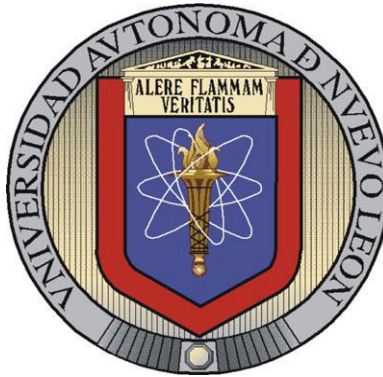


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL
REFUERZO TRANSVERSAL POR FIBRAS DE ACERO A CORTANTE POR
TENSIÓN DIAGONAL EN VIGAS**

**PRESENTADA POR
GREGORIO CASTRUITA VELÁZQUEZ**

**PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

NOVIEMBRE 2018.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE LA SUSTITUCIÓN
PARCIAL DEL REFUERZO TRANSVERSAL POR FIBRAS DE
ACERO A CORTANTE POR TENSIÓN DIAGONAL EN VIGAS.

Por

GREGORIO CASTRUITA VELÁZQUEZ.

Como requisito para obtener el grado de MAESTRÍA EN
CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE
CONSTRUCCIÓN.

Director de tesis.

Dr. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO.

NOVIEMBRE, 2018.



**ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL
REFUERZO TRANSVERSAL POR FIBRAS DE ACERO A CORTANTE POR
TENSIÓN DIAGONAL EN VIGAS.**

Aprobación de la Tesis:

DR. CÉSAR ANTONIO JUAREZ ALVARADO

Director de Tesis

DR. JOSÉ MANUEL MENDOZA RANGEL.

Evaluador de Tesis

DR. BERNARDO TADEO TERÁN TORRES.

Evaluador de Tesis

DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO

Subdirector de Estudios de Posgrado.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FIC



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UANL
DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Presente:

Estimado Dr. Juárez Alvarado:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalicé la revisión de (Tesis) con título **"ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL REFUERZO TRANSVERSAL POR FIBRAS DE ACERO A CORTANTE POR TENSIÓN DIAGONAL EN VIGAS"**, que presenta el **ING. GREGORIO CASTRUITA VELÁZQUEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el 23 de octubre de 2018.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que consideren pertinente.

Atentamente

"ALERE FLAMMAM VERITATIS"

Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. a 17 de septiembre de 2018

Dr. César Antonio Juárez Alvarado
Director de la Tesis



*"Educación de clase mundial.
un compromiso social"*

Código: FOR-SEP-01; Revisión: 01

Av. Universidad S/N Cd. Universitaria Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
Tels.: (81) 1442 4400 ext. 4447 y 4448, 8329 4000 ext. 7216 y 7234
<http://www.fic.uanl.mx>
Correo: subpos@uanl.mx



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FIC

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UANL
DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Presente:

Estimado Dr. Juárez Alvarado:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que finalicé la revisión de la tesis con título “**ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL REFUERZO TRANSVERSAL POR FIBRAS DE ACERO A CORTANTE POR TENSIÓN DIAGONAL EN VIGAS**”, que presenta el **ING. GREGORIO CASTRUITA VELÁZQUEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el 23 de octubre de 2018.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que consideren pertinente.

Atentamente

“ALERE FLAMMAM VERITATIS”

Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L. a 17 de septiembre de 2018

Dr. José Manuel Mendoza Rangel
Evaluador



“Educación de clase mundial,
un compromiso social”

Código: FOR-SEP-01; Revisión: 01

Av. Universidad S/N Cd. Universitaria Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66455
Tels.: (81) 1442 4400 ext. 4447 y 4448, 8329 4000 ext. 7216 y 7234
<http://www.fic.uanl.mx>
Correo: subpos@uanl.mx



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FIC

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UANL
DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Presente:

Estimado Dr. Juárez Alvarado:

Por medio de la presente hago de su conocimiento que he finalizado la revisión de Tesis con título **"ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL REFUERZO TRANSVERSAL POR FIBRAS DE ACERO A CORTANTE POR TENSIÓN DIAGONAL EN VIGAS"**, que presenta el **ING. GREGORIO CASTRUITA VELÁZQUEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad del documento, dictamino que el mismo es **APROBADO** y la fecha del examen de grado será el 23 de octubre de 2018.

Sin otro particular por el momento, estoy a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que consideren pertinente.

Atentamente

"ALERE FLAMMAM VERITATIS"

Cd. Universitaria, a 17 de septiembre de 2018.



Dr. Bernardo Tadeo Terán Torres

Evaluador de la Tesis

Agradecimientos.

En primer lugar, doy gracias a Dios por brindarme sabiduría y entendimiento para poder superar y resolver todos los obstáculos que se me fueron presentando durante este periodo de estudio.

A toda mi familia, en especial a mis padres Felipe de Jesús Castruita Lozano y Rosalinda Velázquez Sánchez, mi mejor ejemplo, porque siempre me han apoyado, guiado por el camino correcto y con humildad.

La realización de este proyecto no hubiera sido posible sin el apoyo y la ayuda de mi asesor, el Doctor César Antonio Juárez Alvarado, a quien le expreso mi más sincero agradecimiento por su atinada asesoría y dedicación al desarrollo de esta investigación.

Agradezco a los catedráticos que con paciencia y ética supieron aportarnos todos sus conocimientos para hacer de nosotros unos profesionistas de bien.

A mis compañeros Jorge Luis Herrera de Casas, José Valdez, Aldrhyn Esquivel y José Guadalupe Martínez que siempre estuvieron dispuestos a ayudarme, ya que su ayuda fue imprescindible para la realización de mi proyecto.

A los laboratorios de Tecnología del concreto y estructuras por el gran apoyo con el equipo necesario para poder llevar acabo la realización del proyecto, en especial al Ingeniero José Román Villa Bárcenas por su tiempo y humildad.

Dedicatorias.

A quien me da la vida,
y la oportunidad de ser mejor persona cada día...

A mi familia...
por ser mi principal motor y siempre apoyarme en todos mis proyectos.

Porque todas las cosas proceden de él, y existen por él y para él.
Romanos 11,36.

Índice.

Lista de figuras.....	xii
Listas de tablas.....	xv
Nomenclatura.....	xvi
Resumen.....	xviii
Capítulo 1.....	2
Descripción del proyecto de investigación.....	2
1.1. Marco teórico.....	2
1.1.1. Falla a cortante por tensión diagonal.....	4
1.1.2. Formación de grietas diagonales.....	7
1.1.3. Tensión diagonal antes de la aparición de la grieta.....	8
1.1.4. Causas de falla por cortante de tensión diagonal.....	9
1.1.5. Fuerzas internas de cortante por tensión diagonal.....	10
1.1.6. Formas en que actúan los esfuerzos cortantes.....	13
1.2. Refuerzo tradicional en el alma.....	15
1.3. Las fibras de acero, como refuerzo transversal.....	18
1.4. Concreto reforzado con fibras.....	20
1.5. Concreto reforzado con fibra de acero.....	22
1.6. Modelos matemáticos para predecir la resistencia a cortante.....	24
1.6.1. Método del ACI 318.....	24
1.6.2. Modelo de Swamy.....	26
1.6.3. Modelo de Narayanan.....	27
1.7. Antecedentes.....	30
1.8. Planteamiento del problema.....	34
1.9. Hipótesis.....	36
1.10. Objetivo general.....	36
1.10.1. Objetivos específicos.....	37
1.11. Justificación.....	38
1.12. Metas.....	39

Capítulo 2.	41
Metodología de investigación.....	41
2.1. Caracterización de los materiales.....	41
2.1.1. Propiedades físicas de los agregados.....	41
2.1.2. Cemento.....	43
2.1.3. Aditivo.....	43
2.1.4. Diseño de mezclas.....	44
2.1.5. Pruebas al concreto en estado fresco.....	46
2.1.6. Pruebas de concreto en estado endurecido.....	47
2.1.6.1. Fabricación de especímenes cilíndricos.....	48
2.1.6.2. Descripción de ensayos a cilindros.....	49
2.1.6.2.1. Ensayos a compresión.....	49
2.1.6.2.2. Ensayos a tensión diametral.....	50
2.1.7. Propiedades del acero de refuerzo.....	51
2.1.8. Propiedades de las fibras de acero.....	53
2.2. Diseño de vigas fibroreforzadas.....	54
2.2.1. Dimensionamiento de las vigas.....	54
2.2.2. Determinación del acero de refuerzo longitudinal.....	55
2.3. Fabricación de vigas fibroreforzadas.....	59
2.3.1. Preparación de las cimbras metálicas.....	60
2.3.2. Identificación de especímenes.....	62
2.3.3. Dosificación de los materiales.....	64
2.3.4. Procedimiento de mezclado.....	64
2.3.5. Elaboración de especímenes.....	66
2.3.6. Curado de especímenes.....	68
2.4. Ensayo de las vigas fibroreforzadas.....	69
2.4.1. Sistema de carga y arreglo de los ensayos.....	69
2.4.2. Desarrollo de los ensayos.....	71

Capítulo 3.	73
Discusión de resultados.....	73
3.1. Características de los materiales.....	73
3.1.1. Propiedades físicas de los agregados.	73
3.1.2. Cemento.....	76
3.1.3. Aditivo.....	76
3.1.4. Diseño de mezclas.	76
3.1.5. Propiedades del concreto en estado fresco.	78
3.1.6. Propiedades mecánicas del concreto endurecido.	78
3.1.6.1. Resistencia a la compresión de los cilindros de concreto.	78
3.1.6.2. Resistencia a la tensión por compresión diametral.	81
3.2. Resistencia del acero de refuerzo.	86
3.3. Resistencia de las fibras de acero.	88
3.4. Resistencia teórica a cortante por tensión diagonal en vigas de concreto.....	88
3.5. Resistencia experimental a cortante por tensión diagonal en vigas. ...	91
3.5.1. Resistencia experimental en vigas fibroreforzads sin refuerzo transversal.....	92
3.5.1.1. Modo de falla.....	92
3.5.1.2. Influencia de la relación a/c en el comportamiento carga-deflexión.....	94
3.5.1.3. Comportamiento carga-deflexión experimental contra el teórico.	96
3.5.2. Resistencia experimental en vigas fibroreforzadas con refuerzo transversal.....	99
3.5.2.1. Modo de falla.....	99
3.5.2.2. Comportamiento teórico-experimental de vigas fibroreforzadas.	103
3.5.2.2.1. Resistencia máxima de las vigas con relación a/c=0.55.	103
3.5.2.2.2. Resistencia a cortante experimental y teórica.....	108
3.5.2.2.3. Resistencia máxima de las vigas con relación a/c=0.35... ..	110
3.5.2.2.4. Resistencia a cortante experimental y teórica.....	115



3.6. Comportamiento carga-deflexión experimental de vigas fibroreforzadas y con refuerzo transversal.....	117
3.7. Relación teórica-experimental de las vigas fibroreforzadas sujetas a cortante.....	121
Capítulo 4.....	129
Conclusiones.....	129
Capítulo 5.....	132
Recomendaciones.....	132
Referencias.....	135
Anexo.....	142

Lista de figuras.

Figura	Página.
1; Distribución de esfuerzos en viga de concreto sometida a carga uniforme....	7.
2; Requerimientos de equilibrio en el claro de cortante de viga.....	11.
3; Partícula de concreto que representa los esfuerzos cortantes verticales..	13.
4; Tipos de refuerzo en el alma.....	17.
5; Geometría de las distintas fibras de acero.....	19.
6; Viga reforzada con refuerzo tradicional y falla frágil.....	35.
7; Especímenes cilíndricos para los ensayos de resistencia a compresión.	48.
8; Ensayo a tensión diametral en cilindros de concreto fibroreforzado.....	50.
9; Ensayo a tensión de refuerzo transversal.....	52.
10; Dimensiones de fibra de acero P50-100.....	53.
11; Geometría general de las vigas.....	54.
12; Arreglo de acero longitudinal y transversal de las vigas de referencia..	56.
13; Arreglo de armado de las vigas fibroreforzadas.....	58.
14. Colocación y detallado del refuerzo transversal.....	58.
15; Armado de cimbras de acero.....	61.
16; Revolvedora de mezclado inverso.....	65.
17; Traslado y colocación de la mezcla de concreto.....	66.
18; Vibrado de mezcla de concreto.....	67.
19; Curado de las vigas con membrana plástica.....	69.
20; Arreglo del ensayo de las vigas.....	70.
21; Registro de carga a la aparición de grieta.....	71.
22; Resistencia a la compresión $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$	79.
23; Resistencia a la compresión $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$	80.

24; Ensayo de tensión por compresión diametral	82.
25; Resistencia a la tensión por compresión diametral $a/c=0.55$	83.
26; Resistencia a la tensión por compresión diametral $a/c=0.35$	84.
27; Muestras y ensayos a tensión del acero transversal.....	87.
28; Patrón de agrietamiento para las vigas sin refuerzo transversal.....	93.
29; Carga-deformación de vigas sin refuerzo transversal.....	96.
30; Carga-deflexión teórica y experimental de vigas sin refuerzo transversal $a/c=0.55$	98.
31; Carga-deflexión teórica y experimental de vigas sin refuerzo transversal $a/c=0.35$	98.
32; Patrón de agrietamiento de vigas con refuerzo transversal $a/c=0.55$	100.
33; Patrón de agrietamiento de vigas con refuerzo transversal $a/c=0.35$	101.
34; Carga-deflexión de vigas de control con vigas 0.3% fibras.....	106.
35; Carga-deflexión de vigas de control con vigas 0.5% fibras.....	106.
36; Carga-deflexión de vigas de control con vigas 0.7% fibras.....	107.
37; Carga-deflexión de vigas de control con vigas 0.3%, 0.5%, 0.7% fibras.....	107.
38; Esfuerzo a cortante diagonal máxima teórica y experimental de $a/c=0.55$	110.
39; Carga-deflexión de vigas de control con vigas 0.2% fibras.....	113.
40; Carga-deflexión de vigas de control con vigas 0.4% fibras.....	114.
41; Carga-deflexión de vigas de control con vigas 0.6% fibras.....	114.
42; Carga-deflexión de vigas de control con vigas 0.2%, 0.4%, 0.6% fibras.....	115.
43; Esfuerzo a cortante diagonal máxima teórica y experimental de $a/c=0.35$	117.

44; Esfuerzo-deformación de vigas de referencia con vigas sin refuerzo transversal de la relación $a/c=0.55$	118.
45; Esfuerzo-deformación de vigas de referencia con vigas sin refuerzo transversal de la relación $a/c=0.35$	120.
46; Carga-deformación de la comparación teórica-experimental de la $a/c=0.55$ con el porcentaje 0.0% de fibras.....	122.
47; Carga-deformación de la comparación teórica-experimental de la $a/c=0.55$ con el porcentaje 0.3% de fibras.....	123.
48; Carga-deformación de la comparación teórica-experimental de la $a/c=0.55$ con el porcentaje 0.5% de fibras.....	123.
49; Carga-deformación de la comparación teórica-experimental de la $a/c=0.55$ con el porcentaje 0.7% de fibras.....	124.
50; Carga-deformación de la comparación teórica-experimental de la $a/c=0.35$ con el porcentaje 0.0% de fibras.....	125.
51; Carga-deformación de la comparación teórica-experimental de la $a/c=0.35$ con el porcentaje 0.2% de fibras.....	125.
52; Carga-deformación de la comparación teórica-experimental de la $a/c=0.35$ con el porcentaje 0.4% de fibras.....	126.
53; Carga-deformación de la comparación teórica-experimental de la $a/c=0.35$ con el porcentaje 0.6% de fibras.....	126.
54; Resistencia experimental a cortante y resistencia ultima.....	127.

Listas de tablas.

Tabla	Página.
1; Proporcionamiento de mezcla de pruebas.....	46.
2; Características del arreglo de los especímenes de prueba.....	59.
3; Identificación y características de los especímenes.....	63.
4; Distribución granulométrica del agregado grueso.....	74.
5; Distribución granulométrica del agregado fino.....	74.
6; Propiedades físicas del agregado grueso y fino.....	75.
7; Proporcionamiento final de 250 kg/cm ²	77.
8; Proporcionamiento final de 350 kg/cm ²	77.
9; Resultado de ensayo a tensión del acero de refuerzo transversal.....	87.
10; Resistencia nominal teórica a cortante ACI.....	89.
11; Resistencia nominal teórica a cortante Swamy.....	90.
12; Resistencia nominal teórica a cortante Narayanan.....	90.
13; Resultados la carga máxima aplicada teórica-experimental a/c=0.55.	104.
14; Resistencia a cortante diagonal teórica-experimental a/c=0.55.....	108.
15; Resultados de la carga máxima aplicada teórica-experimental a/c=0.35.	111.
16; Resistencia a cortante diagonal teórica-experimental a/c=0.35.....	116.

