosméticos, gomas base, tintas, adhesivos, recubrimientos, emulsiones, moldeo de precisión y productos farmacéuticos.

- d. Mulprox 2035. Es una cera Microcristalina, es un producto derivado del petróleo, formado por mezclas complejas de hidrocarburos, incluyendo parafinas normales, así como compuestos monocíclicos y policíclicos de estructura molecular ramificada, su temperatura de fusión es de 83 – 86°C.
- e. Mulprox 2047. Es una cera microcristalina macro-flexible, compuesta por mezclas de parafinas normales y compuestos monocíclicos y policíclicos, su temperatura de fusión es de 73 – 79°C.
- f. Emulwax AM 3040, Emulwax AM 3042, y Emulwax 3060. Estos productos son emulsiones de cera, la función de una emulsión de cera es la de aprovechar la evaporación del agua después de la aplicación de la emulsión, asegurando la impregnación y el depósito uniforme de la cera en la superficie de tratamiento. La diferencia entre cada tipo de emulsión es su cantidad de sólidos, lo que proporciona su viscosidad.

Emulwax AM 3040m tiene un contenido de sólidos de 55 – 60%, Emulwax AM 3042m presenta un contenido de 60 – 63%, estas dos emulsiones tienen un pH de 9 - 11. Mientras que Emulwax 3060 tiene un menor contenido de sólidos de 16 – 20% y un pH de 4 – 6.

Las emulsiones se utilizan para aplicación en superficies como aglomerados de madera, cartón, bandejas de huevo, paneles de yeso, materiales de construcción, PVC, hules y textiles.

2.2.5. Método de impregnación de las fibras.

Se utilizaron dos métodos de impregnación, uno para las ceras y otro para las emulsiones, debido a las propiedades reológicas de los recubrimientos, en el caso de las ceras es necesario fundirlas para poder impregnar las fibras, por otra parte las emulsiones son líquidas y por lo tanto no requieren del uso de calor para su aplicación.

El primer método que se utilizó fue para las ceras, se prepararon tres lotes de fibras de 3 gr cada uno para la aplicación de los distintos tratamientos, las fibras se sumergieron durante 5 min en cada uno de ellos a las temperaturas de fusión correspondientes a cada tratamiento y se dejaron secar por 24 hrs (Figura 6).

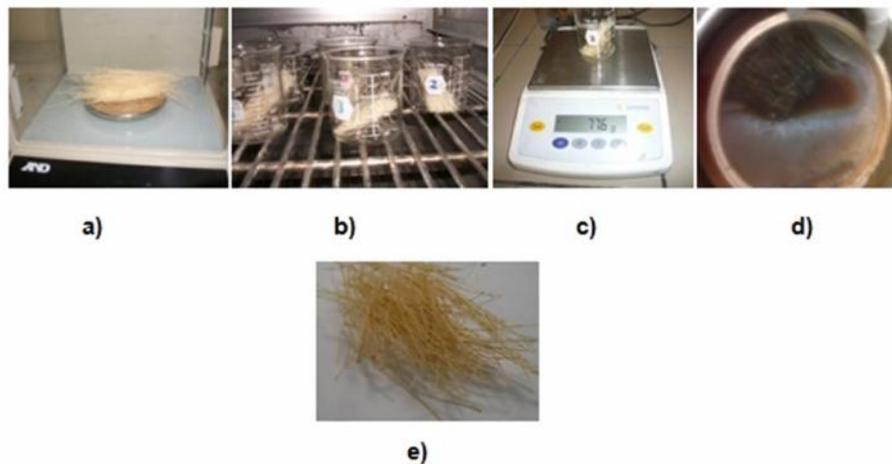


Figura 6. Método de impregnación de las fibras: a) Se pesa la fibra, b) Se seca en el horno a una temperatura de 105°C por 24 hrs, c) Después de transcurridas las 24hrs la muestra se saca del horno y se pesa para obtener el peso seco de la fibra, d) Las fibras se sumergen por 5 min en la cera líquida, e) Se retira la fibra de la cera y se deja secar por 24hrs.

El segundo procedimiento que se utilizó es muy parecido al descrito anteriormente, la fibra se sumergió durante 5 min en la emulsión líquida sin necesidad de fundirla, una vez transcurrido este tiempo la fibra se deja secar por 24 h.

2.2.6. Absorción de agua en fibras tratadas.

Se prepararon 3 lotes de aproximadamente 3 gr de fibra por tipo de tratamiento para determinar su porcentaje de absorción de agua y así poder comparar estos resultados con las fibras sin tratamiento.

Cada muestra contenía 3gr de fibra tratada, la cual fue pesada en una balanza de 0.001g de precisión para obtener su peso seco de la fibra tratada (PST). Posteriormente las fibras se saturaron en agua por 24 h y después de transcurrido el tiempo se obtuvo el peso saturado superficialmente seco de la fibra tratada (PSSST), para obtener el porcentaje de absorción se utilizó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Absorción} = \frac{PSSST - PST}{PS} * 100$$

Para calcular el porcentaje de absorción se obtuvo la diferencia entre PSSST-PS y se dividió entre el PS de la fibra antes de ser tratada.

2.2.7. Durabilidad de la fibra.

La durabilidad de los compuestos reforzados con fibras vegetales, se relacionan con la capacidad de resistir tanto a condiciones externas (variaciones de temperatura y humedad, ataque a los sulfatos o cloruros, ect), así como a los daños que son causados por la compatibilidad entre las fibras, la matriz cementante y a cambios volumétricos. Es conocido que la degradación de las fibras se debe principalmente a la alcalinidad de la matriz cementante, debido a que disuelve la lignina y la hemicelulosa, lo que debilita la estructura de la fibra.

Una de las desventajas de las fibras naturales es su alta absorción de agua, el componente de la fibra responsable de la absorción de humedad es la hemicelulosa, debido a que es la pared celular asociada con la celulosa.

Los materiales compuestos reforzados con fibras naturales presentan una mayor degradación cuando se someten a aplicaciones a la intemperie, en comparación con materiales compuestos con fibras sintéticas, se le atribuye principalmente a la susceptibilidad de las fibras a la biodegradación.

La alta absorción de agua y de humedad causan a las fibras un hinchamiento y efectos plastificantes, dando por resultado inestabilidad dimensional y características mecánicas pobres, esto limita el uso de las fibras naturales como reforzante, y es ahí donde surge la necesidad de realizarle tratamientos superficiales con el objetivo de mejorar su adherencia y disminuir su capacidad hidrofílica.

Se evaluó la eficiencia de los tratamientos descritos para proteger a la fibra del ambiente alcalino de la matriz cementante, con esta finalidad las fibras tratadas fueron expuestas a soluciones alcalinas de hidróxido de calcio y un pH de 12.5, simulando el ambiente que se presentan en la matriz de concreto. Para este procedimiento se prepararon 4 lotes de fibras largas aproximadamente de 350 mm por cada tipo de fibra, correspondientes a los cuatro tratamientos que resultaron ser más favorables respecto a la absorción del agua y el control sin tratamiento, cada lote contenía 10 fibras seleccionadas aleatoriamente, en el caso de la fibra de lino, se tomaron diez haces de fibras. Las muestras de fibras fueron sometidas a dos tipos de exposiciones:

- En una solución alcalina de hidróxido de calcio a un pH de 12.5 por uno y seis meses.
- En una solución de hidróxido de calcio a una temperatura de 70°C con un pH de 12.5 por un día para simular la reacción de hidratación del concreto.

Después de la exposición de las muestras de fibra tratadas y control, se dejaron secar por 24 h, para que las fibras quedaran completamente libres de humedad y así poder llevar a cabo el ensaye de elongación de la fibra, tal como está descrito en el punto 2.2.3.

2.3. Fabricación y ensayos de concreto fibroreforzado.

a. Fabricación de mezclas cemento–ceniza volante.

Se fabricaron 27 barras y 6 cilindros por tipo de fibra reforzados con fibras tratadas para evaluar el efecto del tratamiento en la resistencia mecánica, los agentes protectores que se usaron se seleccionaron de acuerdo a la reducción en la absorción de agua y a su durabilidad una vez que fueron expuestos a la solución de hidróxido de calcio. Como control se fabricaron 27 barras y 6 cilindros con fibra pero sin tratamiento (ST) y 9 barras y 3 cilindros sin fibra (SF).

b. Fabricación de mezclas cemento–metacaolín.

Las actividades en esta sección fueron realizadas durante una estancia de investigación en Francia, por tal razón los materiales y procedimientos para la fabricación de los especímenes fueron diferentes a los usados en México. Las fibras fueron tratadas con un agente protector seleccionado del apartado 2.2.5. Lo anterior se realizó para comparar el comportamiento mecánico y la durabilidad de los compuestos reforzados con fibras tratadas en diferentes matrices minerales.

2.3.1. Proporcionamiento de mezclas.

- a. Se utilizó una matriz compuesta de 80% de Cemento CPO 40 y 20% de Ceniza Volante. Se estudiaron tres volúmenes de fibra, 0.4, 0.7 y 1.0%, una longitud de 45 mm, relación a/mc de 0.5. Se utilizó arena caliza de la región como agregado fino, arena No.4 y el agua utilizada fue potable.

En la tabla 13 se presentan los respectivos a los morteros reforzados con fibras de agave de lechuguilla y lino para cada volumen de fibra.

Tabla 13. Proportcionamiento para morteros reforzados con fibras de agave de lechuguilla y lino en kg/m³.

	Relación a/c = 0.50							
	Volumen de fibra (%)							
	Agave de Lechuguilla (A)				Lino (L)			
Material	Control	0.4	0.7	1.0	Control	0.4	0.7	1.0
Cemento	394.6	1471.2	1464.9	1460.6	394.6	1471.3	1464.9	1460.6
CV	98.6	393.9	393.4	393.4	98.6	393.9	393.4	393.4
Agua	246.6	98.5	98.4	98.4	246.6	98.5	98.4	98.4
Arena	1479.6	246.2	245.9	245.9	1479.6	246.2	245.9	245.9
Fibras	-	5.9	10.4	14.8	-	6.0	10.5	15.0

- b. Se fabricaron especímenes de dos diferentes matrices cementantes, un matriz de cemento (C), la otra matriz compuesta por 85% de Cemento y 15% de Metacaolín (MK).

El cemento que se utilizó para la fabricación de los especímenes es un CEM II/B-LL 32.5 N, de Lafarge, y el Metacaolín que se utilizó de Argeco, se consideró una relación a/mc para los dos tipos de matrices de 0.5. Como agregado fino, se utilizó arena # 4 y se cribó de acuerdo a la norma ASTM C-33 [73].

Se estudiaron 32 mezclas, una mezcla control de cada tipo de matriz cementante sin fibras, se estudiaron tres volúmenes de fibra, 0.4, 0.7 y 1.0%. Así como también se evaluaron las mezclas con fibras tratadas y sin tratamiento, solo las mezclas control y con 1.0% Vf de Lino de las dos matrices minerales fueron fabricadas por duplicado para la exposición natural.

En la figura 7 se muestran las variantes para tener las 32 combinaciones posibles de las mezclas de mortero reforzado con fibras.

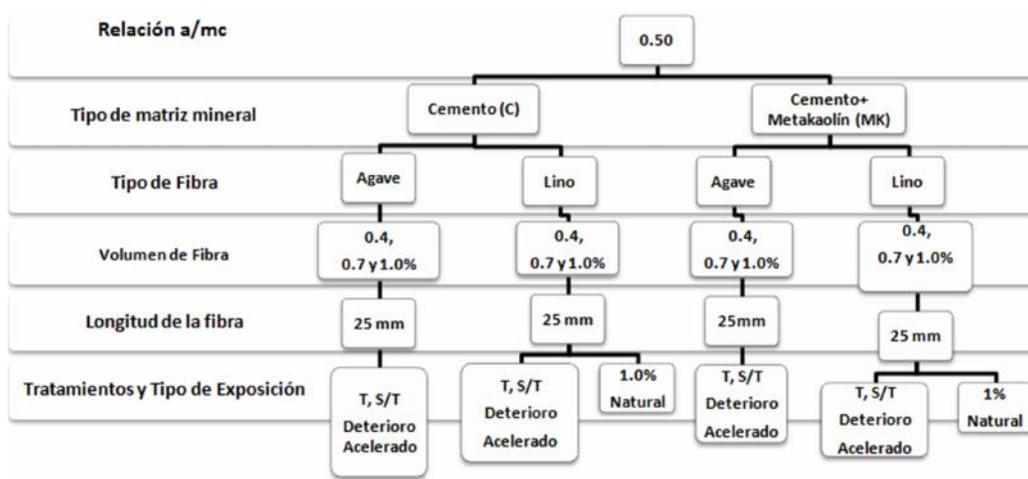


Figura 7. Metodología experimental de los compuestos fibroreforzados.

En la tabla 14y 15 se presentan los proporcionamientos de los morteros control y los respectivos a los morteros reforzados con fibras de agave de lechuguilla y lino para cada volumen de fibra. La cantidad de fibra es en relación a su densidad, obtenida en la caracterización de las fibras en la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Tabla 14. Proporcionamiento para morteros reforzados con fibras de agave de lechuguilla g/m^3 .

	Relación a/c = 0.50							
	(C)				(CM)			
	Volumen de fibra (%)							
Material	Control	0.4	0.7	1.0	Control	0.4	0.7	1.0
Cemento	450	450	450	450	382.5	382.5	382.5	382.5
Metacaolín	-	-	-	-	67.5	67.5	67.5	67.5
Agua	225	244.36	248.75	253.15	225	244.36	248.75	253.15
Arena	1350	1344.08	1339.64	1335.2	1350	1344.08	1339.64	1335.2
Fibras	-	5.92	10.36	14.80	-	5.92	10.36	14.80

Tabla 15. Proporcionamiento para morteros reforzados con fibras de lino g/m³.

	Relación a/c = 0.50							
	(C)				(CM)			
	Volumen de fibra (%)							
Material	Control	0.4	0.7	1.0	Control	0.4	0.7	1.0
Cemento	450	450	450	450	382.5	382.5	382.5	382.5
Metakaolín	-	-	-	-	67.5	67.5	67.5	67.5
Agua	225	244.36	248.75	253.15	225	246.24	252.07	257.85
Arena	1350	1344	1339.50	1335	1350	1344	1339.50	1335
Fibras	-	6.00	10.50	15.00	-	6.00	10.50	15.00

2.3.2. Mezclado, colado y curado.

- a. El mezclado se llevó a cabo en una revolvedora con capacidad de 80 L, bajo condiciones de laboratorio. Se humedeció el interior de la revolvedora evitando el excedente de agua. Después se introdujo a la revolvedora la arena junto con el cemento, y se mezcló durante 2 minutos para homogenizarlos. Se agregó el agua y se mezcló por 3 minutos, fue necesario tapar la boca de la revolvedora para evitar la pérdida de material. La fibra fue adicionada al final sin detener la revolvedora, de manera que pudiera ser distribuida de forma homogénea en toda la mezcla. Al momento de ir adicionando la fibra a la mezcla fue necesario separarla para evitar la aglomeración de las fibras. Después de terminar de adicionar toda la fibra, se mezcló durante 2 minutos más.

Por cada mezcla se colaron 9 barras de 75x75x280 mm para evaluar la resistencia a la flexión según la norma ASTM C 78-94, y tres cilindros con dimensiones de 150 mm de diámetro x 300 mm de altura de acuerdo a la norma ASTM C-192 para evaluar la resistencia al impacto.

Los especímenes fueron desmoldados 24 horas después de su fabricación, durante este periodo se evitó la evaporación del agua. Después de extraer los especímenes, las muestras se etiquetaron y se conservaron durante 28 días en un cuarto de curado a 23°C con 100% de humedad relativa.

- b. El procedimiento de mezclado que se siguió para cada una de las mezclas compuestas de cemento – metacaolín, se realizó en dos partes, la primera parte se realizó en una mezcladora dosificadora AUTOMIX, de acuerdo a la norma ASTM C 305, posteriormente esta mezcla se agregó en un recipiente donde fue mezclada con las fibras por medio de una mezcladora manual (figura 8), debido a que en la mezcladora automatizada las fibras se aglomeraban.

La secuencia de mezcla se realizó de la siguiente manera:

- Colocar toda el agua de la mezcla en olla.
- Agregar el cemento al agua, iniciar la batidora y mezclar a velocidad lenta durante 30 s.
- Añadir toda la cantidad de arena lentamente durante un período de 30 s.
- Detener la mezcladora, cambiar a velocidad media, y mezclar durante 30 s.
- Detener la mezcladora y dejar reposar el mortero durante un minuto y medio. Durante los primeros 15 s de este intervalo, raspar rápidamente hacia abajo, debido a que el mortero se pueda haber acumulado en la olla.
- Acabado el tiempo de reposo, mezclar durante 1 min a velocidad media.
- La mezcla se coloca en un recipiente donde se añaden las fibras .
- Por último se mezcla durante dos minutos, evitando que las fibras se aglomeren.



Figura 8. Mezcladora manual.

2.3.3. Medición de las propiedades de los concretos en estado fresco.

a. Concretos cemento–ceniza volante.

La trabajabilidad en las mezclas se evaluó mediante la norma ASTM C 995 que consiste en determinar el tiempo de fluidez del concreto reforzado con fibras, a través del cono de asentamiento invertido como se muestra en la figura 9.

Esta norma determina el tiempo que requiere el concreto reforzado con fibras para fluir a través del cono de asentamiento invertido sometido a vibración interna.



Figura 9. Cono de asentamiento invertido.

b. Concretos cemento–metacaolín.

La influencia de la incorporación de las fibras y el tipo de tratamiento se evaluó mediante la determinación de la trabajabilidad. Se realizó mediante un dispositivo que sirve para conocer la consistencia según la norma (NF P18-452, NF P15-437). Consiste en una caja metálica rectangular (60 cm x 30 cm x 30 cm), colocada sobre soportes de caucho, con un vibrador y una parte desmoldable. El mortero se coloca en cuatro partes iguales y en cada capa se dan seis golpes. El tiempo de flujo o consistencia es el tiempo que tarda la muestra, una vez que alcanzó la marca en la caja vibrante [78], se mide con un cronómetro con una precisión 1/10s, el esquema se muestra en la figura 10.



Figura 10. Consistencia en morteros fibroreforzados.

La mezcla se colocó en moldes de tres especímenes con dimensiones de 40x40x160 mm, el procedimiento de llenado se realizó en dos capas, donde cada una se compacto en la mesa de golpes durante 60 s, según la norma NF- EN 196-1 [79] (figura 11).

Los moldes se protegieron por una película de plástico para evitar la pérdida de agua y se matuvieron a una temperatura ambiente de 20°C.



Figura 11. Elaboración de especímenes.

Los especímenes fueron desmoldados 24 horas después de su fabricación, durante este periodo se evitó la evaporación del agua.

Después de extraer los especímenes, las muestras se etiquetaron y se conservaron durante una semana en un cuarto de curado a 20°C con 100% de humedad relativa.

2.3.4. Pruebas de durabilidad en los especímenes.

a. Especímenes cemento–ceniza volante.

Los especímenes (barras y cilindros) de concreto con fibra de todas las mezclas incluyendo las de control se sometieron a pruebas de deterioro acelerado, las cuales pretenden simular el medio natural y provocar el deterioro en los especímenes. De esta manera se procedió a realizar los siguientes tipos de deterioro:

- a. En el primer tipo deteriorose sometieron a 17 ciclos de humedecimiento y secado. Cada ciclo consistió en un día de humedecimiento y tres de secado a una temperatura de 21°C.
- b. En el segundo deteriorolos especímenes se expusieron al ambiente natural durante 74 días.

b. Especímenes cemento–metacaolín.

