



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

EVALUACIÓN DE COMPOSITES DE CEMENTO–FIBRA DE VIDRIO

Juan Luis Irving Valladares

Asesorado por: Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol

Guatemala, junio de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE COMPOSITOS DE CEMENTO-FIBRA DE
VIDRIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

JUAN LUIS IRVING VALLADARES

ASESORADO POR: INGA. DILMA YANET MEJICANOS JOL
AL CONFERÍSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, JUNIO DE 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortíz de León
VOCAL V	Br. José Alfredo Ortíz Herincx
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. José Gabriel Ordóñez Morales
EXAMINADOR	Ing. Wuilliam Yon Chavarría
EXAMINADOR	Ing. Diego Velásquez Jofre
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DE COMPOSITOS DE CEMENTO-FIBRA DE VIDRIO,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, el día 17 de abril de 2009.



Juan Luis Irving Valladares



Guatemala, 16 de Marzo de 2 010

Ingeniero José Gabriel Ordoñez Morales
Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil
Área de Materiales y Construcciones Civiles
Coordinador

Ingeniero Ordoñez

Me dirijo a usted para informarle, que he revisado el trabajo de graduación "EVALUACION DE COMPOSITOS DE CEMENTO-FIBRA DE VIDRIO", elaborado con el estudiante universitario Juan Luis Irving Valladares, quien conto con la asesoría de la suscrita.

Considerando que el trabajo desarrollado por el estudiante universitario Irving Valladares satisface los requisitos exigidos en el reglamento de graduación, por lo cual recomiendo su aprobación.

Atentamente,

"Id y enseñad a todos"


Inga. Civil Dilma Yanet Mejicanos Jol
Col. 5947
ASESORA

Dilma Y. Mejicanos Jol
Ingeniera Civil
Col. 5947



Guatemala,
13 de abril de 2010

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos
Guatemala

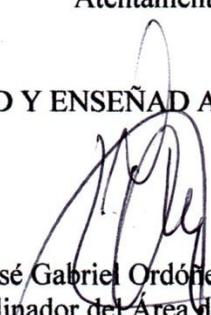
Estimado Ing. Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **EVALUACIÓN DE COMPOSITOS DE CEMENTO-FIBRA DE VIDRIO**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Juan Luis Irving Valladares, quien contó con la asesoría de la Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol.

Considero que el trabajo realizado por el estudiante Irving Valladares, satisface los objetivos para los que fue planteado, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

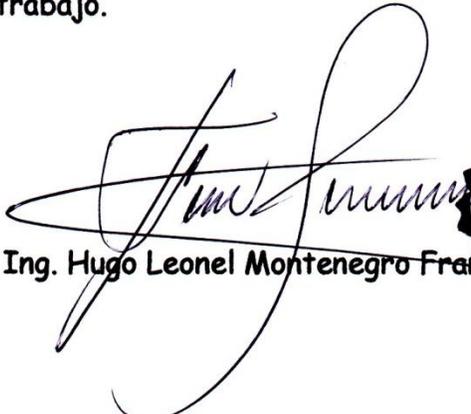


José Gabriel Ordóñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles

/bbdeb.



El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen de la Asesora Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, al trabajo de graduación del estudiante Juan Luis Irving Valladares, titulado EVALUACIÓN DE COMPOSITOS DE CEMENTO-FIBRA DE VIDRIO, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, junio de 2010

/bbdeb.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE COMPOSITOS DE CEMENTO-FIBRA DE VIDRIO**, presentado por el estudiante universitario **Juan Luis Irving Valladares**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Reinos
DECANO



Guatemala, junio de 2010

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por guiarme en esta etapa tan importante de mi vida y permitir compartir este logro con mis seres queridos.

Mis padres

Nicholas M. Irving y Telma Valladares, por su amor y apoyo incondicional, los sacrificios que han hecho, sus sabios consejos y comprensión en cada instante de mi vida.

Mi hermano

Tomás, por animarme y demostrar su apoyo y cariño.

Familiares y amigos

Por su amistad, aprecio y apoyo mostrado en todo momento.

AGRADECIMIENTOS A:

**Inga. Dilma Yanet
Mejicanos Jol**

Por su amistad, valiosa asesoría, ayuda, orientación y consejos para la realización del este trabajo de graduación.

Personal del CII

Eduardo, Marlon, Iván, Eber, Elder, Paulino e Ing. Pablo De León, por su ayuda, paciencia y colaboración en la elaboración del trabajo de graduación.

**Mis compañeros de
estudio**

Por su colaboración y haber compartido una grandiosa experiencia a lo largo de la carrera universitaria.

**Facultad de Ingeniería,
Universidad de San
Carlos**

Por haber brindado una preciada oportunidad para realizar mis estudios y una valiosa formación profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. COMPOSITOS	1
1.1. Definición	1
1.2. Elementos presentes	4
1.2.1. Matriz	5
1.2.2. Material de refuerzo	6
1.3. Tipos	9
1.4. Usos	12
2. CEMENTO	15
2.1. Definición	15
2.2. Propiedades y características	17

3. FIBRAS	21
3.1. Clasificación de fibras	21
3.1.1. Fibras naturales	22
3.1.1.1. Fibra animal	22
3.1.1.2. Fibra vegetal	23
3.1.1.3. Fibra mineral	23
3.1.2. Fibras artificiales	24
3.1.2.1. Fibras orgánicas	24
3.1.2.1. Fibras inorgánicas	25
3.2. Tipos de fibras	25
3.2.1. Fibra de carbono	26
3.2.2. Fibra de metal	27
3.2.3. Fibra de asbesto	27
3.2.4. Fibra de celulosa	29
3.3. Fibra de vidrio	30
3.3.1. Definición	31
3.3.2. Propiedades y características	32
3.3.3. Usos	34
4. PROCEDIMIENTO DE MEZCLAS	37
4.1. Determinación del largo de la fibra	37
4.2. Determinación de las proporciones fibra/cemento	41
4.3. Elaboración de probetas de ensayo	46
4.3.1. Tensión	53
4.3.2. Compresión	55
4.3.3. Flexión	57

5. PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS	63
5.1. Tensión	65
5.2. Compresión	67
5.3. Flexión	70
5.4. Densidad	74
6. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS	77
6.1. Recopilación de datos y cálculos	77
6.1.1. Ensayo a tensión	77
6.1.2. Ensayo a compresión	80
6.1.3. Ensayo a flexión	83
6.1.4. Ensayo de densidad	88
6.2. Relación entre los esfuerzos a tensión, compresión y flexión	90
6.3. Interpretación y análisis de resultados	93
6.4. Análisis de costo	110
CONCLUSIONES	121
RECOMENDACIONES	123
BIBLIOGRAFÍA	125
APÉNDICE	127

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Formas del refuerzo discontinuo: [P] partículas; [F] fibras cortas; [D] discos.	7
2.	Formas del refuerzo continuo: [F] fibras largas; [C] cintas.	7
3.	Configuración del material de refuerzo.	9
4.	Efecto de la relación agua-cemento en la resistencia a la compresión y a la tensión por flexión a los 28 días.	19
5.	Fibras de vidrio sueltas.	30
6.	Micrómetro utilizado para medir el diámetro de las fibras.	38
7.	Longitudes de las fibras.	39
8.	Máquina utilizada para elaborar las mezclas.	48
9.	Ejemplo de proporciones reales de mezclas. Arriba cemento y arena; abajo fibra al 2.5%.	49
10.	A) Mezclado del cemento y arena seca con fibra. B) Añadiendo agua a la mezcla.	50
11.	Proceso de mezclado final.	51
12.	Cubos y briquetas dentro de la cámara de humedad.	52
13.	Probetas de ensayo desencofradas e identificadas.	53
14.	Moldes especiales para briquetas.	54
15.	A) Briquetas terminadas dentro de los moldes. B) Briquetas en agua de curado.	55

16.	Moldes especiales para cubos.	55
17.	A) Cubos terminados dentro de los moldes. B) Cubos y briquetas en agua de curado.	56
18.	Detalles de la formaleta para las planchas.	58
19.	Detalle del bisel de las formaletas.	59
20.	Formaletas listas para verter la mezcla.	59
21.	Detalle de mezcla con 1% fibra.	60
22.	A) Proceso de llenado de moldes para las planchas. B) Planchas listas y alisadas.	61
23.	Plancha extraída del molde.	61
24.	Recipiente de curado para las planchas.	62
25.	Máquina universal.	64
26.	Colocación de briquetas en la máquina de ensayo.	66
27.	Briqueta fallada al concluir el ensayo tensorial.	67
28.	Detalle de la colocación de los cubos en la máquina de ensayo.	68
29.	Detalle de cubos fallados a compresión.	69
30.	Identificación de los puntos de carga y apoyo en las planchas.	71
31.	Colocación de la plancha sobre los apoyos y la arena sobre el centro de falla.	72
32.	Montaje del sistema de ensayo a flexión para una plancha.	72
33.	A) Ajuste del cabezal móvil superior. B) Realización del ensayo a flexión.	73
34.	Falla típica de las planchas a flexión.	74
35.	A) Piezas de briquetas. B) Vaso de precipitación y probeta graduada de 100 cm ³ .	75
36.	A) Toma de peso de la muestra. B) Toma del volumen de la muestra.	76
37.	Gráfica de los esfuerzos a tensión.	80
38.	Gráfica de los esfuerzos a compresión.	83

39.	Gráfica de los módulos de ruptura.	86
40.	Gráfica de los momentos de ruptura.	88
41.	Gráfica de densidades promedio.	89
42.	Gráfica de la relación entre $\sigma_{\text{tensión}} / \sigma_{\text{compresión}}$.	91
43.	Gráfica de la relación entre $\sigma_{\text{flexión}} / \sigma_{\text{compresión}}$.	92
44.	Gráfica de la relación entre $\sigma_{\text{flexión}} / \sigma_{\text{tensión}}$.	93
45.	Detalle de las fibras en briqueta con 0.5% fibra.	97
46.	Toma de medidas de la deflexión.	103
47.	Ejemplos de planchas deflectadas.	103
48.	Detalle de las fibras en plancha con 2.5% fibras.	104
49.	Gráfica del costo del esfuerzo a tensión.	115
50.	Gráfica del costo del esfuerzo a compresión.	117
51.	Gráfica del costo del esfuerzo a flexión.	118
52.	Fallas típicas de las briquetas ensayadas a tensión. A) Control, B) 0.1%, C) 0.25%, D) 0.5%, E) 1% y F) 2.5%.	133
53.	Fallas típicas de los cubos ensayados a compresión. A) Control, B) 0.1%, C) 0.25%, D) 0.5%, E) 1% y F) 2.5%.	134
54.	Fallas típicas de las planchas ensayadas a flexión. A) Control, B) 0.1%, C) 0.25%, D) 0.5%, E) 1% y F) 2.5%.	135

TABLAS

I.	Propiedades de la fibra de carbono.	26
II.	Propiedades de la fibra de vidrio.	33
III.	Muestreo de diámetros de las fibras de vidrio.	38
IV.	Muestreo de longitudes de las fibras de vidrio.	40
V.	Resultados del peso unitario seco de la arena.	42
VI.	Componentes y proporciones del “Surface Bonding”.	43
VII.	Proporciones de los diseños de mezclas.	45
VIII.	Cronograma de elaboración de mezclas, desencofrado y ensayos.	46
IX.	Resultados del ensayo a tensión (en lb) a 7 días.	78
X.	Resultados del ensayo a tensión (en lb) a 28 días.	78
XI.	Resultados promedio del esfuerzo a tensión a 7 días.	79
XII.	Resultados promedio del esfuerzo a tensión a 28 días.	79
XIII.	Resultados del ensayo a compresión (en Kg) a 7 días.	80
XIV.	Resultados del ensayo a compresión (en Kg) a 28 días.	81
XV.	Resultados del esfuerzo promedio a compresión a 7 días.	82
XVI.	Resultados del esfuerzo promedio a compresión a 28 días.	82
XVII.	Resultados del ensayo a flexión (en Kg) a 7 días.	83
XVIII.	Resultados del ensayo a flexión (en Kg) a 28 días.	84
XIX.	Dimensiones de las planchas.	85
XX.	Resultados del módulo de ruptura promedio a 7 días.	85
XXI.	Resultados del módulo de ruptura promedio a 28 días.	85
XXII.	Resultados del momento de ruptura promedio a 7 días.	87
XXIII.	Resultados del momento de ruptura promedio a 28 días.	87
XXIV.	Resultados del peso y volumen promedio de las muestras.	88
XXV.	Resultados de la densidad promedio de las muestras.	89

XXVI.	Relación en porcentaje entre $\sigma_{\text{tensión}} / \sigma_{\text{compresión}}$.	90
XXVII.	Relación en porcentaje entre $\sigma_{\text{flexión}} / \sigma_{\text{compresión}}$.	91
XXVIII.	Relación en porcentaje entre $\sigma_{\text{flexión}} / \sigma_{\text{tensión}}$.	92
XXIX.	Requisitos mínimos para la resistencia a flexión.	108
XXX.	Precios de láminas de fibrocemento de 4'x8'.	111
XXXI.	Costo de las planchas comerciales por metro cúbico.	112
XXXII.	Precio de los materiales utilizados.	112
XXXIII.	Costo por metro cúbico de mezcla.	113
XXXIV.	Incremento en costo de las mezclas.	114
XXXV.	Costo del esfuerzo a tensión.	115
XXXVI.	Costo del esfuerzo a compresión.	116
XXXVII.	Costo del esfuerzo a flexión.	118
XXXVIII.	Cálculos de los resultados obtenidos del esfuerzo a tensión.	127
XXXIX.	Cálculos de los resultados obtenidos del esfuerzo a compresión.	128
XL.	Cálculos de los resultados obtenidos del módulo de ruptura.	129
XLI.	Cálculos de los resultados obtenidos del momento de ruptura.	130
XLII.	Cálculos de los resultados obtenidos la densidad.	131
XLIII.	Sumatoria de la cantidad de componentes por proporción.	132
XLIV.	Unitario de los componentes por proporción.	132
XLV.	Cantidad de material en Kg para hacer un m ³ de cada mezcla.	132

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A_b	Área de la sección central de la briqueta, plg ² (cm ²)
A_c	Área de la cara del cubo, plg ² (cm ²)
b	Ancho de la plancha, plg (ft) ó mm (m)
d	Grosor promedio de la plancha, plg (mm)
d_f	Diámetro de la fibra, plg (mm)
L	Longitud del claro, plg (ft) ó mm (m)
$l_{f\ min}$	Longitud mínima de la fibra, mm
l_f	Longitud promedio de las fibras del muestreo, mm
M	Momento último, lb ft/ft (Nm/m)
m	Masa de la muestra, g (Kg)
P	Carga máxima, lb (Kg o N)
PUS_{ar}	Peso unitario seco de la arena, Kg/m ³
$R, \sigma_{flexión}$	Módulo de ruptura, psi (MPa)
$Rel\ l_f/d_f$	Relación longitud-diámetro de la fibra
v	Volumen de la muestra, cm ³ (m ³)
$\sigma_c, \sigma_{compresión}$	Esfuerzo a compresión, psi (Kg/cm ²)
$\sigma_t, \sigma_{tensión}$	Esfuerzo a tensión, psi (Kg/cm ²)
ρ	Densidad, g/cm ³ (Kg/m ³)
%	Porcentaje

GLOSARIO

Apresto	Acabado que se da a los tejidos y otros productos industriales para mejorar su presentación o conferirles alguna propiedad, como por ejemplo, mejorar la adherencia.
Bisel	Corte oblicuo en el borde de una lámina o plancha.
Composite	Material compuesto; material que resulta de la combinación de otros dos: uno que actúa como matriz y otro en forma de fibras, partículas o láminas que actúan como refuerzo.
Fibra	Elemento filiforme y flexible de tejidos naturales o artificiales con una pequeña sección transversal y longitud al menos 100 veces su diámetro.
Fibrocemento	Material constituido por mezcla de una parte fibra y otra cemento que sirve para hacer elementos moldeados o revestimientos.

Filamento	Un hilillo, natural o artificial, o cualquier material filiforme que compone las fibras.
Fraguado	El cambio de estado plástico a sólido de los morteros, concretos y otros aglomerantes.
Material	Extensión de materia que permite la transmisión de un esfuerzo mecánico.
Matriz	Fase continua que rodea al refuerzo.
Mortero	Una mezcla que se obtiene amasando cemento o cal con arena y agua; no incluye agregado grueso.
Sinergia	Acción combinada de dos o más elementos cuyo efecto es mayor a la suma de los efectos individuales.
Sólido amorfo	Aquel que consiste en partículas acomodadas de forma irregular, no poseen un punto de fusión definidos y son isotrópicos.

Tenacidad

Propiedad de los cuerpos que resisten a los esfuerzos de tracción deformándose y estirándose antes de romperse.

RESUMEN

El trabajo de graduación consiste en elaborar un composite, o material compuesto, a base de cemento hidráulico y fibra de vidrio, que tiene como única variable la cantidad de fibra de vidrio dentro de la mezcla. Esto se realizó con el fin de combinar las propiedades inherentes de cada uno de los componentes, dando como resultado un material superior y así presentar una opción de un material multiuso en la construcción. Para esto, se efectuaron distintas mezclas que fueron sometidas a una serie de ensayos para luego comparar el rendimiento con las distintas cantidades de fibra.

Primero se presenta la teoría acerca de la definición, cualidades, composición y usos de los composites. Luego se describe uno de los componentes principales y sus características, el cemento, que actúa como matriz continua. Posteriormente, se sintetiza la clasificación y tipos de fibras existentes hasta llegar al elemento clave de esta investigación, la fibra de vidrio que actúa como refuerzo. La fibra de vidrio se escogió por ser un material accesible, costeable así como disponible. Asimismo no presenta los peligros a la salud del asbesto, sin embargo retiene varias de las propiedades que hacían a este material apto para su uso. Por último, la fibra de vidrio no está sujeta a la degradación solar ni el decaimiento natural característico de las fibras a base de celulosa.

Para el diseño de mezclas se determinó la cantidad de agua y arena necesaria, así como la longitud de la fibra con el fin de mantener estos parámetros constantes de manera que la única variable bajo estudio fuese la cantidad de fibra en relación con el cemento. La mezcla con la cantidad de fibra máxima se determinó por la procesabilidad o facilidad de hacer la mezcla. Las demás mezclas se realizaron con la intención de observar la respuesta inmediata a cantidades pequeñas de fibra así como puntos representativos en comparación con las de menor proporción. También se mantuvo una muestra de referencia, o patrón, sin fibra. Las mezclas utilizadas según el contenido de fibra por peso en relación al peso del cemento fueron: 0% (control), 0.1%, 0.25%, 0.5%, 1% y 2.5%.

Se realizaron tres ensayos de propiedades mecánicas (tensión, compresión y flexión) y uno de una propiedad física, la densidad, con el fin de evaluar el comportamiento del material y averiguar las variaciones en las propiedades como resultado del cambio en la proporción de fibras en la mezcla. Debido a que el material es un mortero, se utilizó la norma ASTM C 190 a tensión y la ASTM C 109 a compresión. Para el ensayo a flexión se utilizó la norma ASTM C 1185 que rige el ensayo de planchas de fibrocemento sin asbesto. Dichos ensayos se realizaron a 7 días, como parámetro, y a 28 días para obtener la resistencia última.

Por último, se realizaron y tabularon los cálculos respectivos para observar la relación que existe entre la cantidad de fibra presente y las resistencias logradas para luego encontrar algún punto óptimo de la cantidad de fibra. Del mismo modo se realizó un análisis de costo, con el fin de averiguar cuan económicamente viable resulta el uso de este material en comparación con el material ofrecido en el mercado y también la eficiencia de costo que posee cada mezcla con respecto a las resistencias logradas.

OBJETIVOS

GENERAL:

Evaluar un composite a base de cemento y fibra de vidrio que combine las ventajas de ambos materiales, así evitar los inconvenientes de los fibrocementos a base de fibras de asbesto (salud) y celulosa (degradación).

ESPECÍFICOS:

1. Comprender el comportamiento y las ventajas de los elementos que comprenden o forman un composite.
2. Establecer si se encuentra algún punto óptimo en donde el aumento en la cantidad de fibras ya no se refleja distributivamente en un aumento de las propiedades mecánicas.
3. Elaborar un nuevo material que sea de aplicación para la fabricación de techos y láminas multiuso de larga duración, alta rigidez y resistencia.

4. Determinar el porcentaje de fibra a utilizar que demuestre el punto de inflexión o el punto de cambio en el comportamiento a tensión, compresión y flexión del composite.

5. Establecer la cantidad en porcentaje del peso de la fibra de vidrio con respecto al cemento para incrementar al máximo los resultados de las resistencias mecánicas de tensión y flexión.

6. Determinar la densidad de la mezcla a base de cemento y fibra de vidrio.

INTRODUCCIÓN

Los composites tienen un lugar prominente entre los materiales estructurales del mundo moderno. Estos consisten en dos o más componentes que contienen varias características que contrastan tanto en lo físico como lo mecánico. Los composites contienen dos componentes fundamentales: una matriz continua y un material de refuerzo interno (comúnmente fibra). Hoy en día, los composites poliméricos a base de las fibras de vidrio, carbón y orgánicas son utilizados extensamente en varios campos de la tecnología. Otro ejemplo común en el campo de la construcción está dado por el concreto reforzado, donde la matriz es el concreto y el acero actúa como refuerzo.

El empleo de los composites nace de la necesidad emergente de crear materiales que combinen un peso ligero con la suficiente resistencia y rigidez para soportar la carga deseada. Las aplicaciones prácticas de este tipo de materiales se ven reducidas por factores, tales como el costo, dificultad de fabricación o la incompatibilidad entre materiales. El objetivo de crear composites es producir una mejora en las propiedades mecánicas de los materiales involucrados en modo sinérgico. El sinérgismo implica que la acción combinada de los materiales es superior a la suma de los efectos por separado, y por lo tanto, ayuda a producir un material superior.

El presente trabajo e investigación consiste en la elaboración de un composite a base de cemento (matriz continua) y fibra de vidrio (refuerzo) teniendo como única variable la cantidad de fibra de vidrio dentro de la mezcla. Por lo tanto, la relación agua/cemento, la longitud de la fibra y la relación arena/cemento se mantendrán constantes. Este último, la arena, se agregó a fines de evitar fisuración temprana del concreto en la ausencia de fibras.

Las distintas proporciones para las mezclas se realizaron de tal forma que se permita observar la respuesta inmediata a una cantidad mínima de fibra. Asimismo, se realizaron dos muestras de un orden de magnitud arriba de las cantidades mínimas de fibra; por último el punto máximo fue determinado por la procesabilidad o facilidad de hacer la mezcla. Una vez realizadas las mezclas adecuadas con distintas proporciones de cemento-fibra de vidrio, se evaluaron propiedades mecánicas tales como: tensión, compresión y flexión y una propiedad física, la densidad. Para poder adquirir datos prácticos y confiables, se realizaron varias muestras de cada mezcla, con el fin de obtener tres resultados para cada ensayo. Asimismo, debido a que interesa la resistencia última que la mezcla obtenga, se realizaron ensayos a los 7 días de fraguado, como parámetro, y a los 28 días de fraguado, resistencia última, para verificar y determinar las propiedades mecánicas. Dichos ensayos de laboratorio se realizaron en el Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Se observaron los resultados de los ensayos con el fin de averiguar las variaciones de las propiedades mecánicas como consecuencia del cambio de la proporción de fibras en la mezcla. Por último, se intenta observar si se encuentra algún punto óptimo en donde el aumento en la cantidad de fibras ya no se refleja distributivamente en un aumento de las propiedades mecánicas o bien si se encuentra una tendencia en el comportamiento mostrado en las gráficas.

1. COMPOSITES

1.1. Definición

Un composite propiamente dicho no es más que un material compuesto¹. Asimismo, un material compuesto es aquel que resulta de la combinación de otros dos: uno que actúa como matriz y otro en forma de fibras, partículas o láminas que actúa como refuerzo. Usualmente las propiedades y características de dichos materiales contrastan tanto en lo físico como lo mecánico. Esto implica que la acción combinada de los materiales es superior a las partes por separado, y por lo tanto, ayudando a producir un material superior.

En el caso de los metales, la dureza y propiedades mecánicas se dan al inicio, y en las nuevas combinaciones se busca un menor peso. Por el contrario en los nuevos materiales compuestos, se busca mejorar las propiedades mecánicas ya que por lo general son esencialmente ligeros. Asimismo, la tecnología moderna requiere de materiales con una combinación inusual de propiedades. Entre las ventajas que otorgan los composites se encuentra el aumento de resistencia a tensión, rigidez, longevidad contra la fatiga, resistencia ambiental (intemperie), peso reducido, reducción en los costos de producción, entre otros.

La idea no es nada nueva ya que se viene empleando con la fabricación tradicional del adobe, en el cual se mezcla paja con el barro con el fin de evitar grietas durante el proceso de secado y brindar una mejor consistencia a la mezcla final. En la naturaleza también se puede encontrar un material compuesto estructural y versátil, como es el caso de la madera. La madera está constituida de un material rígido llamado lignina con flexibles fibras de celulosa dentro de la misma. Existen muchos tipos de materiales compuestos que se clasifican según el material que forma la matriz predominante y la fibra o aditivo de refuerzo. En general, los materiales más comunes dentro de de la nueva gama de materiales compuestos son los formados por una matriz de polímero con fibras inorgánicas dispersas, normalmente de vidrio o de carbono. Esto involucra la elaboración materiales ligeros comparados con los metales convencionales a los que podrían sustituir.

En los composites poliméricos, la fibra de refuerzo aporta resistencia y rigidez mientras que la matriz de relleno aporta integridad y moldeabilidad al material. El principio de la producción de estos materiales permite una alta resistencia y rigidez, propias de las fibras de refuerzo, para ser combinadas con las propiedades de la matriz. Asimismo, al cambiar y variar el orden de las fibras se puede controlar la anisotropía de dicho material. En síntesis, el objetivo de reforzar una matriz mediante fibras es debido a las ventajas estructurales y tecnológicas que conllevarán a la producción de materiales con mayor resistencia.

No cabe duda que muchos de los composites tienden a ser vistos como una especialidad de la química debido al campo de investigación y desarrollo; sin embargo también están asociados con la ingeniería debido al proceso de diseño, fabricación y el ensayo de estos productos.

Un factor muy importante que se debe considerar es la proporción utilizada de los materiales dentro del composite, ya que esto afecta el resultado de la resistencia final que este posea. Sin embargo, es aquí donde se tiene que analizar si la inversión económica es justificada por un aumento proporcional en el rendimiento o resistencia final dada por el composite.

No obstante, los composites adquieren no solo las propiedades favorables sino también las propiedades no favorables de sus componentes. Pero es aquí donde se puede jugar con las distintas combinaciones de materiales para que en dado caso se compense las deficiencias del otro material en la mezcla. Un ejemplo muy claro de esto en el ámbito de la construcción es el concreto reforzado, en el cual el concreto (matriz) por sí sólo no es apto para altas resistencias a tensión y por lo tanto el acero de refuerzo lo complementa brindando la resistencia necesaria para ese caso.