Nomenclatura.

CRFA	Concreto reforzado con fibras
a/c	Relación agua/cemento
ACI	Instituto Americano del Concreto
AG	Agregado grueso
AF	Agregado fino
As	Área de acero longitudinal
ASTM	Sociedad Americana de Pruebas y Materiales
Av	Área de acero por cortante
bw	Ancho del alma
C	Compresión
cm	Centímetros
cm ²	Centímetros cuadrados
d	Peralte efectivo
Es	Módulo de elasticidad del acero
f _c	Esfuerzo de compresión del concreto a los 28 días de edad
Fu	Esfuerzo último
fv	Esfuerzo de tensión diagonal
Fy	Esfuerzo de fluencia del acero
kg	Kilogramos
L	Litros
m ³	Metros cúbicos
mm	Milímetros

Mu	Momento ultimo
P	Carga concentrada
T	Tensión
V	Fuerza cortante externa
Va	Resistencia al cortante del agregado
Vc	Resistencia al cortante del concreto
Vd	Fuerza de dovela
Vn	Resistencia nominal cortante
Vs	Resistencia nominal al cortante del acero
Vu	Resistencia al cortante último
ϵ	Deformación unitaria
ρ	Porcentaje de acero
σ	Esfuerzo de compresión
Φ	Diámetro

Resumen.

En la actualidad el uso de fibras de acero se ha convertido en parte importante del refuerzo en elementos estructurales de concreto, lo cual incrementa el desarrollo de la investigación de los comportamientos mecánicos, tales comportamientos requieren aportación experimental como teórica, por lo que se requiere de modelos matemáticos que evalúen la aportación de la fibras en los elementos estructurales.

El uso de fibras de acero en combinación con los estribos como refuerzo transversal se presenta como una alternativa más para contrarrestar los esfuerzos de cortante por tensión diagonal.

La presente investigación pretende aportar una alternativa más para solucionar el problema de la falla de cortante por tensión diagonal, mejorando las propiedades mecánicas con la combinación de estribos y fibras de acero, como refuerzo transversal, esperando un incremento en la resistencia a la primera grieta por cortante, incremento en la resistencia última, ductilidad y tenacidad.

El desarrollo del presente trabajo se llevó a cabo con la comparación analítica- experimental del comportamiento a cortante por tensión diagonal de 20 vigas de concreto reforzado, con dimensiones; 200 cm de largo, 25 cm de altura y 15 cm de ancho . Se utilizaron dos relaciones $(a/c) = 0.55$ y 0.35 , además se varió la separación de estribos (0 cm, 15 cm, 25 cm, 30 cm, 35 cm) y el porcentaje de fibras de acero ($a/c = 0.55$; 0.0, 0.3, 0.5, 0.7 y $a/c = 0.35$; 0.0, 0.2, 0.4, 0.6). Las vigas se fabricaron

por duplicado por cada relación (a/c), ocho pares de vigas con estribos y dos pares de vigas sin estribos. Se ensayaron las 20 vigas bajo carga estática produciendo altos valores de esfuerzo cortante en la zona de claro a cortante.

Los resultados obtenidos de forma experimental mostraron que la resistencia a cortante diagonal de las vigas fibroreforzadas, con estribos y sin estribos, es considerablemente mayor que la fuerza teórica estimada por el código del ACI-318. Adicionalmente, se evaluaron procedimientos teóricos de predicción de resistencia a cortante en vigas de concreto fibroreforzado, mediante la comparación de dos modelos matemáticos obtenidos de la literatura (Swamy y Narayanan) y los datos experimentales de las 20 vigas ensayadas a cortante por tensión diagonal. Se encontró que los dos modelos predicen adecuadamente el efecto de la relación a/c, el volumen de fibra (V_f), la aportación del acero longitudinal y la presencia de estribos en la resistencia última a cortante.

Los modelos de Swamy y Narayanan predijeron valores conservadores con respecto a la resistencia última a cortante, acercándose al valor alcanzado por la resistencia a cortante experimental.

CAPÍTULO 1.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.

Capítulo 1.

Descripción del proyecto de investigación.

1.1. Marco teórico.

El concreto es el material de construcción que más se utiliza en la actualidad, fácil fabricación, relativamente económico y de gran durabilidad, presenta una resistencia a compresión alta, pero una escasa resistencia a tensión. Por ello, en el siglo XIX surgió el concreto armado, en donde los esfuerzos a tensión son resistidos por armaduras convencionales de acero.

Las estructuras reforzadas suelen utilizar varillas corrugadas rectas en la mayor parte de los casos. Se proponen en las zonas sujetas a tensión de los elementos, para formar esfuerzos normales producto de fuerza cortante y momento flexionante (V , M). Sin embargo, las grietas de tensión indican como los esfuerzos principales obedecen a una orientación inclinada por el efecto del cortante. Si el concreto no es capaz de resistir dichas acciones se propone un refuerzo transversal para reducir el agrietamiento por cortante (Khuntia et al, 2001).

Tratando de darle una solución a este problema; en el pasado, se han utilizado alternativas para mejorar las propiedades de tensión del concreto, mediante la utilización de varillas de acero, reforzando de la manera tradicional. Estos métodos proporcionan resistencia a la tensión de los elementos de concreto, sin embargo, no aumentan la resistencia a la tensión del propio concreto simple. Por tal motivo, una alternativa es la fibra de acero que

proporciona una resistencia superior a la flexión, resistencia al impacto, resistencia al agrietamiento y baja permeabilidad (Shin et al, 1994).

La utilización de fibra de acero distribuidas aleatoriamente en la mezcla de concreto tiene la finalidad estructural cuando se considera su contribución en los cálculos relativos al estado limite último o de servicio del elemento, su empleo puede implicar la sustitución parcial o total de su refuerzo transversal en algunas aplicaciones, debido a la distribución de las fibras que mejoran sus características de cortante por tensión diagonal, tenacidad y resistencia a flexo-tensión (EHE, 2008).

El uso de las fibras de acero proviene de la idea básica de fortalecer la matriz de concreto ante estos esfuerzos de tensión. La distribución de las fibras en conjunto con el concreto conduce a un mejor comportamiento, debido a que se reduce la naturaleza frágil del elemento. Como consecuencia del uso de la fibra de acero, se propicia que el compuesto presente mayor tenacidad, ya que estas pueden absorber energía antes de llegar al colapso o falla del elemento. La adición de fibras de acero en el concreto ayuda a convertir su característica frágil en una dúctil. Esto se debe a que las fibras quedan uniformemente distribuidas y orientadas de manera aleatoria en todas direcciones en la masa del concreto (Ashour et al, 1992).

El concreto reforzado con fibras de acero tiene un mecanismo de comportamiento diferente y mejor con respecto al concreto simple, tal que, la primera grieta se forma para cargas superiores, después de esa primera grieta se tiene una etapa dúctil, tras alcanzarse una resistencia máxima, que depende

del volumen, de la relación de aspecto (diámetro/longitud) y de la adherencia de las fibras.

Para los porcentajes de fibra usuales, aumenta poco la resistencia en lo que respecta a la aparición de la primera grieta; sin embargo, aumenta significativamente en lo referente a la resistencia última. El refuerzo equivalente de las fibras es menor que el refuerzo tradicional unidireccional, tal que, mejora considerablemente la tenacidad de los elementos por su condición de isotropía.

Las fibras han venido revolucionando el mercado desde su introducción a mediados del siglo XX, cada día estos tipos de concretos son más usados, es por ello, que desde el año 2008 la Institución Española del Concreto Estructural, incluyó en su ejemplar un anexo con prescripciones y requisitos para el uso de fibras de acero (EHE, 2008), es el caso de esta investigación, en donde se utilizaran fibras de acero para contrarrestar los efectos de los esfuerzos de tensión producto de los esfuerzos de cortante.

1.1.1. Falla a cortante por tensión diagonal.

El cortante se desarrolla en diversas situaciones en las estructuras de concreto. En la mayoría de los casos, en el cálculo de vigas de concreto por fuerza cortante, lo que más nos interesa son los esfuerzos de cortante, y no los propios esfuerzos producto del corte directo, ya que, la mayoría de las fallas por cortante se deben a la tensión diagonal existente en el elemento. La sección debe proveer la cantidad necesaria de acero para mantener el equilibrio vertical, por lo que se debe tomar especial cuidado en este tipo de detalles al realizar el diseño de vigas de concreto reforzado por este efecto.

El efecto de la fuerza cortante se analiza en elementos sometidos simultáneamente a momento flexionante, como generalmente sucede, y también cuando existe carga axial. Es claro que el concreto puede fácilmente soportar la compresión diagonal, pero cuando el esfuerzo de tensión es demasiado grande se producirá una grieta de forma inclinada contraria a la acción de tensión.

Un elemento de concreto se agrietará de manera perpendicular a la dirección de los esfuerzos principales; esto se debe, a que la resistencia del concreto a esfuerzos de tensión es baja (aproximadamente 10% de la del esfuerzo a compresión), ver figura 1. En las vigas de concreto es necesario proporcionar acero de refuerzo y con ello contrarrestar los esfuerzos de tensión del concreto en cualquier zona de este efecto (Nilson, 1999).

El principal efecto que produce la fuerza cortante en un elemento de concreto es el desarrollo de fuerzas internas, las cuales influyen en el equilibrio del cuerpo libre, el cual está limitado en un lado por una grieta diagonal.

En donde la grieta por cortante diagonal es la combinación de tres fuerzas:

- Una fuerza cortante a través de la zona de compresión V_c .
- Una fuerza de dovela transmitida a través de la grieta mediante el esfuerzo V_d de flexión.
- Las componentes verticales de los esfuerzos cortantes inclinados V_a transmitidos a través de la grieta inclinada por medio de la trabazón de las partículas del agregado.

El comportamiento de las fuerzas que representan el equilibrio del cuerpo libre se encuentra expresado en la ecuación 1.

$$V = V_c + V_a + V_d \quad \text{Ec. 1.}$$

La ecuación 1 representa la aportación de las zonas más relevantes, la compresión, la acción de dovela a la resistencia cortante y la trabazón del agregado en una viga sin refuerzo en el alma (Nilson, 1999).

R. Park y T. Paulay (Park et al, 1990) explican como ocurre el desplazamiento cortante a lo largo de una grieta inclinada, la fuerza cortante se transfiere por efecto de la acción de dovela del refuerzo de flexión. Una vez que ocurren grietas por desgajamiento, se reduce considerablemente la rigidez, y por consecuencia también disminuye la efectividad de la acción de dovela. Sin embargo, la acción de dovela V_d es más notoria cuando se utiliza refuerzo transversal (estribos), debido a que una varilla de flexión puede apoyarse con mayor efectividad contra un estribo que este doblado estrechamente contra ella. Aun así, se desarrollan grietas casi paralelas a las varillas de flexión antes que los estribos contribuyan a transmitir fuerzas de dovela. Por lo tanto, la rigidez del mecanismo de dovela dependerá considerablemente de la posición de una grieta relativa a los estribos adyacentes que podrían soportar una fuerza de dovela.

1.1.2. Formación de grietas diagonales.

La flexión y cortante se combinan en un miembro de concreto reforzado para crear un estado biaxial de esfuerzos como se muestra en la figura 1. Por tanto, cuando los esfuerzos principales de tensión exceden la resistencia a tensión del concreto, se forman grietas. En la región de grandes momentos flexionantes, estos esfuerzos son máximos en la fibra extrema a tensión del miembro y producen grietas de flexión perpendicular al eje del miembro. En donde la región de elevada fuerza cortante, se pueden generar esfuerzos principales de tensión significativos, también conocidos como tensión diagonal, aproximadamente a 45° respecto al eje del miembro, lo que puede producir grietas inclinadas por tensión diagonal (Ferguson M. , 1969).

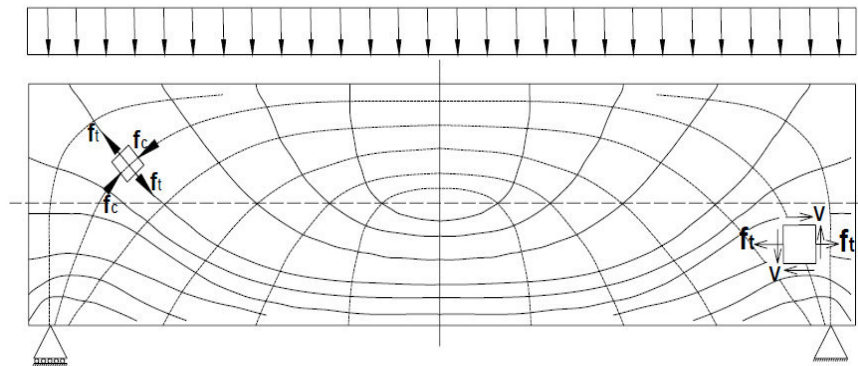


Figura 1. Distribución de esfuerzos en viga de concreto sometida a carga uniforme

(Park et al, 1990).

Encontrando la continuidad de las grietas de flexión en el centro del claro, aunado a esto, la carga de agrietamiento diagonal que se origina de la flexión y cortante es más pequeña de lo que se esperaría del análisis de

esfuerzos principales y de la resistencia a tensión del concreto, lo cual, se debe a la presencia de esfuerzos de contracción, a la redistribución de esfuerzos entre grietas de flexión y cortante, así como la reducción de área del elemento, provocando un patrón regular de discontinuidad a lo largo de la viga (Harmsen, 2005).

Considerando lo anterior se reconoce que es aceptable el agrietamiento diagonal bajo condiciones de carga de servicio, con tal que los anchos de las grietas permanezcan dentro de los mismos límites aceptados para las grietas de flexión (Nilson, 1999).

1.1.3. Tensión diagonal antes de la aparición de la grieta.

Los elementos de concreto reforzado, antes de la formación de la primera grieta se comporta de una manera semejante a un elemento de concreto homogéneo. Donde se puede hacer énfasis en los esfuerzos de tensión diagonal presentados. Los esfuerzos originan una grieta diagonal a partir de la última grieta presentada por esfuerzos de flexión, convirtiendo gradualmente los esfuerzos en una grieta inclinada bajo una carga cortante. Estas grietas de tensión diagonal son casi perpendiculares a las trayectorias que se presentan en la figura 1, mostrando una viga con una carga uniforme. Las trayectorias de las grietas de una viga de concreto reforzado se comportará muy semejante a la viga de la figura 1, hasta el momento que las grietas se abran de una manera vertical debido a la flexión y su origen sea en la mitad inferior del elemento. Las grietas por tensión diagonal por lo general, se abren

más o menos a 45° con respecto al eje de la viga, iniciando por lo general en la parte superior de una grieta originada por esfuerzos de flexión (Park et al, 1990).

Este tipo de falla se presenta en secciones con poco o nulo refuerzo transversal en el alma, ocurre cuando el concreto no es capaz de soportar el esfuerzo de tensión máximo, y se provoca una grieta inclinada perpendicular a la trayectoria del esfuerzo de tensión; la falla se produce súbitamente al presentarse la primera grieta inclinada importante a una altura de medio peralte causando el colapso del elemento.

1.1.4. Causas de falla por cortante de tensión diagonal.

La falla por cortante diagonal es una de las más complicadas de predecir, por ser una falla donde se combinan los esfuerzos de compresión y tensión. Los esfuerzos de compresión son tomados por el concreto y los de flexión por el acero de refuerzo, pero como se mencionó antes, la resistencia del concreto a la tensión es aproximadamente el 10% de la compresión; aunado a esto, el cálculo del elemento se complica o el diseño sea el inadecuado, es decir, donde la viga de concreto puede ser débil para resistir las cargas externas y las fuerzas cortantes se puedan pronunciar, dando origen a que se presente una falla de cortante por tensión diagonal. La fuerza cortante es la resultante de todas las fuerzas verticales que actúan en una viga de una sección considerada; es decir, es la sumatoria de las fuerzas verticales que se presentan para que el elemento se mantenga en equilibrio. Es de donde surge el tema de poner especial cuidado en este tipo de fallas a la hora que se esté realizando el cálculo del diseño de un elemento de concreto reforzado.