Se llevaron a cabo dos procedimientos de deterioro para evaluar la durabilidad de la fibra dentro de una matriz cementante. El primero de ellos fue el deterioro acelerado, mediante ciclos de humedecimiento y secado, donde cada ciclo consistió en un día de humedecimiento y tres días de secado, en la figura 12 se observa el esquema que se desarrollo, en total se realizarón 8 ciclos de deterioro. El otro procedimiento se realizó en un ambiente natural simulado en un cuarto a una temperatura de 20°C y a 65% de humedad relativa, los especimenes se expusieron el mismo periodo de tiempo que los del deterioro acelerado, con motivo de tener una comparativa de los posibles factores que afectan a las fibras y si este tipo de procedimiento, resultaron lo suficientemente agresivos para las fibras, que permita observar el efecto del tratamiento de recubrimiento por medio de sustancias hidrofóbicas en las mismas.



Figura 12. Ciclos de deterioro acelerado.

2.3.5. Ensayos mecánicos.

a. Evaluación de especímenes cemento-ceniza volante.

Para evaluar el efecto en la resistencia mecánica de los especímenes, debido a los ciclos de humedecimiento y secado por el deterioro acelerado, y a los expuestos al ambiente, se ensayaron 57 diferentes series (mezclas), correspondientes a las diferentes mezclas. Cada serie represento 3 barras de 75x75x280mm y tres probetas de 150mm de diámetro x 63mm de espesor para ensayos de impacto, la longitud de la fibra fue de 45mm y las fracciones de volumen utilizadas 0.4%, 0.7% y 1.0%.

Resistencia a la flexión.

La resistencia a la flexión se determinó a través de la prueba de Módulo de Ruptura (MR) de acuerdo con la norma ASTM C 78, en la que se aplica la carga a los tercios del claro en una viga como se muestra en la figura 13, se ensayaron vigas correspondientes a los dos diferentes tratamientos (Mulprox 2047 y Emulwax 3060), con una relación a/mc de 0.5 y tres diferentes volúmenes de fibra (0.4, 0.7 y 1.0) y a las dos tipos de exposiciones, los ensayos se llevaron a cabo en la maquina INSTRON a una temperatura de laboratorio de 21°C.



Figura 13. Ensayo de resistencia a la flexión según la norma ASTM C-78.

Resistencia al Impacto.

Una de las propiedades más importantes de los concretos reforzados con fibras es su resistencia al impacto, que describe la capacidad del material de absorber energía sin romperse.

Existen varios tipos de pruebas que se han utilizado para medir la resistencia al impacto, para este trabajo se utilizó la prueba de caída de peso (impacto única o repetida), en esta prueba se obtiene el número de golpes necesarios para causar la primera grieta visible en la parte superior y para causar la fractura final de la probeta. Este número sirve como una estimación cualitativa de la energía absorbida por la muestra. Esta prueba se utiliza para comparar diferentes mezclas con distintos volúmenes de fibras y para demostrar el mejoramiento de los concretos reforzados con fibras en comparación con el concreto convencional (ACI 244) [80].

El equipo que se requiere para llevar a cabo esta prueba es el siguiente: (1) un martillo de compactación de 18" de caída y 10 libras en peso de acuerdo a la norma ASTM D 1557 [80], (2) una bola de acero de 2 ½", (3) una placa base plana con soporte de fijación como se muestra en la figura 10 y (4) una probeta de concreto de 6" de diámetro y 2 ½" de espesor de acuerdo a la norma ASTM C 31 o C 470. El procedimiento de ensaye fue el siguiente: la muestra se recubrió en la parte inferior con una capa delgada de vaselina o una grasa pesada y se coloca en la placa base dentro de las orejetas de posicionamiento, a continuación se atornilló el soporte de fijación y la bola de acero se colocó en la parte

superior de la muestra dentro del soporte. Se colocaron unas piezas de elastómero entre la muestra y las orejetas de posicionamiento para restringir el movimiento de la muestra durante la prueba para la primera grieta visible. El martinete se coloca con su base sobre la bola de acero y se mantuvo allí con suficiente presión hacia abajo para evitar que la bola se moviera durante la prueba. El martillo se dejó caer repetidamente, se registró el número de golpes necesarios para causar la primera grieta visible en la parte superior y para causar la falla final. El elastómero debe retirarse después de que se observa la primera grieta, la falla final se define como la apertura de grietas en la muestra lo suficiente para que las piezas de concreto estén tocando tres de las cuatro orejetas sobre la placa base.



Figura 14. Ensaye de Resistencia al Impacto.

b. Evaluación de especímenes cemento-metacaolín.

Variación dimensional en morteros.

Para identificar el efecto del volumen de fibra y del tratamiento de protección en los cambios dimensionales de los morteros, se realizaron tres formulaciones: una mezcla control de cemento y dos mezclas con fibras (tratadas y sin tratamiento). Para todas las mezclas se utilizó una relación a/c de 0.5.

El tipo de mezclado que se utilizó es el que se describió anteriormente en el punto 2.3.2.

Contracción total, autógena y pérdida de masa.

De acuerdo con la norma NF P15-433 [83], se prepararon los especímenes en moldes de (40mm x 40mm x 160mm), en sus extremos son colocados unos tornillos como se muestra en la figura 15.



Figura 15. Molde para especímenes de contracción.

Los especímenes se desmoldaron a las 24 horas después de su fabricación, se almacenaron en un ambiente controlado a 20°C, 50% HR. Para el ensaye de la contracción autógena, al momento de desmoldar las probetas fueron recubiertas con papel aluminio impermeable, con el fin de evitar la evaporación del agua (figura 16).



Figura 16. Probeta recubierta con aluminio.

La contracción autógena y la contracción por secado se evaluó mediante la comparación de mediciones cada 24 horas, se comparó la longitud de la muestra, con respecto a su longitud inicial tomada con un tiempo t_0 ($t_0=1$ día), una referencia externa longitud $L=160$ mm (Barra control), que se utiliza para ajustar el cero del micrómetro antes de cada serie de mediciones, así como una comparación en pérdida de masa de los especímenes, se registró el peso inicial como M_0 ($M_0=1$ día) y el peso a cada día.

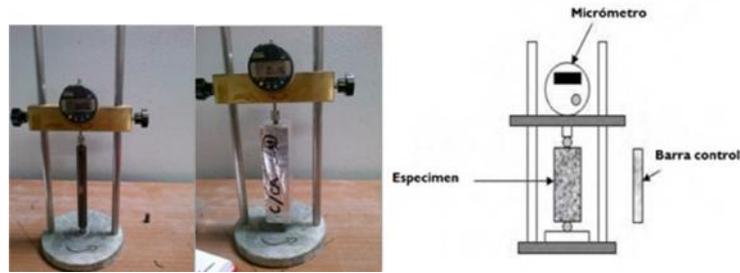


Figura 17. Medición de cambios dimensionales.

La contracción de cada medición se calculo con la siguiente ecuación 4:

$$C = \frac{dl}{L} * 1000 \quad (4)$$

Donde:

C = Contracción relativa ($\mu\text{m}/\text{m}$).

dl = diferencia entre la longitud inicial del especimen tomada en ($t=0$) y la medida final de cada día (μm).

L= Longitud de la barra control igual a 160 mm.

Porosidad.

La porosidad es una propiedad física que impacta la durabilidad del material. El procedimiento para la determinación se describe en la norma [NF P18-459] [84]. La porosidad de un material esta relacionada directamente en su resistencia mecánica y en su capacidad de absorción. De acuerdo a la norma mencionada, la porosidad abierta de un material, es la relación que existe entre el volumen de poros comunicados al exterior y su volumen total, expresada en porcentaje. La porosidad puede ser:

- Abierta (o accesible al agua)

- Cerrada
- Total (suma de la porosidad abierta y la porosidad cerrada).

El principio de esta prueba consiste en medir la porosidad accesible al agua del concreto endurecido por medio de la determinación de algunos pesos: peso de la probeta saturada sumergida en agua (peso hidrostático), peso de la probeta saturada al aire y peso de la probeta seca al aire, para esto las muestras se colocan dentro de un desecador y se hace vacío hasta que la presión sea inferior a 25 mbar, esta presión se mantiene constante por 4 horas. Conseguido esto, se deja entrar lentamente la cantidad de agua suficiente para que las probetas queden totalmente cubiertas y se mantienen con el vacío durante un tiempo mínimo de 44 horas.

La masa volumétrica aparente ρ_d , expresada en kilogramos por metro cúbico, se calcula con la siguiente ecuación 5:

$$\rho_d = \frac{M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times \rho_{eau} \quad (5)$$

La porosidad accesible al agua. ε , expresada en porcentaje volumétrico, se calcula con la ecuación 6:

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \quad (6)$$

Donde:

ε : Porosidad accesible al agua (%).

ρ_d : Densidad volumétrica aparente de la muestra (kg/m^3)

M_{eau} : Masa del cuerpo de prueba saturado sumergido en el agua (kg)

M_{air} : Masa del cuerpo de prueba saturado pesado en el aire (kg)

M_{sec} : Masa de la probeta seca pesada en el aire (kg). Cada pieza de ensayo se secó en un horno a 105 ° C hasta que alcance un peso estable (una diferencia de menos de 0,1% entre dos pesadas llevadas a cabo 24 horas de diferencia)

ρ_{eau} : Densidad del agua utilizada para la pesa hidrostática (kg/m^3).

Ensayos mecánicos.

Para evaluar el efecto en la resistencia mecánica de los especímenes, debido a los ciclos de humedecimiento y secado por el deterioro acelerado, y a los expuestos en una sala controlada a 20°C con 65% Humedad Relativa, se ensayaron 32 diferentes series, correspondientes a las mezclas realizadas. Cada serie represento 3 barras de 40x40x160mm, la longitud de la fibra fue de 25mm y las fracciones de volumen utilizadas 0.4%, 0.7% y 1.0%.

Todos los especímenes se ensayaron al término de 8 ciclos de exposición donde cada ciclo consistió en un día de humedecimiento y 3 días de secado.

Antes de realizar los ensayos las muestras fueron secadas en un horno a una temperatura de 50°C durante una semana, para asegurarse de que las probetas estuvieran completamente secas.

Los ensayos mecánicos se llevaron a cabo de acuerdo a la norma EN 196-1 [85] que consiste en ensayar tres especímenes con dimensiones de 40 x 40 x 160 mm a flexión – compresión.

La ruptura del espécimen en flexión se efectúa conforme al esquema descrito en la figura 18.

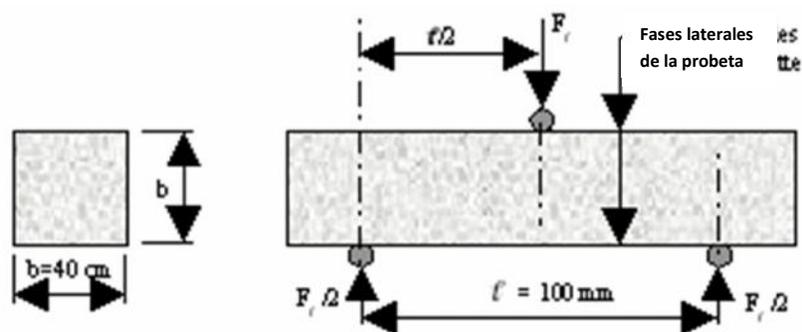


Figura 18. Esquema utilizado para la resistencia a la flexión.

Para evaluar la resistencia a la compresión, se toman las dos mitades de cada espécimen que fue ensayado a la flexión como se muestra en la figura 19.

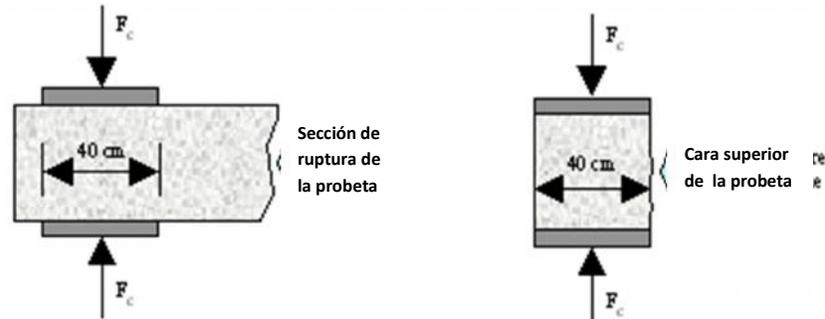


Figura 19. Esquema de ensayo a compresión.

2.4. Observación en el microscopio electrónico de barrido.

Se determinaron por microscopía electrónica de barrido los mecanismos de interacción al interface fibra/matriz. Se realizaron dos tipos de observaciones:

- a) Sobre secciones de falla con el fin de explicar los mecanismos de degradación de los compuestos, su evolución con el tiempo y el beneficio de los métodos de tratamiento de las fibras o de la incorporación de puzolanas en la matriz cementante.

Se observó una probeta por tipo de mezcla de agave y lino con fibras tratadas y sin tratamiento.

- b) Sobre secciones planas pulidas de los compuestos, con el fin de estudiar los cambios volumétricos de las fibras.

Se observaron de las mismas probetas que las del punto (a) para hacer una comparación de resultados.

CAPÍTULO 3

Análisis y discusión de resultados

CAPITULO III

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

3.1. Caracterización de las fibras naturales.

3.1.1. Morfología microscópica.

3.1.1.1. Fibra de agave de lechuguilla.

Las fibras de lechuguilla están formadas por microceldas individuales unidas entre sí por medio de la hemicelulosa y la lignina, esta característica fue observada anteriormente [86]. En la micrografía de la figura 19 se observan las microfibrillas integradas entre sí, las cuales forman la morfología general de la fibra. Esta microestructura origina que la fibra posea una alta permeabilidad.

La geometría de la sección transversal de la fibra no es uniforme, por lo tanto se obtuvo su diámetro equivalente mediante las micrografías de las fibras. Los valores obtenidos del diámetro de la fibra se encuentran en un rango de 125 a 355 μm , de acuerdo a estudios se ha reportado en el comité 544 del Instituto Americano del Concreto (ACI) que el diámetro promedio de la fibra de lechuguilla es de 356 μm .

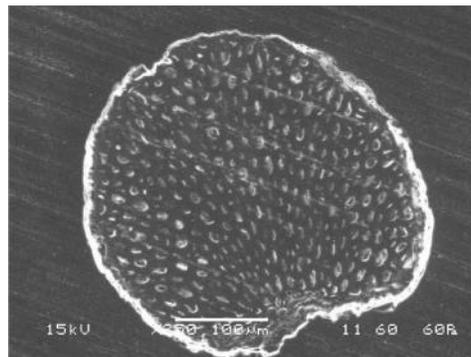


Figura 19. Micrografía de la sección transversal de la fibra de lechuguilla.

3.1.1.2. Fibra de lino.

En un nivel microscópico, una fibra se compone de capas concéntricas que se diferencian porque consisten en cadenas de celulosa cristalina embebidos en una matriz amorfa de hemicelulosa, lignina y pectina principalmente.

La fibra de lino está compuesta por filamentos con características geométricas no uniformes y coinciden con el esquema de la sección transversal descrito por Baley [5] como se muestra en la figura 20. En las micrografías se observó que los filamentos presentan una forma poligonal en su sección transversal, así como una dispersión en sus dimensiones geométricas, el diámetro equivalente que se obtuvo corresponde al de los filamentos, los cuales oscilaron entre los 9 y los 49 μm .

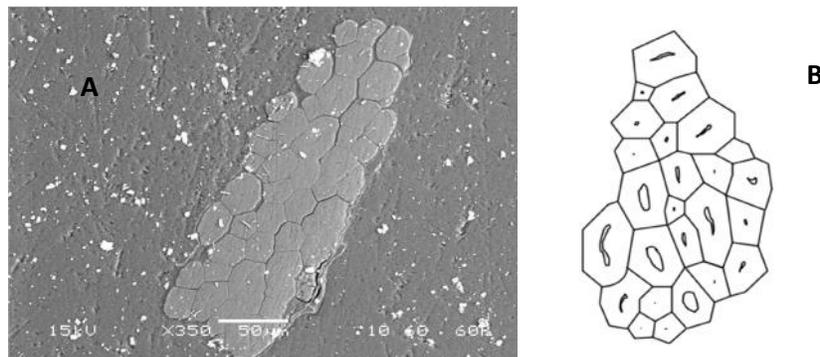


Figura 20. Sección transversal de la fibra de lino: (A) micrografía obtenida por SEM, (B) esquema descrito por Baley.

3.1.2. Absorción de agua.

Las fibras naturales tienen la capacidad de absorber agua y esta cantidad dependerá de la cantidad de vacíos o poros que se presentan en su estructura morfológica [86], esta propiedad afecta principalmente las propiedades mecánicas, se producen cambios volumétricos una vez que la fibra pierde su capacidad hidrofílica, lo que origina una inestabilidad en su volumen que propicia la pérdida de adherencia con la matriz de concreto.

De acuerdo a las pruebas realizadas en el laboratorio en 24 h, las fibras obtuvieron una capacidad máxima para absorber agua de hasta 120% para las fibras de lino y 101% para las fibras de agave aproximadamente con respecto a su peso seco. Estos resultados pueden apreciarse en la Figura 21.

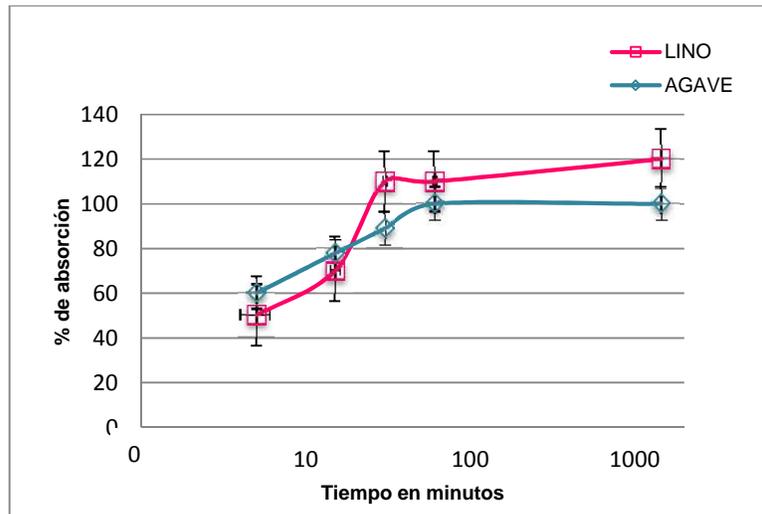


Figura 21. Absorción de fibras sin tratamiento.

Se observó que la fibra de lechuguilla logró saturarse al 100% en 60 min, mientras que la fibra de lino en un 90%, sin embargo la fibra de lino se saturó 1.2 veces más que la fibra de lechuguilla en 24 h, la relación tiempo-absorción fue mayor en la fibra de lechuguilla, este comportamiento puede deberse a la diferencia de porosidad de cada fibra [87], como se mencionó anteriormente la porosidad está ligada con la estructura física de la fibra. De acuerdo con Juárez [86] la porosidad de las fibras de agave se encuentra entre 21 a 25% respecto al volumen de la muestra seca. Una baja porosidad indica que la fibra tiene menos vacíos por lo que absorbe menos agua, lo contrario sucederá en una fibra con mayor porosidad.

La alta absorción de agua en las fibras naturales produce un problema durante el mezclado ya que puede absorber agua de reacción y modificar la relación a/c, al disminuir el agua de mezclado puede generar una mezcla seca y poco trabajable. De este modo el porcentaje de absorción de las fibras naturales fue utilizado para el diseño de mezcla de

los morteros fibroreforzados, se consideró la cantidad de agua que dichas fibras absorbieron, para no afectar la relación a/c.

3.1.3. Densidad absoluta.

La densidad de la fibra está definida por la relación entre el peso y el volumen de una masa, por lo tanto depende directamente de las características de la fibra. Esta propiedad es importante debido a que en el diseño de mezclas es necesario conocer la densidad del material para saber la cantidad de fibra en peso que ocupara cierto volumen dentro de la mezcla.

La densidad obtenida mediante el procedimiento expuesto en el punto 2.2.3.2 para la fibra de lechuguilla fue de 1.48 g/cm^3 y para la fibra de lino fue de 1.5 g/cm^3 . Las densidades reportadas en la literatura para las fibras de lechuguilla han sido de 1.38 g/cm^3 y 1.48 g/cm^3 [86,87], para las fibras de lino se han reportado densidades de 1.54 g/cm^3 y 1.42 g/cm^3 [88, 87].

