

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA**



**CONCRETOS BASE CEMENTO PORTLAND  
REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES  
(AGAVE LECHEGUILLA), COMO MATERIALES  
PARA CONSTRUCCION EN MEXICO**

**POR**

**MC CESAR ANTONIO JUAREZ ALVARADO**

**En opción al Grado de DOCTOR EN INGENIERIA  
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

**JUNIO, 2002**



2002  
J8  
2002  
FIME  
2002  
F.M2  
25853  
FD

CONCURSIONES BASE CEMENTO PORTLAND  
REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES  
(AGAVE LECHUGUILLA), COMO MATERIALES  
PARA CONSTRUCCION EN MEXICO



1020150648

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
Y ELECTRICA



CONCRETOS BASE CEMENTO PORTLAND  
REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES  
(AGAVE LECHEGUILLA), COMO MATERIALES  
PARA CONSTRUCCION EN MEXICO

POR

MC CESAR ANTONIO JUAREZ ALVARADO

En opción al Grado de DOCTOR EN INGENIERIA  
CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES

JUNIO, 2002

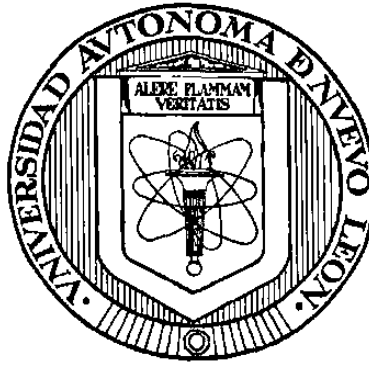
989422

TD  
25853  
172  
FIME  
2002  
.48



FONDO  
TESIS

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**CONCRETOS BASE CEMENTO PORTLAND REFORZADOS CON  
FIBRAS NATURALES (AGAVE LECHEGUILLA), COMO  
MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN EN MÉXICO**

**Por**

**MC CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO**

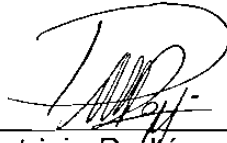
**En opción al Grado de DOCTOR EN INGENIERÍA  
con Especialidad en Materiales**

**Junio, 2 0 0 2**

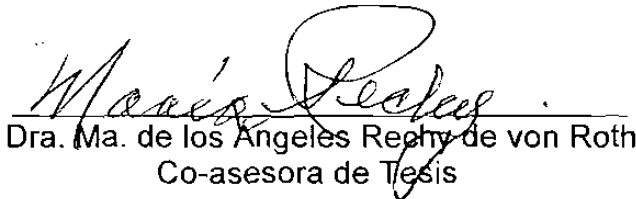
**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “CONCRETOS BASE CEMENTO PORTLAND REFORZADOS CON FIBRAS NATURALES (AGAVE LECHEGUILLA), COMO MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN EN MÉXICO” realizada por el MC CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO, sea aceptada para su defensa como opción al grado de DOCTOR EN INGENIERÍA DE MATERIALES.

El Comité de Tesis



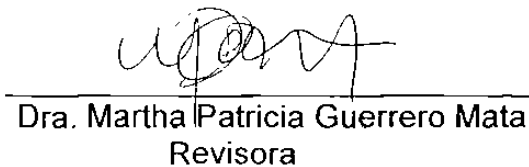
Dra. Patricia Rodríguez López  
Asesora de Tesis



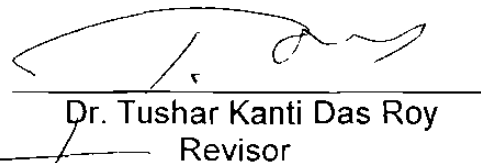
Dra. Ma. de los Angeles Rechy de von Roth  
Co-asesora de Tesis