Es claro que el concreto es uno de los materiales de mayor capacidad, y mejores características para soportar cargas y esfuerzos de compresión, es por ello, que puede fácilmente resistir esfuerzos de compresión diagonales, pero cuando se presenta un esfuerzo de tensión diagonal grande, se llega a producir en el elemento una grieta de tensión diagonal. Tomando en cuenta lo anterior, se puede ver que una viga de concreto reforzado depende de la resistencia a tensión del concreto, es decir, la relación entre la resistencia a la tensión y la resistencia a la compresión es menor para concretos de alta resistencia que para concretos de baja resistencia. Considerando que la falla por cortante es una falla del concreto en tensión diagonal, la sección crítica para el cortante en construcción monolítica no está en el apoyo mismo, solo que la grieta de tensión diagonal se extiende para el mismo. Donde una grieta con una dirección de 45° aproximadamente, no se puede formar hasta que se alcance una sección a una distancia igual al peralte efectivo(d) del apoyo (suponiendo que la tensión diagonal es suprimida por el apoyo), y el área máxima del refuerzo de cortante, tal que, se calcula para la fuerza cortante en esa sección (Cowan, 1989).

1.1.5. Fuerzas internas de cortante por tensión diagonal.

En un elemento simplemente apoyado se encuentran fuerzas internas y externas, las cuales participan en mantener el cuerpo libre en equilibrio, tales fuerzas son mostradas en la figura 2, tal que, está limitada por un lado por una grieta diagonal.

La grieta de cortante por tensión diagonal es resistida por la sumatoria de tres fuerzas internas; la aportación de la resistencia del concreto a la compresión, los esfuerzos de dovela y la correcta trabazón de los agregados. La principal función de los esfuerzos mostrados en la figura 2, es mantener el cuerpo libre de la estructura, tales equilibrio se expresa en la ecuación 1.

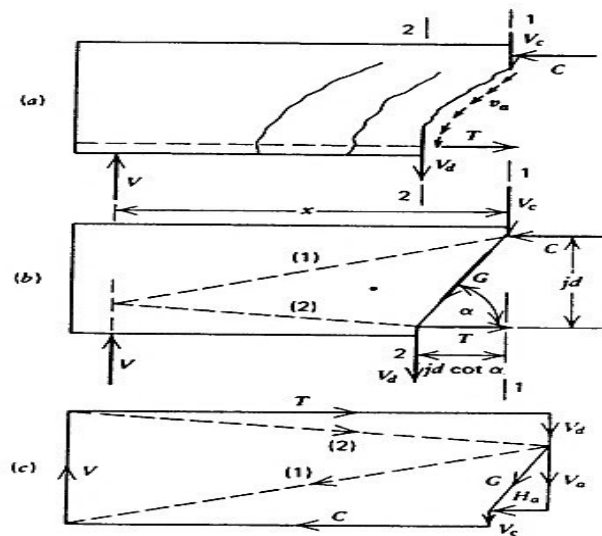


Figura 2. Requerimientos de equilibrio en el claro de cortante de una viga
(Park et al, 1990).

La fuerza V_c se refiere a la fuerza que trata de cortar a la viga de manera directa en forma vertical, empleada por la zona de compresión (fibra superior del elemento). La fuerza cortante V_a se genera en el refuerzo a flexión de la viga al querer contrarrestar las fuerzas transmitidas a través de las grietas. Existen tres mecanismos que pueden desarrollar la resistencia de dovela a través de un plano cortante; por medio de la flexión de la varilla de refuerzo, de la resistencia al corte a través de la varilla y torcedura del refuerzo. La fuerza V_d

se puede expresar en términos de la resistencia de cedencia del acero de refuerzo.

R. Park y T. Paulay (Park et al, 1990), explican como ocurre el desplazamiento cortante a lo largo de una grieta inclinada, la cantidad de cortante que se transfiere por el efecto de la acción de dovela del refuerzo de flexión. Una vez que ocurren las grietas por desgajamiento, se reduce considerablemente la rigidez, y por consecuencia también disminuye la efectividad de la acción de dovela. Sin embargo, la acción de dovela V_d es más notoria cuando se utiliza refuerzo transversal (estribos), debido a que una varilla de flexión puede apoyarse con mayor efectividad contra un estribo que este doblado estrechamente contra ella. Aun así, se desarrollan grietas casi paralelas a las varillas de flexión antes que los estribos contribuyan a transmitir las fuerzas de dovela. Por lo tanto, la rigidez del mecanismo de dovela dependerá considerablemente de la posición de una grieta relativa a los estribos adyacentes que podrían soportar una fuerza de dovela.

La tercera y última fuerza interna que interviene para contrarrestar la fuerza cortante transversal es la del agregado, a través de la trabazón que existe entre los mismos. El avance de las grietas inclinadas hacia la zona de compresión hace que se produzcan rotaciones considerables en las vigas, lo cual significa que se ha terminado la capacidad de dovela por parte del acero de flexión. La formación de grietas de dovela y grietas diagonales secundarias cerca del refuerzo a flexión afectan la acción de trabazón del agregado, que en esta etapa transmite la magnitud de la carga.

1.1.6. Formas en que actúan los esfuerzos cortantes.

Tomando en cuenta el comportamiento de las fuerzas internas y externas en un elemento de concreto presentadas anteriormente, es necesario el conocimiento de los esfuerzos de cortante que se forman dentro del mismo elemento para su mejor entendimiento de su manera de comportamiento.

La fuerza cortante es la sumatoria de las fuerzas verticales que actúan en una sección de una viga a considerar; esta fuerza, dentro de un elemento como se muestra en la figura 3, genera esfuerzos verticales V_1 y esfuerzos cortante horizontales V_2 los cuales son iguales $V_1 = V_2 = V_{12}$, puesto que el equilibrio debe mantenerse.

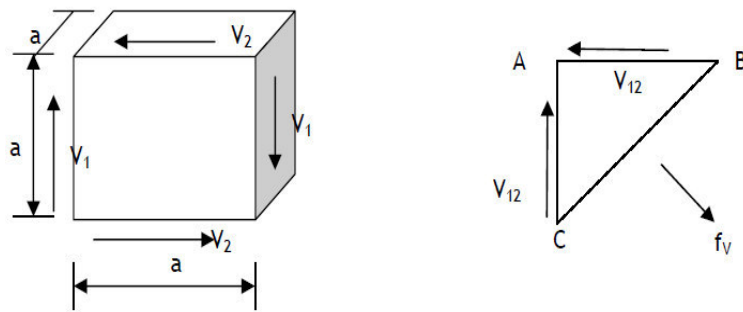


Figura 3. Partícula de concreto que representa los esfuerzos cortantes verticales V_1 y horizontales V_2 , donde la combinación de ambos llega a producir esfuerzos de tensión diagonal (Ferguson, 1969).

Analizando la partícula, se puede ver que, si se corta a la mitad, en diagonal; se podrá ver que los componentes diagonales de los esfuerzos cortantes verticales y horizontales se combinan para producir un esfuerzo de compresión diagonal en toda la sección a través de una diagonal, y un esfuerzo

de tensión diagonal f_v perpendicular a la misma diagonal. Donde el concreto puede resistir la compresión diagonal con facilidad; pero cuando los esfuerzos de tensión diagonal son demasiado grandes, es donde se dará origen a una grieta de tensión diagonal.

1.2. Refuerzo tradicional en el alma.

Las estructuras de concreto deben ser diseñadas de la manera, de sobrecargas, no deben presentar falla por cortante, sino que deben mostrar una adecuada ductilidad y avisar en caso de desastre inminente. Por esta razón, es de suma importancia usar refuerzo en el alma de una viga, para aumentar su capacidad de resistir las fuerzas de cortante por tensión diagonal. Donde el refuerzo en el alma de una viga desempeña funciones importantes; como detener el crecimiento y desarrollo de las grietas, como el incremento de la fuerza ultima e incremento de la capacidad en los claros de corte de las vigas para resistir fuerzas externas mayores.

El refuerzo transversal en forma de estribos mejora la capacidad por adherencia del elemento, ya que tienden a presentarse fallas por desprendimiento en el nivel del acero de refuerzo longitudinal. Por lo tanto, el refuerzo en el alma de una viga toma una posición importante de la fuerza cortante externa, donde el refuerzo actúa formando anillos cerrados, incrementa sustancialmente la capacidad de la zona de compresión, debido al efecto de confinamiento.

Después del desarrollo de las grietas diagonales, el refuerzo en el alma aumenta la resistencia a cortante de la viga de cuatro maneras distintas.

- Las barras que atraviesan la grieta particular resisten parte de la fuerza cortante.

- La presencia de estas mismas barras restringe el crecimiento de las grietas diagonales y reduce su penetración dentro de la zona de compresión.
- Los estribos contrarrestan el ensanchamiento de las grietas de manera que las dos caras de la grieta permanecen en estrecho cortante.
- Al estar los estribos distribuidos de manera que amarren el refuerzo longitudinal al cuerpo principal de concreto. Esto provee alguna medida de restricción contra la fractura del concreto a lo largo del refuerzo longitudinal.

El refuerzo utilizado en estructuras de concreto puede ser de distintos tipos. En algunos casos, se aprovecha del acero principal de flexión (barras dobladas), doblándolas en zonas donde ya no es requerido para tomar esfuerzos longitudinales (de tensión), de manera que atraviesen las regiones donde pueden presentarse grietas de cortante por tensión diagonal (Nilson, 1999).

La manera más común de refuerzo, se encuentran en los estribos inclinados donde las grietas presentadas pueden ser interceptadas con las barras inclinadas y espaciadas horizontalmente entre sí a una distancia calculada, tal y como se pueden observar en la figura 4. El correcto acomodo de estos elementos permite alinearse más estrechamente con los esfuerzos de tensión principal de la viga. Así como, apoyar a soportar etapas de carga y retardar sustancialmente la formación de las grietas por tensión diagonal. Dando a entender que el correcto cálculo del refuerzo en el alma de todo

elemento de concreto contribuye a disminuir el cortante diagonal, donde toda grieta presentada en el elemento este interceptada al menos por un estribo o una barra inclinada. De la manera contraria el refuerzo en el alma no sera de gran utilidad para el elemento dando a presentar una falla frágil o súbita. Cuando los estribos estén espaciados adecuadamente, la falla será inminente cuando estos comiencen a fluir, pero esta fluencia provoca un ensanchamiento en las grietas con la consecuente reducción de los efectos benéficos de restricción escritos anteriormente, donde se mencionan los beneficios del refuerzo en el alma.

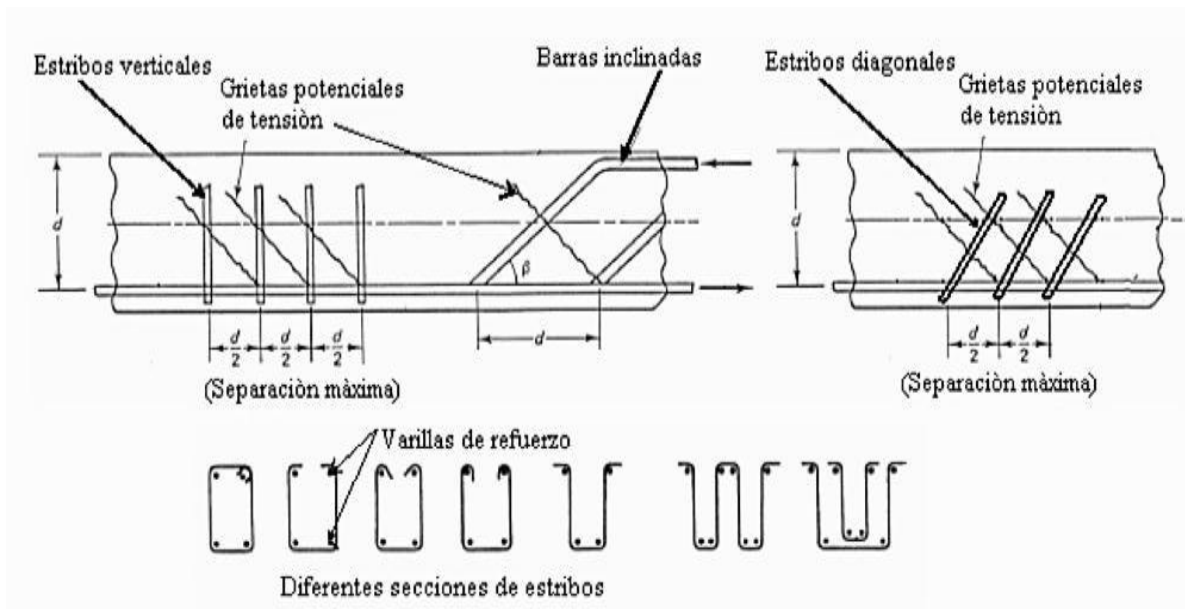


Figura 4. Tipos de refuerzo en el alma (Nilson, 1999).

1.3. Las fibras de acero, como refuerzo transversal.

El refuerzo en el alma es uno de los puntos importantes para el buen desempeño de un elemento de concreto, aunque el refuerzo presentado anteriormente muestre resultados favorables, hoy en día se encuentran otras alternativas de refuerzo con un mayor desempeño, ya que éstas pueden ayudar al elemento desde la matriz cementante, antes de que la grieta tenga un crecimiento considerable, estas son las fibras de acero, las cuales se colocan desde la elaboración de la mezcla, convirtiendo el concreto normal en un concreto fibroreforzado.

El concreto reforzado con fibra de acero es un material que en los últimos 20 años, se ha desarrollado de una forma acelerada gracias a la utilización de nuevas fibras y técnicas adecuadas de aplicación del concreto.

Las fibras de acero tienen diferentes aplicaciones, tales como la construcción de pisos industriales y pavimentos, en pistas de aeropuerto, en concreto lanzado en túneles y minería, en taludes y protección de pendientes, etc. Aunque la principal aplicación que pretendemos darle en esta investigación es de reforzar al concreto para estudiar su influencia en la resistencia de fuerzas cortantes ocasionadas por la tensión diagonal en vigas y de esa manera proponer recomendaciones para elementos saturados con refuerzo transversal en el alma.

Cuando las fibras de acero se agregan al concreto normal, se logra una matriz con fibras dispersas en forma aleatoria, pero de distribución uniforme, que mejoran sus características mecánicas. Las características físicas y

mecánicas de la fibra de acero son; anclaje, resistencia a la tensión, dosificación y lo que la norma ASTM 820-96, define como relación de aspecto (longitud entre diámetro equivalente), desempeñan un papel muy importante en los resultados de las pruebas. La norma mencionada, clasifica los distintos tipos de fibra metálica que se encuentra disponible en el mercado, tales se muestran en la figura 5.

La composición de la fibra de acero generalmente incluye carbono u otros componentes. En función de la aplicación del concreto fibroreforzado, se requerirá de diferentes morfologías, dosificaciones y composiciones minerales de la fibra.

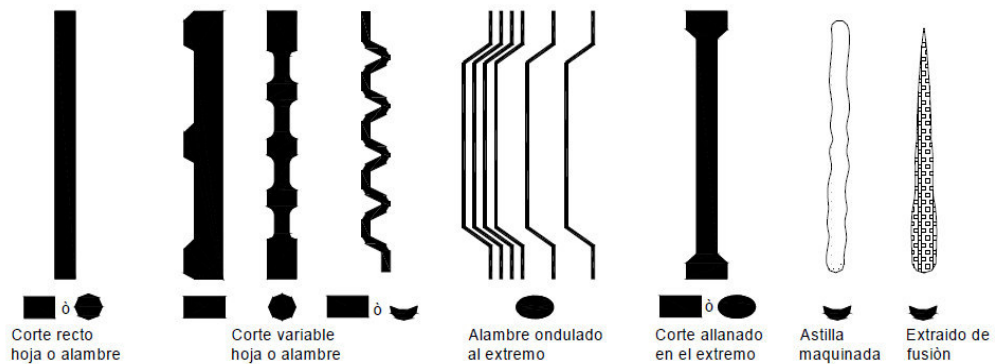


Figura 5. Geometrías de las distintas fibras de acero (ASTM-A-820, 1996)

1.4. Concreto reforzado con fibras.

Las fibras se han utilizado como refuerzo desde la antigüedad. Históricamente, la crin de caballo se utilizaba en el mortero y la paja en ladrillos de barro. A principios de 1900, las fibras de asbelto (almiato) se utilizaban en el concreto.

Las fibras son elementos de pequeño diámetro que se incorporan a la masa del concreto a fin de conferirle ciertas propiedades específicas como por ejemplo el control de agrietamiento, incremento de la resistencia al fuego, abrasión, impacto y otros (EHE, 2008).