3.1.4. Propiedades mecánicas.

3.1.4.1. Elongación a la ruptura.

Define la capacidad que tiene el material para sufrir deformaciones sin fallar, es decir, su ductilidad, esta elongación permite tener importantes deflexiones en el concreto, mientras que no se produzcan fallas por adherencia, las fibras tienen la capacidad de transferir los esfuerzos de la matriz agrietada proporcionando la capacidad de absorber más carga sin colapsar.

La fibra de lechuguilla resultó tener una elongación a la ruptura de 10 mm y la fibra de lino de 12 mm. Juárez obtuvo una elongación de 6-12mm para la fibra de lechuguilla. El comité 544 del ACI reporta una porcentaje de elongación a la ruptura de 10-25% para fibras de coco, 3-5% sisal, 1.5-1.9% yute y de 1.8-2.2% lino respectivamente [1].

3.1.5. Resumen de propiedades físicas.

A continuación, se resumen las propiedades físicas y mecánicas determinadas de las fibras.

Tabla 16. Propiedades físico mecánicas de las fibras.

	Lechuguilla	Lino
Diámetro	125 a 355 μm	9 a 49 μm
Absorción de agua en 24 h	101%	120%
Densidad absoluta	1.48 g/cm^3	1.5 g/cm^3
Elongación a la ruptura	10 mm	12 mm

3.2. Durabilidad de la fibra.

Para reducir la alta absorción de la fibra y la fragilización de la misma dentro de la matriz alcalina, las fibras se impregnaron con los siguientes agentes protectores: Parafina Refinada (PR), Cera de crayón lavable (CL), Candelilla (CA), Mulprox 2035 (2035), Mulprox 2047 (2047), Emulwax 3040 (3040), Emulwax 3042 (3042), Emulwax 3060 (3060), como se mencionó en el capítulo 2.

3.2.1. Absorción de agua en fibras tratadas.

La alta absorción de agua y la humedad causan a las fibras un hinchamiento, dando por resultado inestabilidad dimensional y características mecánicas pobres, los tratamientos superficiales reducen su capacidad hidrofílica como se muestra en la figura 22.

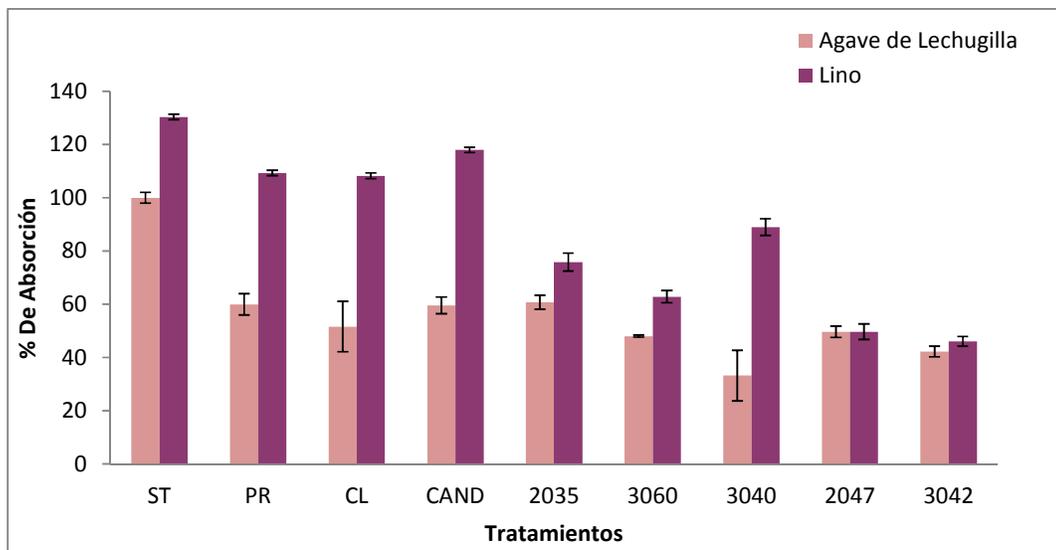


Figura 22. Porcentaje de absorción en fibras tratadas.

Los resultados indican que en un tiempo de saturación de 24 h, los tratamientos hidrofóbicos permiten una reducción en su absorción, las dos ceras que redujeron en mayor cantidad la absorción de agua son la mulprox 2035 y la 2047, de las emulsiones las que resultaron mayores efectivas fueron la 3040 y 3060.

De los tratamientos utilizados se observa que la emulwax 3040 reduce un 70% la absorción de agua en fibras de lechuguilla, mientras que en las fibras de lino reduce un 30% de su absorción, con respecto a la fibra sin tratamiento.

Los resultados de la reducción en la absorción pueden deberse a que la cera forma capas que recubren a la fibra, una vez que estas solidifican tapan los poros formando pequeñas capas como películas alrededor de la fibra, la durabilidad de estas capas dependerá de la composición de cada tipo de cera, como se mencionó en el capítulo 2. Todos los tratamientos reducen la cantidad de absorción, pero es evidente que no todos son tan efectivos, esto se debe a que cada tipo de cera varía su composición, la cual depende de la aplicación para la que fue diseñada. Las ceras difieren en su dureza y esta puede tener un efecto significativo sobre las propiedades, en la figura 22, se observa que las fibras recubiertas con candelilla (CAND) solo redujeron un 20% su capacidad de absorción y las recubiertas con la mulprox 2047 (2047) un 66%, esto podría deberse a que la candelilla tiene una dureza de 0-2 menor que la mulprox 2047 de 18-22 de acuerdo a la norma

ASTM D1321, esto quiere decir que las ceras más “duras” tardaran más en deformarse o de resistir abrasión de la superficie.

3.2.2. Resistencia al medio alcalino.

De acuerdo con Gram la descomposición química de la lignina y la hemicelulosa es la principal causa de deterioro por fragilización de la fibra en el concreto. La alcalinidad del agua en el poro de la matriz de cemento disuelve la lignina, se rompe la unión de las microceldas individuales las cuales absorben el hidróxido de calcio producto de las reacciones de hidratación del cemento. La fibra pierde su flexibilidad y se fragmenta en pequeñas unidades longitudinales perdiendo su capacidad de reforzar al concreto.

Para simular el medio alcalino del concreto, las fibras tratadas se expusieron a una solución concentrada de hidróxido de calcio disuelto en agua a temperatura de laboratorio 23°C [86].

3.2.2.1. Elongación a la ruptura de las fibras tratadas.

Para evaluar el comportamiento mecánico de las fibras se realizaron pruebas de elongación en fibras naturales tratadas. El alargamiento a la rotura del Agave de lechuguilla y de lino se determinó por ensayos de tensión.

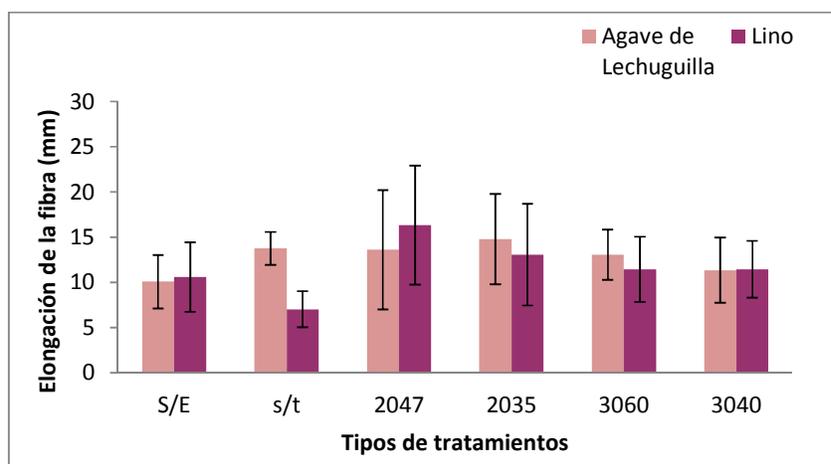


Figura 23. Elongación de fibras a un mes de exposición en una solución alcalina a un pH=12.5, donde S/E: sin exposición, s/t: sin tratamiento.

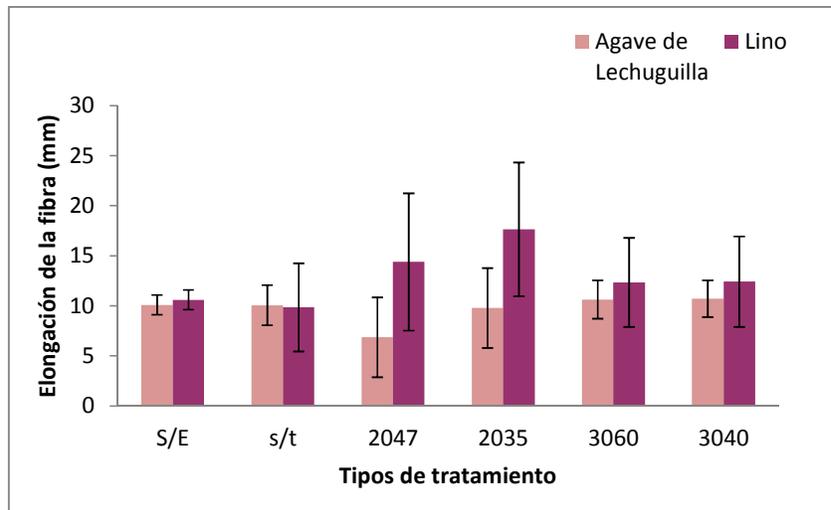


Figura 24. Elongación de fibras a un día de exposición en una solución alcalina a un pH=12.5 a una temperatura de 70°C, donde S/E: sin exposición, s/t: sin tratamiento.

Los resultados muestran que las fibras tratadas expuestas a un mes no presentan una disminución en su ductilidad, sino lo contrario se ven mejorados con el uso de los distintos tratamientos, las fibras tratadas con la cera 2047 mejoran un 15% su ductilidad con respecto a las fibras que no presentan ningún tratamiento. Sin embargo la temperatura afecta de manera considerable la durabilidad de las fibras de lechuguilla con este mismo tratamiento, esto se debe a que las fibras son expuestas a temperatura de 70°C y este tipo de ceras es un material que tiene un punto de fusión de 73°C, muy similar a la temperatura de exposición, esto ocasiona que la fibra pierda sus capas de recubrimiento, para este caso el tratamiento más efectivo resultó ser la cera 2035 esto puede deberse principalmente a que su temperatura de fusión es de 86°C y presenta una dureza de 15.

Los dos tipos de tratamientos que resultaron tener un mejor comportamiento en disminución de absorción, ductilidad en una solución alcalina durante un mes y un día a una temperatura de 70°, además de su facilidad de impregnación son la Mulprox 2047 y Emulwax 3060.

3.3. Fabricación de especímenes fibroreforzados cemento-ceniza volante.

Se realizaron 19 mezclas de morteros fibroreforzados con fibras de lino y lechuguilla, en una matriz compuesta de 80% cemento + 20% CV, se utilizaron volúmenes de fibra (0.4%, 0.7% y 1.0%), dos diferentes tratamientos para protección de la fibra en el medio cementante, (Mulprox 2047, Emulwax 3060), una longitud de fibra fue de 45mm y una relación a/c de 0.5.

3.3.1. Propiedades en estado fresco.

La influencia de la incorporación de fibras naturales en el concreto se evaluó de acuerdo a la norma ASTM C-995 Método de prueba estándar para el tiempo de flujo del concreto reforzado con fibras a través del cono de asentamiento invertido. Esta prueba mide la viabilidad de los concretos reforzados con fibras mediante la movilidad o la fluidez del concreto bajo vibración interna, esta prueba se utiliza para el control de la consistencia de este tipo de concretos.

Los resultados del efecto del volumen y tipo de fibra en la trabajabilidad de acuerdo al tiempo Vebe se dan en la figura 26.

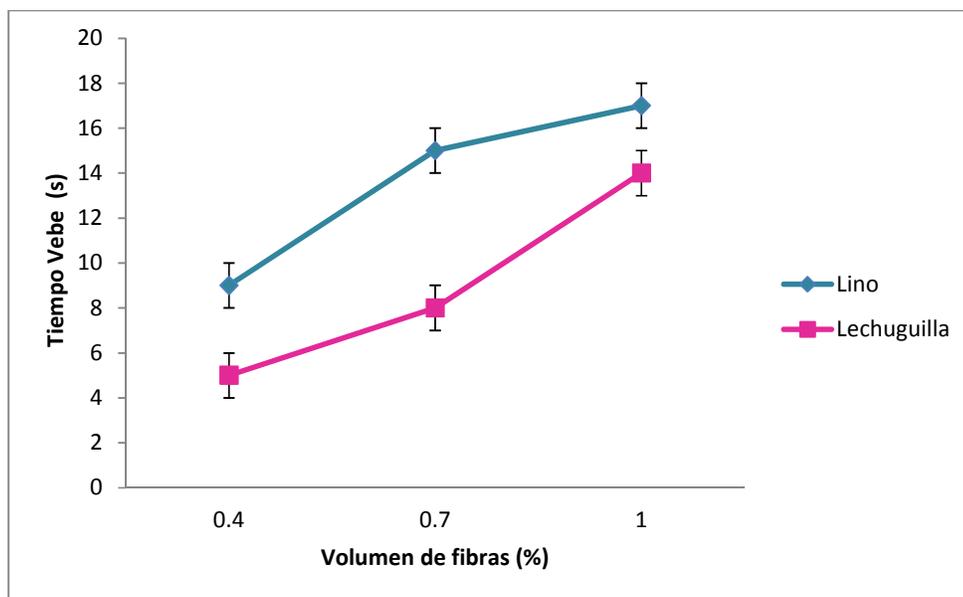


Figura 25. Efecto de las fibras de lechuguilla y lino en el tiempo Vebe.

De acuerdo a la figura se puede observar como la trabajabilidad o consistencia de las mezclas se ve afectada de acuerdo al tipo de fibra y volumen que se utilizó, a mayor contenido de fibras su trabajabilidad disminuye debido a un aumento en su área superficial [88].

El contenido de fibras proporciona una considerable estabilidad a la masa del concreto fresco, por lo que, independientemente del tipo de fibra, la pérdida de trabajabilidad es proporcional al volumen de fibras en el concreto.

Las fibras de lino presentan una menor consistencia y esto se debe a que los haces de fibras en el proceso de mezclado se separan, esto ocasiona que la mezcla tenga una gran cantidad de micro fibras.

De acuerdo a la tabla 19, los concretos fibroreforzados presentan una consistencia muy seca, esto quiere decir que su consistencia es muy baja, no obstante, la facilidad de colocación y la compactación del concreto son mejores de lo que se supone debido a su baja consistencia.

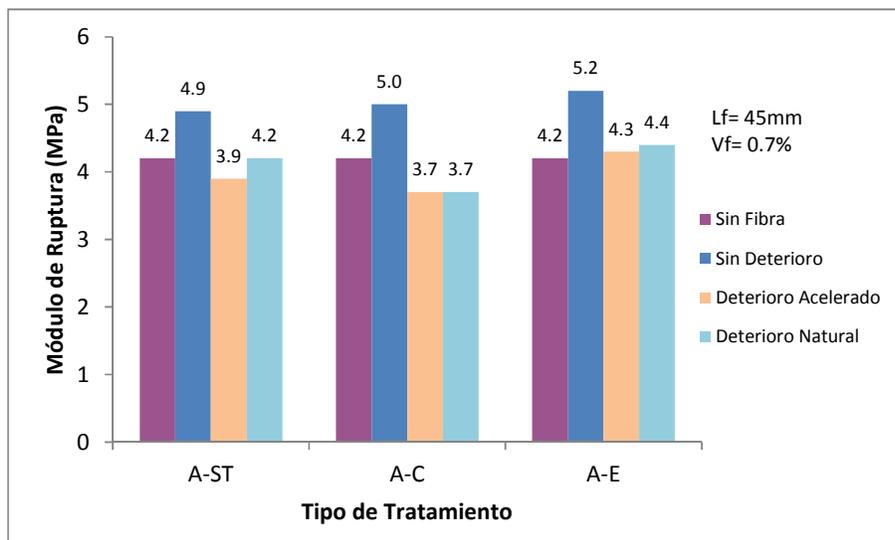
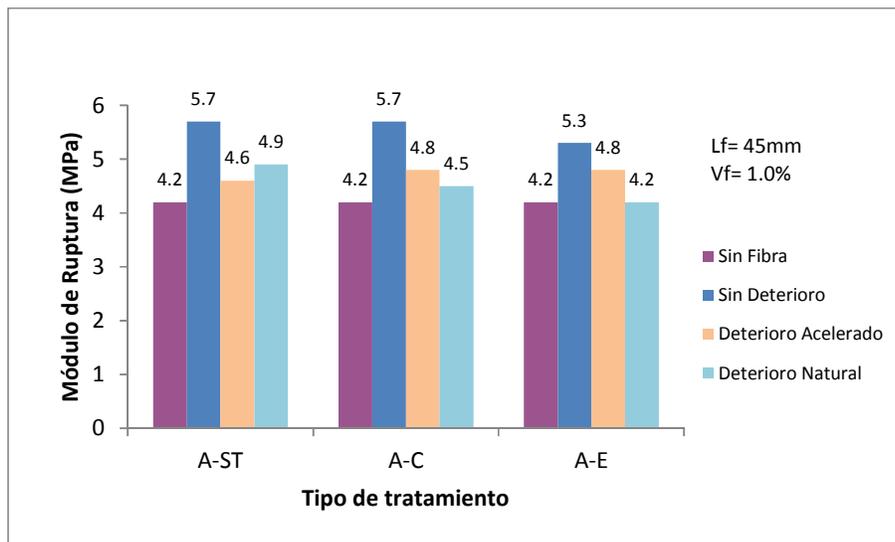
Tabla 17. Consistencia del concreto según el tiempo Vebe.

Tiempo Vebe (s)	Consistencia
30 a 18	Extremadamente seca
18 a 10	Muy seca
10 a 5	Seca

Una mezcla de concreto que no puede colocarse fácilmente o compactarse totalmente, no podrá rendir la resistencia esperada ni cumplir con las características de durabilidad, no es estético.

3.3.2. Comportamiento a la flexión.

La resistencia a la flexión de los especímenes de concreto fibroreforzados es también afectada por el tipo de fibra, variación de volumen, tipo de tratamiento y el tipo de exposición a los cuales fueron sometidos los especímenes, en la siguiente figura se muestra los resultados de la resistencia a la flexión expresada en módulo de ruptura de las fibras de lechuguilla tratadas, expuestas a un deterioro acelerado (ciclos de humedecimiento-secado) y un deterioro al medio ambiente natural.



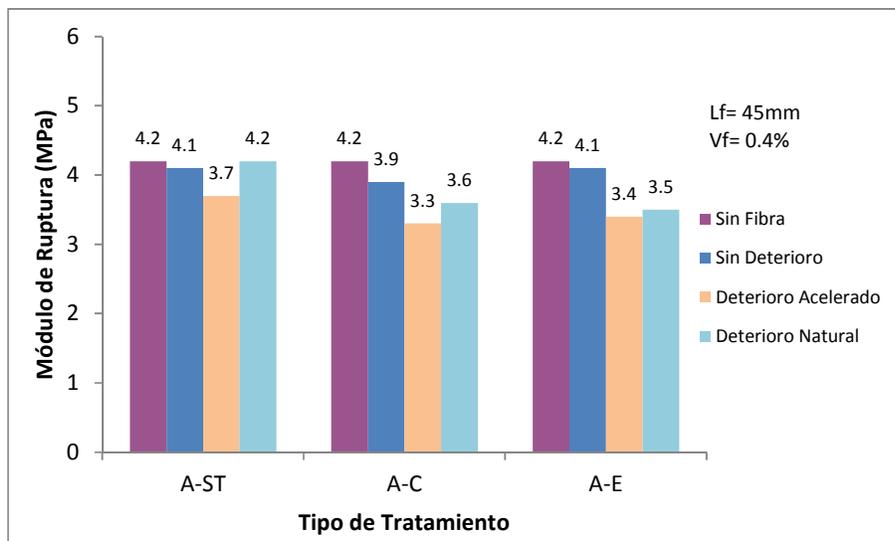


Figura 26. Comportamiento de la fibra de Lechuguilla en la resistencia a la flexión, debido al volumen, tipo de exposición y tratamientos en la fibra (A-ST: agave sin tratamiento, A-C: agave cera y A-E: agave emulsión).

