

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