Diversos estudios han demostrado la efectividad de las fibras como refuerzo para mejorar el comportamiento en el cortante del concreto estructural. El comportamiento del cortante de las vigas de concreto reforzado se han enfocado en el cálculo de los esfuerzos por tensión diagonal, debido a la presencia de grietas en el concreto y a la aportación que implica el refuerzo transversal que soporta a la fuerza cortante en la viga. Desde este punto de vista es posible agregar un refuerzo nuevo en los miembros estructurales de concreto reforzado, el resultado del estudio de las fibras de acero muestra un mejoramiento de la ductilidad en miembros estructurales de concreto fibroreforzado, incremento en la resistencia al cortante, en la tenacidad y en la resistencia al agrietamiento diagonal (Juarez, 2015).

Para encontrar una buena efectividad de las fibras en el elemento estructural, es de gran importancia la correcta selección de fibras para cada tipo de aplicación, dado que se puede encontrar en el mercado; dos tipos de

fibras las que funcionan como refuerzo estructural y las que funcionan como curado interno. La clasificación de las fibras se muestra a continuación, así como la fibra recomendada para esta experimentación.

Existen dos tipos de fibras: Estructurales y no estructurales:

Las fibras estructurales proporcionan una mayor energía de rotura al concreto en masa. La contribución de estas pueden ser consideradas en el cálculo a la respuesta de la sección de concreto (Steven, 2004).

- Fibras de acero.
- Fibras de vidrio.
- Fibras de carbón.

Las fibras no estructurales no se consideran en el cálculo ya que estas suponen una mejora ante determinadas propiedades como por ejemplo en el control de la fisura por retracción, incremento de la resistencia al fuego, abrasión, impacto, otros (Steven, 2004).

- Fibras de poliéster.
- Fibras de polietileno.
- Fibras de polipropileno.

Los tres tipos de fibra más utilizados en la construcción son: acero, polipropileno e inorgánicas.

1.5. Concreto reforzado con fibra de acero.

Los concretos con fibras de acero están formados, esencialmente, por un conglomerante hidráulico; generalmente cemento portland, agregados finos y gruesos, agua y fibras de acero discontinuas cuya misión es contribuir a la mejora de determinadas características de los concretos.

Los concretos reforzados con fibras de acero (CRFA) están elaborados por los mismos componentes que un concreto tradicional y con adición de fibras de acero. La inclusión de las fibras, además de alterar el comportamiento del concreto en estado endurecido, también lo hace en estado fresco.

En función de la cantidad de fibras que se van a adicionar al concreto y de la geometría de estas, el material compuesto tendrá que sufrir ciertas modificaciones respecto de un concreto tradicional. Estas modificaciones pasan principalmente por una limitación en el tamaño de agregado, menores valores de relación grava/arena, mayor cantidad de aditivos reductores de agua, y mayor demanda de finos entre otros.

El CRFA es un material compuesto que se caracteriza por un mayor comportamiento post-agrietamiento, debido a la capacidad de las fibras para puentear las caras agrietadas si están presentes en cantidad suficiente. La adición de fibras de acero en el concreto mejora la resistencia a la tensión antes y después del agrietamiento proporcionando un mejor control, el CRFA hace posible obtener un patrón de grietas más ampliamente distribuido, con anchos de fisura más pequeños y menos separación entre grietas. Las fibras podrían incluso evitar la formación de una grieta de cortante crítica única y retrasar la

aparición del mecanismo de falla de cortante, mejorando la capacidad de carga, mitigando el efecto de tamaño en el cortante o garantizando el refuerzo mínimo requerido por los códigos actuales. El uso de fibras es, por lo tanto, una ventaja clave en elementos estructurales en los que es difícil o incluso imposible instalar refuerzos transversales, como en placas de núcleo hueco extruidas (Cuenca, 2015).

1.6. Modelos matemáticos para predecir la resistencia a cortante.

En la presente investigación se establece un estudio teórico-experimental para determinar el comportamiento a cortante por tensión diagonal de elementos (vigas) reforzados con fibras de acero y estribos de acero. Se proponen tres modelos matemáticos para predecir los resultados de una manera teórica, proponiendo; el método ACI 318 (ACI 318, 2014), como base del diseño de estructuras reforzadas, así del mismo modo los modelos de Swamy y Narayanan (Narayanan et al, 1987) (Swamy et al, 1985), que tienen la función de diseñar estructuras con concreto fibroreforzado. Estos modelos son propuestos por los resultados confiables que mostraron en estudios anteriores relacionados al tema de investigación.

1.6.1. Método del ACI 318.

La resistencia nominal a cortante para cualquier sección de una viga de concreto reforzado por el modelo ACI, se obtienen de acuerdo con la ecuación 2, el cual considera la sumatoria del cortante diagonal aportado por el concreto y el refuerzo transversal (ACI 318, 2014).

$$V_n = V_c + V_s \quad \text{Ec. 2.}$$

Dónde:

V_n = Resistencia nominal a cortante teórica (N).

V_c = Resistencia a cortante proporcionada por el concreto (N).

V_s = Resistencia a cortante proporcionada por los estribos (N).

Para vigas sujetas únicamente a cortante por tensión diagonal, la resistencia al cortante que proporciona el concreto (V_c) se muestra en la ecuación 3, que se encuentra a continuación.

$$V_c = (0.16\lambda\sqrt{f'_c} + 17\rho_w \frac{V_u d}{M_u})b_w d \quad \text{Ec. 3.}$$

Dónde:

b_w = Ancho del alma (mm).

d = Peralte efectivo de la viga (mm).

f'_c = Esfuerzo de diseño a la compresión especificada a los 28 días (N/mm²).

M_u = Momento ultimo factorizado (N-mm).

V_u = Fuerza cortante ultima factorizada (N).

ρ_w = Relación del refuerzo longitudinal en el alma.

λ = Factor de la densidad del concreto = 1.0 para concreto de peso normal.

La resistencia al cortante que proporciona el acero de refuerzo (V_s) se define por el mismo modelo, como se muestra en la ecuación 4.

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad \text{Ec. 4.}$$

Dónde:

f_y = Esfuerzo a la fluencia de los estribos (N/mm²).

s = Separación entre estribos (mm).

A_v = Área de los estribos (mm²).

1.6.2. Modelo de Swamy.

Este modelo se caracteriza por un método simple y considera que una viga de concreto fibroreforzado sin estribos la determinación de cortante último se puede realizar de la siguiente manera con la ecuación 5, (Swamy et al, 1985).

$$V_u = (0.41\sigma_{ut})bd \quad \text{Ec. 5.}$$

Dónde:

V_u = Resistencia última a cortante teórica (N).

σ_{ut} = Esfuerzo último a tensión del concreto fibroreforzado sujeto a flexión (N/mm²).

b = Ancho de la viga (mm).

d = Peralte efectivo de la viga (mm).

El planteamiento del modelo de Swamy se diseñó para determinar el esfuerzo último a tensión del concreto fibroreforzado en flexión, con la intención de no tener que hacer tantos ensayos en laboratorio para determinar el resultado, por lo que el modelo propone que el σ_{ut} sea obtenido con las ecuaciones 6 y 7.

$$\sigma_{ut} = 0.97\sigma_m (1 - V_f) + 3.41V_f \left(\frac{L_f}{D_f}\right) \quad \text{Ec. 6.}$$

$$\sigma_m = 0.62\sqrt{f_{cm}} \quad \text{Ec. 7.}$$

Dónde:

f_{cm} = Resistencia a compresión del concreto fibroreforzado (N/mm²).

D_f = Diámetro de la fibra (mm).

L_f = Longitud de la fibra (mm).

V_f = Fracción de volumen de fibras.

σ_m = Resistencia a tensión del concreto fibroreforzado (N/mm²).

En el caso de la existencia de estribos en la viga, la aportación a la resistencia última a cortante obtenida de la ecuación de cortante se calcula con la ecuación 8.

$$V_w = \left(\frac{A_{sw}}{s} \right) d f_{ywm} \quad \text{Ec. 8.}$$

Dónde:

f_{ywm} = Esfuerzo en los estribos (N/mm²).

s = Separación entre estribos (mm).

A_{sw} = Área de los estribos (mm²).

V_w = Resistencia al cortante proporcionada por los estribos (kN).

1.6.3. Modelo de Narayanan.

Este modelo considera tres términos para el cálculo de la resistencia última a cortante, el primer término toma en cuenta la aportación de las fibras de acero reforzando al concreto, el segundo término considera la acción de “dovela” que proporciona el esfuerzo longitudinal y finalmente el ultimo termino propone la aportación de la resistencia a la extracción de las fibras en el

agrietamiento diagonal. De esta manera se proponen las ecuaciones de la 9 a la 13 (Narayanan et al, 1987).

$$V_u = e \left[A' f_{spfc} + B' p \frac{d}{a} \right] + V_b \quad \text{Ec. 9.}$$

$$e = 1.0 \quad \text{cuando } \frac{a}{d} > 2.8 \quad \text{Ec. 10.}$$

$$e = 2.8 \frac{d}{a} \quad \text{cuando } \frac{a}{d} \leq 2.8 \quad \text{Ec. 11.}$$

$$f_{spfc} = \frac{f_{cuf}}{A} + B + C\sqrt{F} \quad \text{Ec. 12.}$$

$$A = 20 - \sqrt{F} \quad \text{Ec. 13.}$$

Dónde:

a = Claro de cortante (mm).

d = Peralte efectivo de la viga (mm).

e = Factor adimensional que toma en cuenta la acción del efecto de arco.

f_{cuf} = Resistencia a compresión del concreto fibroreforzado (N/mm²).

f_{spfc} = Resistencia a tensión diametral del concreto fibroreforzado (N/mm²).

A = Constante adimensional.

A' = Constante adimensional = 0.24.

B = Constante = 0.7 N/mm².

B' = Constante = 80 N/mm².

C = Constante = 1 N/mm².

F = Factor de la fibra.

V_b = Fuerza de extracción de la fibra en el agrietamiento (N).

V_u = Resistencia última a cortante teórica (N).

ρ = Relación del refuerzo longitudinal.

Los factores identificados que influyen en la resistencia del concreto fibroreforzado, son la fracción del volumen de la fibra, la relación de aspecto y la interface que existe entre la fibra y la matriz, factores que se consideran en las ecuaciones 14 a la 16 para realizar el cálculo.

$$F = \left(\frac{L}{D}\right) p_f d_f \quad \text{Ec. 14.}$$

$$p = \frac{A_s}{bd} \quad \text{Ec. 15.}$$

$$V_b = 0.41(\tau)F \quad \text{Ec. 16.}$$

Dónde:

b = Ancho de la viga (mm).

d_f = Factor de adherencia según el tipo de fibra = 0.5 circulares; 0.75 onduladas; 1 endentada.

ρ_f = Fracción de volumen de fibras.

τ = Esfuerzo de adherencia última = 4.15 N/mm

1.7. Antecedentes.

Diversos estudios han demostrado la efectividad de las fibras como refuerzo para mejorar el comportamiento en cortante del concreto estructural.

Un ejemplo de estos estudios es el realizado por el Doctor Joaquim A. O. Barros en el 2005, donde sustituye fibras de acero de diferentes morfologías (df) en vigas reforzadas convencionalmente cargados a flexión, donde reportó el aumento favorable de la resistencia a la primera grieta, y la resistencia última del elemento estructural (Barros, 2005).

Jimmy Susetyo, Paul Gauveau y Frank J. Vecchio, encuentran que la adición de fibras de acero funciona para aumentar la rigidez de las vigas, reduciendo así la deflexión del elemento y en base a sus resultados demuestran que la resistencia al agrietamiento de los elementos aumenta con el contenido de fibra (Jimmy et al, 2011)

Las fibras de acero se han usado como refuerzo en el alma y junto con los estribos forman un refuerzo a cortante diagonal, sin embargo, estudios demuestran que el uso de la fibra de acero en el concreto ha demostrado un aumento en la resistencia; en la primera grieta, resistencia ultima, ductilidad, absorción de energía e impacto (Emma et al, 2012)

Un aspecto importante es su relación de aspecto de la fibra (L/d), el cual permite detener el agrietamiento diagonal. Las fibras de acero también pueden soportar la tensión máxima por adherencia y transmitir el esfuerzo a la matriz cementante o bien ser extraídas del concreto, esto ocurre generalmente cuando la adherencia no es la adecuada.

En algunas investigaciones se ha encontrado que las fibras de acero mejora la resistencia en la primera grieta y la carga máxima en vigas de concreto reforzado sujetas a cortante (Juarez, 2015).

La adición de fibras discontinuas orientadas al azar en los materiales cementosas reduce el nivel de micro-grietas y mejora la tenacidad, ductilidad y post- resistencia al agrietamiento al cortante de los elementos de concreto (Dipti et al, 2015).

El concreto reforzado con fibras de acero, es un material compuesto con ventajas y propiedades específicas de las que se podrá beneficiar notablemente en comparación con los métodos tradicionales de armado.

Los concretos reforzados con fibra de acero son de suma importancia por el desempeño que han otorgado a la industria de la construcción, por sus diversas aplicaciones tales como son; pisos industriales, muros de refuerzo, túneles, entre otros. Esto gracias a la aportación que genera la fibra de acero al anclarse en la matriz cementante, incrementando las propiedades mecánicas de los elementos estructurales (Dariel et al, 2015).

El concreto normal tiene mayor resistencia a la compresión y menor a la tensión, por lo que para mejorar el comportamiento del concreto se añaden algunos tipos de fibras a la mezcla, el concreto reforzado con fibras es un tipo de concreto el cual aumenta su fuerza estructural y de cohesión

Estos concretos tienen mayor ductilidad que los concretos tradicionales, se debe proveer una dispersión uniforme de las fibras y prevenir una segregación o agrupación de las mismas (erizos). Durante las últimas décadas se ha dado un importante desarrollo en la industria de la construcción.

La elección del tipo de fibra generalmente está condicionada por su aplicación, pero también influyen factores económicos, de disponibilidad de materiales y de durabilidad. Por lo que surgen estudios teóricos, basado en la teoría del campo de compresión modificada para predecir la resistencia al corte de vigas de concreto reforzado con fibra de acero (SFRC) sin estribos, donde se encuentra que las fibras controlan el desarrollo de grietas, evitan grandes anchuras de fisuras, aumentan la resistencia al corte y la rigidez, y reducen la deflexión de los especímenes de concreto, aumentando así la trabazón del agregado (Zhang et al, 2016).

En el estudio realizado por Antonio Caggiano donde hace una combinación de fibra de acero y de polipropileno, se comenta que es una solución atractiva para mejorar el comportamiento post-agrietamiento del concreto a base de la matriz reforzada, y posiblemente la adaptación para tomarse en consideración de diseños estructurales (Caggiano et al, 2016).

La adición de fibras de acero mejora la resistencia al cortante de HSC, en particular cuando las fibras tienen relaciones de aspecto superiores. Un aumento de resistencia a cortante de 39% se consiguió en la investigación realizada por Tahenni en el estudio con nombre "Effect of Steel fibers on the shear behavior of high strength concrete beams". (Tahenni et al, 2016)

Las fibras se han utilizado para controlar el desarrollo de grietas, prevenir grandes anchos de fisura, aumentar la resistencia al cortante final y la rigidez, y mejorar así también la rigidez con el agregado (Zhang, 2016)

Hay estudios que proponen una nueva alternativa de refuerzo para el corte, denominado refuerzo de cortante diagonal (DSR), como una técnica

económica y del mismo modo una alternativa de concreto armado (CR), para el agrietamiento bajo cargas monolíticas y críticas.

El refuerzo de la matriz cementante con fibras de acero, se hace principalmente para aumentar la resistencia al agrietamiento y fortalecer el concreto, es uno de los objetivos en el estudio realizado por N. Horsha Vardhan, donde se utilizó fibras de acero de 35mm de longitud con un diámetro de 0.5mm, donde también se analizó la aportación de la fibra como refuerzo en comparación con las barras de refuerzo tradicional (Harsha et al, 2016).

El UHPFRC garantiza varias ventajas en comparación con el concreto reforzado tradicionalmente, tales como una mayor durabilidad, ductilidad y resistencia, ya que cuenta con una porosidad baja, una matriz densa, una alta resistencia a cortante/compresión, un comportamiento dúctil a cortante y grietas de aperturas de puentes. La inclusión de las fibras de acero al concreto aumenta sustancialmente su capacidad de flexión, su comportamiento post-agrietamiento y su ductilidad ya que las fibras puentean la superficie de la grieta y aumentan la capacidad a la primera grieta (Birol et al, 2016).