Ramakrishna [49], comenta que hay una reducción sustancial en la resistencia a la flexión independientemente del tipo de exposición (humedecimiento-secado, solución de hidróxido de calcio, etc). Esto puede atribuirse a la disolución química de la lignina, especialmente en medios alcalinos, esta disolución es responsable de la pérdida en la resistencia de las fibras y su eficiencia como refuerzo.

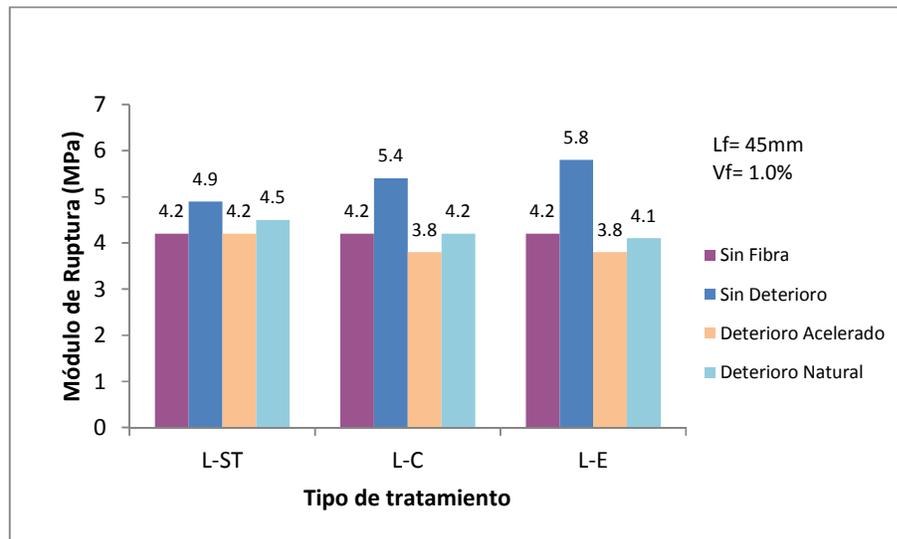
De acuerdo con los resultados obtenidos en 1% de fibra, se puede decir que el medio alcalino de la matriz, así como los dos tipos de deterioro no son factores que reducen la resistencia a la flexión ya que las barras reforzadas con fibras sin tratamiento mantuvieron una resistencia similar a las reforzadas con fibras tratadas con cera y emulsión.

En compuestos con 0.7% de fibra las barras reforzadas con fibras tratadas presentan una resistencia mayor que las barras con fibra sin tratamiento, esto es cuando no son sometidas a ningún tipo de deterioro. Sin embargo, en los especímenes sometidos a los ciclos de humedecimiento y secado, la alcalinidad parece empezar a afectar a las fibras, ya que la resistencia disminuye en un 21% para las fibras sin tratamiento, 26% para las fibras tratadas con cera y en un 18% para las fibras tratadas con emulsión. Un

comportamiento totalmente similar se observa en los compuestos expuestos al medio ambiente natural.

Los resultados muestran una disminución en la resistencia en las fibras expuestas a los dos tipos de deterioro, esto se debe a que la fibra está expuesta a variaciones de humedad y es la principal causa del deterioro debido a la descomposición de la lignina y la hemicelulosa, no se muestra una variación considerable de acuerdo al tipo de exposición pero si al tipo de tratamiento, las fibras tratadas con cera resultaron ser más susceptibles a la pérdida de resistencia que las tratadas con emulsión.

En la figura 28, se indican los resultados obtenidos para los concretos reforzados con fibras de lino correspondientes a la resistencia a flexión de especímenes con fibras tratadas con cera (L-C) y emulsión (L-E) sometidos a 17 ciclos de humedecimiento y secado. Los especímenes estuvieron 28 días en el cuarto de curado con 95% HR, antes de ser sometidos a los deterioros.



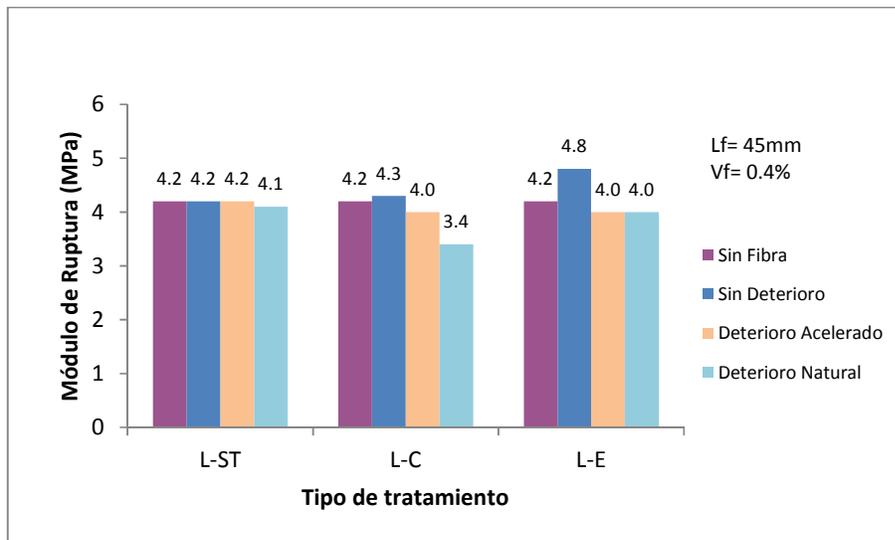
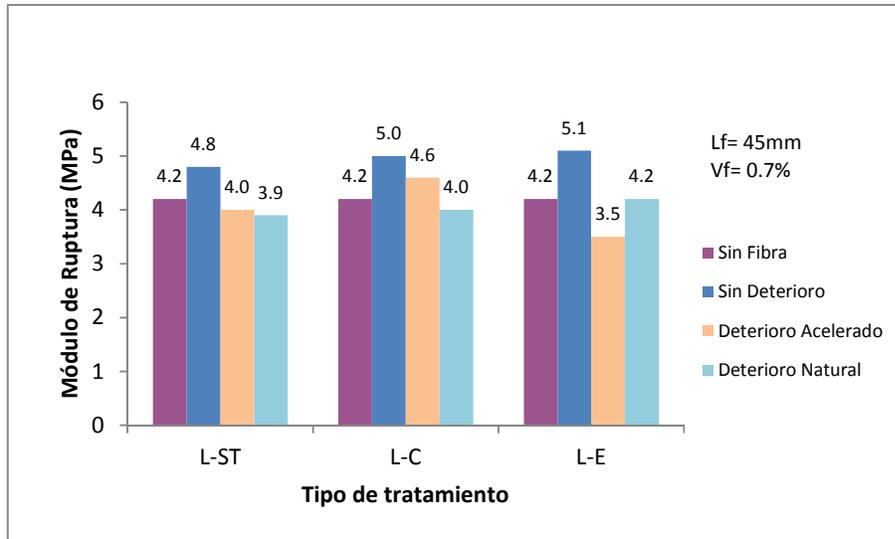


Figura 27. Comportamiento de la fibra de lino en la resistencia a la flexión, debido al volumen, tipo de exposición y tratamientos en la fibra (L-ST: lino sin tratamiento, L-C: lino cera y L-E: lino emulsión).

Los resultados obtenidos señalan que el comportamiento es muy similar a los compuestos reforzados con fibra de agave, el volumen de fibra que resulto ser más favorable es de 1%, las barras reforzadas con fibras tratadas presentan una resistencia mayor que las barras con fibra sin tratamiento, esto es cuando no son sometidas a ningún tipo de deterioro. En los especímenes sometidos a los ciclos de humedecimiento y secado, la alcalinidad empieza a afectar a las fibras, ya que la resistencia disminuye en un 25% para las fibras sin tratamiento, 30% para las fibras tratadas con cera y en un 35% para las

fibras tratadas con emulsión. Un comportamiento totalmente similar se observa en los compuestos expuestos al medio ambiente natural.

En 0.7% de fibra los resultados son más alentadores ya que la resistencia solo se ve disminuida en un 17% para las fibras sin tratamiento, 8% para las fibras tratadas con cera y en un 32% para las fibras tratadas con emulsión.

Para 0.4% de fibra la resistencia disminuye solo en 1% para las fibras sin tratamiento, 1% para las fibras tratadas con cera y en un 17% para las fibras tratadas con emulsión. No se muestra una variación considerable de acuerdo al tipo de exposición pero si al tipo de tratamiento, las fibras tratadas con emulsión resultaron ser más susceptibles a la pérdida de resistencia que las tratadas con cera, estos resultados concuerdan con los previstos en el punto 3.2.2.1. Donde el tratamiento más favorable varía con el tipo de fibra esto es que para las fibras de lechuguilla el mejor comportamiento se obtiene con las fibras tratadas con emulsión, mientras que para las fibras de lino los resultados muestran un mejor comportamiento con las fibras tratadas con cera.

Juárez [86], menciona en estudios realizados que los especímenes con fibra tratada con parafina mantienen la capacidad de resistir cargas después de someterlos a 10 ciclos de humedecimiento y secado. Esto puede deberse a que las variaciones de humedad producen contracción y expansión en el concreto, originando agrietamientos, los que permiten el paso de la humedad y debido a esto se deteriora la fibra sin tratamiento.

En la fibra de agave el comportamiento que se observó en los especímenes durante el ensaye, la deflexión que se produjo hasta aparecer la primera grieta fue mínima, el espécimen no es capaz de sostener la carga sino que esta decae considerablemente hasta un nivel de 20% de la carga máxima, en este punto la carga se mantiene y disminuye paulatinamente y la deflexión se incrementa. Una vez que apareció la primera grieta esta fue incrementando su ancho de grieta durante la aplicación de la carga, por lo que únicamente se generó un solo plano de falla.

Para las fibras de lino se presentó el mismo plano de falla a diferencia de las fibras de agave, en las fibras de lino no se incrementa su ancho de grieta una vez que se obtiene la carga máxima.

En la figura 28, se muestran imágenes de especímenes ensayados con fibra de lino y agave de lechuguilla, donde se observa que el ancho de grieta es mayor para la fibra de

lechuguilla, esto se debe principalmente a la ductilidad de la fibra, en los ensayos de elongación se observa que las fibras de lino presentan valores más altos que la fibra de agave, pero un aspecto importante es que los ensayos se realizaron en haces de fibra es decir, un haz está compuesto por 10-40 microfibras, pero en la matriz reforzada las fibras ya no actúan como haces de fibra, sino como fibras individuales debido a que estas se separan durante el mezclado, o bien las fibras no se encuentran totalmente distribuidas en la matriz, por lo que los esfuerzos no se transfieren de la matriz a las fibras.

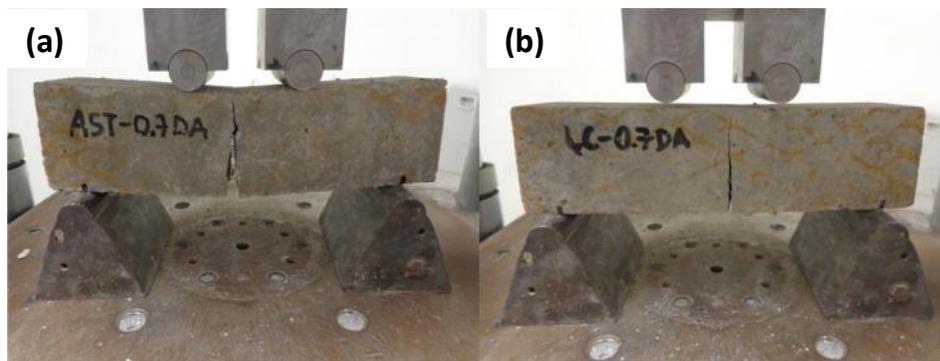


Figura 28. Ensayo a flexión: (a) fibra de agave y (b) fibra de lino.

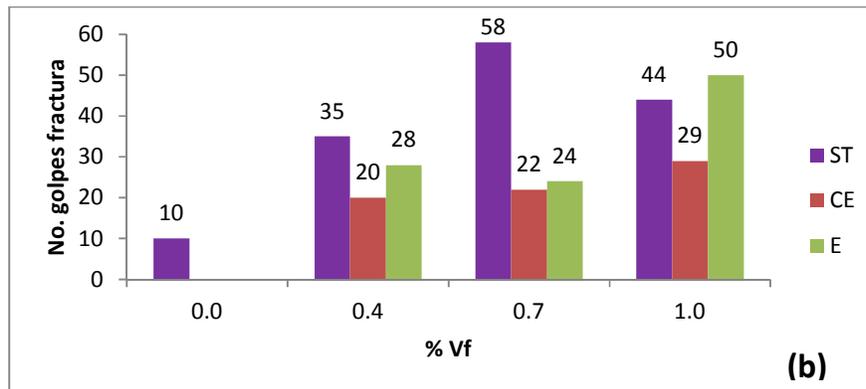
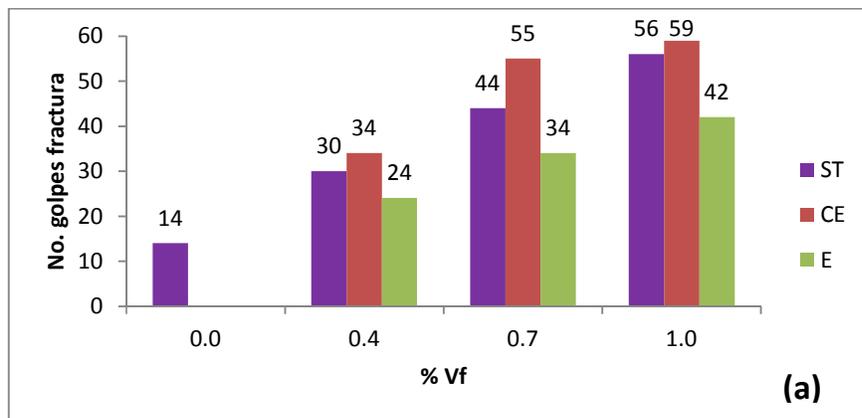
3.3.3. Resistencia al impacto.

3.3.3.1. Resistencia al impacto en especímenes reforzados con fibra de lechuguilla.

Los resultados de la prueba de resistencia al impacto de concretos reforzados con fibras de lechuguilla se muestran en la figura 30. Es evidente que para los tres porcentajes de volumen, la adición de fibras de lechuguilla mejora la resistencia al impacto.

El comportamiento de los compuestos sometidos a condiciones de durabilidad muestra resultados inferiores comparados con los que no fueron expuestos, estos resultados nos indican que la durabilidad de la fibra se ve afectada, por lo que su resistencia disminuye. Esto se debe principalmente a que la fibra es susceptible a degradarse en presencia de humedad, la fibra fue recubierta por dos diferentes tipos de tratamientos, de los cuales el de mejor comportamiento fue la emulsión, aunque en un principio la emulsión no

aumenta considerablemente la resistencia al impacto cuando estas no son sometidas a ningún tipo de deterioro. Se observa que en los especímenes sometidos a un deterioro acelerado, las fibras son afectadas por las variaciones de humedad y su resistencia se ve disminuida; para 1% de fibras, se observa una disminución del 13% para ambos tratamientos. Con un contenido de 0.7% de fibras disminuye en un 15% para las fibras tratadas con cera y en un 8% para las fibras tratadas con emulsión. Para el caso de un 0.4% de fibras su resistencia no se ve afectada. Lo que indica que el tratamiento con emulsión puede evitar la absorción de agua y mantener una durabilidad adecuada ante los efectos de temperatura y humedad.



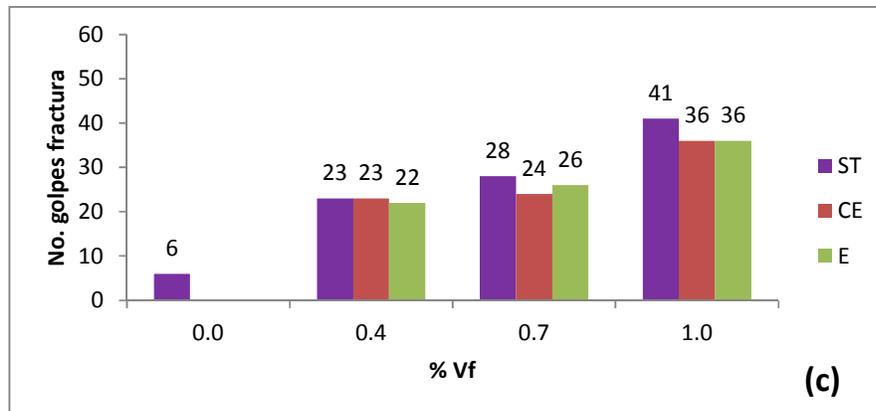


Figura 29. Resistencia al impacto a la fractura en concretos reforzados con fibra de lechuguilla sometidos a ciclos de deterioro: (a) sin deterioro, (b) deterioro natural, (c) deterioro acelerado.

De acuerdo a los resultados observados, el tratamiento con cera (CE) aumento su resistencia de un 13 a un 25%, sin embargo al ser sometidos al deterioro en un ambiente natural su resistencia disminuye, un factor importante que se observó durante los ensayos es la distribución de la fibra dentro de la matriz, la cual fue afectada en especial con los concretos reforzados con fibra tratada con cera, se observan bolas de fibra solo en partes del espécimen y no totalmente distribuida. Esto nos indica que la resistencia al impacto pudo ser afectada por este factor. A pesar de esto se observa que las fibras aumentan su resistencia al impacto cuatro veces más para un volumen de fibra de 1.0%, en comparación con los concretos sin fibra.

3.3.3.2. Resistencia al impacto en especímenes reforzados con fibra de lino.

En la figura 31 se indican los resultados obtenidos para la fibra de lino correspondientes a la resistencia al impacto a la fractura. El comportamiento observado de los especímenes durante el ensaye, fue una resistencia menor a la fractura, esto nos dice que la fibra de lino absorbe menor energía a la rotura que las fibras de agave, además de que el espécimen colapsa totalmente y no es capaz de mantenerse adherido por las fibras, como es el caso de la fibra de lechuguilla.