En la fabricación de composites existen otras formas para disminuir las desventajas potenciales. Se puede incrementar o mejorar la resistencia de la interfase fibra-matriz por medio de tratamientos previos. Asimismo, se pueden crear combinaciones multidireccionales del refuerzo con el objetivo de mejorar los enlaces interlaminares.

En otros aspectos de la construcción, se han realizado estudios para desarrollar materiales y técnicas que permitan una gran resistencia y al mismo tiempo que se reduzca la carga muerta de dicha estructura, en otras palabras, crear nuevos materiales que sean más livianos e igual o más resistentes los que se emplean normalmente. Asimismo, la vida útil que este posea es vital ya que muchas estructuras estarán expuestas a climas adversos o bien los elementos se consideran como componentes permanentes dentro de la estructura.

1.2. Elementos presentes

Como se ha mencionado previamente, los composites están formados por dos elementos: la matriz, la cual es continua y rodea el otro elemento, que es el material de refuerzo. Las propiedades finales de los composites estarán en función de las propiedades individuales que cada uno de estos elementos aporte y de las proporciones relativas de cada uno dentro de la mezcla final. Por lo tanto, para poder interpretar y comprender el comportamiento total de un elemento compuesto, se deben conocer las características de sus componentes.

El grado de adherencia entre la matriz y los elementos dispersos determinan si este último funciona solo como material de relleno o bien como material de refuerzo. Para resolver este problema, se puede recurrir a tratar la superficie de los elementos dispersos con químicos de manera que se pueda incrementar la adherencia. Una unión adecuada y efectiva entre la matriz y la fibra garantiza una transmisión de esfuerzos óptima.

El papel de la matriz y el material de refuerzo generalmente pertenece en uno de los siguientes contextos:

- El refuerzo posee alta resistencia y rigidez, y la matriz sirve para transferir los esfuerzos de una fibra a otra para producir una estructura densa.
- Se emplea cierto énfasis para disminuir el costo y mejorar la economía de la matriz mezclándola o diluyéndola con materiales que mejoren su apariencia, procesabilidad o ventajas económicas, mientras se mantiene un rendimiento adecuado.
- La matriz posee muchas características deseables e intrínsecas y el refuerzo sirve para mejorar otras propiedades importantes carentes de la matriz como la resistencia a tensión, al deslizamiento o movimiento longitudinal y resistencia al desgarre.

1.2.1. Matriz

La matriz es la fase continua que funciona como el aglomerante que une material final y a las fibras. Asimismo, la matriz transmite el esfuerzo a las fibras y de esta manera el composite adquiere cierta ductilidad y tenacidad debido a que las fibras soportan gran parte de la fuerza aplicada.

Cualquier sólido que pueda ser procesado para incrustar y adherir una fase de refuerzo es potencialmente un material matriz. Una propiedad muy conveniente de una matriz es que pueda ser aplicada en un estado fluido, lo cual facilita la penetración y la impregnación en las fibras. Luego al pasar los minutos, la matriz se cambia a un estado sólido. Los polímeros, como las resinas, y metales han sido los más exitosos con este proceso; también son utilizados los cementos, vidrio y cerámicas.

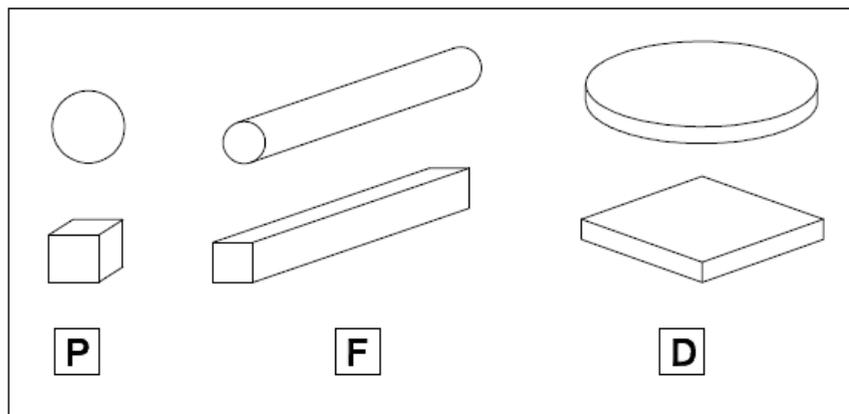
Una de las funciones importantes de la matriz es que proteja a las fibras del deterioro ya sea mecánico o químico al estar expuesto al medio ambiente. También mantiene integrada la mezcla en el caso que se quiebre o se rompa alguna fibra en particular, la rotura total no ocurrirá a menos que se rompan varias de las fibras alrededor.

1.2.2. Material de refuerzo

De acuerdo a la relación de tamaños entre los elementos de refuerzo y su colocación dentro de la matriz, se pueden identificar dos grupos de materiales reforzados. El primero son aquellos que tiene un refuerzo discreto orientado al azar lo que involucra la matriz más partículas. Este primer grupo incorpora un refuerzo por medio de partículas ubicadas en todas las direcciones o bien por medio de fibras cortas o filamentos. Debido a que dichas partículas se encuentran con un arreglo al azar dentro de la matriz, el material se comporta isotrópico a gran escala.

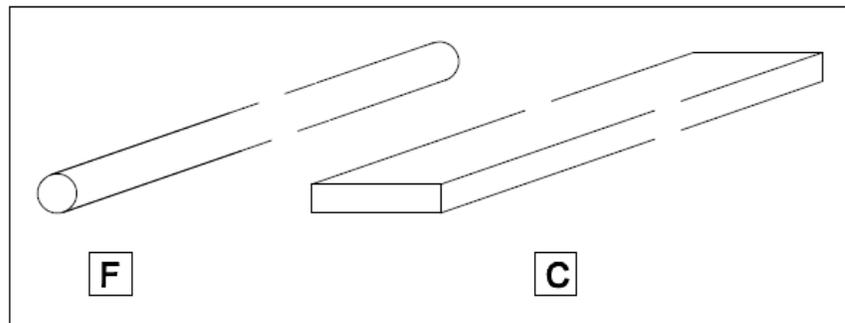
Los componentes discretos del material de refuerzo se pueden clasificar de acuerdo a su forma: partículas de forma esférica, cúbica, etc.; fibras cortas; y discos en forma de plaqueta o escamas. Los refuerzos de disco en forma de plaqueta y escamas incluyen la mica, escamas de vidrio y de aluminio. Si fuesen elementos más largos se tienen las fibras largas y cintas. Las figuras a continuación esquematizan cada uno de estos elementos.

Figura 1. Formas del refuerzo discontinuo: [P] partículas; [F] fibras cortas; [D] discos.



Fuente: Charrier, Jean-Michel, **Polymeric Materials and Processing**. Pág. 36

Figura 2. Formas del refuerzo continuo: [F] fibras largas; [C] cintas.



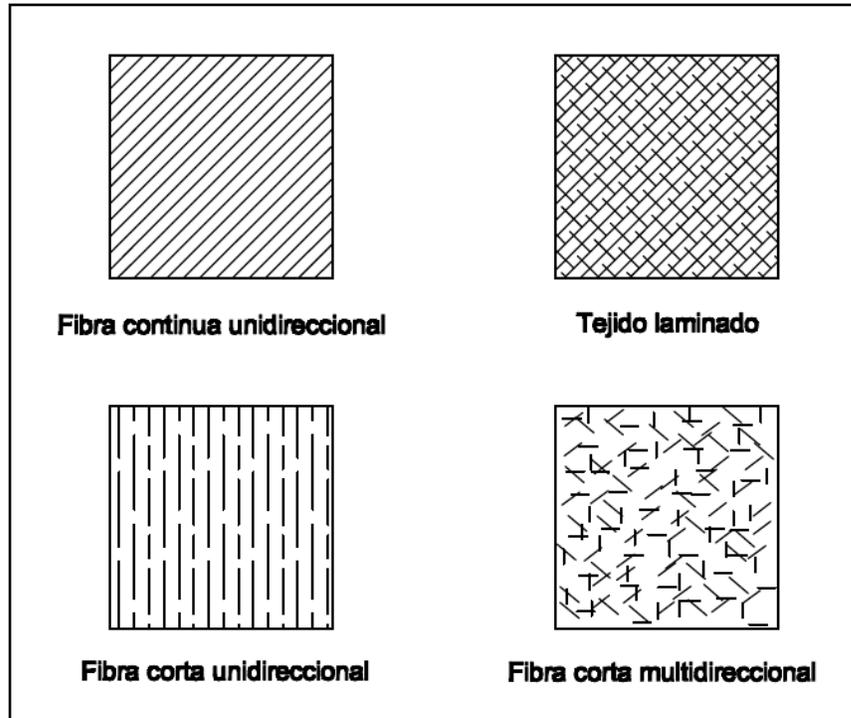
Fuente: Charrier, Jean-Michel, **Polymeric Materials and Processing**. Pág. 36

El segundo grupo lo componen aquellos que tienen un refuerzo regular u orientado que incluye la matriz más fibras continuas. Sin embargo, a diferencia del arreglo en partículas, tienen una estructura orientada. La anisotropía de estos composites fibrosos se genera debido a la colocación de las fibras, y se conoce como anisotropía estructural.

Si el refuerzo se utiliza para mejorar la resistencia de cierta matriz, este debe ser más resistente y rígido que la matriz y debe mejorar el mecanismo de falla de manera favorable.

En cuanto a la colocación del material de refuerzo, se pueden catalogar tres subgrupos de composites de acuerdo al arreglo o configuración del elemento de refuerzo. Estos son: unidireccional, laminado (bidireccional) y multidireccional. Un esquema de estas configuraciones puede ser apreciado en la Figura 3.

Figura 3. Configuración del material de refuerzo.



Fuente: Othmer, Kirk, **Concise Encyclopedia of Chemical Technology**, Pág. 308.

1.3. Tipos

La base de los composites se encuentra bajo el concepto de refuerzo, lo cual involucra la combinación de opuestos, en cuanto a propiedades mecánicas, de una matriz adecuada y un refuerzo rígido y resistente. Este concepto va más allá de la resistencia ya que implica un incremento en la fiabilidad del material.

La creación y fabricación de composites se empieza seleccionando los materiales a partir de las características mecánicas que se requieran dentro de la estructura del material final y la compatibilidad entre sí. Luego se dosifica la proporción o proporciones adecuadas, lo cual estará ligado al costo final, trabajabilidad y que tan efectivo resulte el aumento de uno de los componentes.

Los primeros composites fibrosos poliméricos fueron de fibra de vidrio. Las ventajas estructurales de la fibra de vidrio orientada en una dirección son ampliamente conocidas, principalmente debido a la alta resistencia en la dirección del refuerzo. Sin embargo, esta principal ventaja se encuentra con una serie de problemas asociado con una baja rigidez inclusive en la dirección del refuerzo lo cual puede ocasionar un deslizamiento por corte pronunciado.

Los composites a base de fibra de vidrio pueden tener un refuerzo unidireccional, laminado o multidireccional según sea necesario. Sin embargo los nuevos avances tecnológicos sugieren que la nueva generación de composites se encuentra en materiales a base de carbono y metales, muchos utilizando las cerámicas como matriz. Algunos de estos materiales han adquirido nombres específicos como es el caso de los *cermets*, materiales compuestos por cerámica y metales. No obstante, no se descarta el uso de la fibra de vidrio ya que a pesar de ser un material creado hace varios años, se tiende a crear mejoras y variaciones del mismo conforme el tiempo.

Se tiene la producción industrial de metales reforzados con fibras, como es el caso del boro-aluminio y grafito-aluminio. Sin embargo, la producción de estos y otros composites metálicos requieren de la solución de algunos problemas tecnológicos.

Para clasificar los composites fibrosos se toma en cuenta lo siguiente: los materiales, la clasificación de acuerdo al refuerzo o el material que conforma la matriz; la estructura, por el tipo de refuerzo y su colocación o montaje; y por último la tecnología empleada o bien el método para realizar dicho producto.

Lo más común en los composites fibrosos es que sus nombres se deriven de la fibra de refuerzo, por ejemplo: fibra de vidrio, de boro, de carbono, grafito, orgánica, etc. Sin embargo la clasificación de acuerdo al material de matriz es menos común debido a la amplia variedad de resinas y combinaciones.

Según la clasificación de acuerdo al método de producción, los composites fibrosos se dividen en: pieza fundida, colada o moldeado. El método que se utilice tiene un fuerte efecto en las propiedades del material.

1.4. Usos

El rápido crecimiento en el desarrollo y la aplicación de composites ha llegado al punto en el cual estos materiales son utilizados como estructuras ingenieriles y en muchos casos cotidianas. Es por esta razón que los usos se han ido acoplando a las necesidades emergentes del mundo tecnológico.

Para promover el uso y la aplicación de composites es necesario desarrollar procesos de manufactura de manera que se puedan producir materiales duraderos y efectivos, y que al mismo tiempo sean económicos de fabricar. Asimismo, las estructuras de los composites se diseñan con mayor eficiencia cuando las cargas principales coinciden con la dirección del refuerzo.

En algunos casos, como en los aviones comerciales, el uso de composites consiste entre el 10% y 15% del peso total. Asimismo, en otras estructuras más avanzadas, el contenido puede llegar hasta un 40% y 60%. La aplicación de composites en aeronaves de última tecnología puede resultar en una reducción de hasta 50% del peso.

Entre las aplicaciones de los composites como láminas se encuentran los componentes de las bañeras y piscinas, mesas al aire libre, componentes de automóviles (tales como los paneles, tapas, parachoques, tanques de gasolina), cofres, cascos, cubiertas, tableros, tuberías, cañas de pescar, etc. Hoy en día parecen estar presentes en muchos artículos cotidianos.

El cemento reforzado con fibras funciona prácticamente igual que el concreto reforzado con acero, en el sentido que las fibras le permiten una mejor resistencia a tensión y disminuye las fisuras ocasionadas por la contracción térmica sobre el concreto.

Esta última aplicación es utilizada en el repello estructural llamado "Surface Bonding", ampliamente utilizado en muros de mampostería en Estados Unidos. Este método se utiliza para levantar muros sin el uso de mortero como unión entre bloques ya que con solo apilar los bloques, se coloca el repello a base de cemento y fibra de vidrio en ambos lados. Este repello no solo mejora la adherencia de los bloques comprendidos dentro del muro sino también le otorga resistencia a tensión e impermeabilidad.

Es común que muchos de los nuevos materiales sean relativamente caros y exóticos, pero en muchos casos su aplicación y nuevas propiedades mejoradas compensen dicho costo añadido. Y como es tendencia de toda nueva tecnología, el pasar de los años lo hace más costeable y habitual en el entorno en que se vive.

2. CEMENTO

El cemento es uno de los materiales estructurales más cotidianos e importantes que se utilizan en la construcción de todo tipo de obra civil. Su utilidad se debe a las propiedades mecánicas (sobre todo a compresión), propiedades aglutinantes, resistencia, longevidad y moldeabilidad. Asimismo se produce en cantidades masivas y se puede encontrar en todas partes del mundo.

2.1. Definición

El cemento es el elemento básico de la industria de la construcción, en la que se utiliza como aglomerante en forma de mortero y como componente principal del concreto. Asimismo su uso en la industria está muy diversificado, ya que se utiliza en elementos prefabricados, pavimentos, tubos, presforzados, fibrocemento, entre otros.

Existen los cementos naturales que son los que se obtienen a partir de rocas que contienen cal y arcilla, y los cementos artificiales, fabricados con piedra caliza, arcilla y yeso como materias primas. Estos últimos son los de mayor interés económico porque constituyen prácticamente la totalidad de los que se utilizan en la industria. El más importante de los cementos artificiales es el Cemento Pórtland.

El Cemento Pórtland no sólo es el tipo de cemento más importante, sino también el más común a nivel mundial. Su nombre se deriva de la semejanza al color gris-verdoso de las rocas de dicha región en el Reino Unido. Este material es obtenido mediante la calcinación, a temperaturas ligeramente inferiores a las de fusión, de una mezcla de materiales calizos y arcillosos. El producto obtenido, clínker es un material deshidratado, y es molido con la adición de yeso dando como resultado el producto final: cemento.

Propiamente el cemento hidráulico es aquel que se obtiene de la cocción de materiales calcáreos y arcilla, el cual al ser mezclado y amasado con agua, fragua con este último y tiene la propiedad de endurecerse hasta tomar una consistencia pétreo. De esta manera, la resistencia del cemento es el resultado del proceso de hidratación.

Una variación o tipo de cemento muy común en el país es el cemento puzolánico. Este es formado con una mezcla a base de Cemento Pórtland y puzolana, una fina ceniza volcánica. Las puzolanas son materiales silíceos que son reducidos a polvo y amasados con cal con el fin de formar aglomerantes hidráulicos. La puzolana, en muchos casos, puede llegar a tener una proporción de hasta 40% y 60% del peso total de la mezcla.

2.2. Propiedades y características

La gravedad específica del cemento oscila entre 3.12 y 3.16. Su peso volumétrico es de 94 lb/ft³ (aproximadamente 1500 Kg/m³) lo cual es el peso unitario de un saco de cemento comercial². Sin embargo en Guatemala para el Cemento UGC de 4000 psi, que cumple con la norma ASTM C 595, el peso específico es 2.91 y su peso unitario es de 851.75 kg/m³, según el informe del CII del 6 de junio de 2008.

La estructura del cemento está compuesta principalmente a base de silicatos de calcio y aluminio; y las características más importantes del cemento son:

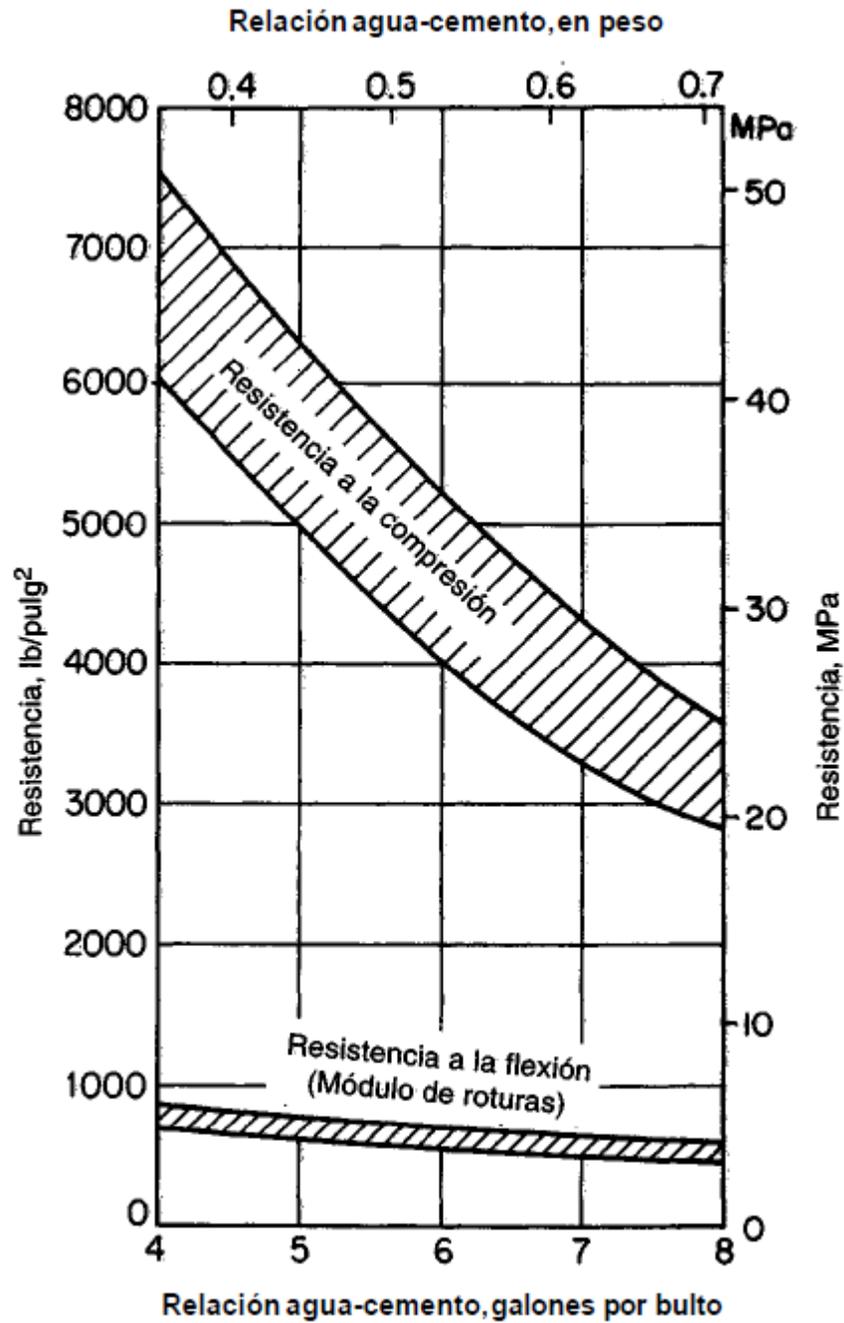
- Módulo hidráulico: En base a este parámetro, se puede clasificar el cemento en lento (de módulo bajo) que fragua en 10 horas y continúa endureciendo por varios meses; y los rápidos (de módulo alto) que fraguan en cuestión de minutos.
- Módulo de silicato: Es la relación entre el peso de sílice y los óxidos de aluminio. Un valor entre 2 y 3 es de buena calidad.
- Módulo de fundentes: Es la relación entre el peso de alúmina y el óxido férrico, y debe ser lo mayor posible.

Las propiedades físicas y químicas que se toman en cuenta para el cemento son las siguientes:

- Tiempo de fraguado: Indica el periodo durante el cual se puede trabajar una pasta formada por cemento y agua. El fraguado es el proceso de endurecimiento mediante la adición de agua.
- Finura del moldeo: Condiciona la rapidez de hidratación del cemento.
- Estabilidad del volumen: Fundamental para mantener un material estable.
- Resistencia mecánica: La resistencia a compresión que llegue a obtener el cemento endurecido se debe a la relación agua-cemento. Por lo general, no se espera que el cemento resista a tensión, pero dicha resistencia suele estar entre 7 y 10% del esfuerzo a compresión obtenida. En flexión, el módulo de ruptura oscila entre 11 y 23% del esfuerzo a compresión.

Las propiedades tales como la resistencia, módulo de elasticidad, y permeabilidad dependen de la relación agua-cemento y del grado de hidratación del cemento.

Figura 4. Efecto de la relación agua-cemento en la resistencia a la compresión y a la tensión por flexión a los 28 días.



Fuente: Nilson, Arthur, **Diseño de Estructuras de Concreto**. Pág. 32

Por su parte, las características propias del cemento puzolánico son: bajo calor de hidratación, poca sensibilidad a los ataques por ácidos débiles y desarrollo de resistencia más lento que el cemento Portland. Este último indica que el tiempo de fraguado tarda un poco más de lo normal, dando mayor manejabilidad y trabajabilidad a la mezcla por más tiempo. Sin embargo, siempre se deben trascurrir 28 días para que la mezcla obtenga la resistencia final para lo cual fue elaborada.

Otra de las razones por la cual se agrega puzolana al cemento Portland es debido a que durante el fraguado se libera cal de algunos de los componentes. En algunos casos extremos, esta cal liberada puede llegar a ser el 20% del peso del cemento. Esto puede ocasionar cierta desintegración de la estructura. La puzolana ayuda a prevenir esto a manera que reacciona con la cal para producir un silicato de calcio fuerte.

3. FIBRAS

Las fibras, en el sentido más amplio, son los filamentos de cuerpo plástico, flexible y resistente. Asimismo, poseen una gran finura con un cuerpo macroscópicamente homogéneo y una relación largo-ancho bastante alta con una pequeña sección transversal. Entre los usos más comunes es la fabricación de hilos y tejidos.

Para poder clasificar a un elemento como fibra, depende más de su forma y geometría que cualquier otra propiedad. Una definición común requiere que la longitud de la fibra sea por lo menos 100 veces su diámetro. Las fibras artificiales se pueden fabricar con cualquier relación largo-diámetro deseado. Entre las fibras naturales, como el algodón y la lana, se encuentran longitudes de 1000 a 3000 veces el diámetro.

3.1. Clasificación de fibras

Convenientemente las fibras se clasifican en dos grandes grupos de acuerdo a su origen y creación, ya sea encontrado naturalmente o hecha por el hombre (artificial).

3.1.1. Fibras naturales

Las fibras naturales son aquellas que se encuentran, como su nombre indica, en la naturaleza y se pueden clasificar en tres grupos de acuerdo a su origen dentro de la misma. Se puede mencionar que las más prominentes a este grupo son el algodón y la lana.

3.1.1.1. Fibra animal

Como su nombre implica, son aquellas fibras provenientes de los animales. Probablemente la más común es la lana, que no es más que el pelo de la oveja. Sus propiedades y versatilidades la hacen apta en múltiples aplicación.

También se tiene la seda, que es la secreción de algunos insectos como por ejemplo la larva. La seda es la única que se obtiene como filamento continuo, a diferencia de las demás fibras naturales que poseen una longitud finita. Por último se comprende el pelo de los animales ya que es utilizado en alfombras, tapicería, etc.

3.1.1.2. Fibra vegetal

Son aquellas fibras procedentes de las plantas y sus derivados, lo cuales, de acuerdo a su procedencia se tiene:

- De la semilla o fruto – Aquí se encuentra el algodón, el cual es la fibra vegetal más importante. También se incluye la seda vegetal, que se emplea como relleno y se mezcla con otras fibras.
- De las hojas – Éstas son denominadas como fibras duras, las cuales son poco flexibles pero muy resistentes.
- Del tallo – Esto da origen a las fibras vegetales largas. Entre las más importantes de este tipo se encuentra: el lino que al ser hilado, es ampliamente utilizado en la industria textil; y el cáñamo con cualidades parecidas al lino, que comúnmente es utilizado para fabricar cuerdas.

3.1.1.3. Fibra mineral

De las fibras naturales, este tipo es el único que no proviene de seres vivientes. La única fibra natural de origen mineral es el asbesto, que es también conocido como amianto.

3.1.2. Fibras artificiales

Las fibras artificiales, o sintéticas, han sido el resultado de la innovación química y científica como respuesta a la fabricación de fibras con propiedades mejoradas o deseadas en comparación con las que se pueden obtener naturalmente. Como consecuencia, estas fibras de polímeros sintéticos han ido desplazando a las fibras naturales y las de acetato de celulosa.

Entre las características que se resaltan de estas fibras se encuentra: una gran resistencia a tensión y al desgaste, no se pudren, no lo ataca la polilla, resistencia al moho y agentes químicos, ligeras, entre otros. Asimismo, las propiedades físicas y químicas dependerán del grupo al que pertenezcan las fibras.

De acuerdo a su naturaleza, las fibras artificiales se dividen en dos grandes grupos, las orgánicas y las inorgánicas.

3.1.2.1. Fibras orgánicas

Estas se subdividen en celulósicas y sintéticas puras.

- Celulósicas – Se producen a partir de polímeros naturales, en especial la celulosa.