1.8. Planteamiento del problema.

El diseño de las estructuras de concreto se ha realizado con el criterio de la resistencia mecánica; con esta base se ha logrado tener estructuras que soportan adecuadamente las cargas de servicio. Sin embargo, no se ha logrado mitigar por completo las fallas estructurales principalmente de cortante en elemento estructural.

Las fallas presentadas en los elementos estructurales son de gran interés, pero una de las fallas de mayor cuidado es la ocasionada por el cortante por tensión diagonal, ya que se presenta de una forma frágil, lo que quiere decir, no existe advertencia alguna de la presencia de esta, la cual se muestra en la figura 6, donde se puede observar la propagación de la grieta, provocando el colapso inmediato del elemento. Es por ello, que el uso de fibras de acero como refuerzo transversal representa una alternativa más para contrarrestar estos efectos de cortante por tensión diagonal, ya que éstas son colocadas en la masa de concreto, quedando la fibra distribuida en todo el elemento y con una dirección aleatoria, ayudando a mitigar la rápida propagación de la grieta en todo el elemento.

Las causas de este tipo de fallas repercuten de inmediato a los ocupantes de la estructura de concreto, por no contar con el tiempo adecuado para la evacuación de dicha estructura en un momento previo a la falla. Estas fallas pueden ser provocadas por acontecimientos tales como los sismos, impacto por sobre cargas accidentales.



Figura 6. Viga reforzada con refuerzo tradicional en la cual se puede ver una falla frágil debido al cortante.

El diseño de elementos estructurales a cortante por tensión diagonal produce una gran demanda de acero de refuerzo transversal (estribos), el cual provoca problemas de acomodo, así como la difícil colocación y compactación del concreto, por lo que es conveniente encontrar una adecuada solución a dicho problema, el cual nos permita mejorar la capacidad de la estructura sometidas a cortante por tensión diagonal, proporcionándole ductilidad, así como una mejor compactación del concreto.

Tradicionalmente en la construcción de elementos de concreto, son estos reforzados con estribos, sin embargo si la separación es mayor a la mitad del peralte ($d/2$) la falla que se produce puede ser frágil. Es así, que es necesario encontrar reforzamiento con una mayor capacidad para desarrollar la ductilidad y tenacidad del elemento, siendo las fibras de acero las que generan mejor desempeño estructural.

Con los puntos antes mencionados se puede observar que el problema principal es la falla producida por cortante diagonal, presente en las estructuras de concreto, dando que tal problema es solucionado con un exceso de refuerzo en el alma, provocando una mala colocación del concreto.

Tomando en cuenta lo anterior, en esta investigación se plantea dar solución viable y practica a este problema, con un refuerzo desde la matriz, con la adición de fibra de acero en la masa de concreto, y así poder aumentar la separación de estribos y conseguir un mejor acomodo del concreto.

En este trabajo de investigación se propone sustituir parcialmente los estribos por fibras de acero y con ello mejorar ó mantener la resistencia mecánica a cortante por tensión diagonal de las estructuras de concreto.

1.9. Hipótesis.

La sustitución parcial del refuerzo transversal (estribos) por fibras de acero, mantendrá y/o aumentará las propiedades mecánicas de las vigas de concreto reforzado; tales como la resistencia al cortante por tensión diagonal, resistencia a la primera grieta, y la ductilidad de los elementos.

1.10. Objetivo general.

Determinar experimental y teóricamente el porcentaje de fibras de acero y separación de estribos optima como refuerzo del alma en vigas de concreto fibroreforzado, tales que, mantendrán y/o aumentaran las propiedades mecánicas de las vigas de concreto fibroreforzado.

1.10.1. Objetivos específicos.

- Determinar analíticamente el porcentaje de fibra de acero y separación de estribos adecuada que mejore las propiedades mecánicas del concreto fibroreforzado.
- Caracterizar las propiedades físicas de los materiales; los agregados a utilizar en la mezcla, el acero de refuerzo (estribos) y fibras de acero, los cuales se utilizarán en la elaboración de los especímenes de prueba.
- Evaluar las propiedades mecánicas del concreto reforzado con estribos y fibra de acero; resistencia a la primera grieta, resistencia al cortante por tensión diagonal, así como la carga última aplicada a los especímenes.
- Utilizar los modelos matemáticos tales como (Swamy y Mangat), y (R.Narayanan y I.Y.S.Darwish) para predecir la resistencia teórica de cortante por tensión diagonal y comparar con los resultados experimentales obtenidos.

1.11. Justificación.

Las fibras de acero como complemento de refuerzo estructural, han sido estudiados para mejorar las capacidades mecánicas de los elementos estructurales de concreto reforzado. Su principal aportación es incrementar la tenacidad, que representa la capacidad de absorber energía sin llegar al colapso. En la presente investigación se estudia el comportamiento de las vigas de concreto reforzado con diferentes porcentajes de fibra de acero y separación del refuerzo transversal, ensayadas a carga estática que provocan altos esfuerzos de cortante por tensión diagonal.

El esfuerzo desarrollado por flexión en las vigas de diseño no se considera crítico, ya que el acero de refuerzo convencional es adecuado para resistir estos esfuerzos.

La utilización de los modelos matemáticos de Swamy y Narayanan en esta investigación permitirá validar la experimentación científica propia del laboratorio, al utilizar algunos procedimientos teóricos de predicción de la resistencia a cortante por tensión diagonal en vigas de concreto fibroreforzado. La cual se logrará con la comparación de los resultados teóricos obtenidos con estos modelos y los resultados obtenidos de manera experimental realizados en esta investigación.

1.12. Metas.

- Determinar experimental y teórica la aportación de las fibras de acero a la resistencia a cortante por tensión diagonal en vigas de concreto reforzado.
- Conocer el efecto que tienen las fibras de acero en el patrón de agrietamiento del concreto producido por los esfuerzos de tensión diagonal.
- Obtener el grado de Maestría en Ciencias, mediante la presentación de esta investigación.

CAPÍTULO 2.

METODOLOGÍA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.

Capítulo 2.

Metodología de investigación.

2.1. Caracterización de los materiales.

2.1.1. Propiedades físicas de los agregados.

Los agregados del concreto son componentes derivados de la trituración natural o artificial de diversas piedras, y pueden tener tamaños que van desde 0.15 mm hasta 18.75 mm.

El interés del estudio de estos es que conforman el esqueleto granular del concreto y son el elemento mayoritario ya que representan el 80 al 90% del peso total de concreto, por lo que representan una gran parte de las características de este. Los agregados por lo general son inertes y estables en sus dimensiones.

Los agregados finos y gruesos ocupan comúnmente del 60% al 75% del volumen del concreto, e influyen notablemente en las propiedades del concreto recién mezclados y endurecidos, en las proporciones de la mezcla, y en la economía. Los agregados finos comúnmente son arena natural o piedra triturada, siendo la mayoría de sus partículas menores a 5 mm.

Considerando la necesidad de este elemento en la matriz cementante, se requiere una serie de estudios para su mejor aprovechamiento y calidad de esta, es donde el tamaño de partícula es una de las prioridades para la mejor colocación del concreto y con ello eficiencia en las estructuras.

Es por ello, que este estudio se enfoca en la distribución de partícula, termino conocido como “granulometría”, definida como la distribución del tamaño de partículas del agregado, tal que, se obtiene por el análisis de tamices, siguiendo el análisis basado en la norma ASTM C-136-84 la cual usa malla de alambre cuadrada y calibrada.

Como se mostró anteriormente, es importante considerar el tamaño de partícula para una mejor eficiencia y colocación del concreto. Por ello es importante considerar los puntos que son mencionados por el reglamento ACI 318-05, donde menciona que el tamaño máximo de partícula no debe sobrepasar:

- Un quinto de la dimensión más pequeña del miembro de concreto.
- Tres cuartos del esparcimiento libre entre barras de refuerzo.
- Un tercio del peralte del elemento, en las losas.
- Tres cuartos del revenimiento.

La granulometría de los agregados grueso y fino se realizó en base a las normas ASTM C 136-84 y ASTM C 33-97, consiguiendo la distribución de partícula, tal que, se considera para el diseño de mezcla realizado en la presente investigación. Así del mismo modo, se realiza el análisis de las propiedades de los agregados; densidad, peso volumétrico suelto y varillado, módulo de finura de la arena, absorción y humedad de obra, siguiendo el lineamiento establecido por la PCA. (Kosmatka et al, 2004).

2.1.2. Cemento.

El cemento es un componente decisivo en la docilidad del material en estado fresco y, posteriormente, en las características mecánicas del concreto endurecido. El cemento utilizado en esta investigación científica fue el CPC 30R, tal que, cumplió con las norma mexicana NMX-C-414 y las características requeridas en este estudio, consiguiendo las propiedades mecánicas solicitadas.

2.1.3. Aditivo.

En los concretos reforzados con fibras de acero CRFA se emplea principalmente aditivos reductores de agua (superfluidificantes) y airantes.

Al adicionar fibras al concreto, este sufre una reducción sustancial de trabajabilidad. Con el fin de no adicionar agua, ni afectar la resistencia y durabilidad esperadas, se emplean superplastificantes..

Es por ello que en esta investigación se utiliza un aditivo superplastificante plastol precast plus de la marca Eucomex tal que tiene la función de reducción de agua, con ello garantizar la trabajabilidad de la mezcla de concreto, así como disminuir la cantidad de erizos originados por las fibras de acero.

2.1.4. Diseño de mezclas.

En la presente investigación se manejaron dos tipos de resistencia a la compresión del concreto ($f'c$) a los 28 días: la primera con una resistencia $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ y una relación $a/c = 0.55$, la segunda con una resistencia $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ y una relación $a/c = 0.35$, lo que llevó a realizar dos diseños de mezclas para conseguir las anteriores resistencias y manejarlas como constantes en el desarrollo de la experimentación.

En el diseño de mezclas se utilizaron, tanto los métodos del Diseño y Control de Mezclas de Concreto (PCA), así como el código del ACI-211-81, los cuales tratan acerca de las prácticas estándar para definir el proporcionamiento de mezclas de concreto.

El objetivo de definir y estandarizar el proporcionamiento de la mezcla de concreto es tomar las resistencias deseadas como una constante. Para ello se realizaron mezcla de prueba para ambas resistencias, donde se tomó en cuenta la trabajabilidad, homogeneidad y la correcta combinación de los agregados ya que estos estaban fuera de la granulometría en base a la norma ASTM C-33.

Es por ello que se realizaron pruebas para verificar el diseño de mezclas y sus características solicitadas (revenimiento y resistencia a la compresión), se realizaron pruebas en estado fresco, tales como el revenimiento en base a la norma ASTM C-143 y elaboración de cilindros de concreto de 10.16 cm (4") de diámetro por 20.32 cm (8") de altura, en base a la norma ASTM C-3. Por otro lado también se realizaron las

pruebas en estado endurecido, la resistencia a compresión en base a la norma ASTM C-39, comprobando las resistencias solicitadas del concreto.

El punto importante por el que se hace un proporcionamiento en esta investigación, y se verifica con pruebas en estado fresco y endurecido, es considerar como constante las resistencias del concreto de $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$, así como, lograr el revenimiento entre 14 y 16 cm para una correcta colocación del concreto en los elementos estructurales, aun agregándole a la mezcla los porcentajes de fibra de acero considerados.

En los proporcionamiento propuestos para lograr las condiciones requeridas se tomaron en cuenta las siguientes condiciones:

- Relaciones agua/cemento que nos permitieran obtener las resistencias a la ruptura del concreto deseadas.
- Una mezcla con un revenimiento de 14 a 16 cm, la cual nos permitirá una buena trabajabilidad y con ello una correcta colocación del concreto en las vigas.
- Lograr un proporcionamiento con el menor consumo de cemento posible.

Las muestras de prueba para las dos resistencias requeridas se fabricaron en volúmenes de 20 litros de concreto, como son mostradas en la tabla 1, donde se presentan las cantidades de material que fueron utilizados, así como los resultados de las pruebas que fueron realizadas al concreto fresco, que en este caso; fueron contenido de aire y revenimiento, donde, fueron de gran utilidad para la verificación de la trabajabilidad y consistencia de las mezclas.

Tabla 1.
 Proporcionamiento de mezclas de prueba para $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$
 (g/20L de concreto).

Materiales	Relación agua/cemento	
	0.55 $F'c=250 \text{ kg/cm}^2$	0.35 $F'c=250 \text{ kg/cm}^2$
Agua	3135	2715
Cemento	5600	7600
A. Grueso	15845	15213
A. Fino	22782	22782
Aditivo	22.4	30.4
Contenido de aire	2.5	2.5
Revenimiento	15	14.5

2.1.5. Pruebas al concreto en estado fresco.

La trabajabilidad del concreto fresco puede definirse como la propiedad que determina el esfuerzo requerido para manipular una cantidad de mezcla de concreto fresco. En esta definición el término significa incluir todos los aspectos que involucra la manejabilidad del concreto fresco, llamándolos: traslado, colocación y compactación. En otras palabras, la trabajabilidad es esa propiedad que hace al concreto fresco fácil de manejar y contraer, sin un riesgo apreciable de segregación.

La trabajabilidad es esencialmente determinada por la consistencia y cohesividad del concreto fresco. Para dar al concreto fresco la trabajabilidad deseada, su consistencia y cohesividad debe ser controlada. La anterior es

lograda por la selección apropiada de las propiedades del mezclado que se usan en los procedimientos de diseño de mezcla. En otras palabras, cuando la cohesividad se logra, la trabajabilidad se obtiene controlando la consistencia de la mezcla. En el diseño de mezcla tales propiedades nos sirven para verificar la consistencia y trabajabilidad, indicando que a mayor sea el revenimiento mejor será la trabajabilidad de la mezcla.

Para esta investigación todas las mezclas fueron verificadas con la prueba de revenimiento, con ella encontrar una correcta colocación de la mezcla en las vigas reforzadas con acero. Así del mismo modo se realizó la prueba del contenido de aire en todas las mezclas de concreto en base a la norma ASTM C-231.

2.1.6. Pruebas de concreto en estado endurecido.

Así mismo para verificar la resistencia de las mezclas a utilizar, se elaboraron cilindros como se mencionó anteriormente, con ello se realizaron ensayos de compresión de tres cilindros por edad, según las especificaciones establecidas por el ACI-318-14, y con ello tener una mejor confiabilidad en los resultados. Los ensayos fueron realizados como lo indica la norma ASTM-C-39.

Una vez obtenidos los resultados de revenimiento, así como los de resistencia a la compresión de los cilindros, se estandarizo el proporcionamiento de las mezclas de concreto, donde se eligieron las relaciones de (a/c) 0.35 y 0.55, relaciones que demostraron desarrollar la

resistencia deseada a la hora de fabricar los elementos de concreto, así como tener la trabajabilidad deseada con revenimientos de 14 a 16 cm.

2.1.6.1. Fabricación de especímenes cilíndricos.

La elaboración de cilindros se lleva después de medir el revenimiento de cada mezcla, prueba que se realiza en base a la norma ASTM C-143 “Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete”, comprobando que toda mezcla se encuentre en un rango de 14 a 16 cm para garantizar una correcta colocación del concreto, enseguida se elaboran tres cilindros de 10.16 cm x 20.32 cm de cada una de las mezclas como se muestra en la figura 7, estos en base a la norma ASTM C-39, tales que se utilizaron para las pruebas de resistencia a la compresión y tensión diametral.



Figura 7. Especímenes cilíndricos para los ensayos de resistencia a compresión tensión diametral.

2.1.6.2. Descripción de ensayos a cilindros.

Para los ensayos de compresión y tensión diametral se fabricaron 120 cilindros; donde 60 de ellos fueron fabricados con la relación $a/c = 0.55$ y fueron ensayados 30 a compresión y 30 a tensión diametral. La segunda serie de 60 cilindros fabricada con la relación $a/c = 0.35$ y ensayados de la misma forma .

Las pruebas realizadas a los cilindros fueron en el mismo día del ensaye de las vigas correspondientes, a los 28 días. Se les realizaron los ensayos de compresión para comprobar la resistencia de diseño que es parte del cálculo de la cortante diagonal de las vigas, así como pruebas de tensión diametral (brasileña), que nos permite obtener de forma indirecta la respuesta a tensión del concreto.