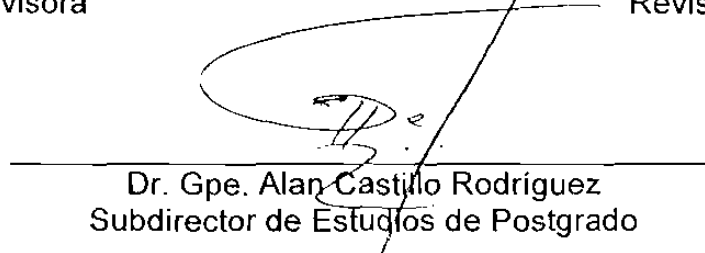
Dr. Raymundo Rivera Villarreal  
Co-asesor de Tesis



Dra. Martha Patricia Guerrero Mata  
Revisora



Dr. Tushar Kanti Das Roy  
Revisor



Dr. Gpe. Alan Castillo Rodríguez  
Subdirector de Estudios de Postgrado

Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N. L., mayo del 2002

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar un sincero agradecimiento a las siguientes personas quienes fueron fundamentales para el desarrollo de mi formación:

A la Dra. Patricia Rodríguez López, quien me dirigió atinadamente en mi trabajo doctoral y me apoyó en forma decidida durante todo el desarrollo de esta investigación.

A los Drs. Ma. De los Ángeles y Walter von Roth, por confiar en mí y darme la gran oportunidad de conocer otra cultura que permitió enriquecer mi formación.

Al Dr. Raymundo Rivera Villarreal, que con sus sabios consejos y críticas me orientó hacia lo importante en el desarrollo de la investigación.

A los Drs. Martha Patricia Guerrero Mata y Tushar Kanti Das Roy, por formar parte del Comité de Tesis y por sus valiosas sugerencias e interés, en la revisión del presente trabajo.

Así también, quiero agradecer la valiosa colaboración por parte de:

Los Drs. y personal técnico de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Neubrandenburg, Alemania. Quienes me ayudaron desinteresadamente para llevar a cabo mi trabajo de investigación.

El personal profesional y técnico del laboratorio del Doctorado en Materiales y del Instituto de Ingeniería Civil, UANL. Por su invaluable ayuda.

Quiero reconocer la valiosa función en la formación de mejores ciudadanos para nuestro país por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT, y agradecer por todo el apoyo brindado para la realización de mis estudios de doctorado.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, por mantener siempre sus puertas abiertas y apoyar decididamente la formación académica.

A los grandes maestros que he tenido durante toda mi carrera académica, simplemente muchas gracias.

A todos mis amigos, muchas gracias por siempre.



## DEDICATORIAS

*Para mi adorada familia Gladys y César, quiero decirles que este logro es el resultado del amor y la paciencia que siempre me han brindado, los amo.*

*Para mi querida Madre Francisca, quisiera que estos pensamientos llegaran a ti para decirte que tu ejemplo me ha guiado a través de la vida, siempre te recordaré mamá.*

*Para toda mi familia de Lerdo y Monterrey, quiero agradecerles todo el apoyo que nos han dado y dedicarles este esfuerzo ya que ustedes son una parte muy importante de nuestras vidas. Gracias.*

*“La Ciencia no es mas que una de las miles de formas de amar a Dios”*

*César Juárez*

## PRÓLOGO

Se me dio el honor de pedirme que escribiera este prólogo, lo cual agradezco profundamente a la Dra. Patricia Rodríguez López y al MC César Antonio Juárez Alvarado quien es el autor de este trabajo de Doctorado.

La idea de cómo nació el interés de estas investigaciones, fue en mi ausencia fuera de México durante una estancia en el extranjero de 18 años. Llegar al noreste de México y ver la zona tan grande del semidesierto 29.3% del territorio mexicano (INEGI 1997), tan hermosa y con una cantidad impresionante de especies típicas; Pero a su vez, y en la misma magnitud tan pobre, tan deshabitada solo niños y ancianos. Con una calidad de vida de sus habitantes tan baja, por la falta de dinero para cubrir las más mínimas necesidades. Además, si se toma en cuenta que el clima es extremo, en el invierno la temperatura es cercana a 0°C mientras que en el verano registra hasta 46 a 48°C. Sus casas habitación generalmente hablando son chozas de cartón, tablas, algo de adobe, ladrillos mal cocidos, mala calidad en el cemento y están cubiertas por un techo también de cartón o de lámina. Esto hace que sufran las inclemencias del tiempo causando muchas veces la muerte principalmente de ancianos y niños, menguando aún más la población que permanece en estas zonas, ya que la gente joven emigra a las grandes ciudades más cercanas tratando de encontrar empleo que en muchas ocasiones no logra, empezando con el desempleo y acabando con el alcoholismo, la drogadicción y la criminalidad.