- Sintéticas – Se obtienen de diversos polímeros que no se encuentran en la naturaleza, y se producen de forma artificial.

3.1.2.2. Fibras inorgánicas

Estas comprenden las fibras metálicas y de vidrio, entre otras.

- Fibra metálica – Están constituidas por una delgada lámina de metal recubiertas de resina sintética. Su uso más común es tejer ciertas telas de fantasía.
- Fibra de vidrio – su composición es semejante a la del vidrio común pero se produce en filamentos muy finos de pocos centímetros de longitud o bien en forma de hilo. Debido a la importancia de este material en el trabajo, se contempla mayor información de la misma en una sección más adelante.

3.2. Tipos de fibras

Entre los tipos de fibras más utilizados en la industria se encuentra la fibra de carbono, fibras de metal, asbestos, celulosa, de vidrio, entre otras.

3.2.1. Fibra de carbono

La fibra de carbono fue desarrollada a finales de 1950. Sin embargo su alto costo lo restringió al uso de composites avanzados para aplicaciones militares o aeroespaciales. Actualmente el costo de estas fibras ha disminuido, no obstante sigue siendo más costoso que la fibra de vidrio debido al proceso de fabricación y sus propiedades físicas y mecánicas codiciadas porque posee una alta rigidez y resistencia combinadas con un bajo peso. Para la fabricación de composites de fibra de carbono de alto rendimiento se utiliza resina epóxica.

La fabricación de los monofilamentos de carbono es bastante compleja. Este involucra un material orgánico alto en carbono el cual está sujeto a una combinación de estiramiento y carbonización en una atmósfera inerte a altas temperaturas. Distintos procesos dan origen a diferentes tipos de fibra de carbono. Las propiedades de las más usuales se encuentran en la tabla a continuación.

Tabla I. Propiedades de la fibra de carbono.

Fibra	Resistencia a tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Gravedad específica	Diámetro de la fibra (µm)
Thornel 300	3448	231	1.75	7.0
AS6	4137	248	1.74	5.5
GY-70	1860	517	1.96	8.4
P-100S	2241	690	2.15	11.0

Fuente: Othmer, Kirk, **Concise Encyclopedia of Chemical Technology**. Pág. 309

3.2.2. Fibras de metal

Los metales usualmente se han utilizado en forma de cables y torones, pero también se cuenta con filamentos continuos de pequeño diámetro, donde su mejor uso ha sido en las llantas de los vehículos. Varios metales han sido fabricados en filamentos, como el acero, berilio y el tungsteno, pero debido a su alta densidad, no se han creado muchos composites con estas fibras.

3.2.3. Fibra de Asbesto

El asbesto es muy conocido, tanto por sus usos y aplicaciones así como el potencial riesgo a la salud que pueden ocasionar. Es un mineral metamórfico fibroso y está compuesto de silicatos en cadena doble. Asimismo las fibras de asbesto son de color grisáceo o verdoso debido a ciertas impurezas presentes. Los minerales de asbesto tienen fibras largas y resistentes que se pueden separar y son suficientemente flexibles como para ser entrelazadas y también resisten altas temperaturas.

El asbesto no se quema, no se pudre, posee una alta resistencia tensorial así como resistencia a los ácidos, bases, el calor y las llamas. Estas excelentes propiedades aislantes, mecánicas y químicas combinadas con su relativo bajo costo, fueron las razones por la cual el material obtenía numerosas aplicaciones industriales, así como el hecho que haya sido un componente durante muchos años de varios productos o acabados industriales al ser mezclado con cemento, formando el fibrocemento, con el que se pueden moldear tubos, ductos, placas onduladas, láminas planas y corrugadas, baldosas para piso y otros objetos de poco espesor. Además, existen numerosos yacimientos en todo el planeta y su costo de extracción es relativamente bajo.

Sin embargo se ha determinado que la fabricación de productos relacionados con el asbesto provoca cáncer con una elevada mortalidad debido a que la inhalación de asbestos puede producir asbestosis, y por lo tanto, desde hace décadas, se ha prohibido su uso en la mayoría de países, aunque se continúa utilizando en algunos países en vías de desarrollo.

3.2.4. Celulosa

La celulosa es un material natural muy común y el constituyente más importante de la membrana de la célula vegetal. Se presenta con una estructura lineal o fibrosa constituida por fibrillas compuestas. La celulosa constituye alrededor del 50% de la madera y casi el 100% de las fibras de algodón. Por sí sola, la celulosa es blanca e inodora. Su densidad es de 1.55 g/cm^3 y su resistencia mecánica se compara a la de algunos aceros ya que las fibras de algodón pueden soportar hasta 80 Kg/mm^2 . Los micro filamentos de la celulosa poseen un diámetro entre 10 y 30 nm (10^{-9} metros)³.

La celulosa no se encuentra de forma pura, sino que esta incrustada con lignina. Debido a que los cristales de la celulosa se pueden derretir, ocurre una degradación química, y por lo tanto la celulosa no tiene propiedades termoplásticas. Un tratamiento químico puede incurrir en la destrucción de la estructura cristalina, y el fluido a base de celulosa puede ser formado en láminas o fibras. Tratamientos consecutivos reintegran a las moléculas a su estructura celulosa y al material a un estado cristalino.

Debido a que los derivados de la celulosa usualmente son plastificados, resulta un poco difícil generalizar sus propiedades mecánicas. Los que sí se puede inferir es que tienden a ser sensibles a la humedad y tienen una alta resistencia a productos derivados del petróleo. Sin embargo debido a su origen natural, están sujetos a la degradación ambiental que puede ser ataque del agua, ataque ácido o ataque bacteriano.

3.3. Fibra de vidrio

Hace muchos años el vidrio sólo se utilizaba como un elemento en ventanas o puertas para dejar entrar luz, y también poseía fines estéticos y ornamentales. En la época moderna, el vidrio se está utilizando también como material estructural en la forma de fibra de vidrio con resina poliéster lo cual forma un composite versátil.

Figura 5. Fibras de vidrio sueltas.



3.3.1. Definición

La fibra de vidrio es un material hecho a base de filamentos finos de vidrio. Se obtiene al hacer fluir el vidrio fundido a través de una serie de agujeros finos que, al solidificarse, se obtiene el material con suficiente flexibilidad como para ser usado como una fibra. Asimismo, las fibras de vidrio están cubiertas con un apresto que no solo protege dicha fibra, sino también mejora la adherencia que esta tenga con la resina poliéster. Cada componente de una fibra individual se llama monofilamento y comúnmente posee un diámetro de alrededor 10 μm (10^{-6} m). Los filamentos pueden ser mucho más delgados que un pelo humano y puede parecer que posee la textura de la seda.

Se utilizan cientos de monofilamentos para enrollarlos y formar un segmento de fibra. Luego estos segmentos se unen para formar hilos. Estos hilos son tejidos para fabricar telas flexibles con variedad de patrones para acoplarse al refuerzo adecuado. Estas telas se caracterizan por su patrón y su peso por unidad de área. Usualmente poseen un refuerzo biaxial de 0° y 90° , aunque hay unas especiales con refuerzo triaxial de $0^\circ - 60^\circ - 120^\circ$.

Los hilos de la fibra pueden ser cortados en pequeños trozos de 3 a 50 mm, lo cual estará sujeto a la aplicación deseada y al aparato empleado para cortar. Estos pequeños trozos pueden ser colocados de forma dispersa dentro de la matriz.

3.3.2. Propiedades y características

Distintos tipos de vidrio se utilizan para producir fibra de vidrio. El tipo E fue desarrollado originalmente para el campo de la electrónica. Asimismo, es el tipo de fibra más económico y el más común. Su composición consiste principalmente de sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxido de calcio (CaO). Existe otro tipo, el S, el cual no solo es más costoso sino también se utiliza para composites más avanzados. La fibra de vidrio tipo S posee la mayor resistencia a tensión de las fibras comerciales. Sin embargo el uso de estas fibras en aplicaciones estructurales avanzadas se ve limitado debido a su bajo módulo elástico y alta gravedad específica en comparación con fibras de otros materiales. Por último se cuenta con varios más, como el C, que son utilizados para ciertas aplicaciones especiales, y el AR que posee resistencia al ataque alcalino.

La principal ventaja estructural de la fibra de vidrio es la alta resistencia en la dirección del refuerzo. Sin embargo esta ventaja se encuentra con una serie de problemas provenientes de la baja rigidez, la cual puede resultar en un deslizamiento en corte. Las fibras de vidrio son más fuertes que el acero y no se quema, estira o pudre.

Una de las propiedades inherentes del vidrio como tal es que este tiende a ser muy quebradizo. Sin embargo en la fibra de vidrio el pequeño diámetro de los monofilamentos permite la flexibilidad de los hilos, a pesar de lo quebradizo que es el propio vidrio.

La fuerza del vidrio usualmente se ensaya para las fibras vírgenes, las cuales son aquellas que recién se han fabricado. Las fibras más frescas y delgadas son las más fuertes debido a que las fibras delgadas son más dúctiles. Mientras más se estire la superficie, mayor resulta la tenacidad. Debido a que el vidrio posee una estructura amorfa, las propiedades son las mismas a lo largo y a lo ancho de la fibra. La humedad presenta un factor importante para el esfuerzo a tensión. Asimismo, la humedad es fácilmente absorbida y es un factor despreciable, por lo tanto las moléculas de agua son retenidas en la superficie del material y pueden empeorar fisuras microscópicas y defectos en la superficie, así como disminuir la tenacidad.

La fibra de vidrio posee una gravedad específica más alta (2.5) y un menor módulo (70 GPa). Sin embargo son mucho más económicas que las demás fibras consideradas de alta resistencia.

Tabla II. Propiedades de la fibra de vidrio.

Fibra	Resistencia a tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Gravedad específica	Diámetro de la fibra (µm)
Tipo E	3450	72	2.54	7.0
Tipo S	4820	85	2.49	10.0

Fuente: Othmer, Kirk, **Concise Encyclopedia of Chemical Technology**. Pág. 309

En los años recientes fue creada la fibra de vidrio tipo AR, la cual posee la resistencia a compuestos alcalinos con una resistencia a tensión y módulo de elasticidad similar al tipo E. Esto se debe al óxido de circonio como un material acoplante incluido en la composición de la fibra y fue creado principalmente para reforzar el cemento ya que dichos componentes alcalinos se ven presentes durante la hidratación y el secado. Está claro que las fibras tipo E sufren cierto deterioro en su superficie debido al ataque químico de los alcalinos, pero esto no solo es poco apreciable sino también puede mejorar la interface fibra-matriz al crear una mejor adherencia debido a una superficie microscópicamente rugosa. Sin embargo, la fibra tipo AR no está disponible en el país y donde se pueda encontrar su precio es más elevado. Asimismo la única substancia que realmente ataca el vidrio es el ácido fluorhídrico, el cual es muy poco probable que entre en contacto con las fibras de vidrio cubiertas con cemento.

6.3.3. Usos

La fibra de vidrio ha tenido un uso extenso entre los plásticos, mediante la combinación y mezcla con resinas que tienen un fraguado térmico, también llamados termofijos. Los plásticos reforzados con fibra de vidrio son muy resistentes y ligeros. Entre los usos más cotidianos que se le ha dado a la fibra de vidrio, debido a la versatilidad en la fabricación y moldeabilidad, es en la fabricación de artesas para baños, jacuzzis, parachoques y piezas de autos, carcasas de barcos, etc. Aproximadamente el 90% de los barcos y yates de recreación y el 40% de las cañas de pescar están hechos con fibra de vidrio.

Mediante el uso de la resina como matriz adecuada, los trozos largos o las fibras largas y continuas se pueden unir sin tejer para formar un tapete que se comportaría como un intermedio entre las fibras cortas dispersas y la tela propiamente tejida.

La fibra de vidrio también se usa como aislamiento eléctrico y térmico. Cuando se utiliza en grandes cantidades sirve para fabricar filtros de aire y para aislar el calor y el sonido.

Se ha utilizado para fabricar repellos estructurales y ahora es utilizado para fabricar un fibrocemento como se encuentra en este trabajo. Entre las razones por la cual se utilizó la fibra de vidrio en este trabajo son las siguientes:

- La fibra de vidrio es accesible y costeable, así como disponible.
- No presenta los peligros a la salud del asbesto, sin embargo retiene varias de las propiedades que hacían a este material apto para este uso.
- Es un buen aislante térmico.
- El vidrio tiene una estructura amorfa, por lo tanto sus propiedades son iguales tanto a lo largo de la fibra como a través de la fibra debido a la falta de regularidad en el ordenamiento de sus partículas.

- En comparación con la fibra de carbono, la cual es muy costosa, la fibra de vidrio posee una resistencia a tensión parecida (Ver Tabla I y Tabla II).
- A diferencia de la celulosa, posee resistencia a los agentes atmosféricos y ambientales ni sufren degradación alguna.

4. PROCEDIMIENTO DE MEZCLAS

4.1. Determinación del largo de la fibra

La determinación del largo de la fibra fue uno de los parámetros de control que se mantuvieron constantes para todas las mezclas de manera que la diferencia de longitudes no fuera un factor influyente en la resistencia de las distintas probetas.

El proceso de mezclado es una de las razones por la cual se tiende a reducir la longitud de los trozos de fibras utilizadas, ya que mientras más corto más manejable será la mezcla y mejor distribuidas estarán dentro de la matriz. Sin embargo si la longitud de la fibra resulta demasiado corta, el refuerzo resulta insignificante ya que prácticamente no ocurre transferencia de esfuerzo de la matriz hacia estos pequeños segmentos de fibra y la fibra llega a actuar como simple relleno.

Previamente se ha mencionado que una definición de fibra requiere que la longitud de la misma sea por lo menos 100 veces su diámetro, lo cual se fijará como el valor mínimo de longitud que deberá poseer cada fibra. Luego para averiguar el diámetro, se tomaron medidas de un muestreo de fibras con un micrómetro con precisión de milésimas de pulgada (1×10^{-3} plg). El micrómetro utilizado y los resultados se muestran a continuación.

Figura 6. Micrómetro utilizado para medir el diámetro de las fibras.

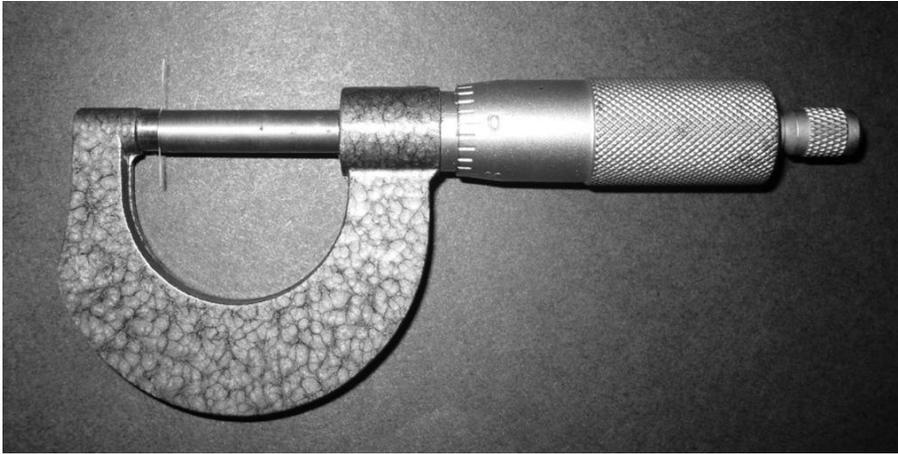


Tabla III. Muestreo de diámetros de las fibras de vidrio.

Diámetros en 1×10^{-3} plg									
2	1	2	2	1	1	0.5	0.5	0.5	2

De acuerdo a los datos anteriores, se procede a calcular el diámetro promedio de las fibras del muestreo.

$$d_f = \frac{2 + 1 + 2 + 2 + 1 + 1 + 0.5 + 0.5 + 0.5 + 2}{10} = 1.25 \times 10^{-3} \text{plg}$$

$$d_f = 1.25 \times 10^{-3} \text{plg} \times \frac{25.4 \text{ mm}}{1 \text{ plg}} = 0.03175 \text{ mm}$$

Tomando la mínima relación entre el largo y el diámetro de una fibra, se calcula la longitud mínima que debe poseer.

$$l_{f \min} = 100d_f = 100(0.03175 \text{ mm}) = 3.175 \text{ mm}$$

La longitud obtenida es relativamente pequeña. Debido a que se necesitaba una amplia cantidad de fibra para realizar todas las probetas de ensayo, la fibra fue comprada, cortada en segmentos con una máquina especial utilizada para este propósito. Sin embargo la longitud mínima está limitada a la disponibilidad de longitudes que se ofrecen en el mercado. En última instancia, dicha longitud está condicionada por la longitud más pequeña que el aparato pueda seccionar, de manera que se pidió lo más corto posible. Asimismo, se tomó un muestreo para medir las longitudes de las fibras obtenidas.

Figura 7. Longitudes de las fibras.

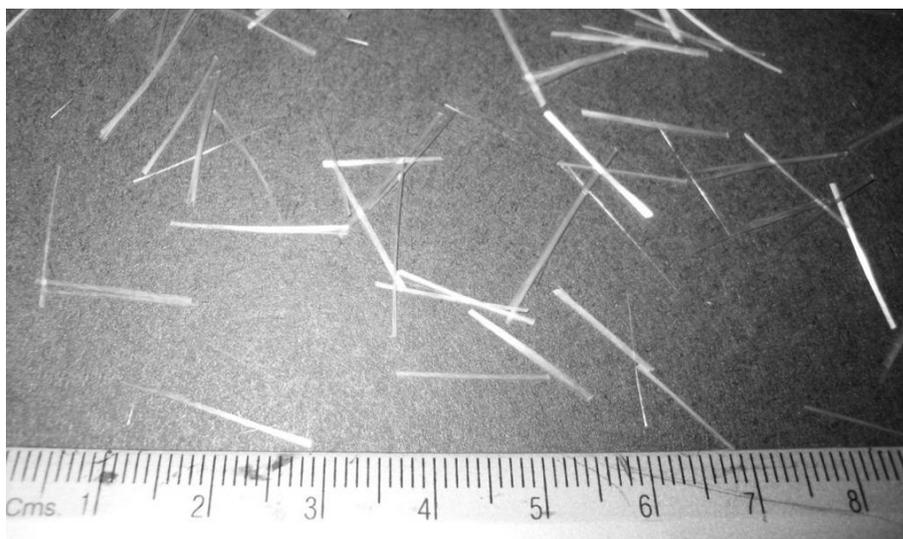


Tabla IV. Muestreo de longitudes de las fibras de vidrio.

Longitudes en milímetros									
18	15	17	17.5	18	15	17	19	14	19

De acuerdo a los datos anteriores, se procede a calcular la longitud promedio de las fibras del muestreo.

$$l_f = \frac{18 + 15 + 17 + 17.5 + 18 + 15 + 17 + 19 + 14 + 19}{10} = 17.25 \text{ mm}$$

Por último, se procede a calcular la relación longitud-diámetro con que se trabajaron las muestras.

$$Rel\ l_f/d_f = \frac{17.25 \text{ mm}}{0.03175 \text{ mm}} = 543.31$$

4.2. Determinación de las proporciones fibra-cemento

Las distintas proporciones para las mezclas se realizaron de tal forma que se permita observar la respuesta inmediata a una cantidad mínima de fibra agregada. Simultáneamente, se realizaron unas mezclas con un orden de magnitud arriba de las cantidades mínimas de fibra para observar si existe alguna relación en la mejora de las propiedades mecánicas con respecto a las cantidades inferiores. A fines de tener un parámetro de comparación, se mantuvo una mezcla de control a la cual no fue adicionada la fibra.

Debido a que el objetivo de la investigación es evaluar el comportamiento del cemento con la fibra de vidrio, se consideró utilizar una cantidad mínima de agregado fino de manera que este ayude a evitar fisuras, sobre todo en la mezcla de control al no poseer fibras. Esta cantidad de arena coincide en una relación arena-cemento de 0.25, lo cual se mantuvo para todas las mezclas. Prácticamente se trata de evaluar el cemento empleándose una cantidad de arena reducida. La arena también reduciría la densidad final del composite final ya que posee un peso unitario inferior al cemento y la fibra. El peso unitario seco (PUS) de la arena de río utilizada, se calculó pesando la cantidad de arena necesaria que ocupara un volumen de 100 cm^3 . Los resultados fueron los siguientes:

Tabla V. Resultados del peso unitario seco de la arena.

	Peso (g)	Volumen (cm³)	PUS (g/cm³)
1	137.49	100	1.375
2	136.41	100	1.364
3	137.93	100	1.379

$$PUS_{ar} = \frac{1.375 + 1.364 + 1.379}{3} = 1.373 \frac{g}{cm^3} = 1,373 \frac{kg}{m^3}$$

La relación agua-cemento fue controlada de manera apropiada para dar la resistencia de diseño al cemento y también mantenga una consistencia manejable de la mezcla. Inicialmente, se tenía contemplada una relación agua-cemento de 0.6 para lograr una resistencia de 4000 psi (ver Figura 4); sin embargo se pudo observar que debido a la gran cantidad de cemento en comparación con la poca cantidad de agregado, el agua resultaba excesiva y daba como resultado una pasta muy diluida. Intentando con cantidades de agua menores, la pasta obtuvo una consistencia normal y adecuada al mezclar con una relación agua-cemento de 0.4. Esta nueva cantidad de agua se mantuvo para todas las mezclas y daría una resistencia nominal de 5500 psi (ver Figura 4) a compresión para la muestra de control.

Una vez se determinó la relación de la cantidad de arena y agua dentro de la mezcla, se procedió a establecer las proporciones fibra-cemento con los que se trabajo. Un parámetro se obtuvo del artículo acerca del “Surface Bonding” ya que indica el tipo de fibra, longitud y las proporciones de los elementos utilizados en la mezcla. Se menciona el empleo de fibra de vidrio tipo E cortada en trozos de media pulgada (aproximadamente 13 mm). De acuerdo a la tabla de ingredientes posee un 78% de cemento y un 4% de fibra de vidrio como se muestra a continuación.

Tabla VI. Componentes y proporciones del “Surface Bonding”.

Ingrediente	Porcentaje	Libras
Cemento	78	19.5
Cal	15	3.75
Estearato de calcio	1	0.25
Fibra de vidrio	4	1
Cloruro de Calcio	2	0.5
TOTAL	100	25

Fuente: Haynes, Jr. Carl; Simmns, J.W., **Construction with Surface Bonding**,

Pág. 15

Haciendo la relación directa entre estos dos componentes se obtiene una relación de aproximadamente 5% fibra de vidrio en comparación con el cemento.

$$Rel \frac{Fibra}{Cemento} = \frac{4}{78} * 100 \approx 5\%$$

De la lista de ingredientes se pueden observar unos aditivos: el estearato de calcio lo utilizan para hacer la mezcla impermeable y el cloruro de calcio lo utilizan para poder acelerar el proceso de mezclado y da como resultado una superficie más dura.

Con este dato ya se obtenía una proporción y un posible máximo para las mezclas. Sin embargo, debido a que no se utilizó aditivo para que la mezcla obtenga una consistencia más manejable, este porcentaje posteriormente resultó un poco alto. Las razones por la cual se justifican las proporciones de las fibras en la mezcla están sujetas al costo, debido a que la fibra es el ingrediente más caro, rendimiento y la procesabilidad ya que esto determinaría la facilidad de hacer la mezcla. Tomando esto en cuenta se plantearon proporciones iniciales que contenían los siguientes porcentajes de fibra con respecto al peso del cemento: 0%, 0.1%, 0.5%, 1%, 2.5% y 5%. Sin embargo cuando se elaboró la mezcla con 2.5% se pudo notar que la procesabilidad reducía notablemente ya que las fibras enlazaban firmemente la mezcla. Esto también dio lugar a la formación de grumos dentro de los cuales se creaban vacíos donde la fibra impedía que el agua llegara al cemento. El mezclado simplemente resultó complicado pero no imposible, sin embargo no se podía pensar en un incremento en la cantidad de la fibra de la mezcla sin el uso de un aditivo plastificante y tampoco se podía agregar más agua ya que esto variaría la relación agua-cemento de la mezcla y por ende afecta la resistencia. A raíz de esto se decidió fijar el 2.5% como el porcentaje más alto descartando el porcentaje de 5% y para tener una mezcla un orden de magnitud menor al porcentaje más alto se utilizó el 0.25% de fibra en relación a la cantidad de cemento.

A fin de simplificar la explicación, se le denominará a las mezclas de acuerdo al porcentaje de fibra en dicha mezcla. Por ejemplo, se referirá como mezcla de 1% a la mezcla que contiene el 1% del peso del cemento en fibra. La excepción será la mezcla denominada “control” ya que esta se sobrentiende que posee 0% fibra. De esta misma manera se identificaron las probetas de ensayo. A continuación se muestra una tabla con las proporciones finales para el diseño de las mezclas.

Tabla VII. Proporciones de los diseños de mezclas.

Mezcla	Cemento	Arena	Fibra	Agua
Control	1	0.25	0.0	0.4
0.10%	1	0.25	0.001	0.4
0.25%	1	0.25	0.0025	0.4
0.5%	1	0.25	0.005	0.4
1.0%	1	0.25	0.01	0.4
2.5%	1	0.25	0.025	0.4

4.3. Elaboración de probetas de ensayo

El proceso fundamental consistió en la realización de la mezcla, colocación en moldes, fraguado, desmoldeo y curado. Para la elaboración de las probetas, se elaboró un cronograma de manera que las fechas importantes tales como el día de desencofrado y los ensayos a siete y 28 días tomarán lugar en un día hábil. Asimismo, en lo posible se trato de juntar la fecha de desencofrado de mezclas anteriores con la fecha de la elaboración de nuevas mezclas. Se puede observar que los pares de diferencia de magnitud se elaboraron el mismo día para que el ensayo comparativo se diera lugar en un mismo día.

Tabla VIII. Cronograma de elaboración de mezclas, desencofrado y ensayos.

Mezcla	Elaboración de mezcla	Desencofrado (3er día)	Ensayos a 7 días	Ensayos a 28 días
Control	vie 21 agosto	lun 24 agosto	vie 28 agosto	vie 18 sept.
0.10%	lun 24 agosto	jue 27 agosto	lun 31 agosto	lun 21 sept.
0.25%	vie 28 agosto	lun 31 agosto	vie 04 sept.	vie 25 sept.
0.5%	vie 21 agosto	lun 24 agosto	vie 28 agosto	vie 18 sept.
1.0%	lun 24 agosto	jue 27 agosto	lun 31 agosto	lun 21 sept.
2.5%	vie 28 agosto	lun 31 agosto	vie 04 sept.	vie 25 sept.

Previo a la realización de las mezclas para las probetas de ensayo se prepararon los componentes. Las fibras poseen un apresto de poliestireno para que se adhieran fácilmente a la resina polimérica y mejorar dicha interface. Sin embargo este apresto no ayuda mucho cuando la matriz es cemento y por lo tanto se necesitaba removerlo para garantizar una mejor interface entre el cemento y la fibra de vidrio. Esto se logró mediante el lavado de las fibras utilizando gasolina como solvente y luego secándolas sobre papel de manera que este absorba la gasolina con el apresto removido, dejando las fibras aptas para el uso indicado. Asimismo, la arena de río utilizada se preparó no solo al ser cernida sino también se lavó cuatro veces con agua para evitar impurezas y contaminación orgánica y de jabón.