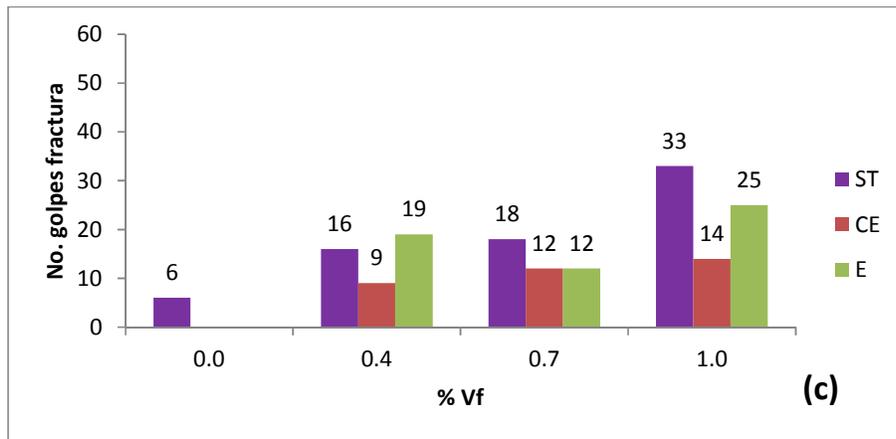
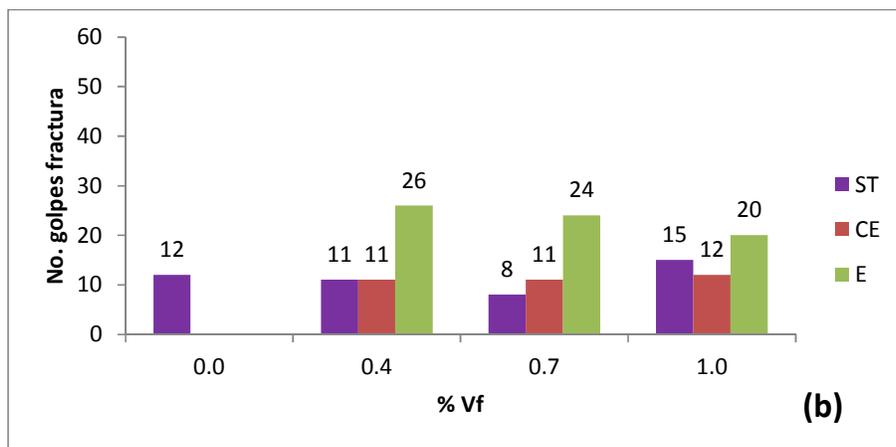
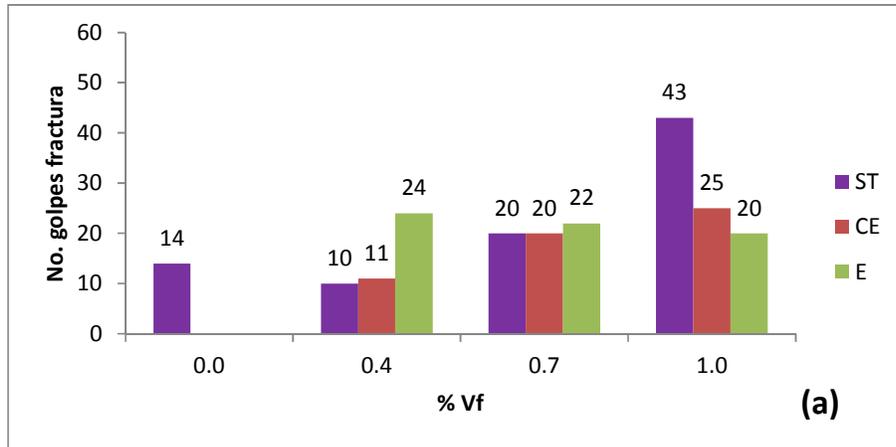


Figura 30. Resistencia al impacto a la fractura en concretos reforzados con fibra de lino sometidos a ciclos de deterioro: (a) sin deterioro, (b) deterioro natural, (c) deterioro acelerado.

Las fibras de lino presentaron una variación de resultados mayor que las fibras de lechuguilla, esto puede deberse como ya se mencionó a la distribución de las fibras en la

matriz, al realizar el ensaye se observó una escasez de fibra de lino en los especímenes, esto puede deberse al efecto de bolas de fibra en el espécimen lo que ocasiona que la matriz no transfiera los esfuerzos a la fibra y esta no es capaz de absorber la energía de impacto. Además las micro fibras de las fibras de lino al parecer no tienen la misma capacidad de absorber energía de impacto que una fibra de lechuguilla, esto se puede ver fácilmente al momento del ensaye donde las probetas ensayadas con fibra de lino colapsan una vez que han adquirido su máxima deformación, en cambio las probetas con fibras de agave, una vez que el concreto falla, esta es capaz de seguir resistiendo las cargas de impacto.

El comportamiento de las fibras de lino es similar al de la lechuguilla, los resultados señalan que los especímenes con fibra tratada con emulsión expuestos a un ambiente natural mejoran la capacidad de su resistencia al impacto, para un 0.4% de fibra su resistencia aumenta en un 136%, para 0.7% de fibra en un 200% y para 1.0% de fibra en un 33%, con respecto a las fibras sin tratamiento. Los resultados de impacto indican que la fibra tratada con emulsión es la mejor opción en comparación con las fibras tratadas con cera, además de que su durabilidad se ve mejorada considerablemente con respecto a las fibras que no fueron tratadas.

3.4. Fabricación de especímenes Cemento-Metacaolín.

Se realizaron 32 mezclas de morteros fibroreforzados con fibras de lino y lechuguilla, y dos matrices cementantes (una compuesta por 100% cemento, y la otra compuesta por 85% cemento + 15% metacaolín), se utilizaron tres volúmenes de fibra (0.4%, 0.7% y 1%), se utilizó un tratamiento hidrófobo a base de cera (emulwax 3060) y una longitud de fibra (25mm), con una relación a/c =0.50.

3.4.1. Mediciones de las propiedades en estado fresco.

La influencia de la incorporación de las fibras naturales en el concreto se evaluó de acuerdo a la norma (NF P18-452, NF P15-437). Se realizaron mediciones únicamente en mezclas de cemento, para los dos tipos de fibras y los tres volúmenes de fibra utilizados.

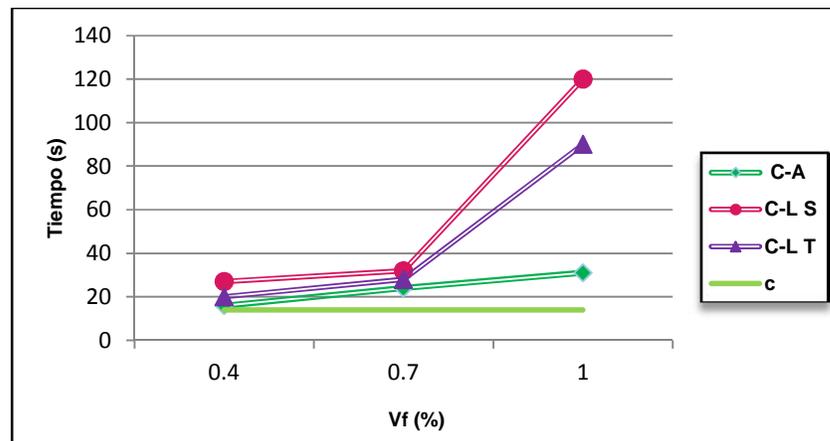


Figura 31. Efecto del volumen y el tratamiento de las fibras naturales en el tiempo (C-A: matriz cemento-agave, C-L S: matriz cemento-lino sin tratamiento, C-L T: matriz cemento-lino tratado, C: matriz cemento).

Es evidente como al aumentar el contenido de fibras en la mezcla disminuye su trabajabilidad, algo que se observa es que las mezclas con fibra de lino tratada aumentan un poco su trabajabilidad, este efecto se deduce del tipo de tratamiento que se utilizó, se trata de una emulsión base agua de cera de carnauba con un rango medio de contenido

de sólidos (16-20%), la cual tiene una consistencia fluida, por lo que ayuda en la viscosidad de la mezcla.

Para las fibras de lino y lechuguilla con un volumen de 0.7% presentan una trabajabilidad muy parecida, con los ensayos mecánicos a flexión se podrá evaluar si existe una significativa diferencia entre estos dos porcentajes de fibras, además otro efecto que se puede presentar es la aglomeración de las fibras y por lo tanto una mala distribución en la matriz cementante.

3.4.2. Medidas de Contracción.

La retracción plástica es el cambio dimensional que se produce en los materiales base cemento dentro de las primeras horas después de su colocación cuando la mezcla se encuentra en estado plástico y aún no ha alcanzado ninguna resistencia significativa.

La contracción es una deformación debida a un cambio de volumen y está ligada a la pérdida de agua que presenta el concreto. Esta contracción se ha atribuido a la presión capilar negativa que conduce a una contracción de volumen de la pasta. Las tensiones se generan por una serie compleja de meniscos que se forman en los poros llenos de agua en el concreto cuando el agua se elimina de la pasta principalmente por evaporación.

La contracción total combina los efectos de la contracción autógena, la contracción por secado debido a la evaporación del agua y la contracción por carbonatación de la mezcla [87].

La evolución en el tiempo de la retracción de los morteros reforzados con fibra de lino, se presenta en la figura 32.

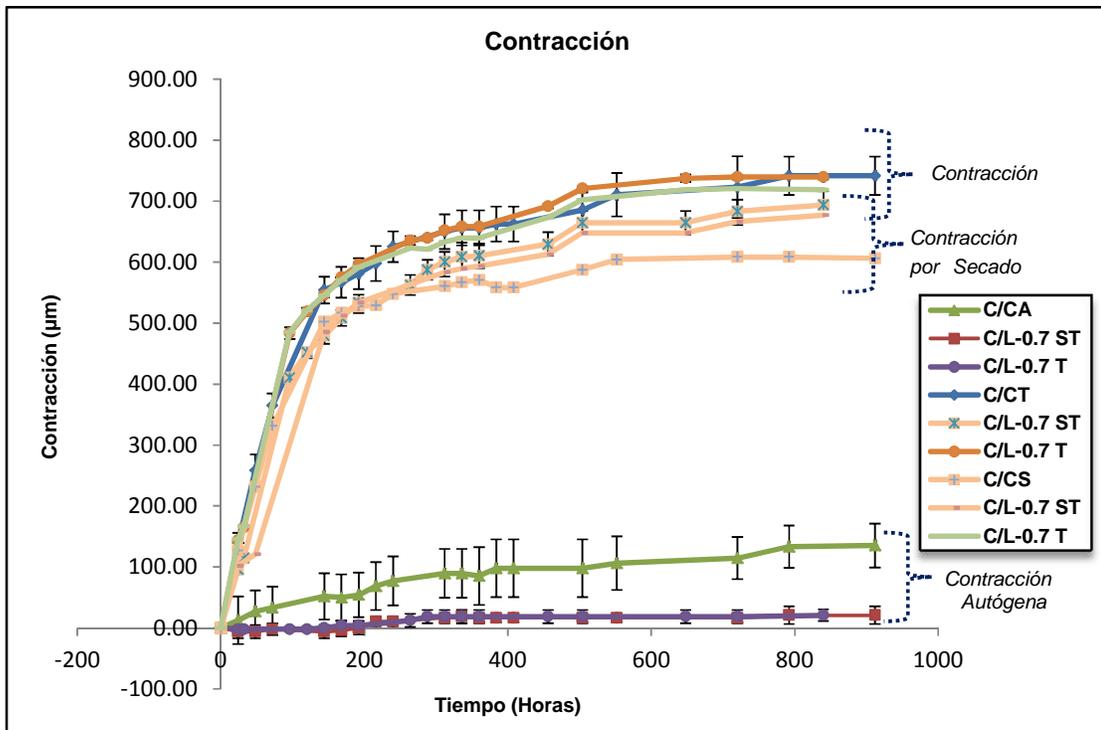


Figura 32. Evolución de la retracción total, por secado y autógena de los morteros control, con 0.7% volumen de fibra de lino tratada y 0.7% volumen de fibra sin tratamiento.

Los resultados muestran una reducción significativa en los cambios dimensionales mediante la incorporación de fibras principalmente en la retracción autógena, los morteros con fibra tratada no mejoran la contracción por secado, sino al contrario esta contracción es mayor, esto se podría deber al hecho de que las fibras tratadas ya no absorberán la misma cantidad de agua, debido a esto el agua podrá evaporarse más fácilmente.

Estas observaciones pueden complementarse con la evaluación de la pérdida de masa respecto al tiempo. Estas tendencias para los diferentes morteros se presentan en la figura 33.

En la contracción total no se observa una diferencia significativa de los compuestos reforzados con fibra tratada y sin tratamiento, respecto al control (compuestos sin fibra). En los resultados de la reducción de la contracción autógena, las fibras tratadas y sin tratar al parecer tienen la misma eficacia, prácticamente su retracción varía de un 0-1%, sin embargo los compuestos sin fibra presentan una retracción del 100%, esto quiere decir que las fibras disminuyen en un 100% la retracción autógena.

Tazama[89], atribuye la retracción autógena de los materiales cementantes a los siguientes mecanismos: a la absorción del agua contenida en los poros para permitir la hidratación de las partículas anhídridas, lo que conduce al desarrollo de limitaciones capilares: lo que se le conoce como el fenómeno de la auto desecación y a la diferencia de volumen entre los reactivos e hidratos formados: lo que se conoce como la contracción de le chatelier.

Los compuestos reforzados con fibras parecen tener un efecto neutro sobre los mecanismos de contracción (reducen la contracción autógena debido a su incorporación en la mezcla, y esta es equivalente a la disminución total de la contracción).

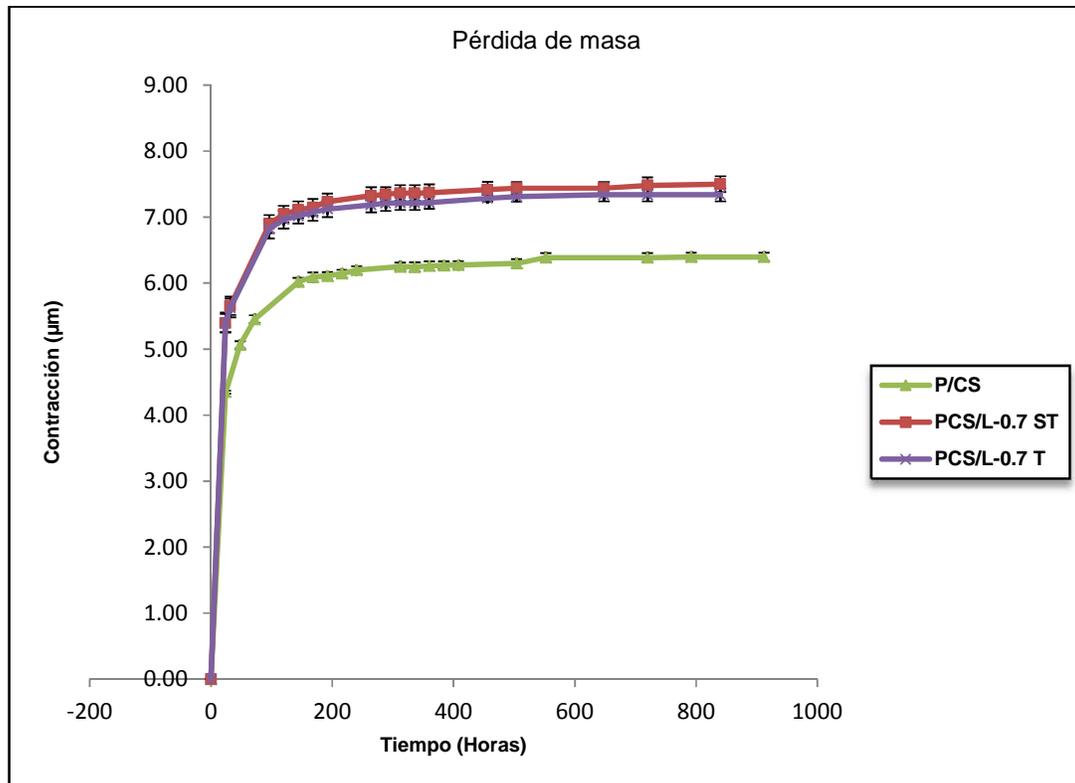


Figura 33. Seguimiento de la pérdida de peso de los morteros control, con 0.7 % de fibra de lino tratada y 0.7% de fibra de lino sin tratamiento.

Se observa que existe una diferencia en la cinética de secado en los diferentes compuestos: los compuestos que contienen fibra logran la máxima pérdida de peso de forma rápida, después de 96 horas, mientras que las muestras control después de las 144 horas aproximadamente.

La incorporación de fibras, por tanto, acelera la cinética de la pérdida de masa del compuesto. Este efecto puede estar ligado a la absorción de agua de las fibras y la desecación de las mismas. Sin embargo estos resultados solo varían en una pérdida de masa de 6.40 μm para el control (compuestos sin fibra) y de 7.34 μm para los reforzados con fibras, es decir solo existe una variación en pérdida de masa del 14%.

3.4.3. Ensayes a flexión de morteros fibroreforzados.

3.4.3.1. Compuestos reforzados fibra de Agave de Lechuguilla.

En las siguientes gráficas se muestran los ensayos mecánicos a flexión de los compuestos, con diferente volumen de fibra, tipo de matriz y tratamiento. Los especímenes fueron sometidos a 8 ciclos de humedecimiento y secado. Los especímenes estuvieron 7 días en el cuarto de curado con 100% de humedad relativa antes de ser sometidos a los ciclos mencionados.

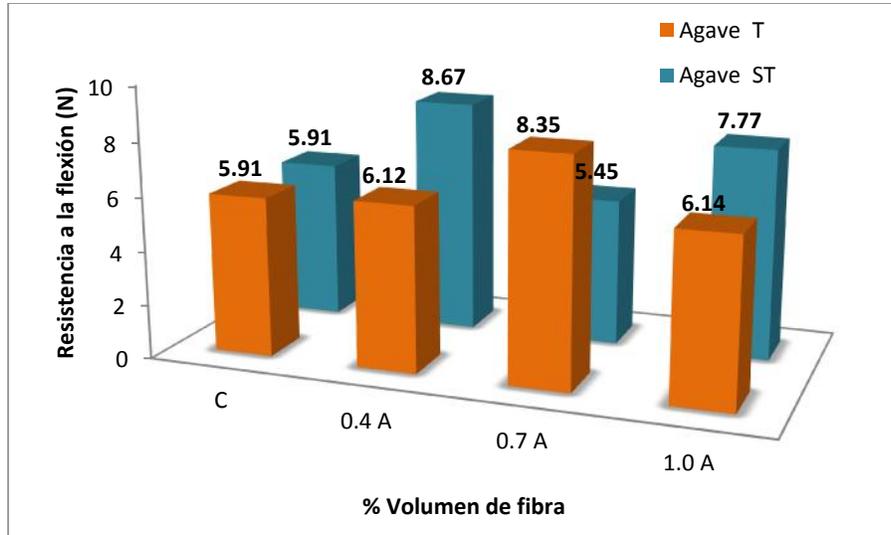


Figura 34. Resistencia a la flexión de los compuestos base cemento reforzados con fibras de agave, expuestos a un deterioro acelerado (A).

De acuerdo a los resultados obtenidos en la figura 34, la incorporación de fibras mejora la resistencia a la flexión hasta en un 46% en comparación con los compuestos sin fibra. Sin

embargo los compuestos reforzados con fibras tratadas presentan menores resistencias que las fibras sin tratamiento, se observa una disminución del 30% para 0.4% de fibra y en un 20% para 1.0% de fibras, esto se puede atribuir a que el tratamiento disminuye la adherencia matriz-refuerzo. Así mismo las fibras tratadas disminuyen la absorción, pero no aumentan o mejoran la resistencia a la flexión. Sin embargo, en comparación con el concreto simple, el concreto reforzado con fibra es mucho más tenaz.

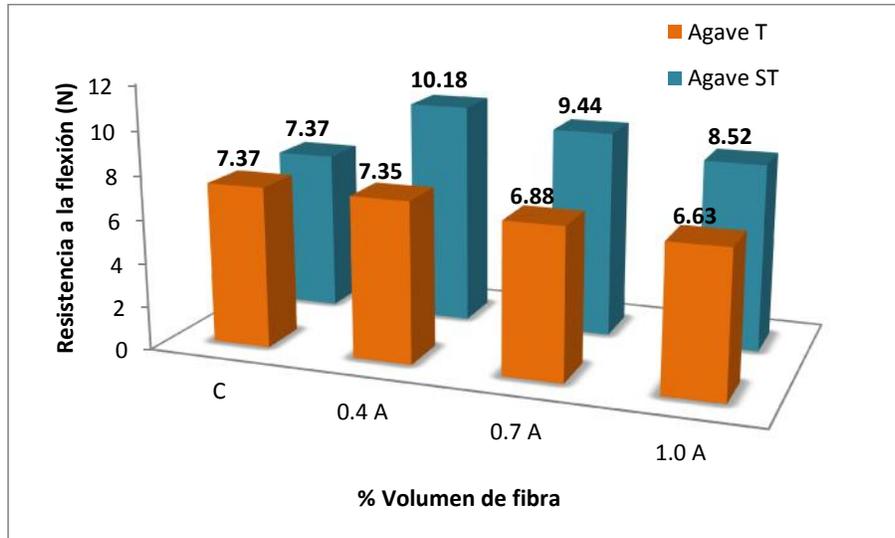


Figura 35. Resistencia a la flexión de los compuestos base cemento con una adición de 15% de metacaolín reforzados con fibras de agave, expuestos a un deterioro acelerado.