¿Cuál podría ser la solución?. La respuesta es este trabajo que abre nuevos horizontes a estas poblaciones marginadas, aprovechando lo que tienen a su alrededor, con instrucciones adecuadas para conservar las especies, con métodos experimentados por especialistas, aprendiendo a valorar y a utilizar lo que poseen y a la vez obteniendo una mejor calidad de vida para los actuales habitantes y las futuras generaciones.

Dra. Ma. de los Ángeles Rechy de von Roth

## CONTENIDO

Prólogo	v
Contenido	vi
Índice de tablas	ix
Índice de figuras	x
Nomenclatura	xiii
Resumen	xiv

Capítulo	Página
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes.....	2
1.1.1. Clasificación de las fibras .....	3
1.1.2. Fibras naturales vegetales.....	3
1.1.3. Origen de las fibras naturales.....	4
1.1.3.1. Provenientes del tallo .....	4
1.1.3.2. Provenientes de la hoja.....	6
1.1.3.3. Provenientes de la cáscara.....	8
1.1.3.4. Celulosa proveniente de la madera.....	8
1.1.4. Propiedades mecánicas de las fibras naturales.....	9
1.1.5. Concreto base cemento portland reforzado con fibras .....	10
1.2. Análisis de los fundamentos.....	13
1.2.1. Reseña de estudios anteriores.....	13
1.2.1.1. Cemento - sisal .....	13
1.2.1.2. Cemento - maguey .....	14
1.2.1.3. Cemento - coco.....	15
1.2.1.4. Cemento - bambú.....	16
1.2.1.5. Cemento – celulosa de madera .....	17
1.2.1.6. Otros tipos de fibras como refuerzo.....	18
1.2.2. Durabilidad del concreto reforzado con fibras .....	19
1.2.3. Aplicaciones en la construcción.....	22
1.2.4. Situación actual y perspectivas de desarrollo .....	25
1.3. Explotación de las fibras naturales en México .....	26
1.4. Definición del problema.....	30
1.5. Necesidad de solución .....	30
1.6. Objetivos de la investigación.....	34
1.7. Hipótesis de trabajo.....	34



<b>2. PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>36</b>
2.1. Caracterización de las fibras de lechuguilla .....	37
2.1.1. Composición química.....	38
2.1.2. Estructura microscópica.....	39
2.1.3. Contenido de humedad .....	39
2.1.4. Propiedades físicas y mecánicas .....	40
2.2. Durabilidad de la fibra .....	43
2.2.1. Agentes protectores.....	43
2.2.2. Tensión superficial y capilaridad.....	44
2.2.3. Absorción de agua en fibras tratadas .....	44
2.2.4. Resistencia al medio alcalino .....	45
2.2.5. Cambios en la humedad y temperatura del medio .....	46
2.2.6. Efecto de sustancias químicas alcalinas y ácidas .....	46
2.3. Ensayes mecánicos en especímenes de concreto con fibras.....	47
2.3.1. Proporcionamientos de las mezclas .....	48
2.3.2. Efecto de los agentes protectores.....	49
2.3.2.1. Mezclado, colado y curado .....	49
2.3.2.2. Fabricación de especímenes.....	49
2.3.3. Efecto del volumen y la longitud de la fibra.....	51
2.3.3.1. Mezclado, colado y curado .....	52
2.3.3.2. Fabricación de especímenes.....	52
2.3.4. Efecto de tratamientos químicos y mecánicos en la fibra.....	53
2.3.4.1. Proporcionamiento de la mezcla .....	53
2.3.4.2. Mezclado, colado y curado .....	54
2.3.4.3. Fabricación de especímenes.....	54
2.3.5. Influencia de la humedad del espécimen en el ensaye .....	56
2.4. Pruebas aceleradas de durabilidad del concreto con fibras.....	56
2.4.1. Proporcionamiento para mezclas densas e impermeables .....	57
2.4.2. Mezclado, colado y curado .....	58
2.4.3. Fabricación de especímenes.....	59
2.4.4. Pruebas de durabilidad en los especímenes .....	59
2.5. Interacción entre la fibra y la matriz de cemento .....	60
2.5.1. Microestructura de la fibra expuesta al medio alcalino.....	60
2.5.2. Morfología de la interfase fibra – matriz de cemento .....	60
2.6. Elementos constructivos.....	61
2.6.1. Materiales potenciales para la construcción.....	61
<b>3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....</b>	<b>62</b>
3.1. Caracterización de las fibras de lechuguilla .....	63
3.1.1. Composición química.....	63
3.1.2. Estructura microscópica.....	64
3.1.3. Contenido de humedad .....	65
3.1.4. Propiedades físicas y mecánicas .....	66
3.1.4.1. Diámetro y longitud .....	66