Para evitar en lo posible el error humano durante el mezclado, se utilizó una mezcladora en vez de una batea para mezclado manual de manera que se puede proveer uniformidad y consistencia para toda la pasta durante el amasado.

Figura 8. Máquina utilizada para elaborar las mezclas.



El proceso de la elaboración de cada una de las mezclas se puede resumir en los siguientes pasos. Primero se comenzó pesando el cemento, arena y las fibras, y también se midió la cantidad de agua necesaria de acuerdo a la Tabla VII. El cemento utilizado fue UGC de 4000 psi y el agua potable utilizada provino de la red de suministro de EMPAGUA.

Figura 9. Ilustración de proporciones reales pesadas para las mezclas. Arriba cemento y arena; abajo fibra al 2.5%.



Luego se cargo parte del cemento, arena y fibra para empezar a mezclar los componentes en estado seco. Para mejores resultados, en la mezcla se agrego una porción de agua al inicio y el resto se fue agregando en forma simultánea con el mezclado. De la misma manera, la fibra se agrega gradualmente a manera de evitar las concentraciones de fibras y obtener mayor uniformidad.

Figura 10. A) Mezclado del cemento y arena seca con fibra. B) Añadiendo agua a la mezcla.



A)



B)

Por consiguiente, se amasa la mezcla durante cinco minutos hasta obtener una consistencia homogénea. Durante el mezclado, las fibras quedan distribuidas en todas las direcciones del elemento siendo un refuerzo multidireccional lo cual homogeniza la resistencia para que sea apta en cualquier dirección que se le aplique la carga, otorgando un comportamiento isotrópico. Esto evita que se tenga una orientación desfavorable en un solo sentido. Asimismo, la distribución de las fibras al azar facilita la colocación o inclusión de las fibras en la mezcla aprovechando que son fibras cortas. Por último se verifica que no hayan quedado grumos o material sin mezclar al fondo o en las orillas del recipiente de la mezcladora y se vuelve a mezclar por un minuto más.

Figura 11. Proceso de mezclado final.



Durante la confección de cada mezcla en particular se pudo observar que la trabajabilidad de la mezcla se ve afectada y disminuye a medida se agrega la cantidad de fibra en la misma. Sin embargo, esta disminución en la trabajabilidad puede ayudar a evitar la segregación de la mezcla para vertidos especiales.

Una vez esta la mezcla lista, se procede con la elaboración de las probetas de ensayo. Para la elaboración de las probetas de ensayo se tomó en cuenta que se estaba trabajando con una mezcla de mortero ya que no se utilizó agregado grueso. Por lo tanto, se utilizaron briquetas de acuerdo a la norma ASTM C 190 para el ensayo de tensión y cubos de acuerdo a la norma ASTM C109 para el ensayo de compresión. En lo que pertenece al ensayo de flexión se crearon unas planchas de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM C 1185, la cual especifica dicho ensayo para planchas de fibrocemento sin asbesto. El proceso en detalle de cada serie de probetas de ensayo se describe en las tres secciones a continuación. Asimismo los siguientes puntos fueron realizados antes y después de la elaboración de las probetas de ensayo, respectivamente.

- Previo a la colocación del mortero dentro de los moldes, estos se preparan con un recubrimiento de aceite mineral para evitar que la mezcla se pegue al molde y facilite la extracción de las probetas.
- Debido a que la resistencia aumenta rápidamente en los primeros días, se mantuvo una humedad adecuada desde el inicio y se conservó de esta manera hasta el día de ensayo para que no exista variación alguna debido al curado. El curado empleado fue el curado normal o estándar en laboratorio y consistió en sumergir las probetas en agua a una temperatura alrededor de $23 \pm 4^{\circ}\text{C}$ en una cámara de humedad.

Figura 12. Cubos y briquetas dentro de la cámara de humedad.



- Asimismo, una vez desencofrada, cada probeta de ensayo fue identificada colocándole el porcentaje de la cantidad de fibra dentro de la mezcla, a excepción la de control que fue denominada control. También se identificó cada probeta perteneciente a una misma mezcla con letras de manera que no se confundiera con los números del porcentaje y así mantener un control del número de probetas.

Figura 13. Probetas de ensayo desencofradas e identificadas.



4.3.1. Tensión

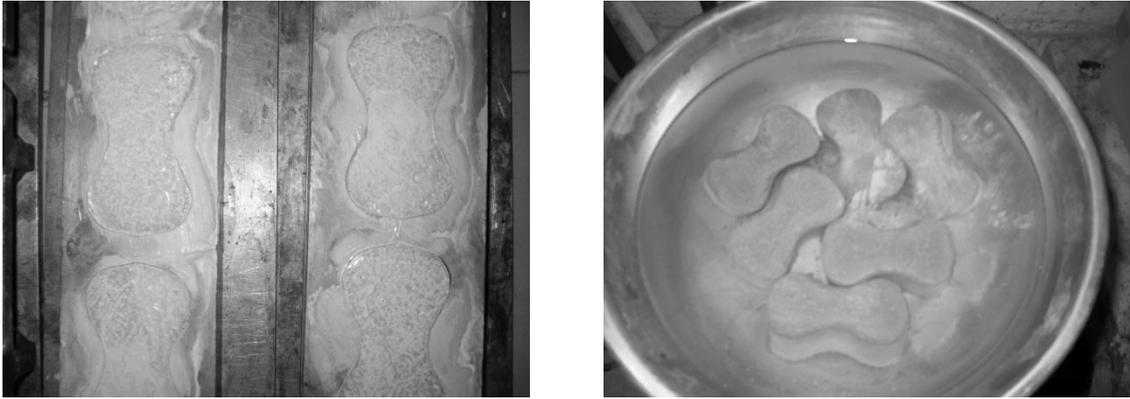
Las probetas para realizar el ensayo a tensión son briquetas de mortero de cemento de acuerdo a la norma ASTM C 190. Estas briquetas poseen una sección transversal central de una pulgada cuadrada. Los extremos son de sección mayor de manera que se puedan sujetar de las grapas de la máquina de ensayo. Los moldes utilizados fueron los siguientes:

Figura 14. Moldes especiales para briquetas.



Se procedió a llenar los moldes con mortero en dos fases, llegando hasta la mitad del molde. En cada fase se presionó el mortero doce veces por capa para cada molde con un apisonador especial de hule de dureza Shore 88. Esto acomoda la mezcla uniformemente dentro del molde, que debe tener una dureza Brinell 55, y minimiza los espacios donde queda aire, logrando una mejor compactación. Una vez llenos los moldes, se nivela y se alisa la superficie de los mismos. Se deja fraguar la mezcla dentro de los moldes por 24 horas. Luego fueron extraídas las probetas de ensayo desatornillando sus moldes para ser identificadas y colocadas en agua dentro de una cámara de humedad hasta el día del ensayo.

Figura15. A) Briquetas terminadas dentro de los moldes. B) Briquetas en agua de curado.



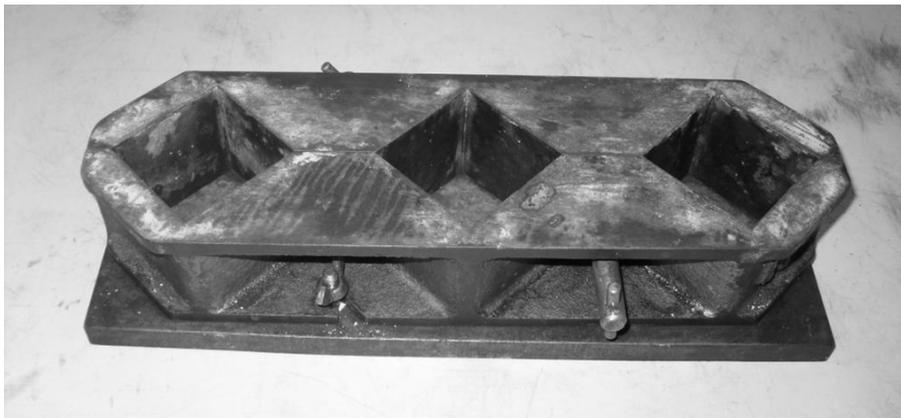
A)

B)

4.3.2. Compresión

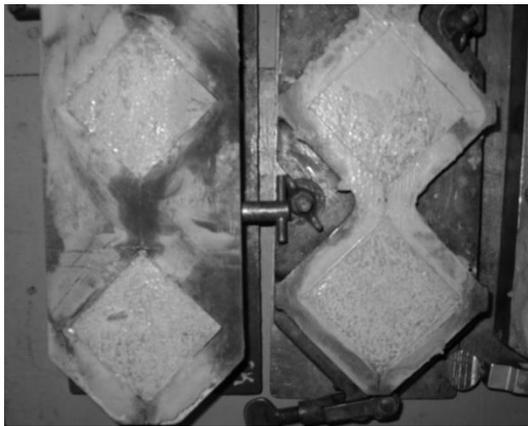
Las probetas para realizar el ensayo a compresión fueron unos cubos de mortero de cemento de dos pulgadas de lado de acuerdo a la norma ASTM C 109. Los moldes utilizados fueron los siguientes:

Figura 16. Moldes especiales para cubos.



Para proceder a llenar los moldes cúbicos se coloca la mezcla en dos capas. Cada capa es apisonada con un apisonador especial de hule, de dureza Shore 88, el cual cumple la misma función de acomodar la mezcla y reducir los espacios de vacío. Sin embargo, este apisonado se realiza 32 veces y en cuatro ciclos para cada capa de acuerdo a la norma. Una vez se llenan los moldes, de dureza Brinell 55, se nivela y se alisa la superficie de los mismos. Se dejó fraguar la mezcla dentro de los moldes por 24 horas. Luego fueron extraídos los cubos desatornillando sus moldes para ser identificadas y colocadas en agua dentro de una cámara de humedad hasta el día del ensayo.

Figura17. A) Cubos terminados dentro de los moldes. B) Cubos y briquetas en agua de curado.



A)



B)

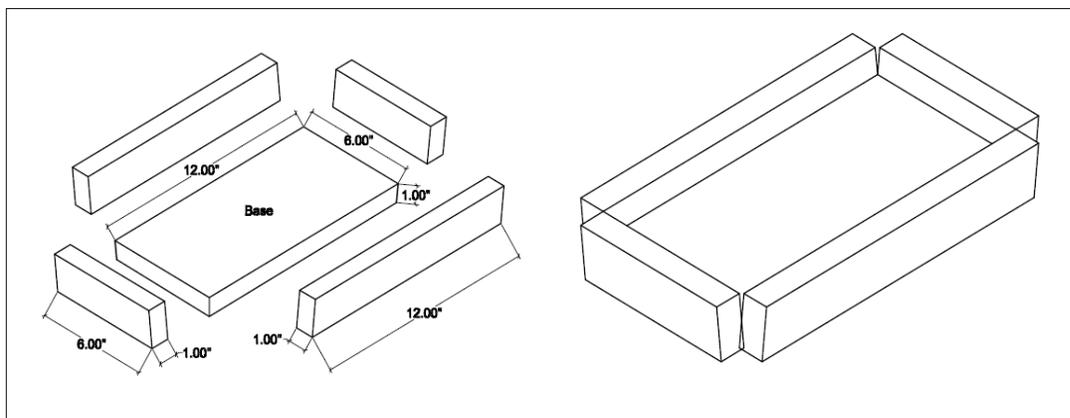
4.3.3. Flexión

Las probetas empleadas para el ensayo de flexión fueron planchas especificadas de acuerdo a las medidas de la norma ASTM C 1185 ya que los productos de este tipo hoy en día son manufacturados bajo esta norma⁴.

De acuerdo a la norma, los especímenes de ensayo deben tener un ancho de $6 \pm 1/16$ plg (152 ± 1.6 mm) y un largo de $12 \pm 1/16$ plg (305 ± 1.6 mm). El espesor de la misma queda a discreción del fabricante. Por lo tanto se consideró un espesor de 17 mm ($11/16$ plg), lo cual es el máximo espesor de las planchas comerciales según el Catálogo Internacional Plycem que se encuentra en el Centro de Información a la Construcción (CICON) de la Facultad de Ingeniería. De esta manera se obtiene esa medida como comparación y también se garantiza un espesor considerable para que la máquina pueda lograr lecturas confiables. A pesar que las planchas comerciales se manejan de distintos espesores, se posee un único dato del módulo de ruptura. Esto se debe a que la resistencia es inherente de la sustancia, o sea que es una propiedad intrínseca del material. El módulo de ruptura final no cambiará al cambiar las dimensiones; éste sólo se ajustaría pues las ecuaciones enlazan todas las medidas. Por ejemplo, si se duplica el espesor, en teoría, se duplicaría el valor de la carga brindando el mismo dato del módulo de ruptura. Sin embargo, el momento último es independiente del espesor.

Se tiene que aclarar que en la norma menciona que las planchas a ensayar deben ser secciones cortadas de una plancha mucho mayor. Sin embargo, no se cuenta con el equipo necesario para garantizar este procedimiento. A razón de este inconveniente, se propuso la fabricación de formaletas hechas de madera que garanticen las medidas de cada plancha. Los detalles y los planos fueron llevados a una carpintería donde las fabricaron a la medida con cedro cepillado.

Figura 18. Detalles de la formaleta para las planchas.



De manera que se pudiera extraer la muestra del molde, no solo fue cepillada la superficie del mismo sino también se realizó un bisel mínimo para que la plancha pudiera deslizarse hacia afuera fácilmente. Este es el mismo principio que se utiliza en las bandejas de los cubos de hielo. Se escogió un bisel de cinco grados ya que este es el mínimo ángulo que la sierra puede cortar con precisión. El resultado final se encuentra en la Figura 20.

Figura 19. Detalle del bisel de las formaletas.

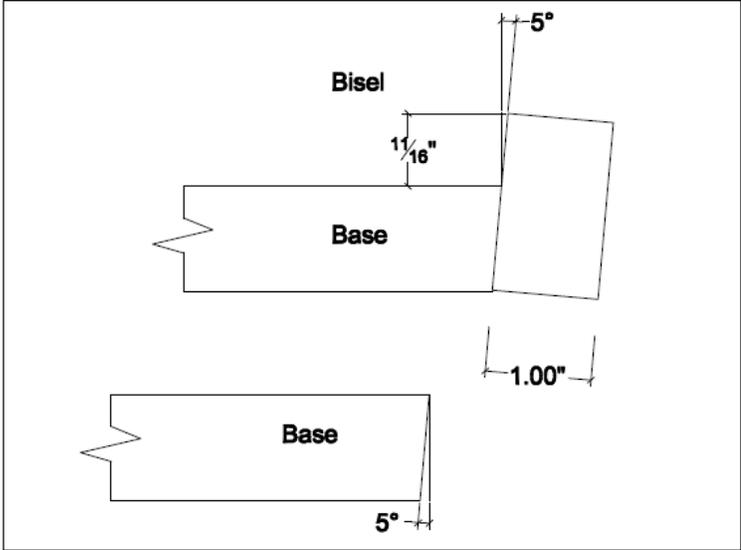


Figura 20. Formaletas listas para verter la mezcla.

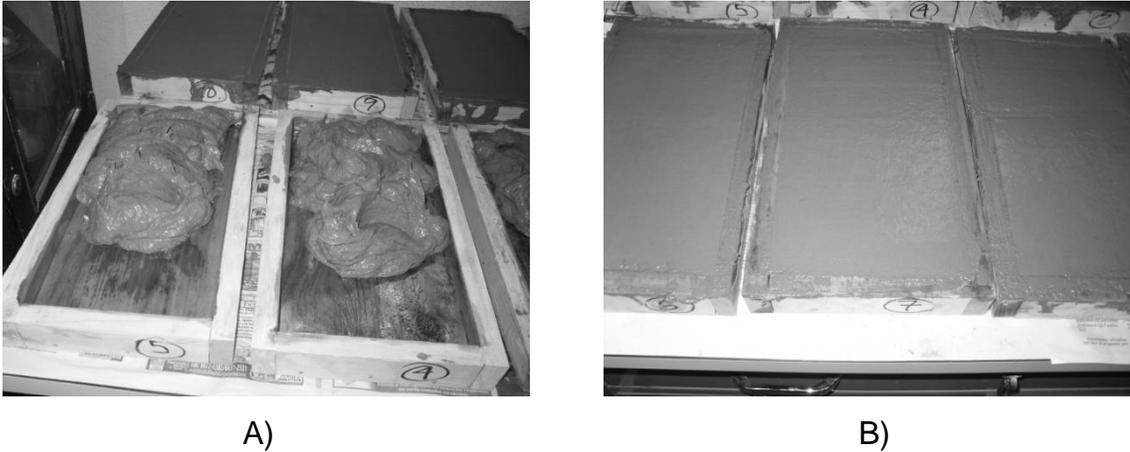


Antes de poder llenar los moldes, estos fueron rotulados del uno al diez siendo cinco planchas para cada mezcla confeccionada ese día. Luego con cada mezcla se procedió a llenar los moldes de un extremo a otro. La pasta fue apisonada y acomodada mediante el uso de un apisonador especial de hule de manera que se redujeran los espacios vacíos y garantice una buena compactación. A medida que fue incrementando la cantidad de fibra en las mezclas también incremento la cantidad de trabajo necesario para acomodar la mezcla dentro del molde. Un detalle muy claro de la presencia y consistencia que le da la fibra a la mezcla puede ser apreciado en la Figura 21. Una vez llenos los moldes, el acabado final se dio con planchas de alisado para garantizar el espesor de 17 mm al borde del molde.

Figura 21. Detalle de mezcla con 1% fibra.



Figura 22. A) Proceso de llenado de moldes para las planchas. B) Planchas listas y alisadas.



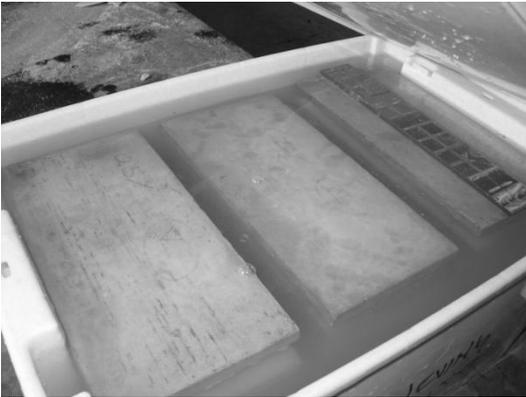
La mezcla se dejó fraguar dentro de los moldes por 24 horas. Luego las planchas fueron extraídas dándole vuelta al molde y golpeando suavemente con un martillo de hule para facilitar la extracción. El resultado de una de las planchas recién desencofrada puede ser apreciado en la siguiente figura.

Figura 23. Plancha extraída del molde.



Posteriormente las planchas permanecieron almacenadas en un recipiente lleno de agua saturada con cal hasta el día del ensayo.

Figura 24. Recipiente de curado para las planchas.



5. PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS

Para obtener la resistencia y rigidez de un material, este debe ser sometido a una serie de ensayos mecánicos. Los datos provenientes de los ensayos de composites pueden variar ligeramente debido a las variaciones en las propiedades de sus componentes, la orientación de las fibras, los parámetros de procesos, las técnicas de procesamiento y la proporción de los componentes. De todas estas variaciones, la última es la más importante para esta investigación ya que se evalúa el comportamiento del composite sujeto a las distintas cantidades de fibra que se encuentren en la respectiva mezcla.

La finalidad de los ensayos para esta investigación es observar la incidencia que los distintos porcentajes de fibra, tienen sobre las propiedades mecánicas del composite.

Los ensayos estandarizados de compresión y flexión, a diferencia del ensayo a tensión que posee la máquina específica, se llevaron a cabo en la máquina universal. Esta máquina fue equipada con los accesorios apropiados dependiendo del tipo de ensayo. La velocidad a la que se aplica la carga es un factor que afecta las propiedades mecánicas y para esto la máquina posee un mando de ajuste.

Figura 25. Máquina Universal.



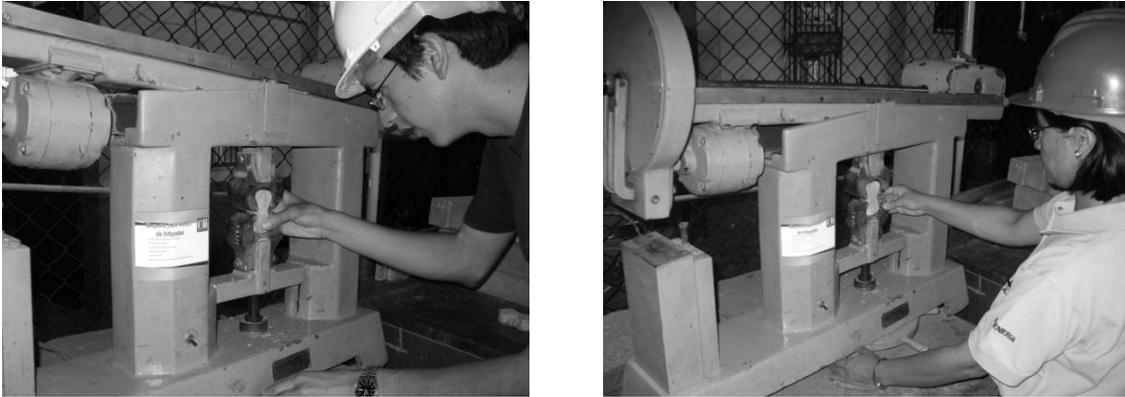
Los ensayos de compresión y tensión se acercan más a la evaluación de las propiedades mecánicas fundamentales para el diseño. Asimismo no necesariamente demuestran el desempeño de los materiales bajo todas las condiciones de carga. Es por esta razón que se incluye el ensayo a flexión ya que el material estará sujeto a ambos esfuerzo y se prevé utilizar en techos o posiblemente como losas.

5.1. Tensión

Como se mencionó en el capítulo anterior, para el ensayo a tensión se utilizaron las briquetas. Sobre su sección central, la deformación y la fuerza se aplican uniformemente. El ensayo a tensión demostrará claramente la influencia de la fibra sobre el comportamiento mecánico del composite ya que su finalidad es trabajar a tensión.

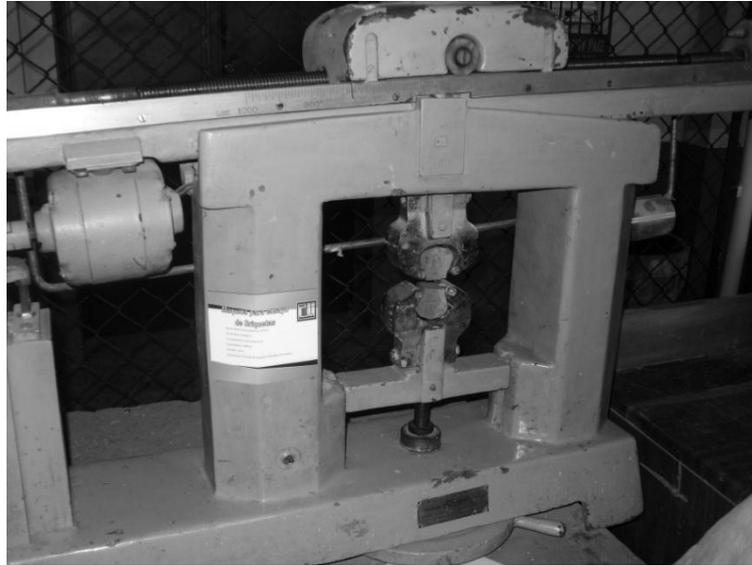
Las briquetas se extraen del agua de curado y se seca la superficie de las mismas. Se prepara la máquina de ensayo ajustándola en cero. Esta máquina en particular posee la lectura de una carga máxima de mil libras con una precisión de ± 5 libras. La biqueta se coloca dentro de las abrazaderas, sujeta de los extremos con la sección transversal mayor. Luego se ajusta la biqueta girando el disco inferior de la máquina hasta que se encuentre posicionada firmemente. La porción central del tramo de la biqueta posee una sección menor que en los extremos para provocar que la falla ocurra en la sección donde los esfuerzos no se ven afectados por los dispositivos de anclaje.

Figura 26. Colocación de briquetas en la máquina de ensayo.



Una vez esta colocada la briqueta, se enciende la máquina la cual aplica la carga a razón de 600 lb/min a medida que la pieza móvil superior se mueve de un extremo a otro. Debido a que este es un ensayo de tensión simple, el objetivo es separar los dos extremos de la pieza hasta el punto de ruptura. Una vez ocurre la ruptura, la máquina lo detecta y se detiene en ese instante marcando la carga última en libras que soporto la briqueta. Por último, se anotaron las cargas de falla de cada una de las probetas ensayadas correspondientes a cada mezcla.

Figura 27. Briqueta fallada al concluir el ensayo tensorial.



5.2. Compresión

El ensayo a compresión es el que se emplea comúnmente para definir la calidad del concreto o mortero. En este ensayo se somete la pieza del material a una carga en los extremos, la cual produce una acción aplastante. Los materiales rígidos y frágiles como el concreto y mortero se fracturan bajo esfuerzos a compresión.

Para realizar este ensayo, se utilizó la Máquina Universal. Primero se preparó colocando una placa en forma de disco en el cabezal móvil de manera que este paralela a la placa fija que se encuentra en la base. Luego se ajustó dicha máquina para que tuviera una lectura máxima de 12,000 kilogramos con una precisión de ± 10 kilogramos. Se procede a sacar los cubos del agua para secarlos y limpiar la superficie de los mismos. Al momento de colocar los cubos en la máquina de ensayo, se escogen las caras lisas y planas para que estén en contacto con la placa inferior y superior. Los extremos de los cubos deben ser planos para no causar concentraciones de esfuerzos y garantizar una distribución de la carga en toda la superficie del cubo. Asimismo, es importante que antes de cada prueba se limpie las superficies de contacto tanto de los cubos como de las placas para evitar las concentraciones de esfuerzos previamente mencionadas. Luego se centran y se alinean los cubos sobre la placa inferior. A medida que la placa superior descende y entra en contacto con el cubo, se debe asentar de manera que se obtenga un apoyo uniforme.

Figura 28. Detalle de la colocación de los cubos en la máquina de ensayo.



Una vez todos los ajustes han sido realizados, los cubos se comprimen entre placas paralelas aplicando la carga con velocidad constante tal que la carga máxima se alcance en no menos de veinte segundos y no más de ochenta segundos. Esta carga máxima ocurre cuando se ocasiona la falla y es necesario estar pendientes a la lectura que se registra en la máquina ya que al fallar el material, la manecilla desciende. Por último, se registra y se anota la carga máxima obtenida.

Figura 29. Detalle de cubos fallados a compresión.