En la figura 35, los resultados señalan que los compuestos siguen la misma tendencia que en la matriz de cemento, se observa un aumento en la resistencia a la flexión, esto se puede atribuir a la sustitución de un 15% de cemento por metacaolín, la matriz es más densa, por lo que disminuye la porosidad de la matriz y su durabilidad aumenta.

3.4.3.2. Compuestos reforzados con fibra de Lino.

En la figura 36. se indican los resultados obtenidos para los compuestos base cemento reforzados con fibra de lino correspondientes a la resistencia a la flexión de especímenes con fibras sin tratar y fibras tratadas. Los especímenes fueron sometidos a 8 ciclos de humedecimiento y secado. Los especímenes estuvieron 7 días en el cuarto de curado con 100% de humedad relativa antes de ser sometidos a los ciclos mencionados.

Los resultados de esta prueba señalan que los especímenes con fibra tratada con emulsión presentan una resistencia menor a los especímenes con fibra sin tratar. Lo que resulto similar a lo obtenido para los compuestos reforzados con fibra de agave de lechuguilla.

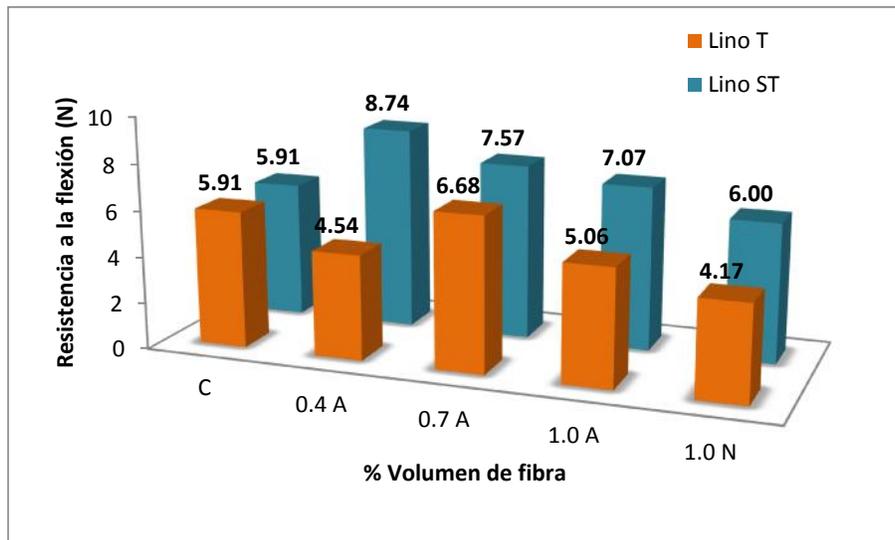


Figura 36. Resistencia a la flexión de los compuestos base cemento reforzados con fibras de lino, expuestos a un deterioro acelerado y 1.0% expuestos a un deterioro natural.

Metha [90], comenta que anteriormente se suponía que las resistencias a la tensión, igual que a la flexión del concreto, podían incrementarse sustancialmente introduciendo fibras cercanamente espaciadas que obstruirían la propagación de las microgrietas, retrasando así el inicio de las grietas por tensión del material. Sin embargo, sigue comentando en estudios experimentales que con los volúmenes y tamaños de fibras que podían ser adecuadamente incorporados en concretos convencionales, los productos reforzados con

fibra no presentaron una mejora sustancial en la resistencia en comparación con las mezclas correspondientes sin fibra.

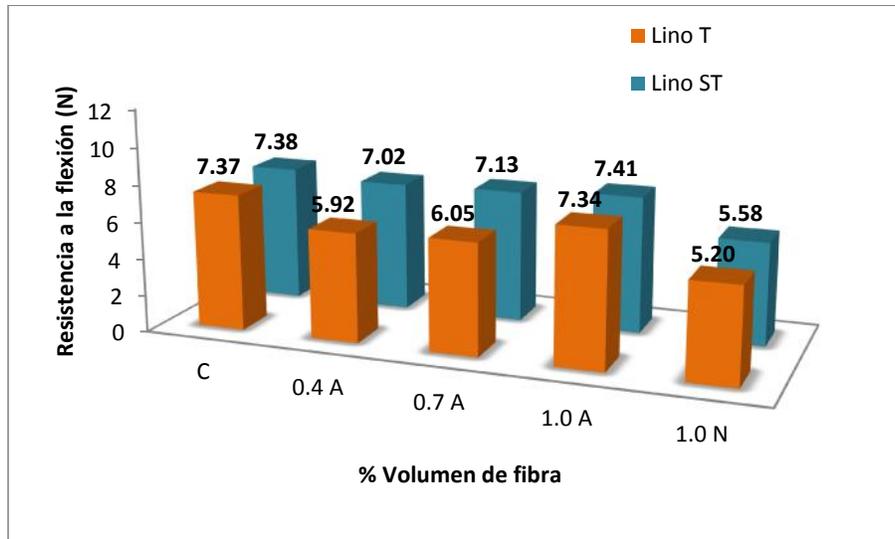


Figura 37. Resistencia a la flexión de los compuestos base cemento con una adición de 15% de metacaolín reforzados con fibras de lino, expuestos a un deterioro acelerado y 1.0% expuestos a un deterioro natural.

Los compuestos reforzados con lino presentan un menor comportamiento a la flexión en los compuestos reforzados con fibras tratadas, en comparación con las fibras sin tratar, esto se podría atribuir a su resistencia a la elongación a la ruptura de los ensayos realizados, donde se observó que la fibra de lino es más susceptible a la degradación en un ph 12.5 durante seis meses de exposición.

3.4.4. Ensayes a compresión de morteros fibroreforzados.

3.4.4.1. Compuestos reforzados con fibra de Agave de lechuguilla.

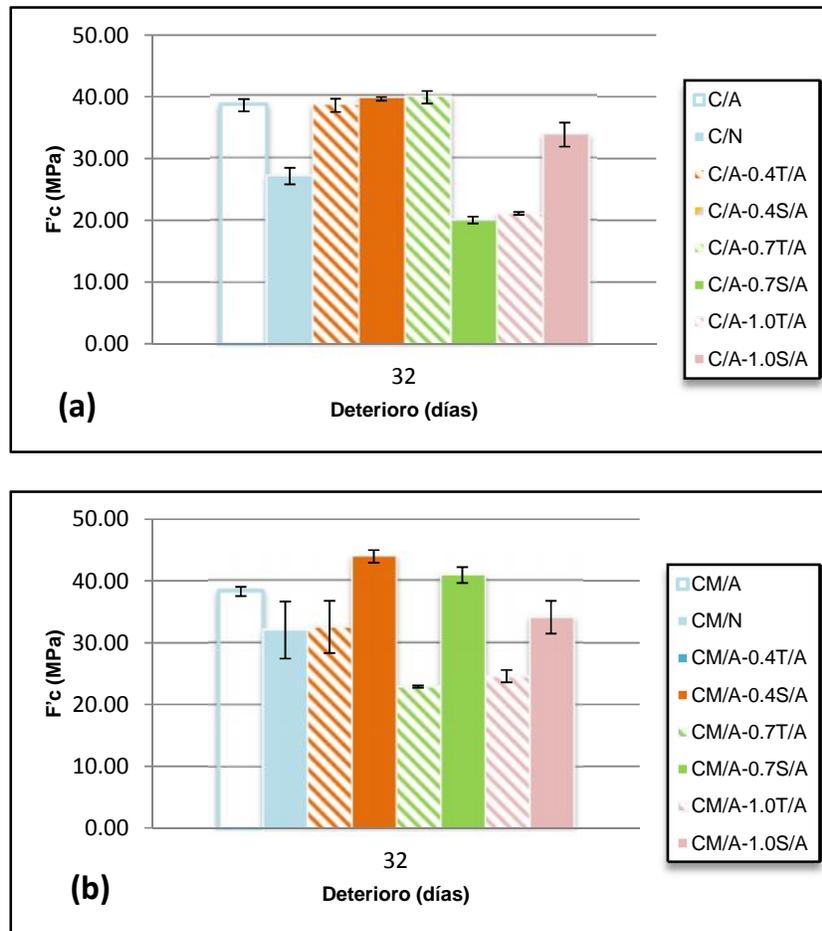


Figura 38. Resistencia a la compresión: (a) matriz decemento, (b) matriz 85% cemento + 15%metacaolín.

Para los compuestos base cemento como los de adición con metacaolín presentan la misma tendencia, los compuestos con fibra tratada disminuyeron su resistencia a la compresión y los volúmenes de fibra con 0.7 resultaron ser más favorables, como se mencionó anteriormente.

Se puede apreciar que tanto las fibras de lino (figura 39) y de lechuguilla (figura 38), en general no mejoraron el comportamiento a compresión del mortero fibroreforzado en comparación con el mortero de referencia, donde para los volúmenes de fibra mayores,

los valores disminuyen en mayor proporción, esto se atribuye a la porosidad que presentan los compuestos con mayor contenido de fibra.

En diversos estudios, se ha manifestado que los compuestos reforzados con fibras naturales para efectos de incremento en la resistencia a la compresión, no presentan una mejora significativa [1, 88]. La disminución de la resistencia a la compresión de los elementos con matrices cementantes reforzados con fibras naturales está directamente afectada debido a que la fibra es un material de menor resistencia que el concreto.

3.4.4.2. Compuestos reforzados con fibra de Lino.

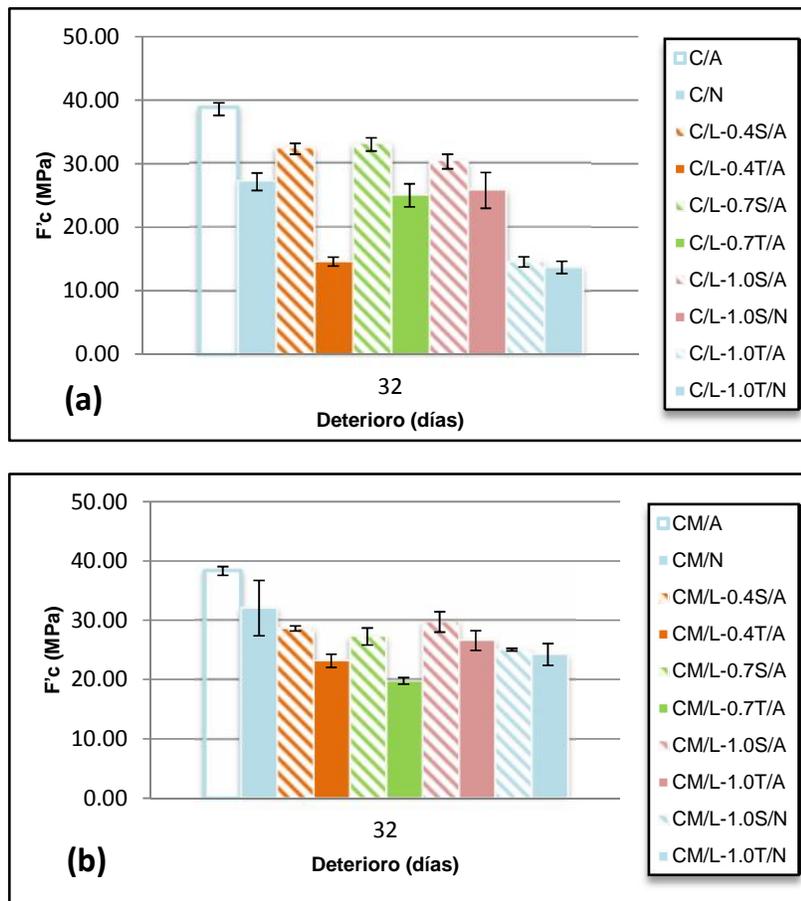


Figura 39. Resistencia a la compresión: (a) matriz de cemento, (b) matriz 85% cemento + 15%metacaolín.

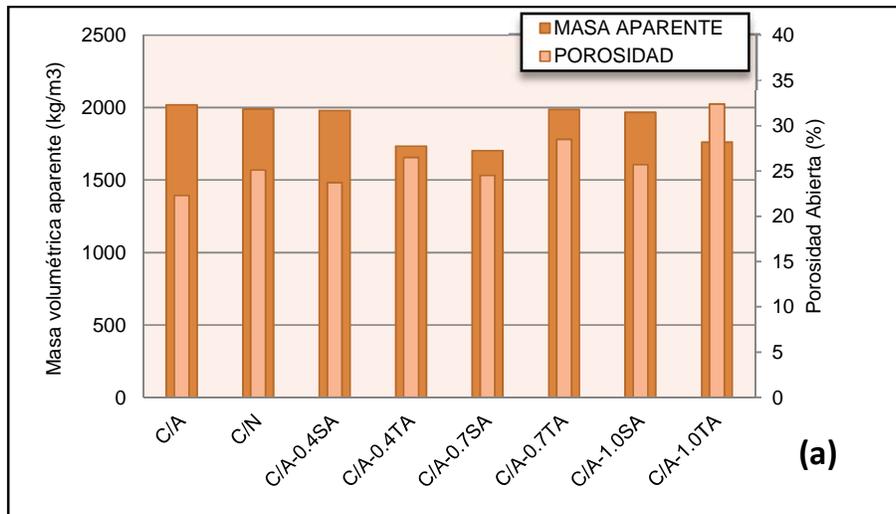
Los resultados muestran un ligero aumento de resistencia en los compuestos con adición de metacaolín, sin embargo su resistencia es menor a los compuestos sin fibra.

Siddique [94], menciona que la presencia de fibras induce la porosidad y reduce la resistencia a la compresión. Sin embargo, en este caso la adición de fibras reduce la resistencia a la compresión entre 15% y 25% respecto a los especímenes sin fibra para la matriz cemento metacaolín y de un 15%- 50% para la matriz de cemento, esto depende del volumen de fibra que se utilice.

3.4.5. Porosidad.

Durante los ciclos de humedecimiento y secado, se monitorearon los especímenes, donde se observó que el tipo de fibra y el volumen influyeron en la absorción y el secado de los especímenes durante su deterioro, por lo que se realizaron pruebas de porosidad para evaluar este comportamiento y si este efecto se debía principalmente a su porosidad.

3.4.5.1. Porosidad en compuestos reforzados con fibra de lechuguilla.



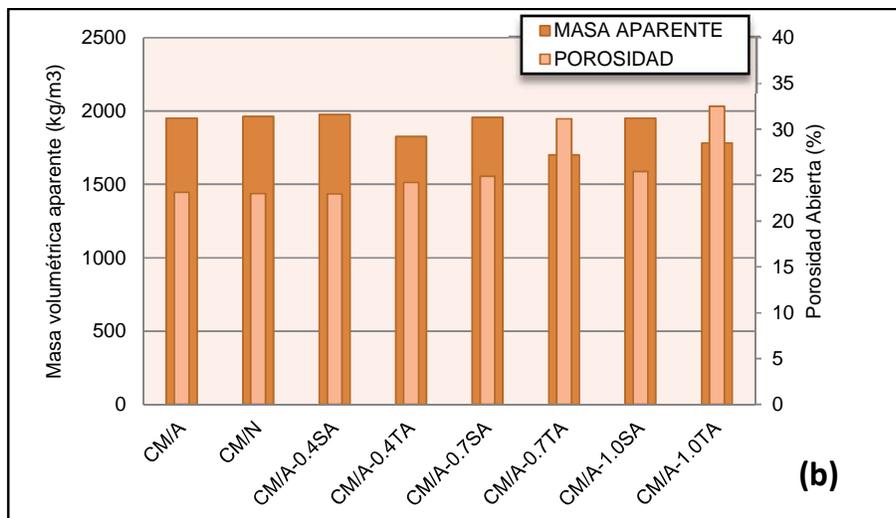


Figura 40. Porosidad de los compuestos reforzados con fibra de lechuguilla: (a) matriz de cemento, (b) matriz 85% cemento + 15% metacaolín.

Los resultados muestran un aumento en la porosidad cuando existe la presencia de fibras en la matriz, a mayor contenido de fibra mayor porosidad. Para los compuestos base cemento (figura 45-a), la porosidad aumento en un 6%, 9% y 15% para un volumen de fibra de 0.4, 0.7 y 1.0 respectivamente (fibra sin tratamiento), estos resultados concuerdan con Siddique[94], donde menciona que la presencia de fibras induce la porosidad y esta depende del contenido de volumen de fibra dentro de la matriz.

El tratamiento a base de emulsión no reduce la porosidad sino que esta aumento en un 18%, 17% y 46% para un volumen de fibra de 0.4, 0.7 y 1.0% respectivamente, esto puede deberse a que las fibras ya no absorben la misma cantidad de agua y esta agua es evaporada ocasionando una mayor porosidad.

Para los compuestos con adición de metacaolín (figura 45-b), los resultados mostraron un ligero aumento en la porosidad de 0.1%, 7% y 9% para los volúmenes de fibra de 0.4, 0.7 y 1.0 respectivamente, esto se debe a que la adición de metacaolín reduce la porosidad de la matriz.

3.4.5.2. Porosidad en compuestos reforzados con fibra de lino.

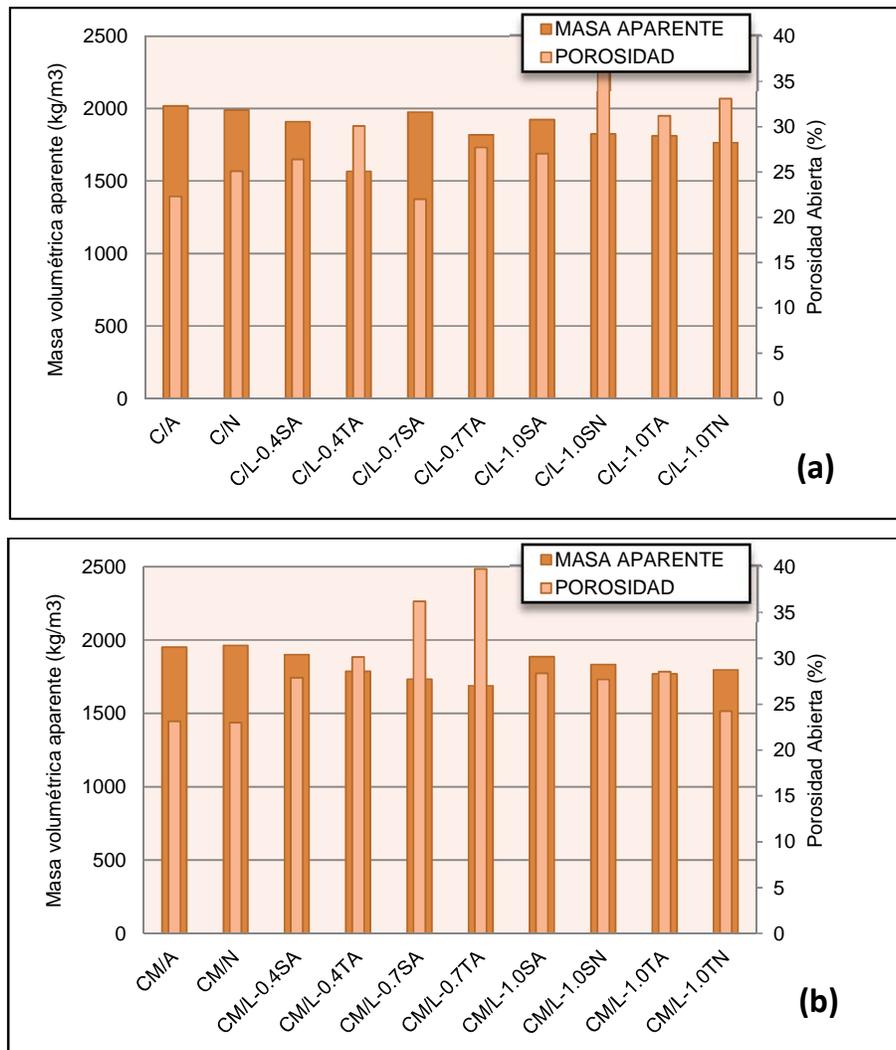


Figura 41. Porosidad de los compuestos reforzados con fibra de lino: (a) matriz de cemento, (b) matriz 85% cemento + 15% metacaolín.