2.1.6.2.1. Ensayos a compresión.

La prueba de compresión fue realizada a 6 cilindros de cada porcentaje de fibra de acero ($a/c=0.55$: 0.0, 0.3, 0.5, 0.7 y $a/c=0.35$: 0.0, 0.2, 0.4, 0.6), esto para tener una mayor seguridad de los resultados. El ensayo se realizó en base a la norma ASTM C-31, usando equipos que se encuentran en correctas condiciones para dichos ensayos, así como calibrados, lo cual nos garantiza resultados confiables. Para este ensayo fue utilizada la maquina universal instron del Instituto de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión se usan fundamentalmente para determinar que la mezcla de concreto utilizado cumpla con los requerimientos de la resistencia especificada en la experimentación.

2.1.6.2.2. Ensayos a tensión diametral.

El ensayo de tensión diametral se realizó con la misma cantidad de especímenes que la prueba a compresión, tal prueba se realizó en el mismo día que los ensayos de compresión y de las vigas correspondientes. El ensayo fue realizado en base a los lineamientos de la norma ASTM C-496-96 “Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens”. Un método simple y representativo, que nos permite ver la respuesta a tensión de un elemento de concreto y obtener la carga máxima que soporta el espécimen antes de romperse.

El ensayo fue realizado aplicando una carga uniforme a lo largo del cilindro como se puede ver en la figura 8, en donde se pudo observar la aplicación de las fibras distribuidas en todo el elemento.



Figura 8. Ensayo a tensión diametral en cilindros de concreto fibroreforzado.

2.1.7. Propiedades del acero de refuerzo.

El refuerzo utilizado en las vigas de concreto presente en esta investigación, son varillas de acero corrugadas disponibles en un amplio intervalo de diámetros con designación numérica, disponibles en el mercado para aplicarse en la construcción. El refuerzo longitudinal fueron varillas de 15.875 mm (5/8"Φ) de diámetro y un $F_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$, con corrugaciones, demostrando una mejor adherencia con el concreto. El cálculo del diseño del refuerzo longitudinal se muestra en el apéndice 1.

En el refuerzo transversal se utilizó alambraón de $F_y = 2800 \text{ kg/cm}^2$, contando con un adecuado desempeño como refuerzo, la separación de este se calculó en base al método ACI-318-14, aunado a esto se le realizaron pruebas de tensión para verificar su desempeño mecánico, con ello hacer la comparación del refuerzo sustituto que en este caso es la fibra de acero. Los ensayos realizados al alambraón se pueden ver en la figura 9. Estos ensayos se encuentran estandarizados por las normas (ASTM 370,1988) y (ASTM A7, 1955). El espécimen por ensayar debe poseer en su totalidad su sección transversal tal como fue rolado y tener una longitud total de 50 cm, para que permita una longitud de calibración libre entre mordazas de 20 cm. Las dimensiones de la probeta se determinaron con un micrómetro o vernier, con aproximación de 0.05 mm.

Las dos propiedades mecánicas principales que determinan los rangos de una varilla de refuerzo son: el límite o esfuerzo de fluencia (F_y) y el módulo de elasticidad (E_s). El modulo elástico es prácticamente el mismo para todos los

aceros de refuerzo y su valor es del orden de 2, 038, 700 kgf/cm² según el ACI-318. Adicionalmente, la forma de la curva esfuerzo-deformación unitaria, y en particular la del tramo inicial, tiene una influencia significativa en el comportamiento de elementos de concreto reforzado.



Figura 9. Ensayo a tensión del refuerzo transversal (alambión).

2.1.8. Propiedades de las fibras de acero.

Las fibras utilizadas en esta investigación son de acero (P50-100), las características presentadas son las indicadas por el fabricante, con dobleces en los extremos, fabricadas con alambres de bajo carbono estirados en frío. Las fibras de acero cumplen con la norma de calidad ASTM A 820-11, con una resistencia a la tensión de $11,523 \text{ kg/cm}^2$, un rendimiento de 3,200 fibras/kg.

Las dimensiones de esta fibra son una longitud de 50 mm y un diámetro de 1 mm, como se muestra en la figura 10. La fibra de acero se pretende que trabaje como un elemento de sustitución de refuerzo transversal en esta investigación, donde ha mostrado un buen desempeño, respecto a la trabajabilidad en las mezclas de concreto.

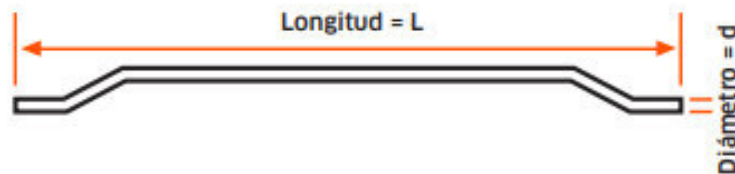


Figura 10. Dimensiones de fibra de acero P50-100, con relación de aspecto de 50.

2.2. Diseño de vigas fibroreforzadas.

2.2.1. Dimensionamiento de las vigas.

Las vigas de concreto fibroreforzado se fabricaron con la geometría de 200 cm de largo, 15 cm de ancho, 25 cm de altura y un recubrimiento de 2 cm. Estas medidas fueron tomadas en cuenta por investigaciones anteriores realizadas por el ingeniero Mizael Izaguirre (Izaguirre, 2006), así como el trabajo realizado por R. Park y T Paulay, donde realizo investigaciones con elementos grandes, lo cual comento que elementos mayores de dos metros la falla se origina por flexión, por lo que en esta investigación se consideró una longitud de 2 metros como se puede ver en la figura 11, así como se mencionó que una relación a cortante (a/d) se tiene que encontrar en los rangos de 1.5 a 7, y con ello se tiene que la falla que se presente será de cortante diagonal, así que en esta investigación se tomó la distancia de apoyo a carga aplicada de 70 centímetros como se presenta en la figura 12, con este valor se consigue que la falla que se presenta sea de cortante diagonal, así como una grieta inclinada aproximadamente a 45° (Park et al, 1990).

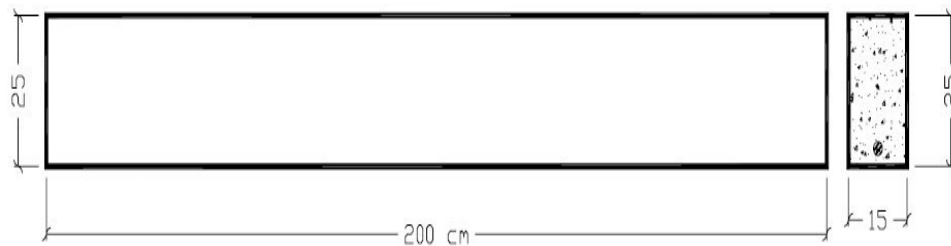


Figura 11. Geometría general de las vigas, unidades en cm.

Es importante señalar que, para la toma de decisión de la geometría de las vigas, se consideraron las condiciones para los ensayos de prueba, tales como: el marco para la aplicación de la carga, la capacidad del gato hidráulico para el ensayo, los elementos de apoyos así como los elementos para la aplicación de las cargas a las distancias señaladas anteriormente, así como la nivelación de los equipos de aplicación de la carga que intervienen dentro de los ensayos de las vigas.

2.2.2. Determinación del acero de refuerzo longitudinal.

Con base al dimensionamiento de las vigas en el punto anterior, se procede al cálculo del refuerzo longitudinal. Donde se calcula la carga teórica de falla; esto quiere decir, que se hace una igualación del cortante nominal con el cortante último, con ello, podremos igualar el cortante último con la carga total de aplicación que se encuentra a una distancia de 70 cm del apoyo propuesto como se puede ver en la figura 12. Por lo tanto, el cortante nominal es igual a la carga de aplicación dividida entre el factor de seguridad, con ello se puede decir que la carga ultima de aplicación es la sumatoria de la resistencia a cortante del acero transversal de refuerzo más la resistencia a cortante de concreto simple y ellas por un factor de seguridad en base al reglamento.

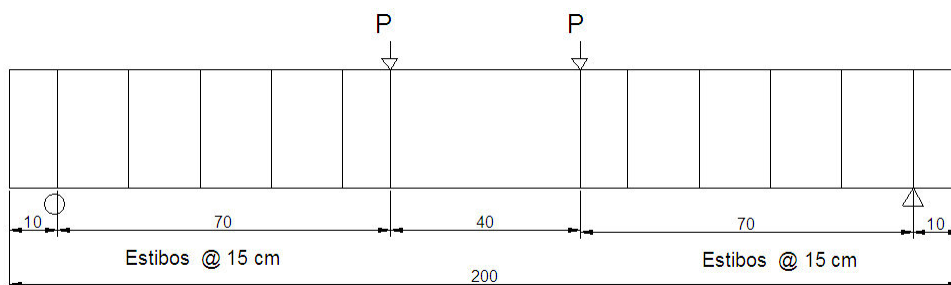


Figura 12. Arreglo de acero longitudinal y transversal de las vigas de referencia.

Después de ser calculada la carga de aplicación P ; se calcula la cuantía de acero de refuerzo longitudinal como es mostrado en el código del ACI C-318-14, tal que, soporte los esfuerzos de flexión. Posteriormente se procedió a calcular los diámetros de las varillas, del mismo modo el acomodo y respetando lo solicitado en el reglamento ACI, con respecto al diámetro de separación. Los cálculos fueron realizados siempre respetando que la resistencia a flexión no controle la falla, para con ello garantizar que la falla se presente por cortante diagonal y no por flexión del elemento.

La separación de los estribos también se calculó de forma como lo dicta el código del ACI C-318-14, donde se nos especifica que la separación entre ellos no debe sobrepasar a la mitad del peralte efectivo ($0.5d$), así también del mismo modo el diámetro de la varilla a colocar.

Como fue descrito anteriormente la carga de aplicación calculada por el reglamento ACI C-318-14, fue considerada $P = (V_s + V_c) \Phi$, tal que fue utilizada para los cálculos correspondientes, donde se pueden ver en el apéndice 1 de esta investigación, y la carga se obtuvo y se aplicó como se muestra a continuación:

➤ Elementos de $f'c = 250 \text{ kgf/cm}^2$

✓ $P_{\text{Teorica}} = 6530 \text{ kgf}$

➤ Elementos de $f'c = 350 \text{ kgf/cm}^2$

✓ $P_{\text{Teorica}} = 7000 \text{ kgf}$

Una vez calculadas las cargas teóricas de aplicación, se procede a la igualación del momento último, con la carga obtenida aplicando la distancia del apoyo, con ello calcular el acero de refuerzo longitudinal, así obtener una falla por cortante diagonal y no por flexión. Donde se obtuvieron los siguientes arreglos para las dos resistencias requeridas en la experimentación.

➤ En los elementos con $f'c = 250 \text{ kgf/cm}^2$ y $f'c = 350 \text{ kgf/cm}^2$

✓ Se colocaron cuatro varillas de número 5 como refuerzo longitudinal, con un área de 5.94 cm^2 .

En el cálculo al seleccionar esta cantidad de acero a colocar se revisó el momento nominal (M_n), considerando fuera mayor que el momento último (M_u). Donde se comprobó que la falla a presentarse será por cortante y no por flexión.

El arreglo del acero transversal y longitudinal se puede ver en la figura 13, mostrado para los diferentes porcentajes de fibra de acero, así como la localización de los refuerzos que se puede ver en la figura 14, donde muestra las medidas de ambos refuerzos.



Figura 13. Arreglo del armado de las vigas, con el acero longitudinal y transversal.

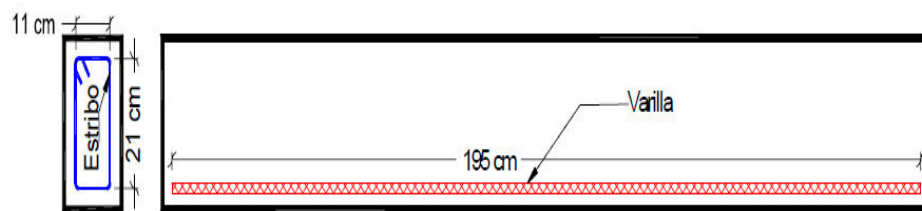


Figura 14. Colocación y detallado del refuerzo longitudinal del arreglo de las vigas.

2.3. Fabricación de vigas fibroreforzadas.

En la presente investigación se fabricaron una cantidad de 20 especímenes de prueba (vigas), de los cuales 16 de ellas contaban con refuerzo tradicional y fibras de acero en diferentes porcentajes ($a/c=0.55$: 0.0, 0.3, 0.5, 0.7 y $a/c=0.35$: 0.0, 0.2, 0.4, 0.6) y separación (15 cm, 25 cm, 30 cm, 35 cm), así como 4 de ellos solo reforzados con fibras, tales que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2.
Características del arreglo de los especímenes de prueba (vigas) y cantidad de ellas.

Relación a/c	Condiciones						Total de especímenes
		15	25	30	35	0	
0.55	Separación de estribo (cm)	15	25	30	35	0	
	Porcentaje de fibra (%)	0.0	0.3	0.5	0.7	0.7	
	Especímenes	2	2	2	2	2	10
0.35	Separación de estribo (cm)	15	25	30	35	0	
	Porcentaje de fibra (%)	0.0	0.2	0.4	0.6	0.6	
	Especímenes	2	2	2	2	2	10
					Total		20

La fabricación de los elementos fue una etapa importante para la experimentación, así como una acción de estricto control, donde se le puso mayor cuidado al mezclado, colocación y curado de los mismos para lograr la

mínima variación de resultados arrojados. La colocación y el vibrado de la mezcla de concreto se realizó siguiendo los lineamientos indicados en la norma ASTM C-192-98, “Standard Plactice for Making and Curring Concrete Test Specimens in The Laboratory”.

Los puntos importantes tomados en cuenta para un estricto control de calidad de los especímenes son los siguientes:

- Tiempo de mezclado.
- Dosificación correcta de cada mezcla.
- Vibrado.
- Curado después del fraguado final, durante siete días.
- Curado después de los siete días (membrana de curado)

Los cuales fueron necesarios para que no se presentara, una mala colocación del concreto, segregación, así como juntas frías de una mezcla entre otra, con ello aumenta confiabilidad de la resistencia, así como la homogeneidad durante todo el elemento.

2.3.1. Preparación de las cimbras metálicas.

La preparación de la cimbra se realizó una vez que se conocieron las dimensiones del diseño de las vigas. Las cimbras que se utilizaron fueron de acero, con ello se logra que no se encuentren deformaciones al momento de colocar la mezcla de concreto, así como, la facilidad del armado, por estar unidas estas con tornillos. La limpieza de ellas se llevó de tal forma que no se

encontrara residuos de experimentaciones anteriores, consecuente a esto se unieron de tal forma que cumplieran con las dimensiones requeridas de 15 cm de ancho x 25 cm de peralte x 200 cm de largo, y finalizando a esto se les coloco desmoldante para que no se presentara problema a la hora de retirar el espécimen de la cimbra para continuar con su curado correspondiente, el armado de las cimbras se puede ver en la figura 15.



Figura 15. Armado de cimbras de acero

2.3.2. Identificación de especímenes.

La identificación es un punto importante de toda experimentación, aunque es simple, es de gran importancia, ya que nos ayuda a tener un correcto control de todos los especímenes, así como sus características con las que se cuenta, esto lo podemos ver en la tabla 3, donde se divide en dos grupos, tales que corresponden a la resistencia y relación a/c. En donde se muestrea la relación a/c, la resistencia a compresión del concreto, la cantidad del refuerzo longitudinal, así como la separación del refuerzo transversal y el porcentaje de fibras de acero con la que se cuenta.

En la tabla 3 también se puede observar que se utilizaron diferentes porcentajes de fibras de acero para cada resistencia, ello para contar con la misma separación de estribos en los dos diseños a/c.

Tabla 3.
Identificación y características de los especímenes.