5.3. Flexión

En muchos elementos estructurales la función primaria es resistir cargas que causan flexión. El ensayo a flexión ayuda a determinar los límites de estabilidad estructurales y el módulo de ruptura puede utilizarse como un criterio o parámetro de calidad en los ensayos de control. Una pieza está en flexión cuando las fuerzas actuantes sobre la misma tienden a inducir esfuerzos compresivos en un extremo de la sección transversal, con respecto al eje neutro, y esfuerzos tensoriales en la parte restante. Asimismo, el ensayo a flexión generalmente es más conveniente que el ensayo a tensión para evaluar la rigidez de los materiales rígidos, pero un tanto menos conveniente para medidas de resistencia.

Se utilizó un sistema simplemente apoyado con dos soportes en los extremos y una carga aplicada en el centro. Estos ensayos se realizaron en la máquina universal donde se adaptó con apoyos colocados sobre la base y el bloque de carga es sujetado al cabezal movable. Previo a la realización del ensayo, se midió la distancia del claro entre apoyos. Según la norma la distancia debe ser de $10 \pm 1/16$ plg (25.4 ± 1.6 mm) y en el laboratorio la distancia fue de 22.4 mm debido a que los apoyos ya tienen ranuras para colocarlos en posiciones predeterminadas y esta fue la más cercana a la distancia requerida. Sin embargo, la carga final está en función de la distancia, por lo tanto existe una relación entre ambas y el resultado, en teoría, sería igual si se utilizará la distancia requerida. Asimismo la máquina universal se ajustó para que tuviera una lectura máxima de 3,000 kilogramos con una precisión de ± 2.5 kilogramos.

Como indica la norma ASTM C 1185, las planchas fueron ensayadas instantes después de haber sido extraídas del agua de curado. Para prepararlas, las planchas fueron limpiadas y secadas. Consiguientemente era necesario marcar tanto el centro de cada plancha, ya que aquí será aplicada la carga, como las posiciones de los ejes de los apoyos ubicados a cuatro centímetros de los extremos de las planchas.

$$\frac{30.48 \text{ cm} - 22.4 \text{ cm}}{2} = 4.04 \text{ cm}$$

Figura 30. Identificación de los puntos de carga y apoyo en las planchas.

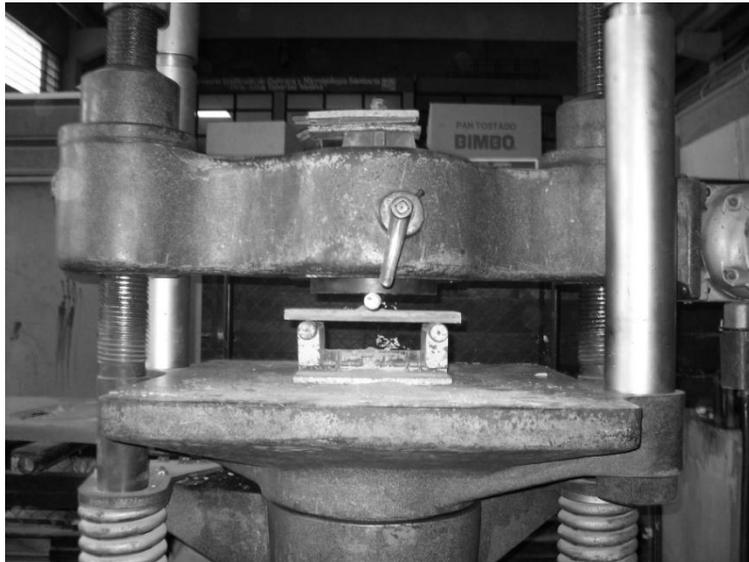


Una vez la plancha ha sido marcada con los puntos de carga y apoyo, se procede a colocarla y centrarla sobre los apoyos en la base de la máquina. Asimismo debido a que la superficie de la barra de metal que transmite la carga central no recae perfectamente sobre toda la superficie de la plancha, se colocó arena para acomodar la barra en el centro y garantizar una distribución equitativa de la carga transmitida a lo largo del centro de la plancha.

Figura 31. Colocación de la plancha sobre los apoyos y la arena sobre el centro de falla.



Figura 32. Montaje del sistema de ensayo a flexión para una plancha.



Al haber situado correctamente la plancha y la barra de carga, se procede a ajustar perfectamente el cabezal móvil superior de la máquina universal para que entre en contacto con la barra de carga. Se necesita ser sumamente cuidadoso ya que un ajuste más allá de lo necesario puede fisurar tempranamente la plancha y por ende dar un resultado inexacto. Una vez todos los ajustes necesarios han sido efectuados, se procede a realizar el ensayo aplicando una carga constante de 150 Kg/min. Por último se anota la carga última registrada por el aparato en el instante antes de la falla.

Figura 33. A) Ajuste del cabezal móvil superior. B) Realización del ensayo a flexión.



A)



B)

Figura 34. Falla típica de las planchas a flexión.



Es necesario aclarar que una particularidad de esta investigación es que no se requiere hacer un ensayo paralelo y otro perpendicular a las fibras ya que el refuerzo es al isotrópico, basta con hacer el ensayo en cualquier dirección.

5.4. Densidad

La determinación de la densidad de un material es muy importante ya que influye en los diseños debido a que el peso es un factor que siempre se debe considerar dentro de los cálculos, en este caso sería como carga muerta. La densidad se reporta en unidad de masa por volumen, comúnmente en gramos por centímetro cúbico o kilogramos por metro cúbico.

Para proceder a realizar los cálculos de la densidad de cada tipo de mezcla se utilizaron como muestras las piezas de las briquetas provenientes del ensayo a tensión. Esto se debe a que su tamaño hace posible que quepa en un vaso de precipitación y también poseen un peso considerable. Debido a que se necesitaba una buena fidelidad se utilizó una balanza electrónica con precisión de ± 0.1 g y una probeta graduada con una precisión de 1 cm^3 .

Figura 35. A) Piezas de briquetas. B) Vaso de precipitación y probeta graduada de 100 cm^3 .



A)



B)

Este común ensayo se llevó a cabo tomando cinco piezas de briquetas para cada tipo de mezcla. Las muestras contenían sólo la humedad del ambiente. Se procedió a pesar cada una de las muestras para luego colocarla dentro del vaso de precipitación vacío con capacidad de 100 cm³. Luego se llenó la probeta graduada hasta los 80 cm³ debido a que esta era la última marca confiable en el vaso de precipitación ya que los 100 cm³ se toman hasta la superficie del mismo. El contenido de la probeta graduada se vertió dentro del vaso de precipitación hasta llegar a la marca de 80 cm³. Se agito levemente el contenido del vaso de precipitación para evitar que se quedaran atrapadas burbujas de aire y si fuera necesario se vertió la cantidad de agua necesaria para llegar otra vez hasta la marca de 80 cm³. El volumen desplazado por la pieza fue la diferencia de agua que quedo dentro de la probeta graduada. Luego este dato se midió y se anoto junto con el peso de cada muestra respectiva.

Figura 36. A) Toma de peso de la muestra. B) Toma del volumen de la muestra.



A)



B)

6. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

6.1. Recopilación de datos y cálculos

La recopilación de datos se llevó a cabo tabulando los resultados obtenidos de los ensayos respectivos tanto a los 7 como a los 28 días para cada mezcla. Por consiguiente, se realizaron los cálculos necesarios que permitieran la evaluación técnica de las propiedades mecánicas con el objetivo de realizar un análisis comparativo de las mezclas elaboradas. Con base a estos cálculos se pudo comprobar la incidencia de la fibra de vidrio sobre el comportamiento de la mezcla final.

6.1.1. Ensayo a tensión

Los resultados de la carga máxima provenientes del ensayo a tensión de las briquetas de mortero a 7 y 28 días fueron los siguientes.

Tabla IX. Resultados del ensayo a tensión (en lb) a 7 días.

Ensayo	Mezcla					
	Control	0.10%	0.25%	0.50%	1.0%	2.5%
1	350	550	400	560	605	505
2	470	520	465	550	570	460
3	460	520	455	530	640	607

Tabla X. Resultados del ensayo a tensión (en lb) a 28 días.

Ensayo	Mezcla					
	Control	0.10%	0.25%	0.50%	1.0%	2.5%
1	540	600	580	640	670	710
2	530	605	540	600	630	660
3	530	570	560	630	750	710

La resistencia a tensión en este ensayo corresponde al esfuerzo máximo necesario para provocar una separación de la briqueta en su sección central. Para calcular el esfuerzo a tensión se utiliza la siguiente ecuación:

$$\sigma_t = \frac{P}{A_b}$$

Donde:

σ_t = esfuerzo a tensión, psi (Kg/cm²)

P = carga máxima, lb (Kg)

A_b = área de la sección central de la briqueta, plg² (cm²)

Los datos de la carga máxima P provienen de la Tabla IX y Tabla X para los 7 y 28 días respectivamente. Asimismo el área de la sección central de la briqueta A_b es de una pulgada cuadrada (1 plg²). A continuación se encuentran los resultados de los esfuerzos promedio para cada mezcla. Se utilizó el factor de conversión de 14.22 psi = 1 Kg/cm².

Tabla XI. Resultados del esfuerzo promedio a tensión a 7 días.

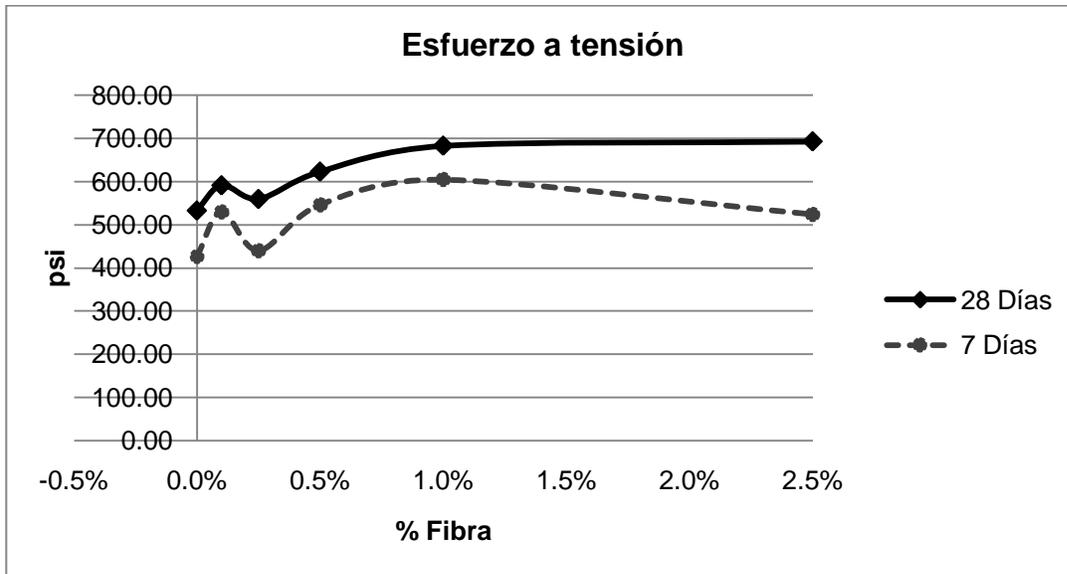
	Mezcla					
	Control	0.10%	0.25%	0.50%	1.0%	2.5%
psi	426.67	530.00	440.00	546.67	605.00	524.00
Kg/cm²	30.01	37.27	30.94	38.45	42.55	36.85

Tabla XII. Resultados del esfuerzo promedio a tensión a 28 días.

	Mezcla					
	Control	0.10%	0.25%	0.50%	1.0%	2.5%
psi	533.33	591.67	560.00	623.33	683.33	693.33
Kg/cm²	37.51	41.61	39.38	43.84	48.06	48.76

Posteriormente los datos fueron graficados para poder analizar la información de manera descriptiva y observar una tendencia en el comportamiento de la mezcla a tensión como resultado de las distintas proporciones de fibra.

Figura 37. Gráfica de los esfuerzos a tensión.



6.1.2. Ensayo a compresión

Los resultados de la carga máxima que soportaron los cubos a compresión a los 7 y 28 días son los siguientes.

Tabla XIII. Resultados del ensayo a compresión (en Kg) a 7 días.

Ensayo	Mezcla					
	Control	0.10%	0.25%	0.50%	1.0%	2.5%
1	6500	6420	6900	5000	5340	5900
2	4500	6650	6600	5500	5850	5600
3	5300	6550	6700	5500	5200	5950

Tabla XIV. Resultados del ensayo a compresión (en Kg) a 28 días.

Ensayo	Mezcla					
	Control	0.10%	0.25%	0.50%	1.0%	2.5%
1	9840	10300	10300	10000	9400	7500
2	9600	11000	10800	10040	8940	8500
3	10840	8500	10600	9700	9980	9100

La resistencia a compresión, para este ensayo, es el esfuerzo aplastante último que soporta el cubo antes que se desintegre, en el instante previo a la falla. Este esfuerzo se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma_c = \frac{P}{A_c}$$

Donde:

σ_c = esfuerzo a compresión, psi (Kg/cm²)

P = carga máxima, lb (Kg)

A_c = área de la cara del cubo, plg² (cm²)

Los datos de la carga máxima P provienen de la Tabla XIII y Tabla XIV para los 7 y 28 días respectivamente. Asimismo el área de la cara del cubo A_c es de cuatro pulgadas cuadradas (4 plg²) ya que este posee aristas de dos pulgadas. A continuación se encuentran los resultados de los esfuerzos promedio para cada mezcla. Se utilizaron los factores de conversión de 0.102 Kg = 0.2248 lb y 14.22 psi = 1 Kg/cm².

Tabla XV. Resultados del esfuerzo promedio a compresión a 7 días.

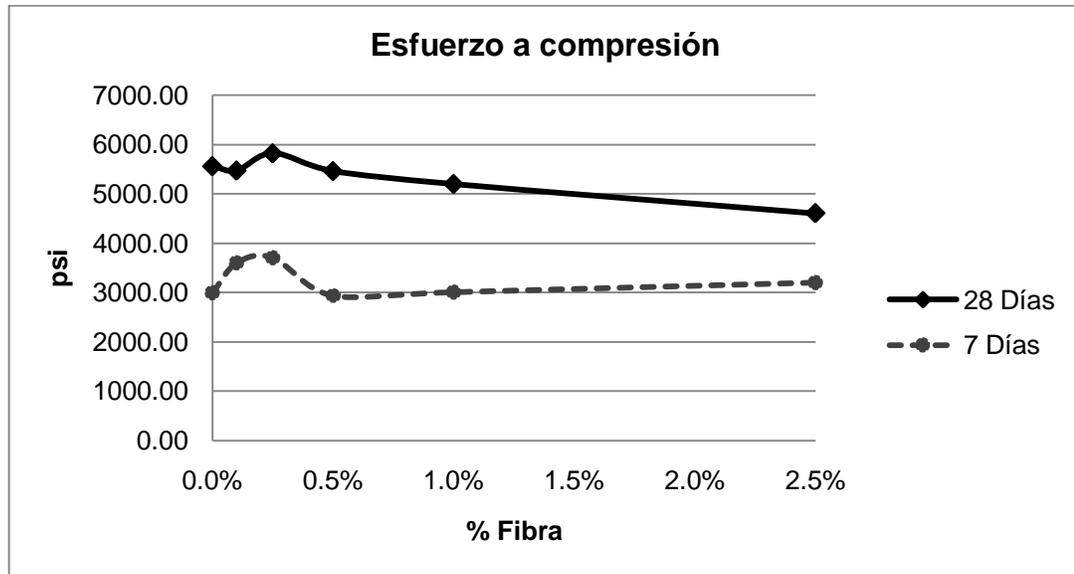
	Mezcla					
	Control	0.10%	0.25%	0.50%	1.0%	2.5%
psi	2993.66	3603.41	3709.93	2938.56	3010.19	3204.87
Kg/cm²	210.54	253.43	260.92	206.67	211.70	225.40

Tabla XVI. Resultados del esfuerzo promedio a compresión a 28 días.

	Mezcla					
	Control	0.10%	0.25%	0.50%	1.0%	2.5%
psi	5561.23	5473.07	5822.03	5462.05	5201.25	4609.87
Kg/cm²	391.12	384.92	409.46	384.14	365.80	324.21

De acuerdo a los datos calculados, se obtiene la siguiente gráfica que describe el comportamiento a compresión del composite sujeto a la variación de la cantidad de la fibra.

Figura 38. Gráfica de los esfuerzos a compresión.



6.1.3. Ensayo a flexión

Los resultados de la carga de ruptura que soportaron las planchas a flexión a los 7 y 28 días son los siguientes. Como se había mencionado anteriormente, debido a la cantidad de planchas disponibles, se realizaron dos ensayos a los 7 días y tres ensayos a los 28 días.

Tabla XVII. Resultados del ensayo a flexión (en Kg) a 7 días.

Ensayo	Mezcla					
	Control	0.10%	0.25%	0.50%	1.0%	2.5%
1	40	65	50	95	55	112
2	47	65	60	90	75	100

Tabla XVIII. Resultados del ensayo a flexión (en Kg) a 28 días.

Ensayo	Mezcla					
	Control	0.10%	0.25%	0.50%	1.0%	2.5%
1	80	85	90	115	115	110
2	110	90	110	80	85	130
3	80	60	85	85	100	110

La resistencia a flexión corresponde al máximo esfuerzo que soporta la plancha en el instante previo a la falla, y ocurre en la fibra extrema de la sección sujeta al momento último donde la carga central es aplicada. Para calcular la resistencia a flexión o módulo de ruptura se utiliza la siguiente ecuación según la norma ASTM C 1185:

$$R = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Donde:

R = módulo de ruptura, psi (MPa)

P = carga máxima, lb (N)

L = longitud del claro, plg (mm)

b = ancho del espécimen, plg (mm)

d = grosor promedio, plg (mm)

Para la realización de los cálculos se utilizaron las dimensiones de las planchas de acuerdo a la Tabla XIX. Asimismo, debido a que la carga está dada en kilogramos, se utilizó el factor de conversión $1 \text{ N} = 0.102 \text{ Kg} = 0.2248 \text{ lb}$.

Tabla XIX. Dimensiones de las planchas.

	mm	plg
<i>L</i>	224	8.8189
<i>b</i>	152.4	6
<i>d</i>	17	0.6693

Tabla XX. Resultados del módulo de ruptura promedio a 7 días.

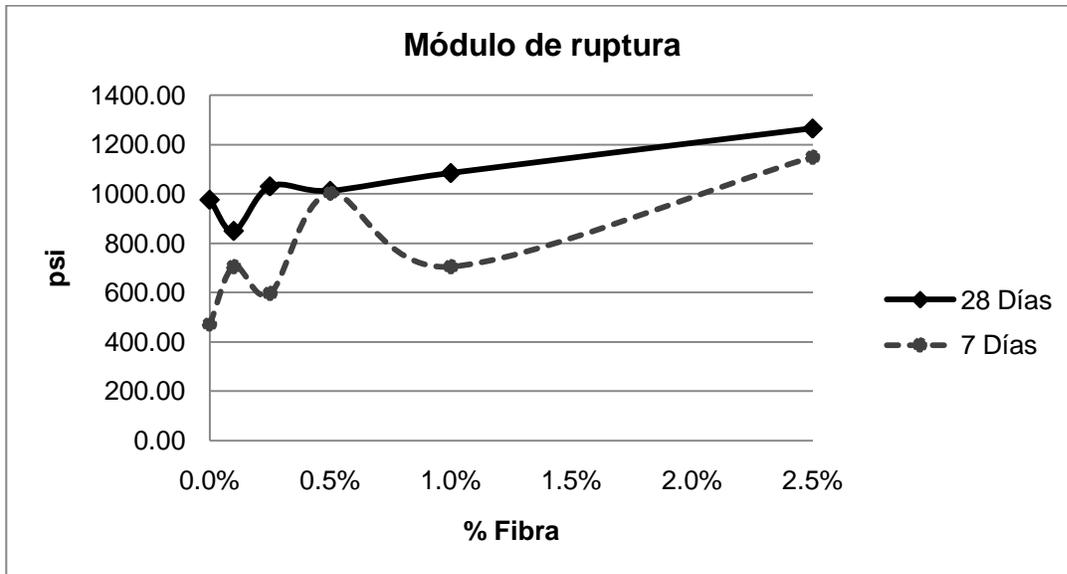
	Mezcla					
	Control	0.10%	0.25%	0.50%	1.0%	2.5%
psi	471.86	705.07	596.60	1003.37	705.07	1149.81
MPa	3.25	4.86	4.11	6.92	4.86	7.93

Tabla XXI. Resultados del módulo de ruptura promedio a 28 días.

	Mezcla					
	Control	0.10%	0.25%	0.50%	1.0%	2.5%
psi	976.25	849.70	1030.49	1012.41	1084.73	1265.51
MPa	6.73	5.86	7.11	6.98	7.48	8.73

La gráfica correspondiente a los datos obtenidos de las dos tablas anteriores es la siguiente:

Figura 39. Gráfica de los módulos de ruptura.



En cuanto al momento de ruptura, éste se calcula mediante la siguiente ecuación según la norma ASTM C 1185:

$$M = \frac{PL}{4b}$$

Donde:

M = momento de ruptura, lb ft/ft (Nm/m)

P = carga máxima, lb (N)

L = longitud del claro, ft (m)

b = ancho del espécimen, ft (m)

Para los cálculos se utilizan los mismos datos procedentes de la Tabla XVII, Tabla XVIII y Tabla XIX. Los resultados y la gráfica respectiva son los siguientes.

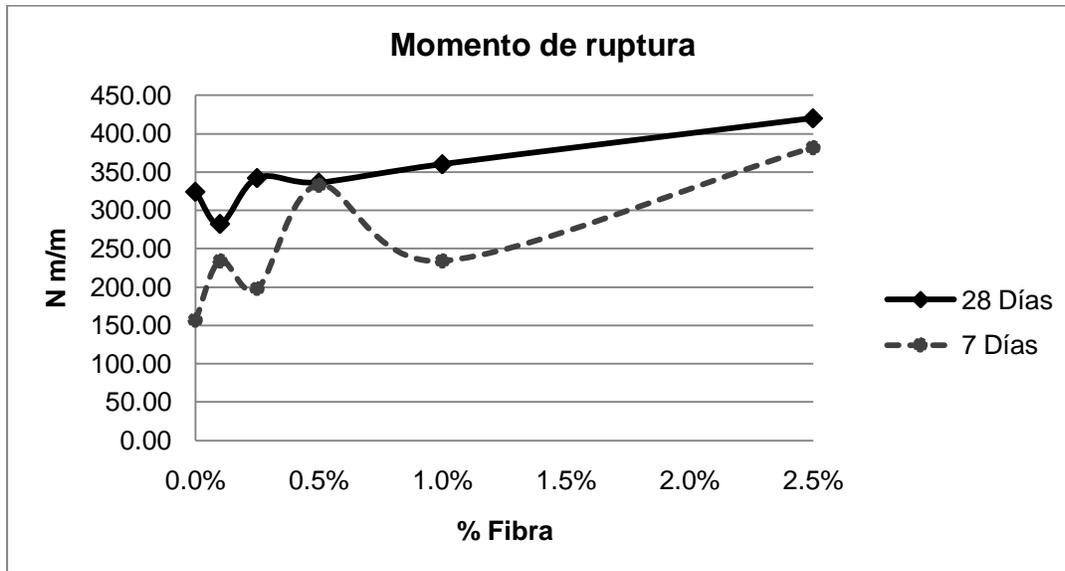
Tabla XXII. Resultados del momento de ruptura promedio a 7 días.

	Mezcla					
	Control	0.10%	0.25%	0.50%	1.0%	2.5%
Nm/m	156.71	234.16	198.14	333.23	234.16	381.86
lb ft/ft	35.23	52.64	44.54	74.91	52.64	85.84

Tabla XXIII. Resultados del momento de ruptura promedio a 28 días.

	Mezcla					
	Control	0.10%	0.25%	0.50%	1.0%	2.5%
Nm/m	324.22	282.20	342.24	336.23	360.25	420.29
lb ft/ft	72.89	63.44	76.93	75.59	80.98	94.48

Figura 40. Gráfica de los momentos de ruptura.



6.1.4. Densidad

El ensayo de densidad es el más práctico y fácil de efectuar de todos los ensayos realizados. Esto se debe a la disponibilidad de probetas, ya que eran las piezas sobrantes del ensayo a tensión, y la maquinaria y equipo utilizado son comunes.

Tabla XXIV. Resultados del peso y volumen promedio de las muestras.

	Mezcla					
	Control	0.10%	0.25%	0.50%	1.0%	2.5%
g	59.38	58.98	60.42	60.44	57.12	55.58
cm³	31.6	31.8	33	32.3	31.2	30.9

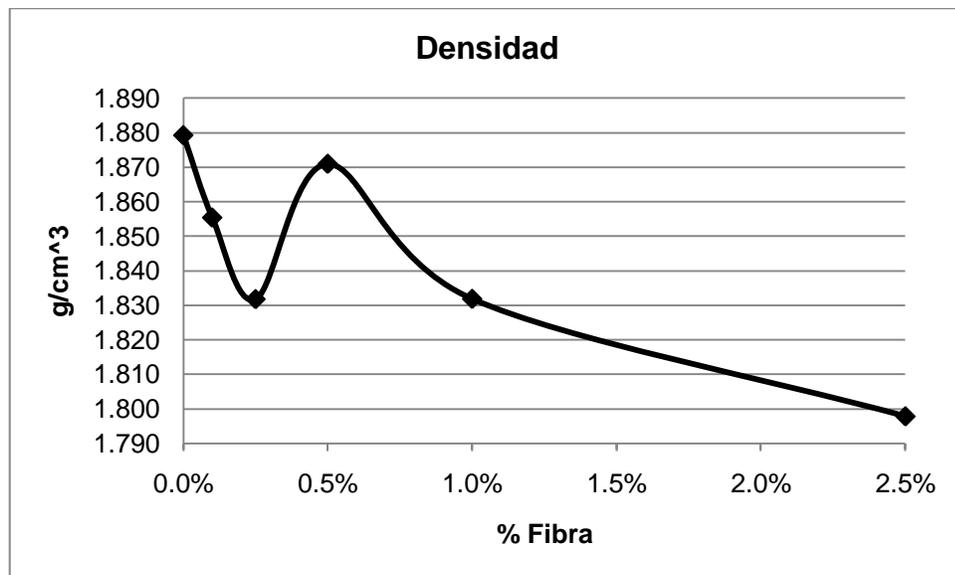
Los cálculos efectuados fueron relativamente sencillos ya que implicaban hacer la relación de la masa por volumen de cada una de las muestras. La ecuación utilizada, así como los datos y la gráfica se pueden observar a continuación.

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Tabla XXV. Resultados de la densidad promedio de las muestras.

	Mezcla					
	Control	0.10%	0.25%	0.50%	1.0%	2.5%
g/cm³	1.879	1.855	1.832	1.871	1.832	1.798

Figura 41. Gráfica de densidades promedio.



6.2. Relación entre los esfuerzos a tensión, compresión y flexión

Al haber realizado los cálculos de los esfuerzos a tensión, compresión y flexión, se procedió a calcular y graficar las relaciones principales que existen entre los esfuerzos de cada mezcla en particular. Estas relaciones son: $\sigma_{\text{tensión}} / \sigma_{\text{compresión}}$, $\sigma_{\text{flexión}} / \sigma_{\text{compresión}}$ y $\sigma_{\text{flexión}} / \sigma_{\text{tensión}}$. Se utilizaron los datos provenientes de los esfuerzos promedio de cada una de las mezclas. Los resultados que se obtuvieron se muestran a continuación.