Los compuestos base cemento presentan una porosidad mayor que la matriz pura, en un 18%, 21% y 24% para los volúmenes de fibra de 0.4, 0.7 y 1.0 respectivamente (fibra sin tratamiento) y de un 21%, 34% y 39% para la fibra tratada. Es evidente que el tratamiento no mejora la porosidad de la matriz. A pesar de esos valores de porosidad mayores, la densidad de la matriz no varía en relación al volumen de fibra.

Los compuestos reforzados con fibras de lino presentaron una mayor porosidad que los reforzados con fibra de agave, esto puede deberse a las propiedades físicas de cada tipo de fibras, donde las fibras de lino como se observó en el punto 3.1.2. tienen una

capacidad de absorción mayor que las fibras de agave, esto podría ocasionar una mayor porosidad en el compuesto.

La porosidad es una característica importante del concreto y de ésta dependen en parte otras características como la resistencia a la compresión y la durabilidad.

3.5. Caracterización por microscopia de los morteros fibroreforzados.

3.5.1. Compuestos base cemento reforzados con fibras de agave expuestas a un deterioro acelerado de 8 ciclos de humedecimiento y secado.

Se observa en la figura que el modo de falla del compuesto no solo es por el aflojamiento o deslizamiento de las fibras (figura D), sino también por ruptura de la fibra, se observan fragilizaciones en la superficie (figura B). La fibra de agave aun no es atacada agresivamente por la matriz alcalina ya que se observan ligeras depositaciones de productos minerales en la fibra (depósitos blancos).

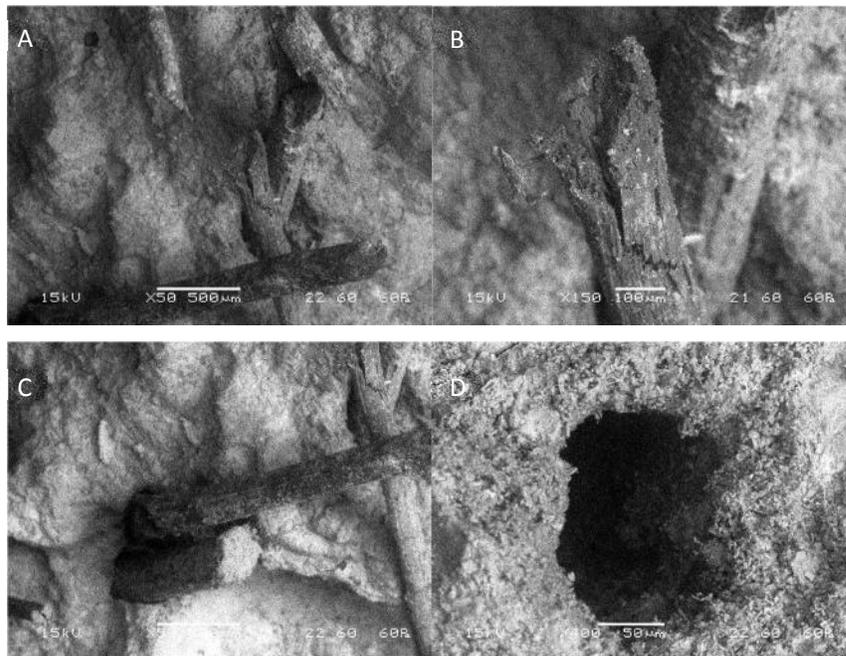




Figura 42. MEB (LV-BSE) de la sección de ruptura de compuesto reforzado con fibras de agave en una matriz base cemento expuestas a un deterioro acelerado. (a: x50; b: x450; c: x50; d: x400; e: x200).

Las imágenes A y B de la figura 43 presentan una sección pulida del material compuesto reforzado con fibra de lechuguilla, alejada de la sección de ruptura.

En la figura A, se observa como la fibra está adherida a la matriz, el desgarramiento que se observa de la fibra puede deberse al pulido de la muestra, mientras que en la imagen B se muestra como la fibra está agrietada esto podría deberse a la fractura de la fibra pero no se observa mineralización, solo algunas partículas blancas correspondientes a los residuos de la capa que se pulió superficialmente.

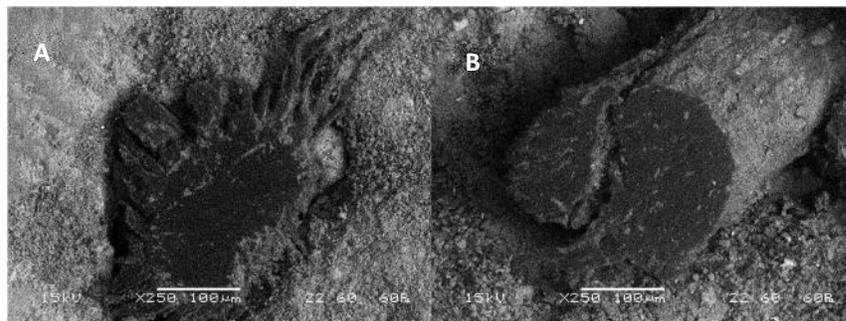


Figura 43. MEB (LV-BSE) de la sección pulida del compuesto reforzado con fibras de agave en una matriz base cemento expuestas a un deterioro acelerado. (a: x250; b: x250).

3.5.2. Compuestos con una adición del 15% de metacaolín reforzado con fibras de lechuguilla, expuestas a un deterioro acelerado de 8 ciclos de humedecimiento y secado.

Las imágenes A, B, C y D de la figura 44 presentan la sección de ruptura del compuesto reforzado con fibra de lechuguilla.

Se observa en la figura que el modo de falla fue por falta de adherencia de la fibra, es decir se presentó una extracción y deslizamiento de las fibras, ya que no se encontraron fibras rotas (figura 44-a).

Se observa que la fibra de agave presenta depositaciones de productos minerales en las paredes de la fibra en forma de pequeñas placas (depósitos blancos), pero estas no se presentan en profundidades de la fibra, esto puede deberse a que los productos de la matriz pueden adherirse a la fibra pero no llegaron a fragilizarla (figura 44-d).

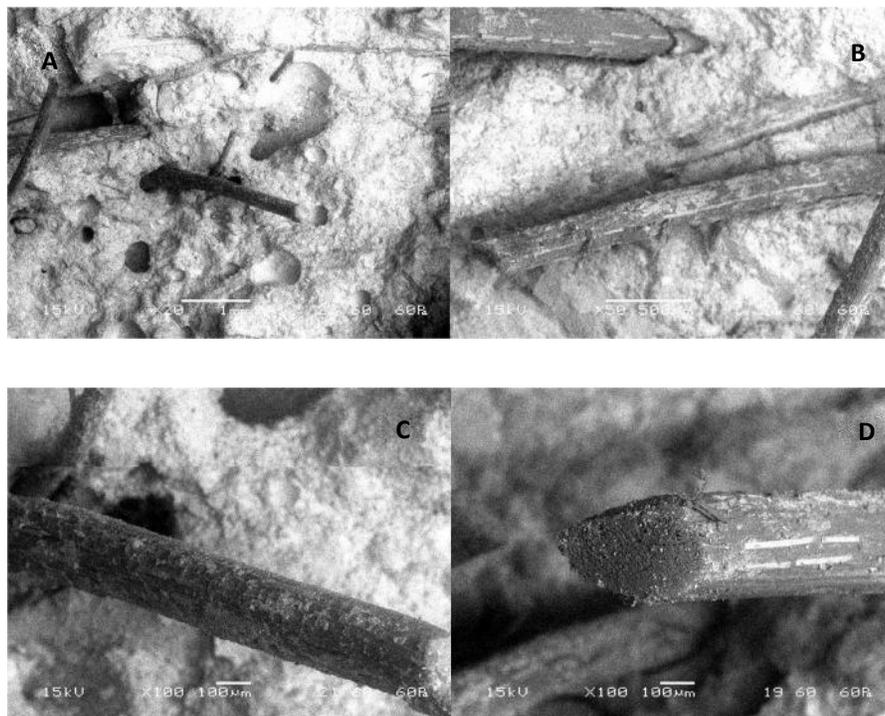


Figura 44. MEB (LV-BSE) de la sección de ruptura del compuesto reforzado con fibras de agave. (a: x 20; b: x 50; c: x 100; d: x 100).

Las imágenes A, B y de la figura 45 presentan la sección pulida del compuesto reforzado con fibra de lechuguilla.

Se observa una separación entre la fibra de la matriz (imagen A), esta presencia se debe a que la separación se crea durante el pulido de la muestra y no a la degradación de la fibra ya que solo se pueden observar residuos que son depositados superficialmente (imágenes B y C), además de que no se encontraron fibras con el mismo comportamiento.

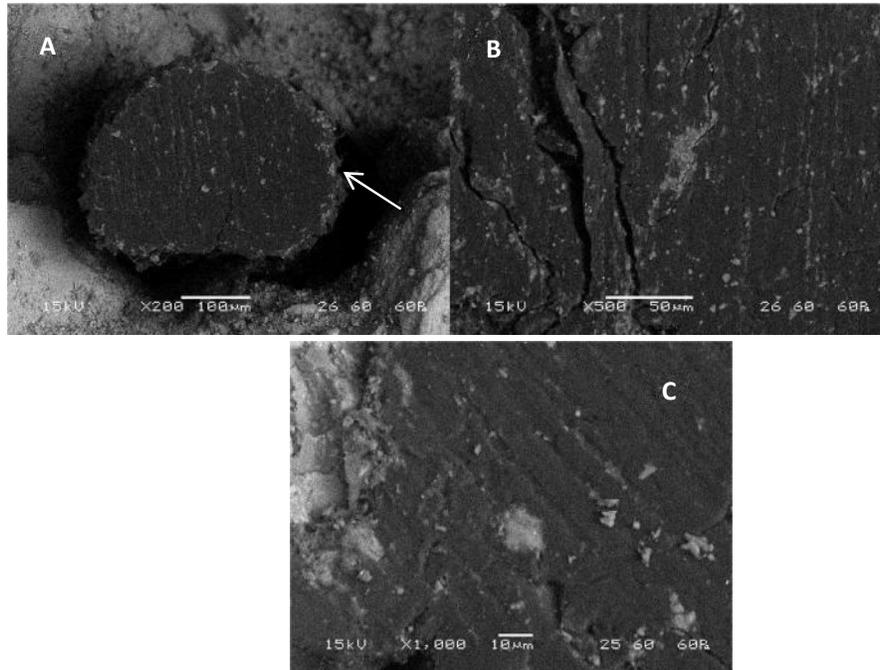


Figura 45. MEB (LV-BSE) de la sección pulida del compuesto reforzado con fibras de agave. (a: x 200; b: x 500; c: x 1000).

En la fibra de agave tanto en sección a la fractura como en sección pulida no se observó alguna mineralización de la fibra, así como tampoco su fragilización, se observaron algunos desprendimientos de la fibra en la sección de falla, donde la fibra fue arrancada por el ensayo, pero esto no significa que la fibra este fragilizada, ya que no se observa alguna mineralización de la fibra, esto puede deberse principalmente a que el periodo de exposición no fue suficiente como para un deterioro notable.

3.5.3. Compuestos base cemento reforzados con fibras de lino expuestas a un deterioro acelerado de 8 ciclos de humedecimiento y secado.

Las imágenes A, B, C y D de la figura 46 presentan la sección de ruptura del compuesto reforzado con fibra de lino.

Se observa que los haces de fibras iniciales fueron separados en fibras individuales, esto podría ocurrir cuando las fibras son incorporadas a la mezcla.

La imagen A muestra la apariencia de depósitos sobre la superficie de la fibra, este fenómeno no está presente en todas las fibras (imagen B). Se observan depósitos discontinuos (imagen C) como una especie de corteza alrededor de la fibra (imagen D), sin muestra de la profundidad de mineralización de las fibras. Algunas fibras pueden haber sido rotas (imagen D, donde las fibras muestran signos de rotura, donde su fin está dañado).

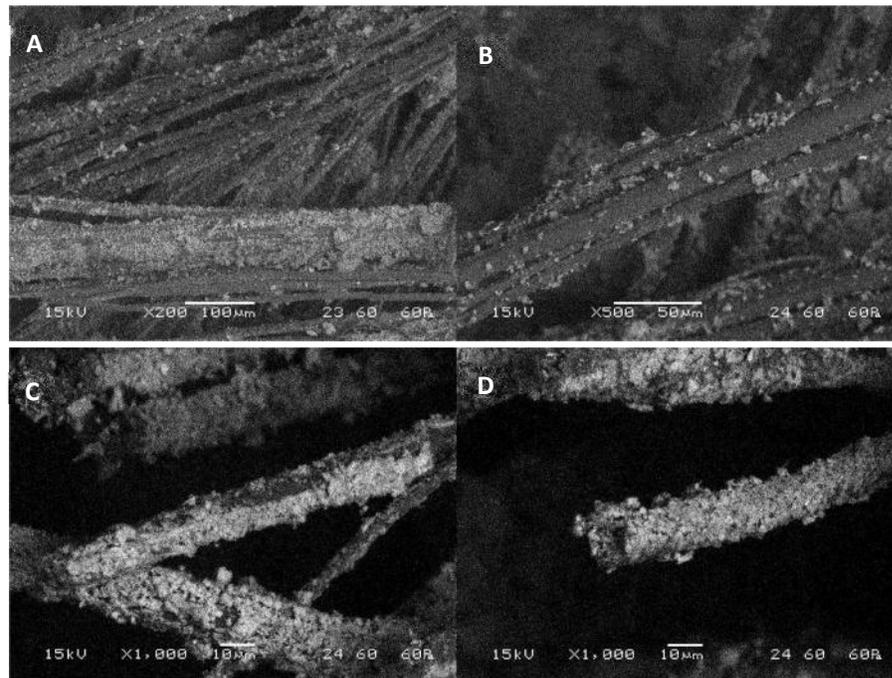


Figura 46. MEB (LV-BSE) de la sección de ruptura de compuesto reforzado con fibras de lino en una matriz base cemento expuestas a un deterioro acelerado. (a: x 200; b: x500; c: x 1000; d: x 1000).

En la figura 47 se presenta la sección pulida del compuesto reforzado con fibra de lino, la sección de las fibras se observa de color negro y de la pasta en gris. Estas imágenes confirman las observaciones realizadas en la sección de ruptura, la mayoría de los haces son destrutturados cuando se incorporan a la mezcla, también pueden deberse a la disolución de la lignina, la hemicelulosa y las pectinas, que son los principales componentes de la lámina media que une las fibras. Esta observación fue reportada por Gram [39], en su trabajo sobre la durabilidad de las fibras de sisal en una matriz cementante.

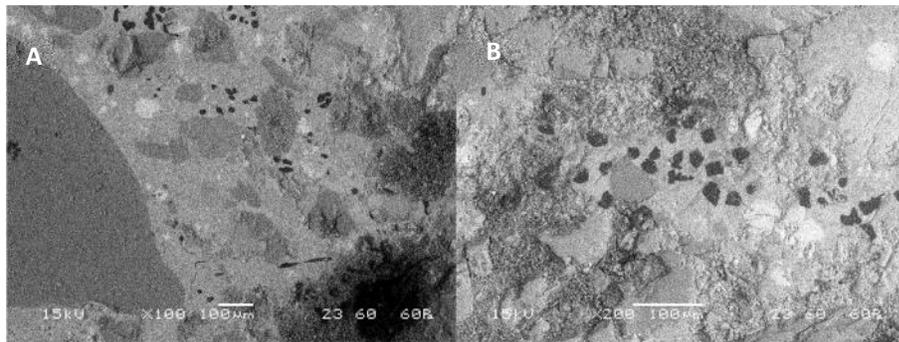


Figura 47. MEB (LV-BSE) de la sección pulida de compuesto reforzado con fibras de lino en una matriz base cemento expuestas a un deterioro acelerado. (a: x 100; b: x200).

En las imágenes C y D se aprecia como el haz de fibras de lino se encuentra incrustado en la matriz, existe una separación significativa entre las fibras y la matriz y entre fibras que se separan unas de otras. Esto se puede deber a las variaciones de volumen de las fibras o a las variaciones de humedad producidas por el deterioro.

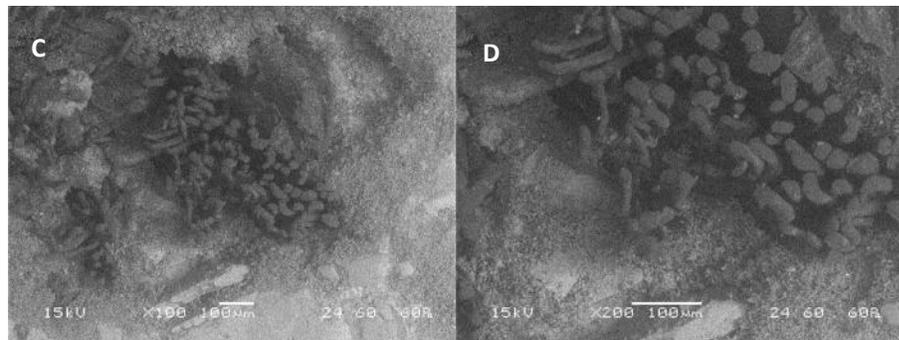


Figura 48. MEB (LV-BSE) de la sección pulida de compuesto reforzado con fibras de lino en una matriz base cemento expuestas a un deterioro acelerado. (c: x 100; d: x 200).

3.5.4. Compuestos con una adición del 15% de metacaolín reforzados con fibras de lino expuestas a un deterioro acelerado de 8 ciclos de humedecimiento y secado.

Las imágenes A, B, C y D de la figura 49 presentan la sección de ruptura del compuesto reforzado con fibra de lino.

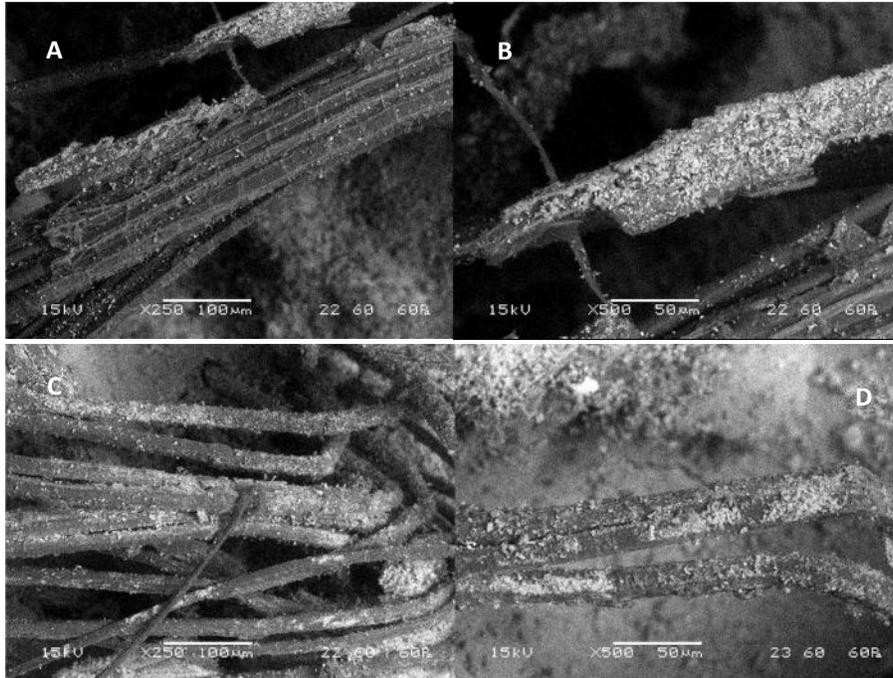


Figura 49. MEB (LV-BSE) de la sección de ruptura de compuesto reforzado con fibras de lino en una matriz con 15% de adición de metacaolín expuestas a un deterioro acelerado. (a: x 250; b: x500; c: x 250; d: x 500).