3.1.4.2.	Porcentaje de absorción de agua.....	67
3.1.4.3.	Porosidad y densidad absoluta.....	68
3.1.4.4.	Esfuerzo último a la tensión .....	70
3.1.4.5.	Porcentaje de elongación a la ruptura .....	73
3.1.4.6.	Resumen de propiedades físicas.....	74
3.2.	Durabilidad de la fibra .....	74
3.2.1.	Tensión superficial y capilaridad.....	74
3.2.2.	Absorción de agua en fibras tratadas .....	76
3.2.3.	Resistencia al medio alcalino .....	77
3.2.4.	Cambios en la humedad y temperatura del medio .....	80
3.2.5.	Efecto de sustancias químicas alcalinas y ácidas .....	81
3.3.	Ensayes mecánicos en especímenes de concreto con fibras.....	84
3.3.1.	Efecto de los agentes protectores.....	84
3.3.1.1.	Comportamiento a tensión .....	85
3.3.1.2.	Comportamiento a flexión.....	87
3.3.2.	Efecto del volumen y la longitud de la fibra.....	92
3.3.2.1.	Comportamiento a tensión .....	92
3.3.2.2.	Comportamiento a flexión.....	94
3.3.3.	Efecto de tratamientos químicos y mecánicos en la fibra.....	96
3.3.3.1.	Comportamiento a flexión y compresión.....	96
3.3.4.	Influencia de la humedad del espécimen en el ensaye .....	99
3.4.	Pruebas aceleradas de durabilidad del concreto con fibras.....	101
3.4.1.	Resistencia a las variaciones de humedad y temperatura .....	102
3.4.2.	Resistencia al ambiente húmedo .....	104
3.4.3.	Resistencia a los cloruros y sulfatos .....	104
3.5.	Interacción entre la fibra y la matriz de cemento .....	109
3.5.1.	Microestructura de la fibra expuesta al medio alcalino .....	109
3.5.2.	Morfología de la interfase fibra – matriz de cemento .....	111
3.6.	Elementos constructivos.....	117
3.6.1.	Bóvedas como aligerante para losas .....	117
3.6.2.	Placas acanaladas.....	119
3.6.3.	Placas planas como cimbra perdida para puentes y edificios.....	120
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>123</b>
<b>5.</b>	<b>SUGERENCIAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>126</b>
	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>128</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>141</b>
	ANEXO A.- Procedimiento de extracción de la fibra de lechuguilla .....	142
	ANEXO B.- Tabulación de los datos de ensayos mecánicos.....	148

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>Página</b>
1.	Propiedades mecánicas típicas de las fibras naturales .....	9
2.	Factores que afectan las propiedades de los concretos reforzados con fibra natural.....	11
3.	Resumen de trabajos de investigación referentes a las propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto con fibras naturales .....	24
4.	Comparativa nacional de zonas con y sin apoyo oficial .....	32
5.	Granulometría para las mezclas .....	48
6.	Proporcionamientos del CRF en $\text{kg/m}^3$ .....	48
7.	Granulometría para mezclas en Alemania.....	53
8.	Proporcionamientos del CRF para durabilidad en $\text{kg/m}^3$ .....	58
9.	Porcentaje del contenido de humedad en la fibra.....	66
10.	Porcentaje de absorción de agua en las fibras.....	68
11.	Resumen de prueba de porosidad en las fibras .....	69
12.	Densidad absoluta de la fibra .....	69
13.	Propiedades físico mecánicas de la fibra de lechuguilla.....	74