Tabla XXVI. Relación en porcentaje entre $\sigma_{\text{tensión}} / \sigma_{\text{compresión}}$.

Mezcla	Relación a 7 días	Relación a 28 días
Control	14.3	9.6
0.10%	14.7	10.8
0.25%	11.9	9.6
0.50%	18.6	11.4
1.0%	20.1	13.1
2.5%	16.4	15.0

Figura 42. Gráfica de la relación entre $\sigma_{\text{tensión}}/\sigma_{\text{compresión}}$.

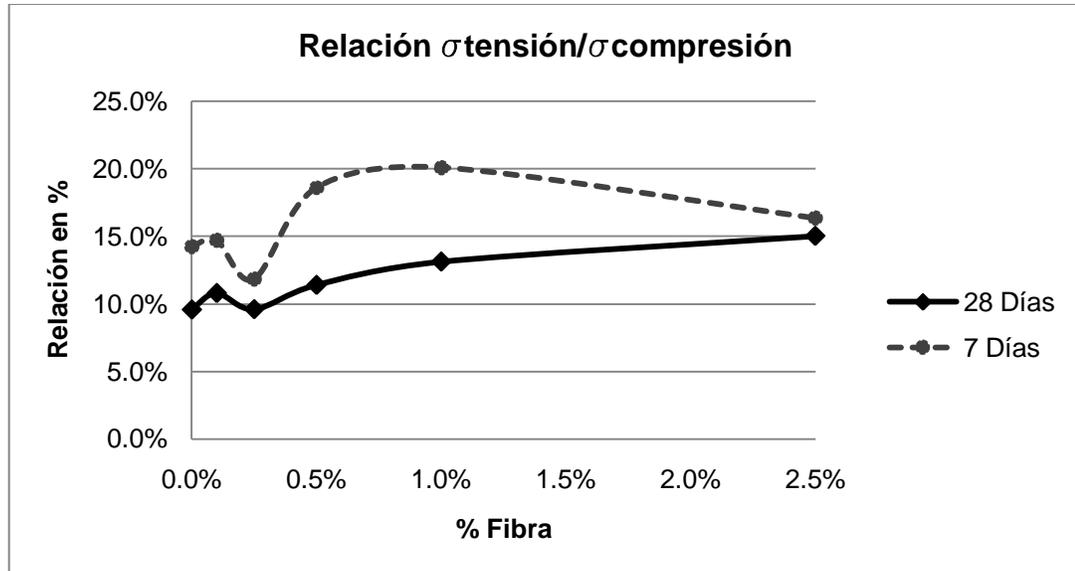


Tabla XXVII. Relación en porcentaje entre $\sigma_{\text{flexión}}/\sigma_{\text{compresión}}$.

Mezcla	Relación a 7 días	Relación a 28 días
Control	15.8	17.6
0.10%	19.6	15.5
0.25%	16.1	17.7
0.50%	34.1	18.5
1.0%	23.4	20.9
2.5%	35.9	27.5

Figura 43. Gráfica de la relación entre $\sigma_{flexión}/\sigma_{compresión}$.

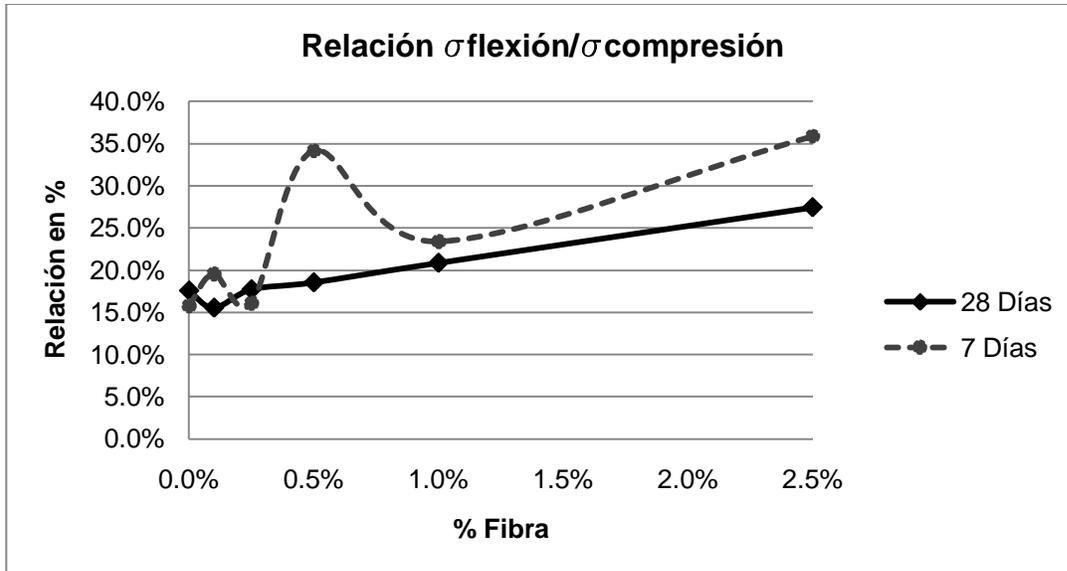
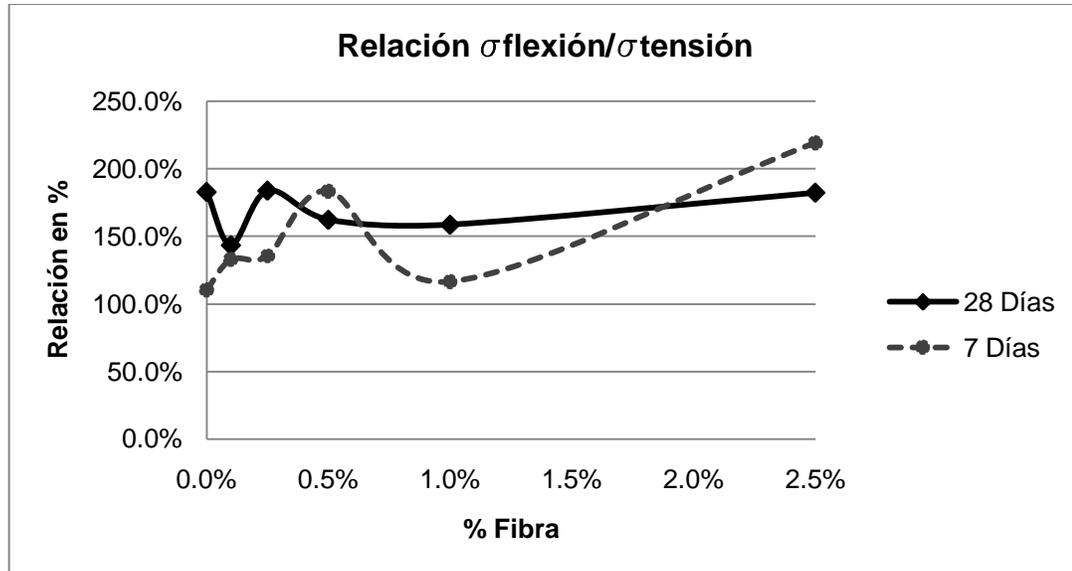


Tabla XXVIII. Relación en porcentaje entre $\sigma_{flexión}/\sigma_{tensión}$.

Mezcla	Relación a 7 días	Relación a 28 días
Control	110.6	183.0
0.10%	133.0	143.6
0.25%	135.6	184.0
0.50%	183.5	162.4
1.0%	116.5	158.7
2.5%	219.4	182.5

Figura 44. Gráfica de la relación entre $\sigma_{flexión}/\sigma_{tensión}$.



A simple vista se puede observar que el comportamiento a los 28 días es más estable que a 7 días para todas las gráficas.

6.3. Interpretación y análisis de resultados

Gran parte de la interpretación y análisis de resultados se llevó a cabo comparando y discutiendo los resultados provenientes de los cálculos expuestos en las secciones anteriores que comprende este capítulo. Además se hace mención de ciertas consideraciones generales que pudieron haber influido en los resultados finales así como también se mencionan ciertas características de las probetas de ensayo ocurridas durante o al finalizar los ensayos.

Las partes débiles de las probetas de ensayo pueden ser ocasionadas debido a la naturaleza heterogénea del material donde puede haber regiones débiles de la matriz con fibras fuertes en los alrededores o puede haber vacíos debido al arreglo no uniforme, o al azar, de las fibras. Asimismo es usual que en el moldeado y extracción no se pueda reducir al 100% la ocurrencia de poros y vacíos dentro de la estructura del composite. En estos lugares no se tiene adherencia alguna entre la fibra y la matriz. Estas imperfecciones estructurales tienen poco efecto en la resistencia a tensión en dirección de la fibra, pero si afectan de cierta forma la rigidez y resistencia a compresión, corte interlaminar y la resistencia a tensión transversal.

La trabajabilidad fue un aspecto que se podía apreciar a simple vista desde el momento del mezclado. A medida que se aumentaba la cantidad de fibra en la mezcla, la pasta obtenía una consistencia más ligada y enlazada entre sí. Esto era de esperarse ya que la fibra le brinda rigidez a la mezcla y lo ejecuto desde el momento su elaboración. Asimismo este decremento progresivo en la trabajabilidad afectó la colocación de la mezcla en los moldes ya que resultó un poco más complicado y tardado para asentarse, acomodarse y afianzar a la forma desaseada.

Como se mencionó en la sección 4.2., la mezcla que contenía el 2.5% de fibra, siendo la del máximo contenido, resultó ser la más afectada en cuanto a la trabajabilidad, manipulación y colocación como resultado de la cantidad de fibra. Esto se puede corregir con una o ambas de las siguientes sugerencias. La primera sería reducir la longitud de las fibras individuales, probablemente a un centímetro, pero esto estaba limitado en la investigación por el aparato utilizado para cortar las fibras en pequeños trozos. La segunda contiene la inclusión de aditivos plastificantes; pero de haberlo hecho para esta mezcla, todas lo deberían de tener para que no existiera otra variante adicional, y lamentablemente ya se habían realizado prácticamente todas las demás mezclas con sus respectivas probetas de ensayo. Durante la colocación, cuando se topaba algún grumo con el apisonador, se procedió a removerlo para evitar en lo posible este desperfecto; sin embargo esto era efectivo para los grumos con un tamaño considerable que fuesen detectados. A pesar del cuidado y manejo que se le dio a la mezcla de 2.5%, es probable que hayan quedado algunos puntos débiles en las probetas de ensayo donde hayan quedado ciertos micro grumos relegados, dentro de los cuales es probable que no obtuvo suficiente agua al cemento para que este fraguara de manera apropiada.

En casi todas las gráficas realizadas se puede observar que el comportamiento de cada una de las propiedades ensayadas es mucho más estable y menos sujeto a cambios drásticos a los 28 días que a los 7 días. Incluso es más fácil encontrar un patrón o tendencia del comportamiento del material sujeto a las variaciones de fibra con base a los resultados del ensayo a 28 días. Por esta razón y debido a que interesa más la resistencia final del material, la mayoría de consideraciones se hacen en base a estos datos. Por último el punto óptimo del porcentaje de fibra no sólo se hace en base a los resultados obtenidos, sino también influye el costo de la fibra ya que es el elemento más caro de la mezcla.

En cuanto a los ensayos a tensión, al finalizar dicha serie de ensayos fue claro observar los distintos tipos de falla de las briquetas. Para las mezclas de control la falla siempre fue lisa en el área transversal de una pulgada. Luego en las mezclas que incluían fibra se noto que la falla ya no era tan recta ya que la superficie de corte poseía ciertas irregularidades. Esto fue más evidente en la muestra con 2.5% fibra, aunque se empezó a notar de manera particular desde la mezcla con 0.5% fibra. Las fallas típicas de las briquetas pueden ser observadas en el apéndice. Otra tendencia era que la sección de la falla se inclinaba un poco con respecto al eje horizontal de la briketa cuando las mezclas poseían fibra. En la Figura 45 se puede apreciar el detalle de una briketa fallada en la cual se puede observar claramente la presencia de las fibras.

Figura 45. Detalle de las fibras en briqueta con 0.5% fibra.



De todos los ensayos realizados de las propiedades mecánicas, la gráfica del esfuerzo a tensión es la que mejor muestra que en ambas edades el comportamiento fue el más parecido entre sí. Asimismo es la única que no posee algún punto con una resistencia menor a aquella obtenida de la mezcla de control; todo incremento de fibra es una mejora a tensión por más leve que sea. Una indicación clara que pequeñas cantidades de fibra inciden claramente en el comportamiento final del composite se puede observar ya que tanto a los 7 como a los 28 días, la resistencia a tensión incrementa en el primer punto a 0.1% fibra y luego decrece en el siguiente punto, con 0.25% fibra. Luego la tendencia comprende un aumento gradual hasta llegar a un punto donde al parecer un aumento de la cantidad de fibra ya no se percibe como un aumento en la resistencia (a 28 días).

Era de esperarse que las fibras incrementaran la resistencia a tensión y a flexión, ya que su papel dentro del composite es reforzar precisamente para este tipo de esfuerzos. A tensión, de acuerdo a la gráfica de la Figura 37, para la mezcla de 2.5% a los 7 días se nota un obvio rechazo de la fibra por la matriz ya que la resistencia disminuye en comparación con la tendencia obtenida a 28 días. Es posible que la interface no se haya adherido del todo a la fibra y provoque cierto deslizamiento que evite la transferencia del esfuerzo de tensión a la fibra. Este efecto desaparece a los 28 días quedando la propiedad final con el valor similar al porcentaje anterior. Eso dice que es prácticamente innecesario llegar a este porcentaje final, ya que sí se percibe una leve mejoría de 10 psi, pero no justifica el incremento del uso de 1% al 2.5% de fibra a tensión.

Con respecto a las resistencias finales obtenidas de las muestras con un orden de magnitud de diferencia, se obtuvo lo siguiente. Entre las mezclas de 0.1% y 1%, la resistencia aumento 15.5% con respecto a la de menor contenido de fibra; para las mezclas de 0.25% y 2.5% la resistencia obtuvo un aumento del 23.8% con respecto a la de menor contenido de fibra. A pesar que se utilizó una relación de diez veces más fibra en cada una de las parejas, el incremento obviamente no fue similar y tampoco se pudo observar tendencia alguna entre puntos de diferencia de magnitud.

El incremento máximo de la resistencia a tensión en comparación con la muestra de control se puede encontrar en la mezcla con 2.5% fibra. La resistencia final promedio obtenida fue de 693.33 psi, lo cual representa un incremento del 30.0% con respecto a la resistencia promedio de 533.33 psi obtenida de las muestras sin fibras. Debido a que todos los puntos mostraron una mejora, no se tiene algún punto mínimo con respecto a la muestra de control.

En cuanto a la relación entre los esfuerzos de tensión con los esfuerzos finales de compresión, se puede apreciar que todos los puntos se comportan igual o mejor en relación con la muestra de control. El punto con mayor relación fue claramente el que corresponde a la mezcla de 2.5%, prácticamente dos puntos porcentuales por encima del segundo lugar, la mezcla de 1%.

Por último, tomando en cuenta los aspectos discutidos de los resultados a tensión, se puede decir que la mezcla óptima a tensión es la que contiene 1% de fibra, ya que brinda una resistencia última muy similar al punto con mayor porcentaje de fibra sin incidir mucho en el costo final.

Comúnmente los materiales quebradizos, como el concreto, a compresión se rompen a lo largo de un plano diagonal o con una fractura en forma de cono o reloj de arena. Este tipo de fracturas es esencialmente una falla por corte. Esta falla ocurrió la mayoría de veces sobre todo con las mezclas de Control y de 0.1%. Sin embargo, se pudo observar que a medida se incrementa la cantidad de fibra en la mezcla, el elemento tiende a quedarse unido y la desfragmentación es mucho menor. Este cambio se puede notar fácilmente desde los cubos con mezcla de 0.25% en adelante, hasta llegar a los cubos con 1% y 2.5% fibra que están prácticamente íntegros y sólo se encuentran agrietados. En otras palabras, la pieza tiende a quedar usualmente entera a pesar de estar fallada. Esto resulta importante ya que la pieza no se desmorona o colapsa totalmente como resultado de la falla y por lo tanto puede resultar una propiedad que otorgue cierta medida de seguridad o resguardo para los elementos que trabajen a compresión.

Realmente no se esperara que las fibras fueran a resistir el esfuerzo a compresión ya que el cemento es el elemento del composite que proporciona dicha resistencia. De acuerdo a los datos de la Tabla XVI y la gráfica de la Figura 38 se puede observar, para la resistencia última, a mayor cantidad de fibra se disminuye levemente la resistencia a compresión, con la única excepción siendo la mezcla de 0.25%. A partir de este punto la tendencia del descenso en resistencia es casi lineal. Esto es probable que haya sido causado por una serie de micro fallas producidas internamente debido al aplastamiento de las fibras, ya que el vidrio es un material muy quebradizo. Estas rupturas pueden ocasionar esfuerzos internos que debiliten al material de adentro hacia afuera. En dado caso que haya estado presente una concentración o grumos de fibras, se pudo dar lugar a un punto débil propenso a colapso interno ya que no contenía suficiente cemento entre fibras para compensar.

Entre las observaciones de las resistencias logradas entre las muestras de un orden de magnitud aparte se obtuvo lo siguiente. La relación que hubo entre la mezcla de 0.1% y la de 1% fue una disminución del 5.0% con respecto al punto de menor contenido de fibra. De la misma forma, la relación que se obtuvo entre la mezcla con 0.25% y la de 2.5% también fue una disminución de la resistencia, pero con un valor mucho mayor, 20.8%. La gran diferencia que se encuentra entre estos dos últimos puntos de orden de magnitud se debe al desplome de la resistencia sufrido a partir del 0.25%, y el hecho que este es el punto máximo de toda la gráfica.

A simple vista se pueden destacar los puntos máximos y mínimos de resistencia última de la gráfica. Como se mencionó en el párrafo anterior, el punto máximo se encuentra con la mezcla que contiene 0.25% fibra con 5822.03 psi y la resistencia a compresión mostró un leve aumento de 4.69% con respecto a la mezcla de control con 5561.23 psi. Luego el punto mínimo precisamente le pertenece a la mezcla con 2.5% fibra con 4609.87 psi y posee un valor de resistencia 17.1% menor que la resistencia obtenida de la mezcla de control. Sin embargo esta todavía es una muy buena resistencia a compresión estructural.

Tomando en cuenta todos los parámetros discutidos anteriormente, se puede decir que el porcentaje óptimo de fibra para la resistencia a compresión es de 0.25%. Esto se debe a que todas las demás muestras con fibra obtuvieron una resistencia menor a aquella obtenida por la muestra de control. Esto demuestra que la fibra no es muy buena a compresión, pero se sabe de entrada que el cemento si lo es, y por lo tanto compensa esta carencia.

A medida que se fueron realizando los ensayos a flexión, era claro que mientras la mezcla contenía más fibra, la plancha no solo tardaba más en ceder sino también colapsaba segundos después que la falla había ocurrido, o sea que la falla no necesariamente involucraba colapso. La plancha de control fallaba y colapsaba en el instante, y la de 0.1% fue similar; y a partir de la mezcla con 0.25% fibra el cambio ya se empezaba a notar. La secuencia general para las planchas de las mezclas, excepto la de control y 0.1%, era la siguiente: aparecen grietas, la plancha falla y segundos después colapsa. Claro está que la capacidad de ceder más tiempo y colapsar tardíamente estaba ligada directamente con la cantidad de fibra involucrada. Un ejemplo de esto ocurrió con la plancha que poseía 1% fibra. Se tuvo un cronómetro en mano y una vez que esta plancha fallo tardó 13.4 segundos en colapsar. De manera similar ocurrió con las planchas que poseían 2.5% de fibra, ya que tardaban varios segundos desde la falla en colapsar.

La deflexión de un elemento es el desplazamiento de un punto sobre la superficie neutra desde su posición original bajo la acción de las fuerzas aplicadas. Las planchas con 2.5% fueron las que obtuvieron una mayor deformación de este tipo, incluso una de estas planchas se deflectó 5 mm. Esto se hizo colocando una cinta métrica verticalmente como se muestra en la Figura 46. Se tomó como referencia el punto sobre el eje del cabezal móvil y se marcaron las medidas antes y después del ensayo. La diferencia fue lo que se desplazó la máquina como consecuencia de la deflexión de la plancha. Esto comprueba que así como la fibra incrementa la resistencia a tensión también ayuda a aumentar la resistencia a flexión. Esto se debe a que la fibra no solo le aumenta resistencia a tensión sino también brinda elasticidad a la mezcla, creándola apta para los esfuerzos de flexión.

Figura 46. Toma de medidas de la deflexión.

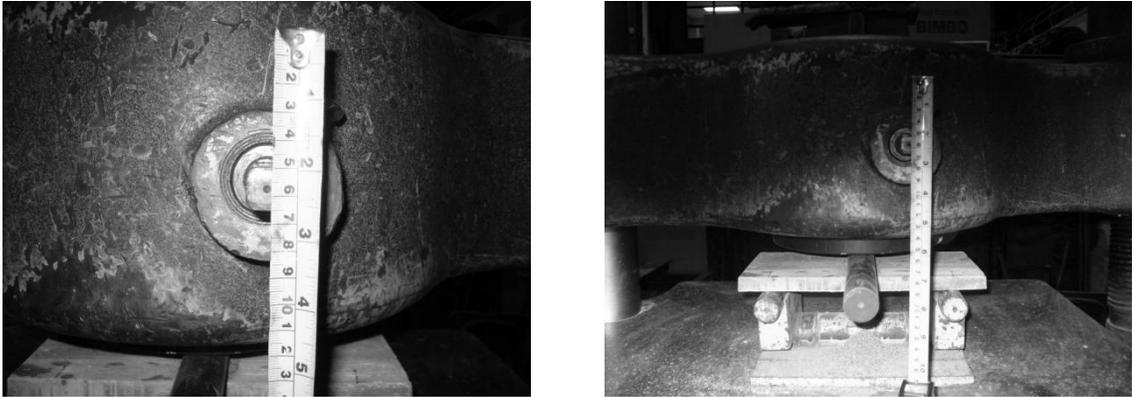
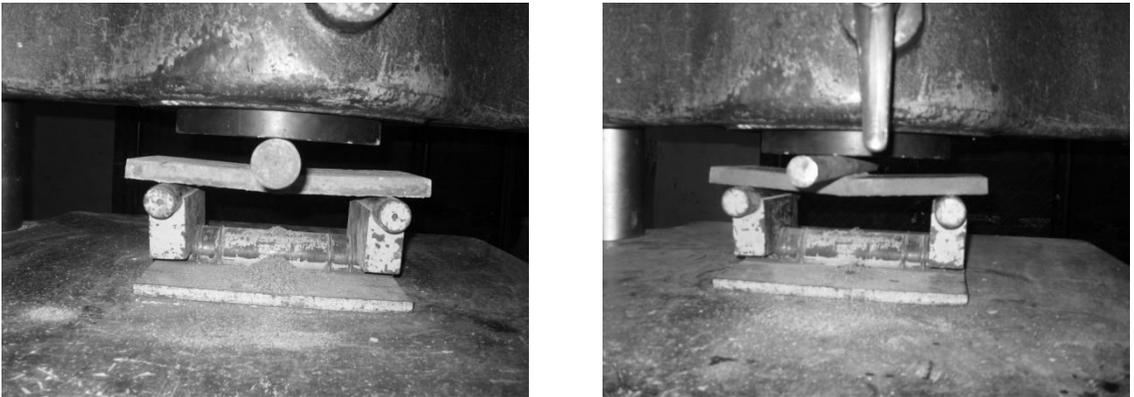


Figura 47. Ejemplos de planchas deflectadas.



A flexión la falla de las planchas se comportó de manera similar a las briquetas a tensión solo que se manifestaba de manera más notable. Esta variaba según la concentración de fibra comenzando por un corte limpio hasta llegar a un corte rasgado y desperfecto. Por ejemplo en la falla de las planchas de control siempre era recta y limpio, y coincidía en el punto de aplicación del apoyo. Luego conforme incrementaba la cantidad de fibra, la falla no era tan recta y se empieza a ver claramente a partir de la mezcla de 0.25%, la superficie de falla comienza a ser irregular. El patrón se sigue aumentando hasta llegar a los puntos máximos de 1% y 2.5%, donde la falla ya no es recta en absoluto y cada mitad en particular posee trozos pertenecientes a la otra mitad. La diferencia de estas fallas es tan clara como si se cortara un trozo de papel con tijeras y luego otro trozo se arrancara con las manos. Asimismo en la superficie de la falla de estas planchas se pudo observar fácilmente la presencia de fibra como se aprecia en la Figura 48.

Figura 48. Detalle de las fibras en plancha con 2.5% fibras.



De la Figura 39 se puede observar un incremento semi-lineal del módulo de ruptura final a medida que incrementa la cantidad de la fibra de la mezcla. La única excepción se encuentra en el punto con 0.1% fibra, ya que es el único punto de la gráfica que obtuvo un módulo de ruptura menor a la muestra de control. Todos los demás puntos, incluso para la resistencia a 7 días, obtuvieron una mejor resistencia como consecuencia de la adición de la fibra. A 7 días la gráfica fluctúa considerablemente, pero se estabiliza a los 28 días lo cual muestra una tendencia clara de la resistencia a flexión y manifiesta que un aumento en la cantidad de la fibra resulta en un aumento del módulo de ruptura a una razón de 110 a 115 psi por cada unidad porcentual de fibra añadida (110 a 115 psi por cada 1% de fibra). Si se llegará a realizar otra mezcla con más fibra, es muy probable que la resistencia siga la pendiente establecida e incremente a esta razón de cambio.

Las parejas de orden de magnitud mostraron un comportamiento mucho más parecido entre sí que en los otros ensayos. El módulo de ruptura entre la mezcla de 0.1% con 849.70 psi y la de 1% con 1084.73 psi aumentó un 27.7%; y entre la mezcla de 0.25% con 1030.49 psi y la de 2.5% con 1265.51 psi aumentó un 22.8%. Es de esperar que estos resultados sean un tanto parecidos debido al comportamiento del material ilustrado en la gráfica del módulo de ruptura. Asimismo, el mayor aumento porcentual de la resistencia entre los primeros puntos, el de 0.1% y 1%, se debe a que el punto con 0.1% no obtuvo una resistencia mejorada con respecto a la de control y tampoco se encuentra sobre la pendiente como resultado de la tendencia de los demás puntos.

En cuanto a las resistencias finales mínimas y máximas se puede deducir lo siguiente. Como se mencionó en los párrafos anteriores, la resistencia mínima pertenece a la mezcla con 0.1% de fibra, la cual mostró una disminución de resistencia de 13.0% con respecto a la muestra de control. Luego la resistencia máxima pertenece a la mezcla con mayor porcentaje de fibra, 2.5%, y mostró un incremento de resistencia de 29.6% con respecto a la muestra de control. Este dato es muy similar al máximo obtenido de la resistencia final a tensión, ya que se percibió un aumento de 30.0% también perteneciente a la mezcla con 2.5% fibra.