Nomenclatura	Resistencia del concreto (kgf/cm ²)	Relación a/c.	Refuerzo longitudinal	Refuerzo transversal	Porcentaje de fibra de acero
Mva-N-1,0.0%	250	0,55	4 Vs. No. 5	12 est. @ 15 cm, Φ 6,35 mm	0,0
Mva-N-2,0.0%	250	0,55	4 Vs. No. 5	12 est. @ 15 cm, Φ 6,35 mm	0,0
Mva-N-3,0.3%	250	0,55	4 Vs. No. 5	8 est. @ 25 cm, Φ 6,35 mm	0,3
Mva-N-4,0.3%	250	0,55	4 Vs. No. 5	8 est. @ 25 cm, Φ 6,35 mm	0,3
Mva-N-5,0.5%	250	0,55	4 Vs. No. 5	8 est. @ 30 cm, Φ 6,35 mm	0,5
Mva-N-6,0.5%	250	0,55	4 Vs. No. 5	8 est. @ 30 cm, Φ 6,35 mm	0,5
Mva-N-7,0.7%	250	0,55	4 Vs. No. 5	6 est. @ 35 cm, Φ 6,35 mm	0,7
Mva-N-8,0.7%	250	0,55	4 Vs. No. 5	6 est. @ 35 cm, Φ 6,35 mm	0,7
Mvb-N-9,0.0%	350	0,35	4 Vs. No. 5	12 est. @ 15 cm, Φ 6,35 mm	0,0
Mvb-N-10,0.0%	350	0,35	4 Vs. No. 5	12 est. @ 15 cm, Φ 6,35 mm	0,0
Mvb-N-11,0.2%	350	0,35	4 Vs. No. 5	8 est. @ 25 cm, Φ 6,35 mm	0,2
Mvb-N-12,0.2%	350	0,35	4 Vs. No. 5	8 est. @ 25 cm, Φ 6,35 mm	0,2
Mvb-N-13,0.4%	350	0,35	4 Vs. No. 5	8 est. @ 30 cm, Φ 6,35 mm	0,4
Mvb-N-14,0.4%	350	0,35	4 Vs. No. 5	8 est. @ 30 cm, Φ 6,35 mm	0,4
Mvb-N-15,0.6%	350	0,35	4 Vs. No. 5	6 est. @ 35 cm, Φ 6,35 mm	0,6
Mvb-N-16,0.6%	350	0,35	4 Vs. No. 5	6 est. @ 35 cm, Φ 6,35 mm	0,6
Mva-N-17,0.7%	250	0,55	4 Vs. No. 5	0 est. @ 70 cm, Φ 6,35 mm	0,7
Mva-N-18,0.7%	250	0,55	4 Vs. No. 5	0 est. @ 70 cm, Φ 6,35 mm	0,7
Mvb-N-19,0.6%	350	0,35	4 Vs. No. 5	0 est. @ 70 cm, Φ 6,35 mm	0,6
Mvb-N-20,0.6%	350	0,35	4 Vs. No. 5	0 est. @ 70 cm, Φ 6,35 mm	0,6

Dónde:

Mva: espécimen con resistencia de 250 kgf/cm².

Mvb: espécimen con resistencia de 350 kgf/cm².

N-1... Numero de espécimen.

0.0%... Porcentaje de fibra de acero.

2.3.3. Dosificación de los materiales.

La dosificación de los materiales fue el punto de la elaboración donde se pesó el material a utilizar en cada una de las mezclas, tales como; el agua, agregado grueso, agregado fino, cemento, fibras de acero y el aditivo el cual su función fue la trabajabilidad de la mezcla, así con ello continuar con el procedimiento de mezclado.

2.3.4. Procedimiento de mezclado.

Una vez pesados los materiales para la elaboración de la mezcla se procede a la elaboración. Donde se siguió el siguiente procedimiento:

Primeramente, se humedece el equipo para la elaboración de la mezcla, esto para que no absorba agua de reacción, en seguida de esto se procede a la colocación del agregado grueso y fino dentro de la mezcladora con un tercio del agua de reacción, mezclando durante un minuto, esto con el propósito de homogenizarlos y queden en condiciones de saturado superficialmente seco (sss) los agregados.

En seguida se coloca el cemento, el resto de agua y el aditivo a colocar, mezclando durante tres minutos, esto para que los agregados y el agua se mezclen completamente, dando el tiempo para que la mezcla quede homogénea.

Después de esto se pone a reposar la mezcla durante tres minutos, tiempo para que el aditivo trabaje, en seguida de esto se coloca la fibra de

acero, mezclándola durante 2 minutos adicionales. El mezclado total es de 9 minutos aproximadamente, llevándose a cabo en una revolvedora de mezclado inverso como la que se muestra en la figura 16, especial para mezclas con fibras, donde se logra una mejor distribución en toda la mezcla y logrando menos acumulación de fibras (erizos).



Figura 16. Revolvedora de mezclado inverso.

2.3.5. Elaboración de especímenes.

Simultáneamente a la fabricación de los cilindros utilizados para los ensayos de compresión y tensión diametral, se trasladó la mezcla en una carretilla para la elaboración de las vigas como se puede ver en la figura 17. El proceso de traslado y colocación de la mezcla en los moldes de acero se llevó un aproximado de 20 minutos, tal proceso se termina con el acabado de los especímenes.



Figura 17. Traslado y colocación de la mezcla de concreto.

El proceso de elaboración de las vigas se llevó de tal manera que la mezcla de concreto fuera colocada correctamente; para ello se procede a colocar una primera capa de concreto de aproximadamente la mitad del peralte, enseguida de esto se procede a realizar el vibrado. El vibrado se realizó de tal manera que la mezcla no llegara al punto de segregación, por ello se realiza en una distancia de aproximadamente 20 centímetros y una altura de tres centímetros desde la base de la cimbra, cuidando que el vibrador no tuviera

contacto con la cimbra, así como el refuerzo transversal, para no provocar un movimiento en el acomodo de los estribos, también hubo estricto cuidado en el refuerzo longitudinal, tal que puede sufrir movimiento en su colocación. En seguida del primer vibrado se procede a colocar la otra mitad del concreto, así como la continuación del vibrado de la misma manera antes mencionada, tal como se puede ver en la figura 18. Finalmente, las vigas se nivelaron y se enrasaron, dándoles un acabado correcto que no permitiera agregado o fibras en la superficie del concreto.

El objetivo de vibrar las vigas fue eliminar el aire atrapado en el concreto fresco y evitar los huecos o discontinuidades que pudieran perjudicar la resistencia y la calidad de este.

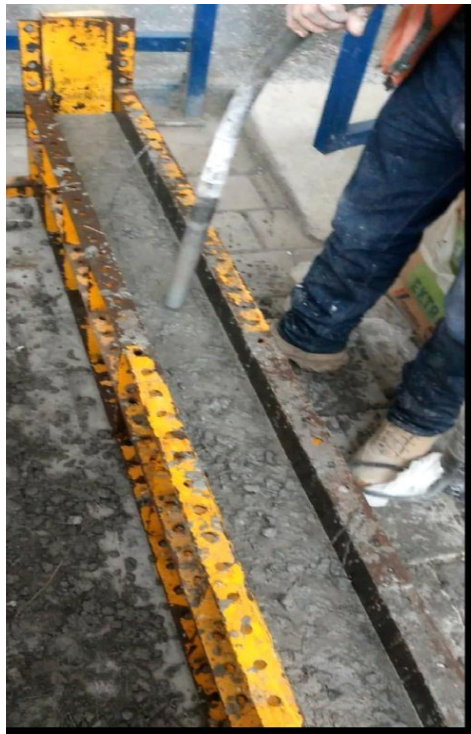


Figura 18. Vibrado de la mezcla de concreto.

2.3.6. Curado de especímenes.

El curado de los especímenes de concreto es uno de los puntos importantes de toda experimentación con este material, porque aun después del fraguado final sigue desarrollando resistencia. En esta experimentación se les dió el correcto curado a todos los especímenes, a cilindros como a las vigas. Los cilindros fueron llevados al cuarto de curado después de 24 horas de su elaboración, enseguida de ser desmoldados, así permanecieron durante 28 días, para después ser ensayados. Las vigas se les dio un curado diferente por el tamaño de estos elementos, el curado inicio después del fraguado final, colocándoles una lámina de agua de aproximadamente 1 cm en la superficie de las vigas, evitando que se produjera socavación al verter el agua. Este curado se realizó por un tiempo de 7 días, después del fraguado final.

Después de los 7 días, se procedió a desmoldar los especímenes e inmediatamente se les colocó una membrana plástica, este fue colocado en todas las caras, tratando de cubrir también los poros presentados, para que no afectaran en el curado, como se puede ver en la figura 19. Este curado fue durante 21 días, hasta que se cumplieran los 28 días que fueron planteados para realizar los ensayos correspondientes.

La membrana utilizada fue de derivados parafínicos y solventes asfálticos de la marca Sika, la que al ser colocada sobre todas las caras evita la evaporación excesiva del agua.



Figura 19. Curado de las vigas con membrana plástica.

2.4. Ensayo de las vigas fibroreforzadas.

Los ensayos a las vigas fueron realizados en instalaciones del laboratorio de Estructuras del Instituto de Ingeniería Civil, correspondiente a la Universidad Autónoma de Nuevo León, donde se encuentra la losa de reacción de 10 m x 10 m y que cuenta con los equipos y aditamentos en correctas condiciones, y calibrados, que nos garantiza que los correctos resultados sean confiables.

2.4.1. Sistema de carga y arreglo de los ensayos.

Todas las vigas fueron ensayadas a los 28 días después de su elaboración, donde se le aplicaron cargas concentradas a una distancia de 70 cm de los apoyos, esto para lograr producir una falla por cortante diagonal como fue calculada.

El arreglo de los ensayos consistió en la colocación de dos barras triangulares de acero, macizas, colocadas en los puntos seleccionados para las cargas puntuales, así como, arriba de estas dos barras un riel de acero, el cual funcionó para la distribución correcta de la carga que es aplicada. La carga se aplicó mediante un pistón hidráulico el cual este accionado por una bomba manual, apoyado contra un marco de carga anclado a la losa de reacción. La carga se aplicó con el arreglo antes mencionado, así como fue medida mediante una celda de carga con una aproximación de 5.12 kg, habilitada al pistón del cilindro hidráulico. La celda de carga fue conectada al puente Wheaststone como es mostrada en la figura 19, el cual funciona para registrar la carga aplicada. También es colocado el transductor de desplazamiento lineal (LVDT) al centro de la viga para registrar la deflexión que presenta la viga, como es mostrado en la figura 20. El LVDT también es conectado como la celda al puente Wheaststone, para medir los desplazamientos, ya con ello el puente se conecta a una computadora y los resultados son capturados.



Figura 20. Arreglo del ensayo de las vigas.

2.4.2. Desarrollo de los ensayos.

El desarrollo de los ensayos de las vigas se lleva a cabo con la nivelación, las cuales se montaron en dos apoyos con libertad de rotación, tales que no restringen el movimiento de la viga a desplazarse al momento de estar aplicándose la carga. Terminando de nivelar las vigas y colocar los aparatos, el puente Wheatstone se coloca en ceros. En seguida se aplicó una precarga de aproximadamente el 5% de la carga estimada en cada viga, para el ajuste de los accesorios y el equipo de medición. En seguida de retirar la precarga, se inició con la aplicación de la carga, en incrementos de 10 kg aproximadamente iguales hasta llegar a la carga de falla. Donde para cada lectura del incremento de carga, se realizó el registro para el incremento del desplazamiento vertical en el centro de la viga. El registro de las grietas con su correspondiente carga se realizó de una manera manual como se muestra en la figura 21.



Figura. 21. Registro de carga a la aparición de grieta.

CAPÍTULO 3.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Capítulo 3.

Discusión de resultados.

Los resultados se mostraran en el sistema métrico, tales que facilitan la interpretación de los mismos.

3.1. Características de los materiales.

3.1.1. Propiedades físicas de los agregados.

En las tablas 4 y 5 que a continuación se muestran se encuentra la granulometría de los materiales utilizados en la presente experimentación, basados en la norma ASTM C 136-84, y la norma ASTM C 33-97, que se puede ver que las partículas del agregado grueso se encuentran por arriba de los valores presentados en la norma ASTM C-33, clasificándose como un agregado grande tal que requiere agregar mayor cantidad de fino para que el concreto no quede gravoso y la arena mostro valores por abajo de la granulometría de la norma ASTM C-33, indicando que se encuentra con mucho fino que puede llevar al problema de utilización de más agua, lo anterior se consideró en los ajustes del diseño de mezclas.

Tabla 4.
Distribución granulométrica del agregado grueso.

Malla No.	% Que pasa	% Retenido individual	Especificaciones ASTM C 33	Especificaciones ASTM C 33
3/4	87.59	12.41	100	100
1/2	43.95	43.64	90	100
3/8	13.88	30.07	40	70
4	0.77	13.11	0	15
8	0.17	0.60	0	5
Ps 8	0.01	0.16	-	-

Tabla 5.
Distribución granulométrica del agregado fino.

Malla No.	% Que pasa.	% Retenido individual	Especificaciones ASTM C 33	Especificaciones ASTM C 33
3/8	100.00	0.00	100	100
4	100.00	0.00	95	100
8	84.30	15.70	80	100
16	54.60	29.70	50	85
30	30.30	24.30	25	60
50	13.70	16.60	10	30
100	5.30	8.40	2	10
Ps 100	0.10	5.20	-	-

En la tabla 6, se muestran las propiedades físicas obtenidas de los agregados que fueron utilizados en esta experimentación, tales como; la densidad del agregado fino y grueso, peso volumétrico, módulo de finura del agregado fino, porcentaje de absorción de ambos agregados, así como, la humedad de obra, con estos valores se puede obtener una mejor dosificación y control de la mezcla de concreto. Tales propiedades son de gran importancia para el correcto control y elaboración del proporcionamiento de mezcla, donde se puede notar que el porcentaje de absorción del agregado fino se encuentra en un valor alto en comparación a la humedad de obra, con ello se toma el control del agregado para que el mismo se encuentre en condiciones triple (SSS) y no genere problemas al momento de la elaboración de la mezcla, dato que se le puede agregar a la finura del agregado, así como al contrario el agregado grueso que se encuentra con igualdad de absorción y humedad de obra.

Tabla 6.
Propiedades físicas del agregado grueso y fino.

Materiales	Ds (Kg/L)	PVVS(Kg/m ³)	PVSS(kg/m ³)	M.F	ABS %	HO %
A. Grueso.	2.69	1649	1538		0.54	0.49
A. Fino.	2.64		1685	3.12	1.21	0.90

3.1.2. Cemento.

El cemento utilizado en esta investigación científica fue el CPC 30R, al cual se le realizaron pruebas de densidad y peso volumétrico, datos utilizados para el diseño de mezclas. La densidad del cemento se encontró de 3.06 kg/l, y el peso volumétrico seco suelto de 1400 kg/m³.

3.1.3. Aditivo.

El aditivo utilizado fue un superplastificante plastol precast plus de la marca Eucomex, al cual se le realizaron pruebas de contenido de sólidos y líquidos, presentando un contenido de líquido del 40% y sólido del 60%, así como una densidad de 1.11 g/cm³, con ello hacer una corrección por líquidos en el agua de reacción de la mezcla de concreto.

3.1.4. Diseño de mezclas.

Se realizaron dos diseños de mezclas correspondientes a la resistencia a compresión de $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$, tales proporcionamientos se muestran en las tablas 7 y 8, observando que la cantidad de aditivo se fue incrementando conforme se incrementaba el porcentaje de fibras de acero, esto para lograr la trabajabilidad de la mezcla, así como su correcta colocación en los moldes. Los porcentajes de fibras de acero también se fueron variando para las dos relaciones a/c.

Tabla 7.
 Proporcionamiento final para la resistencia de 250 kg/cm², elaborado en kg/m³.

Materiales	% de fibra de acero			
	0	0.3	0.5	0.7
$f'c = 250 \text{ kg/cm}^2, a/c = 0.55$				
Agua	157.0	157.0	157.0	157.0
Cemento	280.0	280.0	280.0	280.0
A. Grueso	792.0	782.6	766.9	770.1
A. Fino	1139.0	1124.8	1115.5	1106.1
Fibra	0.0	23.5	39.2	54.8
Aditivo	1.1	1.4	1.6	2.2
Aire %	2.5	2.5	2.5	2.5

Tabla 8.
 Proporcionamiento final para la resistencia de 350 kg/cm², elaborado en kg/m³.

Materiales	% de fibra de acero			
	0	0.2	0.4	0.6
$f'c = 350 \text{ kg/cm}^2, a/c = 0.35$				
Agua	136.0	136.0	136.0	136.0
Cemento	380.0	380.0	380.0	380.0
A. Grueso	761.0	753.9	748.5	742.2
A. Fino	1139.0	1128.4	1120.2	1110.8
Fibra	0.0	17.7	31.3	47.0
Aditivo	1.9	2.3	2.7	3.4
Aire %	2.5	2.5	2.5	2.5

3.1.5. Propiedades del concreto en estado fresco.

La trabajabilidad del concreto fresco es de tal importancia ya que, con ello se obtiene una correcta colocación de la mezcla en los moldes de los especímenes. Es por ello, que se le realizaron pruebas de revenimiento y contenido de aire a todas las mezclas utilizadas, controlando el revenimiento entre 14 y 16 cm para asegurar la correcta trabajabilidad, el contenido de aire se mantuvo en 2.5 indicando que con la incorporación de fibras de acero en la mezcla de concreto no incorpora aire con esos porcentajes de fibra.