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Clasificación de las fibras según su origen .....	3
2. Yute, bambú, lino y caña de azúcar .....	6
3. Sisal, henequén, yucca y pasto de elefante .....	7
4. Palmera o árbol de coco .....	9
5. Tipos de vegetación en México (INEGI, 1998) .....	28
6. Planta de lechuguilla .....	29
7. Zonas áridas y semiáridas del país según la CONAZA .....	33
8. Microscopio electrónico de barrido .....	39
9. Dispositivo de ensaye a tensión y porosímetro de intrusión de mercurio .....	41
10. Estereoscopio equipado con cámara fotográfica .....	47
11. Ensaye a flexión, ensaye a tensión por compresión diametral .....	51
12. Programa de ensayos variando el volumen y la longitud de la fibra.....	52
13. Ensaye a flexión, ensaye a compresión .....	55
14. Representación esquemática de la celulosa .....	63
15. Micrografías de la sección transversal y lateral de una fibra de lechuguilla.....	65
16. Variación de diámetros máximo y mínimo en fibras .....	67
17. Curvas típicas de carga vs elongación de acuerdo con el diámetro .....	70
18. Variación de la carga última con respecto al diámetro .....	71
19. Variación del esfuerzo último con respecto al diámetro .....	72
20. Relación entre la resistencia a tensión y el diámetro en fibras de bambú y maguey .....	72
21. Histograma del esfuerzo último a tensión .....	73
22. Variación de la tensión superficial con respecto a la temperatura de los agentes protectores.....	75
23. Variación de la capilaridad con respecto a la temperatura de los agentes protectores.....	75
24. Porcentaje de absorción en fibras tratadas .....	76
25. Variación del esfuerzo último a tensión respecto al tiempo de exposición en la solución alcalina .....	78
26. Variación de la elongación a la ruptura, respecto al tiempo de exposición en la solución alcalina .....	79
27. Variación del esfuerzo y la elongación a la ruptura, respecto	

a ciclos de humedecimiento y secado .....	80
28. Fibras control expuestas a agua destilada.....	81
29. Fibras expuestas a $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y expuestas a $\text{NaOH}$ .....	82
30. Fibras expuestas a $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ y expuestas a $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .....	83
31. Especímenes para ensaye a flexión y a tensión por compresión diametral .....	85
32. Efecto en la resistencia a tensión debido al tratamiento en las fibras.....	86
33. Falla frágil de un espécimen sin fibras, falla dúctil de un especímen con fibras, a tensión .....	87
34. Efecto en el comportamiento a flexión debido a los tratamientos en la fibra para especímenes de la serie 3.....	88
35. Efecto en el comportamiento a a flexión debido a los tratamientos en la fibra para especímenes de la serie 8.....	89
36. Efecto en la resistencia a flexión de especímenes con fibras tratadas, debido a ciclos de humedecimiento y secado .....	90
37. Falla frágil de un espécimen sin fibras, falla dúctil debido a las fibras de refuerzo a flexión.....	91
38. Efecto del volumen y la longitud de la fibra en la resistencia a tensión.....	93
39. Efecto del volumen y la longitud de la fibra en la resistencia a flexión .....	94
40. Efecto de los tratamientos químicos en la resistencia a flexión y compresión.....	97
41. Efecto del volumen y la longitud de la fibra en la resistencia a flexión y compresión de especímenes con fibras tratadas con $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .....	98
42. Influencia de las condiciones de humedad durante el ensaye en la resistencia a tensión.....	100
43. Efecto de las variaciones de humedad y temperatura en la resistencia a la flexión.....	103
44. Efecto de la humedad constante en la resistencia a la flexión.....	105
45. Efecto del ataque químico por cloruros y sulfatos en la resistencia a flexión .....	106
46. Micrografía de la sección transversal de una fibra expuesta durante 12 meses al medio alcalino .....	110
47. Micrografías a detalle de la sección transversal de fibra mineralizada .....	111
48. Fibrillas superficiales producidas por fricción externa en la fibra .....	112
49. Micrografía de una fibra sin tratamiento fisico-mecánico .....	112
50. Interfase fibra-matriz en concretos con estearato de sodio .....	113
51. Interfase fibra-matriz en concretos con ceniza volante .....	113
52. Interfase fibra-matriz en concretos con fibra tratada y sin tratamiento, sometidos a ciclos de humedecimiento y secado .....	114
53. Interfase fibra-matriz en concretos con fibra tratada	