Las fallas de un material quebradizo siempre ocurren por ruptura súbita debido a la falla o ceder de las fibras extremas. Asimismo, el esfuerzo calculado con el módulo de ruptura generalmente es mayor que la resistencia a tensión del material. La relación entre el módulo de ruptura y el esfuerzo a tensión para el concreto oscila entre 1.5 y 2. De acuerdo a la gráfica de la Figura 44 se puede observar que esta relación se cumple para todos los puntos de las resistencias finales con la excepción de la mezcla de 0.1%. Sin embargo su valor no se encuentra muy por debajo. Asimismo, la relación entre el módulo de ruptura y el esfuerzo a compresión del concreto es de 0.15 a 0.20. Tomando como referencia la Figura 43, se puede prestar atención que todos los puntos cumplen con esta relación y casi la mitad lo sobrepasan.

Tomando como referencia la Figura 4 que demuestra el efecto de la relación agua-cemento en la resistencia a la compresión y a la tensión por flexión a los 28 días, se puede observar un aumento claro de la resistencia a flexión. De acuerdo a la gráfica, para la relación agua-cemento utilizada de 0.4, la resistencia a flexión debería de oscilar entre 650 y 850 psi. Todos los resultados obtuvieron un rendimiento igual o mucho mejor a este rango, incluso dos tercios de los resultados sobrepasan la marca de 1000 psi a flexión como resultado de la adición de fibras.

Para controles de calidad, usualmente sólo el módulo de ruptura es requerido, el cual está sujeto a la carga de ruptura y las dimensiones de la pieza (el claro y la sección crítica). Los factores que afectan los resultados son la velocidad de la carga, largo del claro y las dimensiones de la sección transversal. De acuerdo a la Guía de Aplicaciones Plycem, Tabla 4, Pág. 8, el módulo de rotura mínima que deben poseer las planchas manufacturadas es de 7 N/mm^2 (7 MPa o 1,015 psi). Los datos obtenidos de los ensayos a flexión a 28 días muestran que prácticamente se logra ese requisito mínimo con una cantidad de 0.25% de fibra en adelante ya que la mezcla de 0.5% obtuvo un resultado de 1012.41 psi.

De acuerdo a la norma ASTM C 1186, la cual comprende planchas planas de fibrocemento sin asbesto, la resistencia a flexión de las planchas no puede ser menor a los datos de la siguiente tabla. Con respecto al párrafo anterior, las planchas deben ser por lo menos de Grado II. Cuando se refiere a la resistencia en estado mojado se trata de ensayar la pieza instantes después de extraerla del agua del curado; en cuanto al estado en equilibrio es cuando la pieza se ensaya luego de haber estado en una atmósfera controlada con una humedad relativa de 50%.

Tabla XXIX. Requisitos mínimos para la resistencia a flexión.

Grado	Resistencia en estado mojado, psi (MPa)	Resistencia en estado en equilibrio, psi (MPa)
I	580 (4)	580 (4)
II	1015 (7)	1450 (10)
III	1885 (13)	2320 (16)
IV	2610 (18)	3190 (22)

Fuente: ASTM C 1186, Pág. 776.

De acuerdo a los parámetros y datos de los resultados discutidos anteriormente, el porcentaje óptimo de fibra para la resistencia a flexión es de 2.5%. Esto se debe a que obtuvo el módulo de ruptura más alto con un resultado considerablemente mayor a la segunda mejor resistencia que pertenece a la mezcla de 1%. Asimismo, estos dos últimos porcentajes garantizan al material una resistencia a flexión de Grado II.

Por último en cuanto a la densidad, la gráfica de la Figura 41 muestra que las tendencias de las densidades promedio de cada muestra tienden a reducir conforme aumenta la cantidad de fibra con la única excepción siendo la mezcla con 0.5%, la cual obtuvo una densidad parecida a la mezcla de control. La mezcla que obtuvo una mayor densidad fue la de control con 1.879 g/cm^3 . Asimismo la muestra que obtuvo la menor densidad fue la del máximo contenido de fibra. Este valor es de 1.798 g/cm^3 y representa una disminución de 4.3% de densidad con respecto a la muestra de control. Este no sólo fue el único ensayo físico sino también era el único en donde un resultado de menor valor era favorable.

La Guía de Aplicaciones Plycem en la página 7 menciona que las láminas pesan 1,110 y 1,150 Kg/m^3 . En las muestras ensayadas, la menor densidad se obtuvo de $1,798 \text{ Kg/m}^3$ correspondiente a la mezcla de 2.5%. Este dato resulta aproximadamente 56% más pesado. Es probable que el problema se resuelva reduciendo la cantidad de cemento en la mezcla y agregándole más agregado fino y/o también aumentando la cantidad de fibra en la mezcla. Sin embargo este criterio y ensayo de estas nuevas proporciones quedará para una futura investigación. Asimismo se tiene que tomar en cuenta que las fibras utilizadas en las láminas livianas provienen de la celulosa, la cual posee una densidad mucho menor que la fibra de vidrio, 1.55 g/cm^3 versus 2.54 g/cm^3 .

Este material a base de cemento y fibra de vidrio en promedio resultó ser un 25% más ligero que el concreto armado, lo cual representa una disminución considerable de peso. La ventaja de lo ligero que resulta este material se encuentra en el diseño de estructuras, pues no sólo la carga muerta será menor sino también se reducirá el costo de la estructura porque las columnas, vigas y cimientos tendrán dimensiones reducidas al no tener que soportar tanto peso.

Con base a lo anterior, se puede deducir que el porcentaje óptimo en cuanto a una menor densidad pertenece a la mezcla de 2.5% de fibra.

6.4. Análisis de costo

El análisis de costo se realizó con el fin de comparar que tan económicamente rentable sería utilizar este composite a base de cemento y fibra de vidrio con los materiales convencionales en el mercado. Asimismo se utilizó el costo para comparar la cantidad de resistencia soportada por unidad monetaria y comprobar así la economía de cada mezcla en particular, como por ejemplo Q/psi.

Para obtener los costos de las láminas de fibrocemento que se ofrecen en el mercado, se consultaron los precios con un distribuidor. Dichas láminas multiuso se venden en planchas de 4 pies por 8 pies (1.22 m por 2.44 m). Los precios se encuentran en la tabla a continuación de acuerdo al grosor y corresponden al 27 de enero del 2010. Es necesario aclarar que los siguientes precios corresponden al precio comercial y no el precio a costo; por lo tanto incluyen el costo del capital y administración, de mano de obra, maquinaria y equipo con su depreciación, ganancia, etc.

Tabla XXX. Precios de láminas de fibrocemento de 4'x8'.

Grosor	Precio
1/2"	Q245
3/4"	Q395
1"	Q423

Con estos datos se procedió a calcular el costo unitario por metro cúbico de manera que el costo esté en función del volumen y no solo del grosor. Esto facilitará la comparación del costo con las mezclas efectuadas en esta investigación. El área es de 2.9768 m² de acuerdo a las dimensiones de la plancha (1.22m x 2.44m).

Tabla XXXI. Costo de las planchas comerciales por metro cúbico.

Grosor plg.	Area m²	Grosor m	Vol m³	Costo Plancha	Costo por m³
½	2.9768	0.0127	0.03781	Q245.00	Q6,480.56
¾	2.9768	0.01905	0.05671	Q395.00	Q6,965.50
1	2.9768	0.0254	0.07561	Q423.00	Q5,594.44

Luego se obtuvo el precio de los materiales utilizados en la investigación. Aquí se tiene que aclarar que el cemento se compro en sacos, la fibra se compro por libra, la arena por metro cúbico y el agua se obtuvo de la red de distribución. Esto significa que en al comprar y utilizar cantidades mayores en producción, el precio reducirá. Asimismo, claramente se puede comprobar que la fibra de vidrio es el material más costoso de toda la mezcla.

Tabla XXXII. Precio unitario de los materiales utilizados.

Material	Costo	Descripción	Costo por Kg
Cemento	Q 58.00	Saco de 42.5 Kg	Q 1.36
Arena	Q 95.00	Metro cúbico	Q 0.09*
Fibra	Q 18.00	Libra	Q 39.60
Agua	Q 145.00	60 m ³	Q 0.01**

*Para la arena se tomó en cuenta que alrededor del 75% del metro cúbico es utilizable luego del cernido y también el PUS de la arena 1373 Kg/m³ (ver sección 4.2.)

**El costo de agua es casi despreciable, siendo este valor un cuarto de centavo, pero por razones prácticas se le asignara costo de Q0.01.

Se procedió a calcular la cantidad de cada material necesaria para hacer un metro cúbico de mezcla. Para esto, se utilizaron las densidades obtenidas de la Tabla XXV y las proporciones de la Tabla VII. Luego con la cantidad de cada material en kilogramos, se obtuvo el costo parcial por material con los datos de la Tabla XXXII. La sumatoria del costo de cada material para cada mezcla dio como resultado el costo por metro cúbico.

Tabla XXXIII. Costo por metro cúbico de mezcla.

Mezcla	Cemento	Arena	Fibra	Agua	TOTAL
0%	Q1,548.75	Q25.62	Q0.00	Q4.56	Q1,578.93
0.10%	Q1,528.04	Q25.28	Q44.49	Q4.49	Q1,602.31
0.25%	Q1,507.73	Q24.94	Q109.75	Q4.43	Q1,646.86
0.50%	Q1,537.50	Q25.44	Q223.84	Q4.52	Q1,791.30
1.0%	Q1,500.92	Q24.83	Q437.03	Q4.41	Q1,967.19
2.50%	Q1,459.87	Q24.15	Q1,062.70	Q4.29	Q2,551.01

De la tabla anterior se puede comprobar que incluso la mezcla con el costo más elevado no resulta tan encarecida comparado con la mezcla de menor costo de la Tabla XXXI. Se ha mencionado que estos precios consideran únicamente el costo de los materiales pero se puede considerar como regla general cualquier proceso industrial se ajusta por el factor de 1.15 sobre la materia prima. Este incremento del 15% es el costo del capital de equipo menos depreciación. Incluso con este valor añadido, el costo sigue siendo distintivamente menor. Asimismo es muy fácil e interesante observar que el costo sólo de la fibra incrementa drásticamente y afecta en gran parte el costo final de la mezcla. La tabla a continuación demuestra el incremento en costo de cada mezcla en comparación con la mezcla de control.

Tabla XXXIV. Incremento en costo de las mezclas.

Mezcla	Costo	Incremento
0%	Q1,578.93	1
0.10%	Q1,602.31	1.01
0.25%	Q1,646.86	1.04
0.50%	Q1,791.30	1.13
1.0%	Q1,967.19	1.25
2.50%	Q2,551.01	1.62

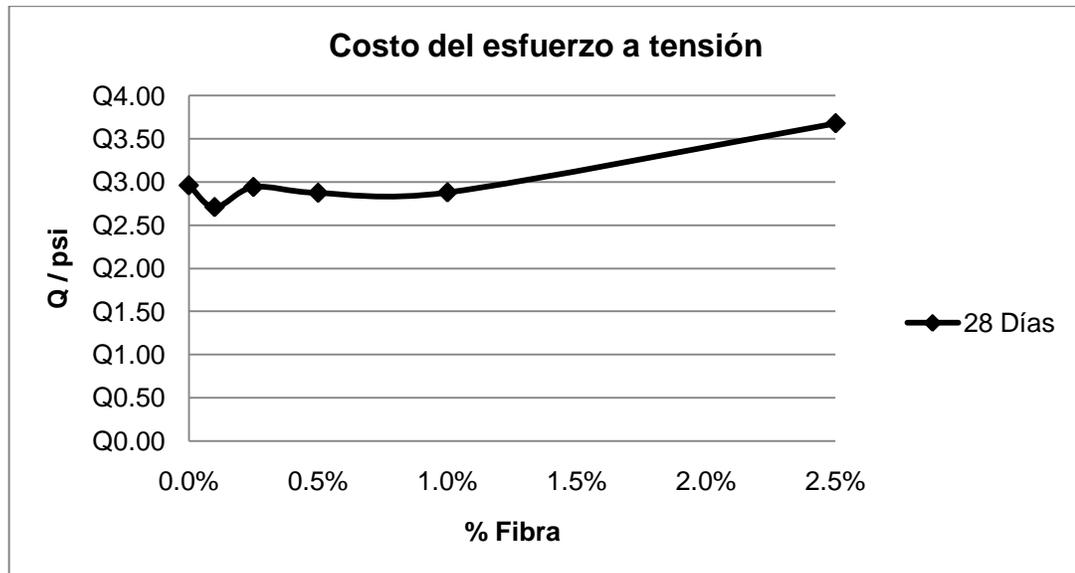
Posteriormente se realizó el análisis de costo por mejora en propiedades para cada uno de los ensayos de las propiedades mecánicas efectuados. Esto brindo un parámetro, además del rendimiento que cada porcentaje apporto en los ensayos, para poder escoger la proporción adecuada. Las siguientes tablas y gráficas ayudan a verificar realmente qué tan económico y favorable es aumentar la cantidad de fibra a la mezcla. Los cálculos efectuados consistieron en dividir el costo total de la mezcla, proveniente de la Tabla XXXIII, dentro de la resistencia última a 28 días correspondiente a cada mezcla dentro de cada ensayo. Se utilizó la resistencia última porque es la que se debe considerar si dicho material fuese puesto en uso. El objetivo fue encontrar la relación del costo en quetzales para obtener un psi de la resistencia obtenida para cada mezcla en particular; y mientras menor sea el resultado, este será económicamente mejor. Un ejemplo de la realización de estos cálculos se muestra a continuación así como también las respectivas tablas y gráficas.

$$Rel\ Control = \frac{Costo\ Mezcla\ de\ Control}{Resistencia\ a\ Tension\ Control} = \frac{Q1,578.93}{533.33} = Q2.96/psi$$

Tabla XXXV. Costo del esfuerzo a tensión.

Mezcla	Q/psi
0%	Q2.96
0.10%	Q2.71
0.25%	Q2.94
0.50%	Q2.87
1.0%	Q2.88
2.50%	Q3.68

Figura 49. Gráfica del costo del esfuerzo a tensión.

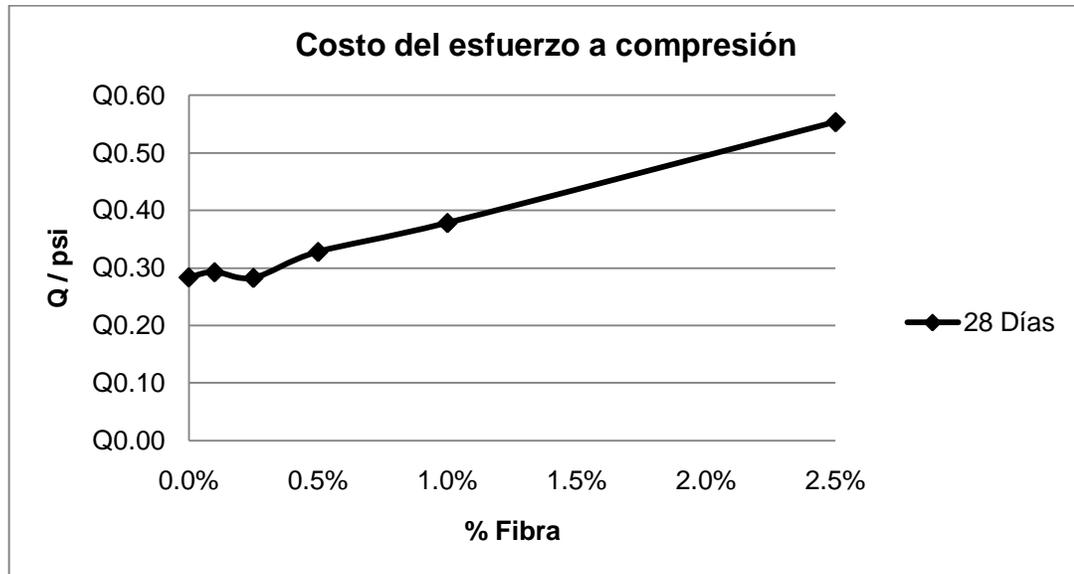


Los datos obtenidos demuestran un comportamiento estable para las mezclas por debajo del 1% de fibra. La mezcla correspondiente al 2.5% de fibra demuestra tener un retorno sobre la inversión es oneroso pues el costo aumenta 24.3% con respecto a la mezcla de control. Asimismo la gráfica confirma a la mezcla de 1% como la mezcla óptima a tensión no solo por su alto rendimiento mecánico sino también porque resulta ser una inversión más viable pues su costo disminuye un 2.8% con respecto a la mezcla de control. En otras palabras, combina una mejor resistencia con un menor costo.

Tabla XXXVI. Costo del esfuerzo a compresión.

Mezcla	Q/psi
0%	Q0.28
0.10%	Q0.29
0.25%	Q0.28
0.50%	Q0.33
1.0%	Q0.38
2.50%	Q0.55

Figura 50. Gráfica del costo del esfuerzo a compresión.

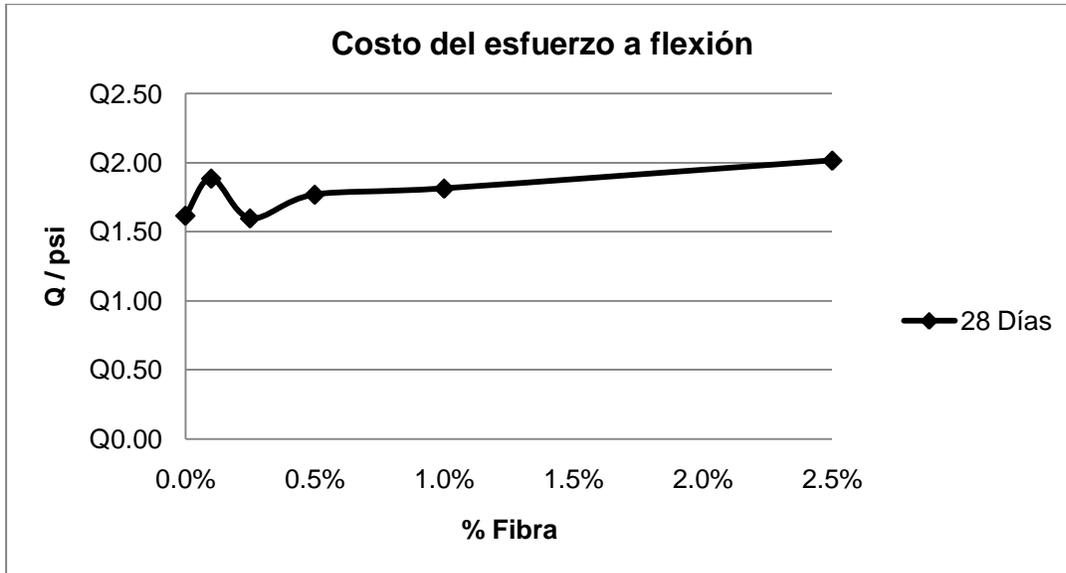


A compresión la gráfica claramente demuestra que el costo se eleva rápidamente a medida que se sobrepasa la cantidad de 0.25% de fibra. Esto indica que no es conveniente aumentar la fibra más allá de este punto si se necesita una alta resistencia a compresión ya que puede resultar en un aumento de hasta 96.4% con respecto a la mezcla de control, como ocurre con la mezcla de 2.5%. Estos datos respaldan la elección de 0.25% como porcentaje óptimo del contenido de fibra a compresión. Lo más interesante es que este punto tiene un costo de quetzal por psi igual a la de la muestra de control, por lo tanto se percibe una mejora mecánica sin que represente un gasto extra relativo con la mezcla de control.

Tabla XXXVII. Costo del esfuerzo a flexión.

Mezcla	Q/psi
0%	Q1.62
0.10%	Q1.89
0.25%	Q1.60
0.50%	Q1.77
1.0%	Q1.81
2.50%	Q2.02

Figura 51. Gráfica del costo del esfuerzo a flexión.



A flexión la gráfica se mantiene estable, con un aumento leve y progresivo a partir de la mezcla con 0.5% fibra. Técnicamente vale la pena llegar hasta el punto con máxima cantidad de fibra. Sin embargo, económicamente es más conveniente parar en el penúltimo punto. Con la mezcla de 1% fibra, el costo aumenta 11.7% con respecto a la mezcla de control, mientras que para la mezcla de 2.5% el costo aumenta 24.7%. Por lo tanto, el retorno sobre la inversión ya resultaría oneroso, pero en última instancia se puede comprometer el rendimiento con la economía. En este último caso se tiene la peculiaridad que se puede escoger la cantidad óptima entre los últimos dos porcentajes de fibra, siempre y cuando el uso que se le otorgue al material justifique el gasto.

CONCLUSIONES

1. Los composites combinan las propiedades características de los elementos constituyentes y comparados con los materiales homogéneos, pueden optimizar, según la aplicación, la resistencia, densidad, costo, etc. Estas ventajas han incidido en que el énfasis del desarrollo de materiales se haya desplazado hacia el desarrollo de materiales con propiedades específicas, o bien, diseñadas a la medida.
2. El rendimiento óptimo o recomendable se encuentra con el contenido de 1% de fibra de vidrio, tomando en cuenta los resultados de las distintas propiedades evaluadas así como también el costo y manejabilidad. Este valor comprende mejoras significativas a tensión y flexión sin sacrificar considerablemente la resistencia a compresión y también posee una de las densidades más bajas.
3. Los composites a base de cemento y fibra de vidrio pueden competir técnica y económicamente con productos elaborados a base de otros materiales similares. Asimismo, ofrece la versatilidad de idear nuevos métodos y sistemas constructivos, y se prevé su aplicación en la elaboración de techos y láminas multiuso de larga duración en donde las construcciones actuales demandan elementos con una rigidez y resistencia razonable.

4. La mezcla de 0.25% resulta ser un porcentaje clave, ya que las gráficas demuestran en muchos casos que es un punto de inflexión en el comportamiento mecánico y también la forma de las fallas tienden a cambiar distintivamente con respecto a la muestra de control a partir de este punto.
5. En todos los ensayos realizados se puede observar claramente la respuesta inmediata que otorgan los pequeños porcentajes de fibra al comportamiento general del composite. Para los ensayos de tensión y flexión se pudo apreciar que el mayor incremento en resistencia se llevó a cabo para la mezcla que poseía 2.5% de fibra. Asimismo, en ambos casos el incremento fue de alrededor del 30% en comparación con la muestra de control. Esto demuestra eficazmente la incidencia que tiene la fibra sobre el composite bajo estos esfuerzos.
6. Una de las grandes ventajas del composite a base de cemento y fibra de vidrio es su peso ligero, un 25% menor en comparación con el concreto tradicional.
7. La mezcla que contiene más fibra posee una mayor resistencia a flexión que a tensión, ya que se beneficia esfuerzos combinados; por lo tanto, aprovecha la buena resistencia a tensión de la fibra de vidrio y la alta resistencia a compresión del cemento.

RECOMENDACIONES

1. Para la elección de los elementos de un composite es importante tomar en cuenta la compatibilidad y propiedades de los mismos, para garantizar un material superior.
2. Para poder establecer un punto óptimo de la cantidad de fibra en la mezcla, se recomienda analizar el comportamiento del material bajo los distintos esfuerzos y encontrar un punto de equilibrio; también se debe tomar en cuenta el aspecto económico, la densidad y la manejabilidad.
3. Con base a los resultados obtenidos, los ingenieros y diseñadores podrán sugerir las mezclas adecuadas con la cantidad de fibra necesaria, según la aplicación deseada de manera que puedan satisfacer los requisitos de resistencia.
4. Se exhorta realizar diseños de morteros con porcentajes de fibra con respecto al peso del cemento entre 0.25% y 0.5%, para observar si en este intervalo se encuentra algún punto clave que determine el cambio en el comportamiento del composite.

5. Para maximizar la resistencia a tensión y flexión, se recomienda el uso de 2.5% fibra de vidrio en la mezcla. Se debe enfatizar que la trabajabilidad de la mezcla disminuye drásticamente a medida que se agregan más fibras a la mezcla. Por lo tanto, se invita a utilizar aditivos fluidificantes o longitudes de fibra menores para mejorar esta propiedad. Esto otorgaría la posibilidad de agregar más cantidad fibras a la mezcla si en dado caso fuese necesario.

6. Para poder reducir aún más la densidad del composite, una de las posibles opciones sería aumentar la cantidad de arena u otro agregado liviano en la mezcla y luego comparar los resultados. Esto no solo alivianaría el peso final del material sino también reducirá costos.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM International. **Annual Book of ASTM Standards**. Estados Unidos: s.e., 2004.
2. Billmeyer, Jr., Fred W. **Textbook of Polymer Science**. 2º edición. Nueva York: John Wiley and Sons, Inc., 1971. 598 pp.
3. Charrier, Jean-Michel. **Polymeric Materials and Processing: Plastics, Elastomers and Composites**. Munich: Hanser Publishers, 1991. 633 pp.
4. De Galiana Mingot, Tomás. **Pequeño Larousse de Ciencias y Técnicas**. París: Editorial Larousse, 1967. 1056 pp.
5. Den Hartog, J.P. **Strength of Materials**. Nueva York: Dover Publications, Inc., 1977. 323 pp.
6. García-Pelayo y Gross, Ramón y Micheline Durand. **Pequeño Larousse Español-Inglés, English-Spanish**. París: Ediciones Larousse, 1976. 1079 pp.
7. **Guía de Aplicaciones Plycem**. 2º edición. s.l.: s.e., Junio 2005. 19 pp.
8. Haynes, Jr. Carl y J.W. Simmns. "Construction with Surface Bonding" **U.S. Department of Agriculture: Agriculture Information Bulletin No. 374**. Washington, D.C.: Octubre 1974. 18 pp.
9. **La Enciclopedia Salvat**. Vol 2, 4, 5, 8 y 13. Madrid: Salvat Editores, S.A., 2004.

10. Nawy, Edward G. **Concreto Reforzado: Un Enfoque Básico**. México: Prentice Hall, 1988. 743 pp.
11. Nilson, Arthur H. **Diseño de Estructuras de Concreto**. 12° edición. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill, 1999. 722 pp.
12. Ordoñez, Gabriel y otros. **Manual de Laboratorio del Curso de Materiales de Construcción**. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería: Agosto 2002, 145 pp.
13. Othmer, Kirk. **Concise Encyclopedia of Chemical Technology**. Nueva York: John Wiley and Sons, Inc., 1985. 1318 pp.
14. Productos Duralita, S.A. **Catálogo Internacional Plycem**. s.l.: s.e., Mayo 1990.
15. Robb, Louis A. **Diccionario para Ingenieros Español-Inglés, Inglés-Español**. 2° edición. Nueva York: John Wiley and Sons, Inc., 1949. 664 pp.
16. Tarnopol'skii, Yu. M. y T. Kincis. **Static Test Methods for Composites**. Nueva York: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1985. 301 pp.
17. **The World Book Encyclopedia**. Vol. 7. Londrés: World Book International, 1995.
18. Tobolsky, Arthur V. y Herman, F. Mark. **Polymer Science and Materials**. Hungington, Nueva York: Robert E. Krieger Publishing Company, 1980. 404 pp.
19. Zeceña Girón, Carlos E. **Laboratorio de Resistencia de Materiales 1: Compendio del Libro "Ensayo e Inspección de los Materiales"**. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería. s.a.