Se observa una disminución en los productos minerales presentes en la fibra, esto se debe principalmente a la sustitución de un 15% de metacaolín, lo que reduce la alcalinidad de la matriz, se siguen observando productos de mineralización discontinuos en la fibra y solo se presentan superficialmente.

En los compuestos reforzados con fibra de lino en la matriz de cemento se observan mayores productos de mineralización, no se observan cambios volumétricos que afecten el refuerzo de la matriz. Una de las observaciones que más afecta al refuerzo de la matriz

es que la fibra se encuentra solo en algunos planos y no totalmente distribuida, a este efecto se puede atribuir una baja resistencia a la flexión del compuesto.

Mediante la comparación de las observaciones realizadas en la interacción fibra/matriz reforzada con fibras de lino y agave, se observa que solo las fibras de lino se dispersan en fibras individuales en la matriz, las fibras de agave permanecen en su forma, estas dispersiones de la fibra aumentan la superficie de contacto y mejoran la adherencia de las fibras, pero también es probable que exista una mayor degradación de los componentes principales de la fibra.

CAPÍTULO 4

Conclusiones

CAPITULO 4.

4. CONCLUSIONES.

A continuación se presentan las principales conclusiones del trabajo de investigación realizado.

1. Las fibras naturales sin tratamiento presentaron una alta absorción de agua, sin embargo, el uso de tratamientos hidrofóbicos a base de ceras y emulsiones permitió una reducción significativa en dicha propiedad. Las ceras mulprox 2035 y mulprox 2047 disminuyeron la absorción de agua en ambos tipos de fibras hasta un 40% y 55% con respecto al control respectivamente. Del mismo modo, las emulsiones emulwax 3040 y la emulwax 3060 redujeron la absorción en un 70% y 30% con respecto al control respectivamente.
2. Las fibras tratadas con emulsiones que fueron expuestas a un mes en una solución alcalina de hidróxido de calcio con pH de 12.5 y una temperatura 70°C, presentaron un aumento en su ductilidad de hasta un 15% con respecto a las fibras sin tratamiento. Siendo la mulprox 2047 y la emulwax 3060 las emulsiones que resultaron tener un mejor comportamiento en cuanto a la ductilidad para ambos tipos de fibras.
3. La trabajabilidad de las mezclas se ve afectada de acuerdo al tipo de fibra y volumen que se utilice, a mayor contenido de fibras su trabajabilidad disminuye debido a un aumento en su área superficial. Las mezclas reforzadas con fibras de lino presentaron una menor trabajabilidad que las mezclas reforzadas con fibras de agave de lechuguilla, esto se debe a que los haces de las fibras de lino se separan durante el mezclado.
4. Los compuestos reforzados con fibra de lechuguilla tratada con emulsión y $V_f = 0.7\%$, 1.0% presentaron mayor resistencia a flexión en comparación con el concreto simple, cuando han sido expuesto a ciclos de humedecimiento y secado, y al ambiente natural. Del mismo modo, los compuestos reforzados con fibra de lino tratada con cera y $V_f = 0.7\%$ reportó mayor resistencia a flexión en

comparación con los compuestos reforzados con fibras sin tratar, cuando son expuestos a ciclos de humedecimiento y secado, así como al ambiente natural.

5. Los compuestos reforzados con fibras de lino tratados con emulsión resultaron ser más susceptibles a la pérdida de resistencia a la flexión que los tratados con cera, cuando son expuestos a variaciones de humedad.
6. La presencia de fibras en el compuesto mejoró sustancialmente la resistencia al impacto en comparación con los compuestos sin fibra. Para una $V_f = 1.0\%$ de fibra de lechuguilla tratada con cera, la resistencia al impacto aumentó 400%, en comparación con el control. Del mismo modo, para $V_f = 0.4\%$ y 0.7% de fibra de lino tratada con emulsión, la resistencia al impacto, se incrementó 136% y 200% con respecto al control respectivamente.
7. Los compuesto reforzados con fibras de lino con $V_f = 0.7\%$ permitió una reducción de 100% en la contracción autógena, en comparación de los compuestos sin fibra.
8. La porosidad de la matriz del compuesto se ve afectada en presencia de fibras, a mayor contenido de fibras mayor la porosidad. La porosidad en matrices con cemento se incrementó un 6%, 9% y 15% para $V_f = 0.4$, 0.7 y 1.0% respectivamente para la fibras de lechuguilla. La porosidad en matrices con metacaolín se incrementó un 0.1%, 7% y 9% para $V_f = 0.4$, 0.7 y 1.0% respectivamente para las fibras lechuguilla.
9. Los compuestos reforzados con fibras de lino presentaron mayor porosidad que los reforzados con fibra de agave, esto puede deberse a las propiedades físicas de cada tipo de fibras, donde las fibras de lino tienen una capacidad de absorción mayor que las fibras de agave, por lo que esto podría ocasionar una mayor porosidad en el compuesto.

CAPÍTULO 5

Recomendaciones

CAPITULO 5.

5. RECOMENDACIONES.

La investigación sobre la durabilidad del concreto reforzado con fibras naturales de lechuguilla y lino no concluye con esta tesis, al contrario, el presente proyecto proporciona para futuras investigaciones sobre el tema estudiado. Es necesario seguir investigando sobre la durabilidad de las fibras por lo que se recomienda lo siguiente:

1. Utilizar recubrimientos en las fibras con ceras de mayor dureza y evaluar la durabilidad de estas fibras sometidas al medio alcalino del concreto.
2. Utilizar matrices cementantes con mayores porcentajes de adiciones de ceniza volante y metacaolín, para evaluar el comportamiento de las fibras naturales en este tipo de matrices con menor alcalinidad, cuando son expuestos a cloruros y sulfatos.
3. Utilizar aditivos superfluidificantes que faciliten el mezclado y la distribución de las fibras dentro de la mezcla.
4. Evaluar la resistencia al impacto de concretos fibroreforzados con longitudes de fibra mayores a 45 mm.

REFERENCIAS

1. ACI Committe 544, "Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete", ACI Manual of Concrete Practice, Part 5, 1996, pp. 544.2R-1 – 544.2R-11.
2. R. Filho, K. Ghavami, G. England, K. Scrivener, "Cement & Concrete Composites" Vol. 25 2003, pp.185-196.
3. D. J. Cook, "Concrete and Cement Composites Reinforced with Natural Fibres" Concrete International, Concrete Society (U.K.) Construction Press. Ltd, 1980, pp 99-109.
4. F. Pacheco-Torgal, S. Jalali (2011) "Cementitious building materials reinforced with vegetable fibers: A review" Construction and Building Materials 25 (2011) 575–581.
5. C. Baley, "Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites", Techniques de l'Ingénieur, A.M. 5 130.
6. ACI Committee 544, "State-of-the-Art on Fiber Reinforced Concrete", ACI Manual of Concrete Practice, Part 5, 1998, pp. 544.1R-1 – 544.1R-66.
7. H. Savastano, P. Warden, "Cement & Concrete Composites" Vol. 22 (2000), p. 379-384.
8. V. Agopyan, "Vegetables Fibre Reinforced Building Materials - Developments in Brazil and other Latin American Countries", Concrete Technology and Design, Vol. 5: Natural Fibre Reinforced Cement and Concrete, London, Blackie and Son Ltd, 1988, pp. 208 – 242.
9. M. Brandt, "Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after 40 years of development in building and civil engineering", Composite structures, volume 86 (2008) 3-9.
10. M.A. Aziz, P. Paramasivam, S.L. Lee, "Concrete reinforced with natural fibres", Concrete technology and Desing Vol. 2, Surrey University Press, 1984, pp. 106-140.
11. M.A. Aziz, P. Paramasivam, S.L. Lee, " Prospects of natural fiber reinforced concretes in construction", Cement composites and lightweight concrete, vol.3, No.2, 1981, pp. 123-132.

12. ACI Committee 224, "Control of cracking in concrete structures", ACI Committee report, American concrete institute (2001) 1-8.
13. F.H. Wittmann, "Surface tension shrinkage of hardened cement paste", Materials and structure, RILEM, No.6 (1968) 547-552.
14. P. Aitcin, "High-Performance concrete", Modern concrete technology (1998).
15. ASTM C-1608, "Standard test method for chemical shrinkage of hydraulic cement paste", ASTM International 2000.
16. ACI Committee 116, "Cement and concrete terminology", Parte 1, American concrete institute (2000).
17. M. Sarigaphuti, SP. Shah, "Shrinkage craking cracking and durability characteristics of cellulose fiber reinforced concrete ACI Mater J (1993) 309-18.
18. S. Kawashima, SP. Shah, "Early-age autogenous and drying shrinkage behavior of cellulose fiber-reinforced Cementitious materials", Cement & Concrete Composites 33 (2011) 201-208.
19. P. Soroushian, S. Ravanbakhsh, "Control of plastic shrinkage cracking with specialty cellulose fibres. ACI Mater J 1998; 95:429-35.
20. FJ. Grimer, MA Ali "The strength of concrete reinforced with glass fibres". Mag Concr Res 1969;21:23-30.
21. T. Filho, K. Ghavami, "Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetables fibres.
22. M. Brandt, "Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after 40 years of development in building and civil engineering", Composite structures, volume 86 (2008) 3-9.
23. C. Juárez, A. Duran, P. Valdez, G. Fajardo, "Performance of Agave de lechuguilla natural fiber in portland cement composites exposed to severe environment conditions", Building and environment, octubre 2005.
24. R.D. Toledo, K. Scrivener, G.L. England, K. Ghavami, "Durability of alkali-sensitive sisal and coconout fibres in cement mortar composites", Cement and concrete composites, volume 25 (2003) 185-196.

25. H. Savastano, V. Agopyan, A.M. Nolasco, L. Pimentel, "Plant fibre reinforced cement components for roofing", *Construction and building materials*, volume 13 (1999) 433-438.
26. A. Bentur, S.A.S. Akers, "The microstructure and ageing of cellulose fibres reinforced cement composites cured in a normal environment", *The international journal of cement composites and lightweight concrete*, volume 11-2 (1989).
27. K. Ghavami, G.L. England, K. Scrivener, "Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability", *Cement and concrete composites*, volume 25 (2003) 185-196.
28. K. Ghavami, "Ultimate load behavior of bamboo-reinforced lightweight concrete beams", *Cement and concrete composites*, 1995;21: 49-57.
29. L. Pimentel, A. Beraldo, H. Savastano, "Durability of cellulose-cement composites modified by polymer", *Enng Agr* 2006; 26:344-53.
30. H. Savastano, P. Warden, R. Coutts, "Ground iron blast furnace slag as a matrix for cellulose-cement materials", *Cement and concrete composites*, 2001;23: 389-97.
31. D.F. Swift, R. Smith, "The flexural strength of cement-based composites using low modulus (sisal) fibers", *Composites*, p. 145-148, 1979.
32. F.A. Silva, K. Ghavami, J.R. d'Almeida, "Toughness of cementitious composites reinforced by randomly sisal pulps", in eleventh international conference on composites engineering – ICCE-11, 2004, Hilton Head Island, 2004.
33. F.A. Silva, J. Melo Filho, R. Toledo, E.M. Faibairn, "Mechanical behavior and durability of compression moulded sisal fiber cement mortar laminates (SFCML)", *International RILEM Conference on textile reinforced concrete (ICTRC)*, 2006 171-180.
34. R.D. Toledo-Filho, B.B. Americano, E.M. Fairbairn, J.S. Rolim, J.F. Filho, "Potential of crushed waste calcined-clay brick as a partial replacement for Portland cement", *International symposium on sustainable development*, San Francisco, 2001 147-157.

35. M.R. Maiti, "Fibras Vegetales en el Mundo, Aspectos Botánicos, Calidad y Utilidad", Editorial Trillas, Méx., D.F., Primera Edición, (1995), pp. 105-123.
36. R. Filho, K. Ghavami, G. England, K. Scrivener, "Cement & Concrete Composites" Vol. 25 2003, pp.185-196.
37. R. Zollo, "Fiber- reinforced concrete: an overview after 30 years of development", Cement and Concrete Composites 19, 1997 pp. 102-122.
38. ACI Committee 544.5R-10, 2010, "Report on the Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete," Reported by ACI Committee 544, American Concrete Institute, pp. 2-31.
39. H. Gram, 1988, "Durability of Natural Fibres in Concrete," Natural Fibre-Reinforced Cement and Concrete, R. Swamy, ed., pp. 143-172.
40. J. Mohr, J. Biernacki, E. Kurtis (2006), "Microstructural and Chemical Effects of Wet/Dry Cycling on Pulp Fiber-Cement Composites," Cement and Concrete Research, V. 36, pp. 1240-1251.
41. F. Silva, J. Melo-Filho, R. Toledo-Filho, E. Fairbairn, (2006a), "Mechanical Behavior and Durability of Compression Moulded Sisal Fiber-Cement Mortar Laminates (SFCML)," Proceedings of the 1st International RILEM Symposium on Textile Reinforced Concrete, pp. 171-180.
42. F. Pacheco-Torgal, S. Jalali (2011) "Cementitious building materials reinforced with vegetable fibers: A review" Construction and Building Materials 25 (2011) 575–581.
43. V. F. Fisher, O. Wihaus, M. Ryssel, J. Oldrecht, "The water soluble carbohydrates of wood and their influence on the production of lightweight wood-wools boards", Holztechnologie, Volume 15 (1974) 1303-1309
44. D. Sedan, C. Pagnoux, A. Smith, T. Chotard, "Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction" Journal of the European Ceramic Society 28 (2008), pp. 183-192.
45. M

46. F. Pacheco, S. Jalali, "Vegetable fibre reinforced concrete composites: a review", University of Minho, Portugal (2005).
47. M.A. Mansur, P. Paramasivam, S.L. Lee, "New Reinforced Concretes, Concrete reinforced with natural Fibres", Surrey University Press, (1984).
48. M.A Mansur, M.A. Aziz "A Study of jute fibre reinforced cement composites" International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Volume 4-2 (1982) 75-82.
49. G. Ramakrishna, T. Sundararajan, "Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar", Cement and Concrete Composites, Volume 27 (2005), pp. 575-582.
50. F. Pacheco, S. Jalali, "Vegetable fibre reinforced concrete composites", University of Minho, Portugal (2005).
51. K. Ghavami, "Cement & Concrete composites", Vol.27 (2005), p.637-649.
52. H. Lima, F. Willrich, N. Barbosa, M. Rosa, B. Cunha, "Materials and Structures", Vol. 41 (2008), p.981-989.
53. A. Kriker, A. Bali, G. Debicki, M. Bouziane, M. Chabannet, "Cement & Concrete composites, Vol. 30 (2008), p.639-648.
54. R. Toledo-Filho, K. Ghavami, G. England, K. Scrivener, (2003), "Development of Vegetable Fiber Mortar Composites of Improved Durability," Cement and Concrete Composites, Vol. 25 (2003), pp. 185-196.
55. G. Lewis, P. Miri hagalia, "Natural Vegetable Fibers as Reinforcement in Cement Sheets", Magazine of Concrete Research, Vol. 31, N°107, (1979), pp.104-108.
56. P.C. Aitcin, "Binders for durable and sustainable concrete", Modern concrete technology 16, Taylor & Francis, 2008.
57. NMX-C-414, "Industria de la construcción – cementos hidráulicos – especificaciones y métodos de prueba", Organismo nacional de normalización y certificación de la construcción y edificación (2004).
58. ASTM C-125, "Standard terminology realting to concrete and concrete aggregates, ASTM International, 2004.

59. ASTM C-618, "Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete", ASTM International, 2004.
60. PCA, "Diseño y control de mezclas", PCA, 2004.
61. R. Siddique, J. Klaus, "Influence of metakaolín on the properties of mortar and concrete: A review". Applied Clay Science 43 (2009) 342-400.
62. J.P. Gleize, M. Cyr, G. Escadeillas, "Effects of metakaolín on autogenous shrinkage of cement pastes". Cement & Concrete Composites 29 (2007) 80-87.
63. www.argeco.fr.
64. F. Saidat, "Activation chimique du métakaolin dans une matrice cimentaire", Thèse Doctorat de L'Univesité de Toulouse, (2013).
65. Estudio comparativo "Impact environnemental Ciment-Argicem " Rapport interne confidentiel de la société Argeco.
66. C. Magniont, "Contribution á la formulation et á la caractérisation d'un écomatériau de construction á base d'agroressources", Thèse Doctorat de L'Univesité de Toulouse, (2010).
67. C. Juárez, A. Durán, P. Valdez, G. Fajardo, "Performance of Agave de lecheguilla natural fiber in Portland cement Composites exposed to severe environment conditions". Buikling and Environment (2007) 1151-1157.
68. C. Berlanga, M. García, L. González, "Técnicas para el establecimiento y manejo de una plantación de lechuguilla". Folleto Divulgativo Núm. 1. Instituto Nacional de Investigación Forestal, SARH, Saltillo, México, (1997) 7 pp.
69. F. Flores, G. Perales "Primer reporte nacional de las plagas asociadas a la lechuguilla (Agave Lecheguilla Torr.). (1989) Agraria 5. 57-73.
70. P. Nieto, "La lechuguilla". INIREB Informa. Instituto Nacional de Investigación sobre Recursos Bióticos, Xalapa, Ver., México (1983). Núm. 63, 3pp.
71. M.R. Maiti, "Fibras Vegetales en el Mundo, Aspectos Botánicos, Calidad y Utilidad", Editorial Trillas, Méx., D.F., Primera Edición, (1995), pp. 105-123.
72. W.E. Morton, J.W.S. Hearle, "Physical Properties of Textile Fibres". The Textile Institute, Manchester (1993).

73. ASTM C-33, "Standard specification for concrete aggregates", ASTM International, 2004.
74. ASTM C-78-94, "Standard test method for flexural strength of concrete, ASTM International 2000.
75. ASTM C-192-98, "Practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory", ASTM International 1999.
76. ASTM C-305, "Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency", ASTM International 2000.
77. ASTM C-995-01, "Standard test method for time of flow of fiber-reinforced concrete through inverted slump cone", ASTM International 2000.
78. NF P 18-452, "Mesure du temps d'écoulement des bétons et des mortiers aux maniabilimètre", AFNOR sagaweb, 1995.
79. NF P 15-437, "Llants hydrauliques – Technique des essais – Caractérisation des ciments par mesure de la fluidité sous vibration des mortiers.
80. ASTM D-1557, "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort", ASTM International, 2000.
81. ASTM C-31, "Standard practice for making and curing concrete test specimens in the field", ASTM International, 2000.
82. ASTM C 470, "Standard specification for molds for forming concrete test cylinders vertically", ASTM International, 2000.
83. NF P 15-433, "Méthodes d'essais des ciments – Détermination du retrait et du gonflement".
84. NF P 18-459, "Béton – Essai pour béton durci – Essai de porosité et de masse volumique".
85. NF-EN 196-1, "Méthodes d'essais des ciments – Partie 1: détermination des résistances mécaniques".

86. C. Juárez, "Concretos base cement Portland reforzados con fibras naturales (agave de lechuguilla), como materiales para construcción en México", Tesis de investigación para grado de doctorado de la Universidad Autónoma de Nuevo León (2002).
87. S. Monroy, "Control del Agrietamiento por contracción plástica en materiales cementantes fibroreforzados", Tesis de investigación para grado de maestría de la Universidad Autónoma de Nuevo León.
88. C. Magniont, "Contribution á la formulation et á la caracterisation d'un écomatériau de construction á base d'agroressources", Tesis de investigación para grado de doctorado, Universidad de Toulouse, Francia (2010).
89. E.I. Tazawa, S. Miyazawa, "Influence of cement and mixture on autogenous shrinkage of cement paste", Cement and concrete research, volume 25-2 (1995) 281-287.
90. K. Metha, P. Monteiro, "Concreto estructura, propiedades y materiales", Instituto mexicano del cement y del concreto, A.C., México, 1998, pp.286.