química y mecánicamente .....	115
54. Sistema vigaeta y bovedilla, mostrando bóveda de concreto con fibras .....	118
55. Placa acanalada de concreto reforzado con fibras de lechuguilla .....	120
56. Placas planas de concreto con fibras.....	121
57. Vista general de los elementos constructivos fabricados en la presente investigación.....	122



## NOMENCLATURA

A	Aguarrás.
A/C	Relación agua/cemento.
ACI	Instituto americano del concreto.
AL	Aceite de linaza.
ASTM	Sociedad americana de pruebas y materiales.
C	Creosota.
$C_{18}H_{35}NaO_2$	Estearato de sodio.
CRF	Concreto reforzado con fibras.
NaOH	Hidróxido de sodio.
$Na_2SO_4$	Sulfato de sodio.
$Na_2SiO_3$	Silicato de sodio.
P	Parafina.
pH	Índice para la escala de acidez y alcalinidad.
PS	Peso de fibra seca.
PSSS	Peso de fibra saturada superficialmente seca.
PST	Peso de fibra tratada seca.
PSSST	Peso de fibra tratada saturada superficialmente seca.
R	Brea o colofonia.
SF	Especímenes de concreto sin fibra.
SM	Sellador de madera.
ST	Especímenes de concreto con fibras no tratadas.
$W_1$	Peso de picnómetro.
$W_2$	Peso de picnómetro más agua.
$W_3$	Peso de picnómetro más fibra saturada superficialmente seca.
$W_4$	Peso de picnómetro más fibra saturada superficialmente seca y agua

## RESUMEN

La ingeniería civil y los materiales de construcción se han desarrollado considerablemente a partir de la segunda mitad del siglo XX. En la actualidad es común escuchar de concretos sustentables y de materiales compuestos avanzados. Sin embargo, los países pobres y en vías de desarrollo hacen grandes esfuerzos para desarrollar tecnologías que les permitan aprovechar sus vastos recursos naturales y generar sus propios materiales de construcción. El uso de las fibras naturales como refuerzo en el concreto representa una alternativa de desarrollo para estos países.

La presente investigación pretende dar alternativas de solución al problema de la falta de vivienda e infraestructura en las zonas ixtleras, las cuales representa el 10% del territorio nacional. Sus objetivos son: producir un material compuesto a partir de cemento portland reforzado con fibras naturales de lechuguilla, que posea resistencia, durabilidad y pueda ser usado para fabricar materiales de construcción baratos. La hipótesis de trabajo sostiene que es necesario proteger a las fibras y reducir la porosidad de la matriz para que el compuesto sea durable.

Los principales resultados indican que la fibra de lechuguilla es resistente a la tensión, pero es severamente deteriorada por el medio alcalino del concreto. Sin embargo, si la fibra es protegida con parafina y la matriz es densificada con ceniza volante, el compuesto soporta aceptablemente la exposición a ambientes agresivos y a las variaciones de humedad y temperatura. Las fibras largas y en cantidades reducidas proporcionan incrementos en la resistencia a flexión y tensión del concreto.

Resulta factible entonces fabricar con este material compuesto elementos constructivos, tales como láminas acanaladas, prefabricados arquitectónicos y cimbras perdidas. Sin embargo, es necesario investigar aún más la durabilidad del concreto con fibras para que sea viable en el desarrollo de la infraestructura en las zonas rurales, tal como tuberías, tanques de almacenamiento y caminos.