APÉNDICE

Tabla XXXVIII. Cálculos de los resultados obtenidos del esfuerzo a tensión.

7 Días				28 Días			
		(Kg/cm²)	(psi)			(Kg/cm²)	(psi)
0%	1	24.62	350.00	0%	1	37.98	540.00
	2	33.05	470.00		2	37.27	530.00
	3	32.35	460.00		3	37.27	530.00
0.10%	1	38.68	550.00	0.10%	1	42.20	600.00
	2	36.57	520.00		2	42.55	605.00
	3	36.57	520.00		3	40.09	570.00
0.25%	1	28.13	400.00	0.25%	1	40.79	580.00
	2	32.70	465.00		2	37.98	540.00
	3	32.00	455.00		3	39.38	560.00
0.50%	1	39.38	560.00	0.50%	1	45.01	640.00
	2	38.68	550.00		2	42.20	600.00
	3	37.27	530.00		3	44.31	630.00
1%	1	42.55	605.00	1%	1	47.12	670.00
	2	40.09	570.00		2	44.31	630.00
	3	45.01	640.00		3	52.75	750.00
2.50%	1	35.52	505.00	2.50%	1	49.93	710.00
	2	32.35	460.00		2	46.42	660.00
	3	42.69	607.00		3	49.93	710.00

Tabla XXXIX. Cálculos de los resultados obtenidos del esfuerzo a compresión.

7 Días	
(Kg/cm ²)	(psi)

0%	1	251.88	3581.37
	2	174.38	2479.41
	3	205.38	2920.20
0.10%	1	248.78	3537.29
	2	257.69	3664.02
	3	253.81	3608.92
0.25%	1	267.38	3801.76
	2	255.75	3636.47
	3	259.63	3691.57
0.50%	1	193.75	2754.90
	2	213.13	3030.39
	3	213.13	3030.39
1%	1	206.93	2942.24
	2	226.69	3223.24
	3	201.50	2865.10
2.50%	1	228.63	3250.78
	2	217.00	3085.49
	3	230.56	3278.33

28 Días	
(Kg/cm ²)	(psi)

0%	1	381.30	5421.65
	2	372.00	5289.41
	3	420.05	5972.63
0.10%	1	399.13	5675.10
	2	426.25	6060.78
	3	329.38	4683.33
0.25%	1	399.13	5675.10
	2	418.50	5950.59
	3	410.75	5840.39
0.50%	1	387.50	5509.80
	2	389.05	5531.84
	3	375.88	5344.51
1%	1	364.25	5179.22
	2	346.43	4925.76
	3	386.73	5498.78
2.50%	1	290.63	4132.35
	2	329.38	4683.33
	3	352.63	5013.92

Tabla XL. Cálculos de los resultados obtenidos del módulo de ruptura.

				7 Días				28 Días			
				MPa		(psi)		MPa		(psi)	
0%	1	2.99	433.89		1	5.98	867.78		2	8.23	1193.20
	2	3.52	509.82								
0.10%	1	4.86	705.07		1	6.36	922.02		2	6.73	976.25
	2	4.86	705.07								
0.25%	1	3.74	542.36		1	6.73	976.25		2	8.23	1193.20
	2	4.49	650.84								
0.50%	1	7.11	1030.49		1	8.60	1247.43		2	5.98	867.78
	2	6.73	976.25								
1%	1	4.11	596.60		1	8.60	1247.43		2	6.36	922.02
	2	5.61	813.54								
2.50%	1	8.38	1214.89		1	8.23	1193.20		2	9.72	1410.14
	2	7.48	1084.73								

Tabla XLI. Cálculos de los resultados obtenidos del momento de ruptura.

7 Días	
Nm/m	Lb ft/ft

0%	1	144.10	32.39
	2	169.32	38.06
0.10%	1	234.16	52.64
	2	234.16	52.64
0.25%	1	180.12	40.49
	2	216.15	48.59
0.50%	1	342.24	76.93
	2	324.22	72.89
1%	1	198.14	44.54
	2	270.19	60.74
2.50%	1	403.48	90.70
	2	360.25	80.98

28 Días	
Nm/m	Lb ft/ft

0%	1	288.20	64.79
	2	396.27	89.08
	3	288.20	64.79
0.10%	1	306.21	68.84
	2	324.22	72.89
	3	216.15	48.59
0.25%	1	324.22	72.89
	2	396.27	89.08
	3	306.21	68.84
0.50%	1	414.29	93.13
	2	288.20	64.79
	3	306.21	68.84
1%	1	414.29	93.13
	2	306.21	68.84
	3	360.25	80.98
2.50%	1	396.27	89.08
	2	468.32	105.28
	3	396.27	89.08

Tabla XLII. Cálculos de los resultados obtenidos la densidad.

		Peso (gramos)	Volumen (cm³)	Densidad (g/cm³)
Control	1	61.8	32	1.93
	2	57.1	30	1.90
	3	56.8	31	1.83
	4	60	32.5	1.85
	5	61.2	32.5	1.88
0.10%	1	59.3	32	1.85
	2	60.1	32	1.88
	3	56.6	30	1.89
	4	59.9	33	1.82
	5	59	32	1.84
0.25%	1	61	32.5	1.88
	2	60.3	32.5	1.86
	3	60.4	34	1.78
	4	58	31.5	1.84
	5	62.4	34.5	1.81
0.50%	1	62.8	32.5	1.93
	2	59.3	32	1.85
	3	62.2	33	1.88
	4	57.9	32	1.81
	5	60	32	1.88
1%	1	53.3	28.5	1.87
	2	57.2	31	1.85
	3	59.5	32	1.86
	4	58.5	32.5	1.80
	5	57.1	32	1.78
2.50%	1	47	26	1.81
	2	56.7	31.5	1.80
	3	52.4	30.5	1.72
	4	60.8	33	1.84
	5	61	33.5	1.82

Tabla XLIII. Sumatoria de la cantidad de componentes por proporción.

Mezcla	Cemento	Arena	Fibra	Agua	Suma
0%	1	0.25	0	0.4	1.65
0.10%	1	0.25	0.001	0.4	1.651
0.25%	1	0.25	0.0025	0.4	1.6525
0.50%	1	0.25	0.005	0.4	1.655
1%	1	0.25	0.01	0.4	1.66
2.50%	1	0.25	0.025	0.4	1.675

Tabla XLIV. Unitario de los componentes por proporción.

Mezcla	Densidad (Kg/m³)	Suma de componentes	Unitario (Kg)
0%	1879	1.65	1138.788
0.10%	1855	1.651	1123.561
0.25%	1832	1.6525	1108.623
0.50%	1871	1.655	1130.514
1%	1832	1.66	1103.614
2.50%	1798	1.675	1073.433

Tabla XLV. Cantidad de material en Kg para hacer un m³ de cada mezcla.

Mezcla	Cemento	Arena	Fibra	Agua
0%	1138.79	284.70	0.00	455.52
0.10%	1123.56	280.89	1.12	449.42
0.25%	1108.62	277.16	2.77	443.45
0.50%	1130.51	282.63	5.65	452.21
1%	1103.61	275.90	11.04	441.45
2.50%	1073.43	268.36	26.84	429.37

Figura 52. Fallas típicas de las briquetas ensayadas a tensión. A) Control, B) 0.1%, C) 0.25%, D) 0.5%, E) 1% y F) 2.5%.



A)



B)



C)



D)

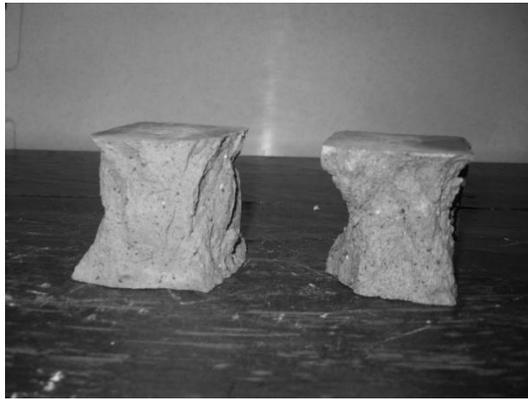


E)



F)

Figura 53. Fallas típicas de los cubos ensayados a compresión. A) Control, B) 0.1%, C) 0.25%, D) 0.5%, E) 1% y F) 2.5%.



A)



B)



C)



D)

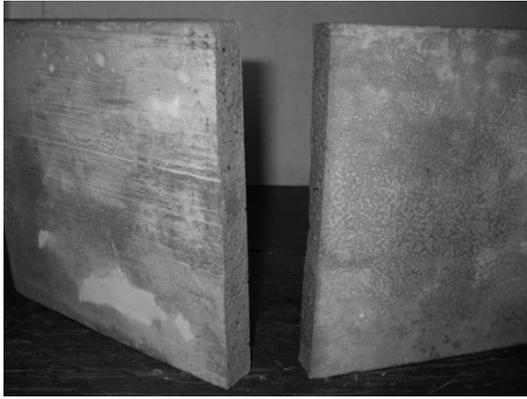


E)

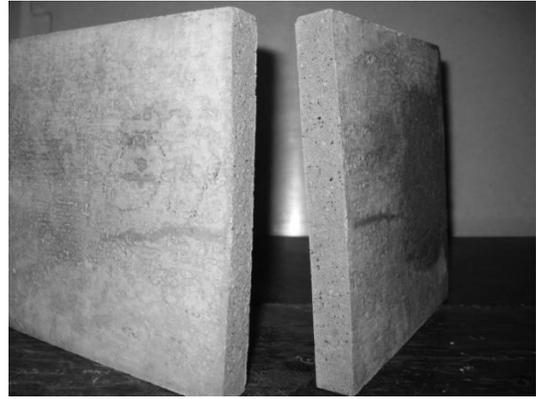


F)

Figura 54. Fallas típicas de las planchas ensayadas a flexión. A) Control, B) 0.1%, C) 0.25%, D) 0.5%, E) 1% y F) 2.5%.



A)



B)



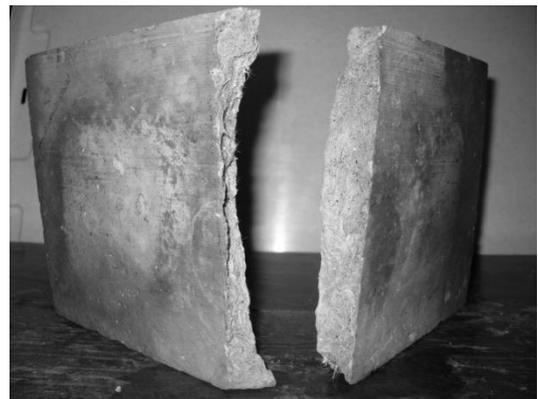
C)



D)



E)



F)



Interesado: Juan Luis Irving Valladares Carnè No. 2006-11257

Proyecto: Trabajo de Graduación "Evaluación de Composites de Cemento-fibra de vidrio"

Asunto: Diseño de mezclas de mortero y resistencia a la compresión y tensión a 7 y 28 días

Fecha: 05 de Noviembre de 2009

1. **Generalidades:** El interesado proporcionó los materiales siendo estos, cemento, arena, fibra de vidrio y agua.

2. **Procedimiento:** Se diseñó y trabajó de acuerdo con la norma ASTM C-270.

3. **Resultados:**

3.1 **Proporción del Mortero:** 1: 0,25: 0: 0,4

3.2 **Resistencia a la Compresión:**

No.	EDAD EN DIAS	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3				
1	7	6500	4500	5300	5433,33	25,81	210,54	2994,58
2	28	9840	9600	10840	10093,33	25,81	391,12	5562,94

3.3 **Resistencia a la Tensión:**

No.	EDAD EN DIAS	CARGA (lbs)			CARGA PROMEDIO (lb)	ÁREA (plg ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		BRIQUETA 1	BRIQUETA 2	BRIQUETA 3				
1	7	350	470	460	426,67	1	30,01	426,77
2	28	540	530	530	533,33	1	37,51	533,47

OBSERVACIONES:

a) Dicho diseño corresponde a la mezcla Control.

Atentamente:

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora CII/USAC



Inga. Dilma Yangel Mejicanos Jol
Jefa Sección de Concretos

m.c.



INFORME No. S.C. – 1173

O.T. No. 25727

Hoja 2/12

Interesado: Juan Luis Irving Valladares Carnè No. 2006-11257

Proyecto: Trabajo de Graduación "Evaluación de Composites de Cemento-fibra de vidrio"

Asunto: Diseño de mezclas de mortero y resistencia a la compresión y tensión a 7 y 28 días

Fecha: 05 de noviembre de 2009

1. Generalidades: El interesado proporcionó los materiales siendo estos, cemento, arena, fibra de vidrio y agua.

2. Procedimiento: Se diseñó y trabajó de acuerdo con la norma ASTM C-270.

3. Resultados:

3.1 Proporción del Mortero: 1: 0,25: 0,001: 0,4

3.2 Resistencia a la Compresión:

No.	EDAD EN DIAS	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3				
1	7	6420	6650	6550	6540,00	25,81	253,43	3604,52
2	28	10300	11000	8500	9933,33	25,81	384,86	5473,94

3.3 Resistencia a la Tensión:

No.	EDAD EN DIAS	CARGA (lbs)			CARGA PROMEDIO (lb)	ÁREA (plg ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		BRIQUETA 1	BRIQUETA 2	BRIQUETA 3				
1	7	550	520	520	530,00	1	37,27	530,13
2	28	600	605	570	591,67	1	41,61	591,81

OBSERVACIONES :

a) Dicho diseño corresponde a la mezcla con 0,10% de fibra de vidrio.

Atentamente:

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora CII/USAC



Inga. Dilma Yaret Mejicanos Jol
Jefa Sección de Concretos



m.c.



INFORME No. S.C. – 1173

O.T. No. 25727

Hoja 3/12

Interesado: Juan Luis Irving Valladares Carnè No. 2006-11257

Proyecto: Trabajo de Graduación "Evaluación de Composites de Cemento-fibra de vidrio"

Asunto: Diseño de mezclas de mortero y resistencia a la compresión y tensión a 7 y 28 días

Fecha: 05 de noviembre de 2009

1. Generalidades: El interesado proporcionó los materiales siendo estos, cemento, arena, fibra de vidrio y agua.

2. Procedimiento: Se diseñó y trabajó de acuerdo con la norma ASTM C-270.

3. Resultados:

3.1 Proporción del Mortero: 1: 0,25: 0,0025: 0,4

3.2 Resistencia a la Compresión:

No.	EDAD EN DIAS	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3				
1	7	6900	6600	6700	6733,33	25,81	260,92	3711,08
2	28	10300	10800	10600	10566,67	25,81	409,46	5823,82

3.3 Resistencia a la Tensión:

No.	EDAD EN DIAS	CARGA (lbs)			CARGA PROMEDIO (lb)	ÁREA (plg ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		BRIQUETA 1	BRIQUETA 2	BRIQUETA 3				
1	7	400	465	455	440,00	1	30,94	440,11
2	28	580	540	560	560,00	1	39,38	560,14

OBSERVACIONES :

a) Dicho diseño corresponde a la mezcla con 0,25% de fibra de vidrio.

Atentamente:

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora CII/USAC



Inga. Dilma Yaret Mejicanos Jol
Jefa Sección de Concretos



m.c



INFORME No. S.C. – 1173

O.T. No. 25727

Hoja 4/12

Interesado: Juan Luis Irving Valladares Carnè No. 2006-11257

Proyecto: Trabajo de Graduación "Evaluación de Composites de Cemento-fibra de vidrio"

Asunto: Diseño de mezclas de mortero y resistencia a la compresión y tensión a 7 y 28 días

Fecha: 05 de noviembre de 2009

1. Generalidades: El interesado proporcionó los materiales siendo estos, cemento, arena, fibra de vidrio y agua.

2. Procedimiento: Se diseñó y trabajó de acuerdo con la norma ASTM C-270.

3. Resultados:

3.1 Proporción del Mortero: 1: 0,25: 0,005: 0,4

3.2 Resistencia a la Compresión:

No.	EDAD EN DIAS	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3				
1	7	5000	5500	5500	5333,33	25,81	206,67	2939,47
2	28	10000	10040	9700	9913,33	25,81	384,14	5463,73

3.3 Resistencia a la Tensión:

No.	EDAD EN DIAS	CARGA (lbs)			CARGA PROMEDIO (lb)	ÁREA (plg ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		BRIQUETA 1	BRIQUETA 2	BRIQUETA 3				
1	7	560	550	530	546,67	1	38,44	546,80
2	28	640	600	630	623,33	1	43,84	623,49

OBSERVACIONES :

a) Dicho diseño corresponde a la mezcla con 0,50% de fibra de vidrio.

Atentamente:

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora CII/USAC



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Concretos



m.c.



INFORME No. S.C. – 1173

O.T. No. 25727

Hoja 5/12

Interesado: Juan Luis Irving Valladares Carnè No. 2006-11257

Proyecto: Trabajo de Graduación "Evaluación de Composites de Cemento-fibra de vidrio"

Asunto: Diseño de mezclas de mortero y resistencia a la compresión y tensión a 7 y 28 días

Fecha: 05 de noviembre de 2009

1. Generalidades: El interesado proporcionó los materiales siendo estos, cemento, arena, fibra de vidrio y agua.

2. Procedimiento: Se diseñó y trabajó de acuerdo con la norma ASTM C-270.

3. Resultados:

3.1 Proporción del Mortero: 1: 0,25: 0,01: 0,4

3.2 Resistencia a la Compresión:

No.	EDAD EN DIAS	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3				
1	7	5340	5850	5200	5463,33	25,81	211,70	3011,12
2	28	9400	8940	9980	9440,00	25,81	365,80	5202,86

3.3 Resistencia a la Tensión:

No.	EDAD EN DIAS	CARGA (lbs)			CARGA PROMEDIO (lb)	ÁREA (plg ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		BRIQUETA 1	BRIQUETA 2	BRIQUETA 3				
1	7	605	570	640	605,00	1	42,55	605,15
2	28	670	630	750	683,33	1	48,06	683,50

OBSERVACIONES :

a) Dicho diseño corresponde a la mezcla con 1% de fibra de vidrio.

Atentamente:

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora CI/USAC



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Concretos



m.c.



INFORME No. S.C. – 1173

O.T. No. 25727

Hoja 6/12

Interesado: Juan Luis Irving Valladares Carnè No. 2006-11257

Proyecto: Trabajo de Graduación "Evaluación de Composites de Cemento-fibra de vidrio"

Asunto: Diseño de mezclas de mortero y resistencia a la compresión y tensión a 7 y 28 días

Fecha: 05 de noviembre de 2009

1. Generalidades: El interesado proporcionó los materiales siendo estos, cemento, arena, fibra de vidrio y agua.

2. Procedimiento: Se diseñó y trabajó de acuerdo con la norma ASTM C-270.

3. Resultados:

3.1 Proporción del Mortero: 1: 0,25: 0,025: 0,4

3.2 Resistencia a la Compresión:

No.	EDAD EN DIAS	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		CUBO 1	CUBO 2	CUBO 3				
1	7	5900	5600	5950	5816,67	25,81	225,40	3205,86
2	28	7500	8500	9100	8366,67	25,81	324,21	4611,29

3.3 Resistencia a la Tensión:

No.	EDAD EN DIAS	CARGA (lbs)			CARGA PROMEDIO (lb)	ÁREA (plg ²)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		BRIQUETA 1	BRIQUETA 2	BRIQUETA 3				
1	7	505	460	607	524,00	1	36,85	524,13
2	28	710	660	710	693,33	1	48,76	693,51

OBSERVACIONES :

a) Dicho diseño corresponde a la mezcla con 2,5% de fibra de vidrio.

Atentamente:

Vo.Bo.

Inga. Telma Marcela Cano Morales
Directora CII/USAC



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Concretos



m.c.



INFORME No. S.C. - 1173

O.T. No. 25727

Hoja 7/12

Interesado: Juan Luis Irving Valladares Carnè No. 2006-11257
Proyecto: Trabajo de Graduación "Evaluación de Composites de Cemento-fibra de vidrio"
Asunto: Diseño de mezclas de mortero y resistencia a flexión a 7 y 28 días
Fecha: 05 de Noviembre de 2009

1. **Generalidades:** El interesado proporcionó los materiales siendo estos, cemento, arena, fibra de vidrio y agua.

2. **Procedimiento:** Se diseñó y trabajó de acuerdo con la norma ASTM C-270.

3. **Resultados:**

3.1 **Proporción del Mortero:**

3.2 **Resistencia a flexión:**

No.	EDAD EN DIAS	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		VIGA 1	VIGA 2	VIGA 3			
1	7	40	47	---	43,50	33,19	472,00
2	28	80	110	80	90,00	68,66	976,55

OBSERVACIONES :

- a) Dicho diseño corresponde a la mezcla control.

Atentamente,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora CII/USAC



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Concretos



m.c.



INFORME No. S.C. – 1173

O.T. No. 25727

Hoja 8/12

Interesado: Juan Luis Irving Valladares Carné No. 2006-11257
Proyecto: Trabajo de Graduación "Evaluación de Composites de Cemento-fibra de vidrio"
Asunto: Diseño de mezclas de mortero y resistencia a flexión a 7 y 28 días
Fecha: 05 de Noviembre de 2009

1. **Generalidades:** El interesado proporcionó los materiales siendo estos, cemento, arena, fibra de vidrio y agua.

2. **Procedimiento:** Se diseñó y trabajó de acuerdo con la norma ASTM C-270.

3. **Resultados:**

3.1 **Proporción del Mortero:**

3.2 **Resistencia a flexión:**

No.	EDAD EN DIAS	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		VIGA 1	VIGA 2	VIGA 3			
1	7	65	65	---	65,00	49,59	705,29
2	28	85	90	60	78,33	59,76	849,96

OBSERVACIONES :

a) Dicho diseño corresponde a la mezcla con 0,10% de fibra de vidrio.

Atentamente,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora CII/USAC



Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Concretos



m.c.



INFORME No. S.C. - 1173

O.T. No. 25727

Hoja 9/12

Interesado: Juan Luis Irving Valladares Carnè No. 2006-11257
Proyecto: Trabajo de Graduación "Evaluación de Composites de Cemento-fibra de vidrio"
Asunto: Diseño de mezclas de mortero y resistencia a flexión a 7 y 28 días
Fecha: 05 de Noviembre de 2009

- 1. Generalidades:** El interesado proporcionó los materiales siendo estos, cemento, arena, fibra de vidrio y agua.
- 2. Procedimiento:** Se diseñó y trabajó de acuerdo con la norma ASTM C-270.
- 3. Resultados:**

3.1 Proporción del Mortero:

3.2 Resistencia a flexión:

No.	EDAD EN DIAS	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		VIGA 1	VIGA 2	VIGA 3			
1	7	50	60	-----	55,00	41,96	596,78
2	28	90	110	85	95,00	72,47	1030,81

OBSERVACIONES :

- a) Dicho diseño corresponde a la mezcla con 0,25% de fibra de vidrio.

Atentamente,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora CII/USAC



Inga. Dilma Yaret Mejicanos Jol
Jefa Sección de Concretos

m.c.



INFORME No. S.C. - 1173

O.T. No. 25727

Hoja 10/12

Interesado: Juan Luis Irving Valladares Carné No. 2006-11257
Proyecto: Trabajo de Graduación "Evaluación de Composites de Cemento-fibra de vidrio"
Asunto: Diseño de mezclas de mortero y resistencia a flexión a 7 y 28 días
Fecha: 05 de Noviembre de 2009

- 1. Generalidades:** El interesado proporcionó los materiales siendo estos, cemento, arena, fibra de vidrio y agua.
- 2. Procedimiento:** Se diseñó y trabajó de acuerdo con la norma ASTM C-270.
- 3. Resultados:**

3.1 Proporción del Mortero:

3.2 Resistencia a flexión:

No.	EDAD EN DIAS	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		VIGA 1	VIGA 2	VIGA 3			
1	7	95	90	-----	92,50	70,57	1003,68
2	28	115	80	85	93,33	71,20	1012,72

OBSERVACIONES:

- a) Dicho diseño corresponde a la mezcla con 0,50% de fibra de vidrio.

Atentamente,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora CII/USAC



Inga. Dilma Yaret Mejicanos Jol
Jefa Sección de Concretos

m.c.



INFORME No. S.C. – 1173

O.T. No. 25727

Hoja 11/12

Interesado: Juan Luis Irving Valladares Carnè No. 2006-11257
Proyecto: Trabajo de Graduación "Evaluación de Composites de Cemento-fibra de vidrio"
Asunto: Diseño de mezclas de mortero y resistencia a flexión a 7 y 28 días
Fecha: 05 de Noviembre de 2009

- 1. Generalidades:** El interesado proporcionó los materiales siendo estos, cemento, arena, fibra de vidrio y agua.
- 2. Procedimiento:** Se diseñó y trabajó de acuerdo con la norma ASTM C-270.
- 3. Resultados:**

3.1 Proporción del Mortero:

3.2 Resistencia a flexión:

No.	EDAD EN DIAS	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		VIGA 1	VIGA 2	VIGA 3			
1	7	55	75	-----	65,00	49,59	705,29
2	28	115	85	100	100,00	76,29	1085,06

OBSERVACIONES :

- Dicho diseño corresponde a la mezcla con 1% de fibra de vidrio.

Atentamente,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
 Directora CII/USAC



Inga. Dilia Yaret Mejicanos Jol
 Jefa Sección de Concretos

m.c.



INFORME No. S.C. – 1173

O.T. No. 25727

Hoja 12/12

Interesado: Juan Luis Irving Valladares Carnè No. 2006-11257
Proyecto: Trabajo de Graduación "Evaluación de Composites de Cemento-fibra de vidrio"
Asunto: Diseño de mezclas de mortero y resistencia a flexión a 7 y 28 días
Fecha: 05 de Noviembre de 2009

1. **Generalidades:** El interesado proporcionó los materiales siendo estos, cemento, arena, fibra de vidrio y agua.
2. **Procedimiento:** Se diseñó y trabajó de acuerdo con la norma ASTM C-270.
3. **Resultados:**

3.1 Proporción del Mortero:

3.2 Resistencia a flexión:

No.	EDAD EN DIAS	CARGA (kg)			CARGA PROMEDIO (kg)	RESISTENCIA (kg/cm ²)	RESISTENCIA (PSI)
		VIGA 1	VIGA 2	VIGA 3			
1	7	112	100	----	106,00	80,87	1150,16
2	28	110	130	110	116,67	89,00	1265,90

OBSERVACIONES :

- a) Dicho diseño corresponde a la mezcla con 2,50% de fibra de vidrio.

Atentamente,

Vo.Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
Directora CIVUSAC



Inga. Dilma Yaret Mejicanos Jol
Jefa Sección de Concretos



m.c.