3.1.6. Propiedades mecánicas del concreto endurecido.

3.1.6.1. Resistencia a la compresión de los cilindros de concreto.

Los resultados promedio de los ensayos a compresión realizados se muestran en las figuras 22 y 23, donde en la figura 22 se observa la resistencia de un promedio de 6 cilindros por cada porcentaje de fibras de acero, para la resistencia de 250 kg/cm². Así de igual manera, la figura 23 nos muestra resultados de la resistencia de 350 kg/cm². La totalidad de los resultados de los ensayos a compresión de los cilindros de concreto se encuentran en el apéndice 1.

La resistencia a la compresión de los cilindros con relación a/c = 0.55, mostrada en la figura 22 cumple con la solicitada de 250 kg/cm² y lo

dictado en Los Requisitos del Reglamento para Concreto Estructural (ACI-318, 2011), indicando que cumple como un concreto estructural. El aumento de la resistencia a la compresión de las vigas con el más alto porcentaje de fibras de acero en comparación con las de control se encuentra en un 10% como se muestra en la gráfica, que se le puede atribuir a la incorporación de las fibras de acero, aunque su principal función de las fibras no sea el aumento a la compresión, contribuyen a obtener una matriz más densa.

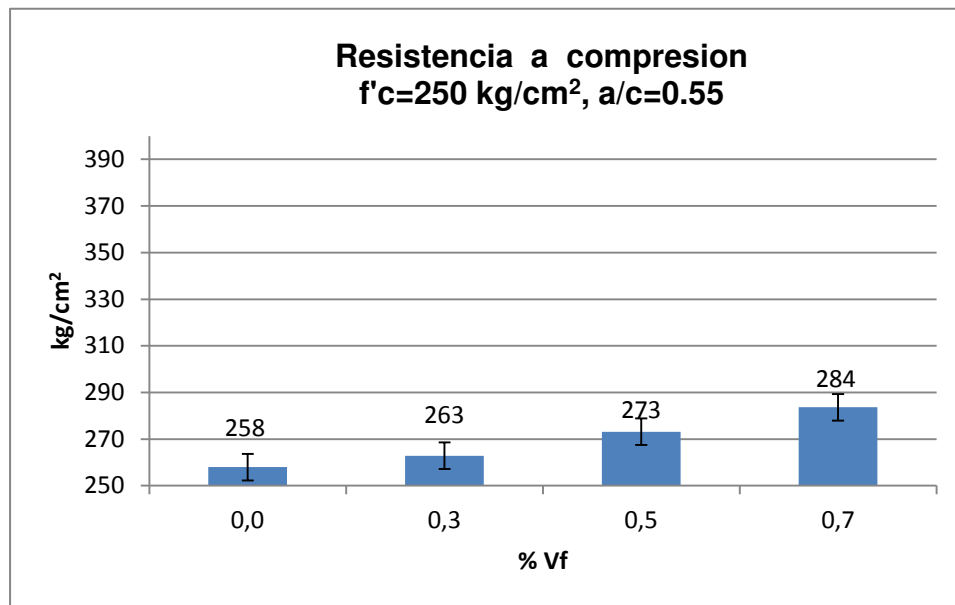


Figura 22. Resistencia a la compresión de 6 cilindros de concreto con fibras de acero.

La figura 23 muestra los resultados a compresión de la relación $a/c=0.35$, donde se puede observar que los resultados del promedio de 6 cilindros para cada porcentaje de fibras de acero se encuentran igual o por encima de lo requerido en la experimentación para la resistencia

$f'c=350 \text{ kg/cm}^2$, así como, cumplen con lo establecido en Los Requisitos del Reglamento para Concreto Estructural (ACI-318, 2011).

La grafica nos muestra resistencias iguales o por encima de 350 kg/cm^2 , lo que se requiere para la aplicación en los modelos matemáticos, así como se puede observar un aumento poco significativo en la resistencia, este aumento que se presenta es atribuido a la incorporación de las fibras de acero, aunque, su función principal no es el aumento de la resistencia a la compresión esta mejora por la adherencia de las fibras en la matriz cementante. El resultado de la barra con el porcentaje de fibras de acero de 0.4, se puede atribuir a diferentes factores como puede ser; la elaboración de los especímenes, el curado, cabeceo con azufre o el propio ensayo, pero aun a ello se encuentra en un resultado aceptable para ser aplicado en la experimentación.

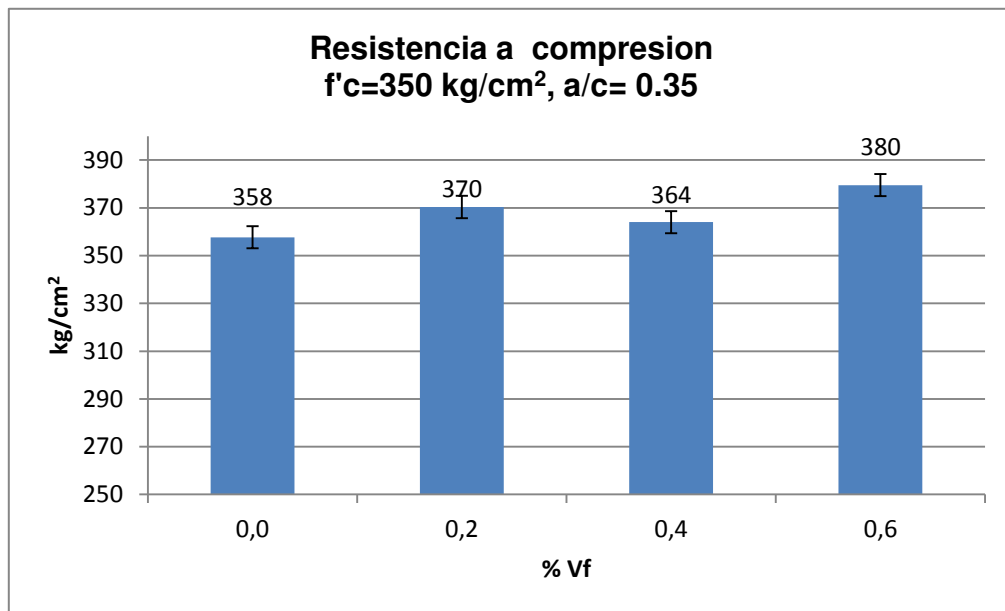


Figura 23. Resistencia a la compresión de 6 cilindros de concreto con fibras de acero.

3.1.6.2. Resistencia a la tensión por compresión diametral.

El ensayo de tensión por compresión diametral se realizó con la misma cantidad de especímenes que el ensayo a compresión, tal prueba se realizó de manera simultánea a los ensayos de compresión y los ensayos de las vigas correspondientes. El ensayo de tensión por compresión diametral a diferencia del ensayo a compresión, se encuentra que la resistencia a tensión del concreto reforzado con fibra de acero (CRFA) es mayor que la de un concreto simple (CS) (Ponce, 2008). Para el CRFA, la disipación de energía que se desarrollan después de la primera grieta son mayores que los observados en un CS (Blanco, 2008).

La prueba se realizó con la aplicación de carga en un cilindro de concreto de 300 mm de altura y 150 mm de diámetro, como se muestra en la figura 24, donde se puede observar como las fibras de acero puentean a la grieta, generando un aumento en la resistencia del elemento, así como disminuir la grieta frágil que se presenta en un concreto simple. La ecuación 20 señala los parámetros necesarios según la normatividad.

$$f_t = \frac{2 \times p}{\pi \times l \times d} \quad \text{Ec. 20.}$$

Dónde:

P: Carga máxima aplicada.

F_t: Resistencia a la tensión diametral.

L: Longitud del cilindro.

D: Diámetro del cilindro.

Los ensayos a tensión por compresión diametral se realizaron, para determinar la aportación de la fibra de acero en la tensión de la masa de concreto. Estos resultados serán utilizados en los modelos matemáticos para determinar la resistencia al cortante diagonal teórico de las vigas de concreto.



Figura 24. Ensayo de tensión por compresión diametral en cilindro de concreto reforzado con fibra de acero.

Los resultados promedio se presentan en las figuras 25 y 26, donde, la figura 25 muestra los resultados obtenidos para la relación $a/c=0.55$, y los resultados de la figura 26 son los obtenidos para la relación $a/c=0.35$, resultados que se ven favorecidos con el aumento del porcentaje de fibra de acero. Los resultados de todos los ensayos a compresión por tensión diametral de los cilindros de concreto se encuentran en el apéndice 1, se obtuvo el promedio de estos resultados y son presentados en las figuras 25 y 26.

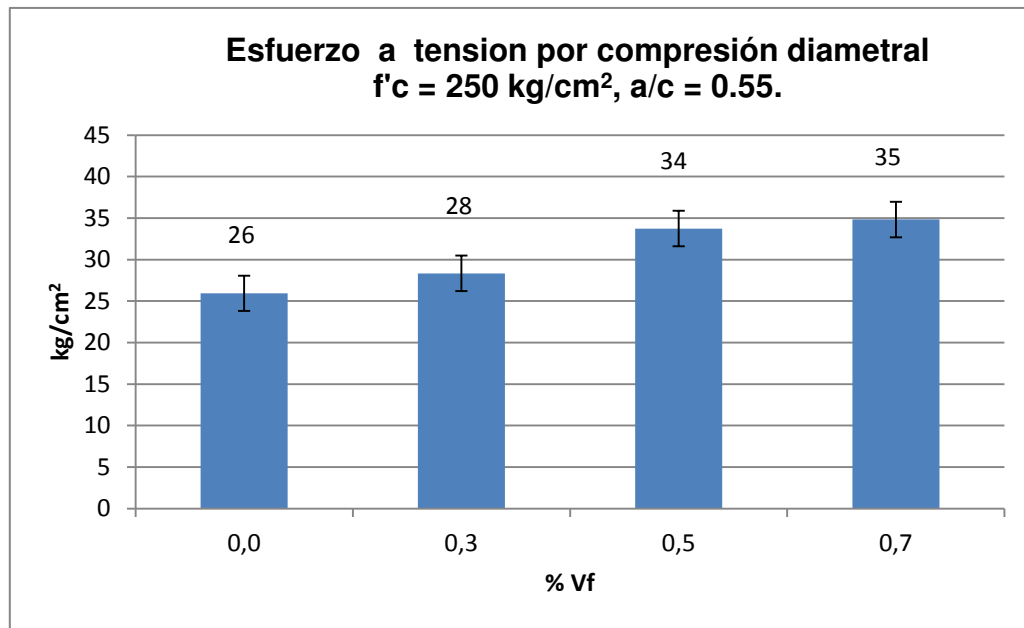


Figura 25. Grafica del ensayo del promedio de 6 cilindros por cada porcentaje de fibra de acero.

La figura 25 nos muestra los resultados de los ensayos realizados a 6 cilindros por cada porcentaje de fibra de acero con relación $a/c = 0.55$ y $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$. El concreto simple, sin fibra de acero también cumple en la resistencia a tensión con el $0.10f'c$, parámetro dictado por Gonzales Cuevas en su libro Aspectos Fundamentales del concreto reforzado (Gonzales, 1994), que lo estableció como una aproximación del ensayo a compresión. Así como, también se puede ver el incremento de la resistencia a medida que aumenta la cantidad de fibras, encontrando que aumentó el 34% con el porcentaje más alto de fibras de acero, esto pasa, porque las fibras están proporcionando al concreto no solo la máxima capacidad de resistencia, sino también una capacidad de deformación a tensión mayor que la que se presenta en un concreto sin fibras (Carrillo et al, 2014).

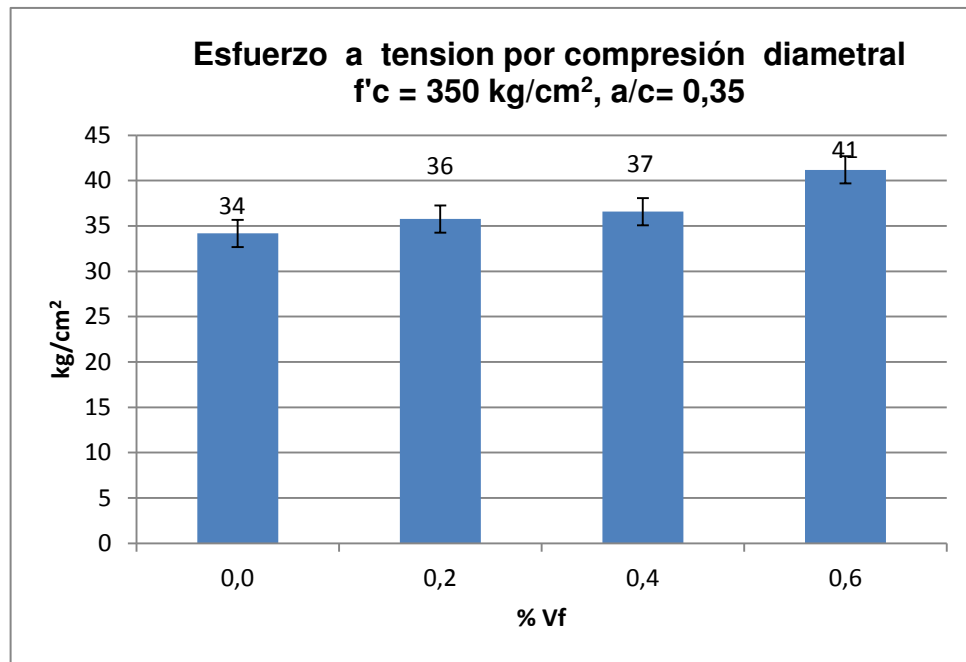


Figura 26. Grafica del ensayo del promedio de 6 cilindros por cada porcentaje de fibra de acero.

En la figura 26 se muestran los resultados de los ensayos promedio de 6 cilindros para cada porcentaje de fibra de acero, con una relación $a/c = 0.35$ y $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$, donde se puede observar que el promedio de los 6 cilindros de concreto simple, se encuentra dentro del 9 al 12 % de la resistencia a compresión como lo dicta Gonzales Cuevas en su libro Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado (Gonzales, 1994), como una aproximación y se representa para dar una idea de los órdenes de magnitud relativos.

El aumento de la resistencia con respecto al aumento del Vf de fibra de acero incorporada en la masa de concreto es favorable, presentando un incremento del 20% los especímenes con el más alto

porcentaje de fibras de acero en comparación con los especímenes de control, la resistencia se le puede atribuir al aporte de las fibras, a la resistencia máxima, así como a la deformación del concreto, mostrando un comportamiento distinto al concreto simple. No se presentó una falla frágil como sucede con el concreto simple, esto a la aportación de la fibra reduciendo el agrietamiento presentado como se pudo observar en la figura 24, donde se puede apreciar como las fibras de acero puentean la dirección de la grieta, originando una reducción en el ancho de grietas, del mismo modo también se le puede atribuir a la geometría de las fibras de acero, como son los ganchos en los extremos, así como una mejor adherencia en la matriz cementante .

3.2. Resistencia del acero de refuerzo.

El refuerzo longitudinal utilizado en las vigas de concreto, es conocido como varillas de acero con cara circular y disponible en un amplio intervalo de diámetros con designaciones numéricas que representan octavos de pulgada de diámetro y disponibles usualmente para aplicarse en la construcción. Las corrugaciones tienen el propósito de aumentar la adherencia entre el acero y el concreto.

Las dos propiedades mecánicas principales que determinan los rasgos de una varilla de refuerzo son: el límite o esfuerzo de fluencia (F_y) y el módulo de elasticidad (E_s). Este último es prácticamente el mismo para todos los aceros de refuerzo y su valor es del orden de 2, 038, 700 kgf/cm², (ACI-318 08). Adicionalmente, la forma de la curva esfuerzo-deformación unitaria y en particular la del tramo inicial, tiene una influencia significativa en el comportamiento de elementos de concreto reforzado.

Los resultados obtenidos de los ensayos a tensión del refuerzo transversal se presentan en la tabla 9 y se pueden observar en la figura 27 la forma de falla del acero, presentando una forma cónica lo cual nos indica que el acero cuenta con baja proporción de carbono dándole una resistencia a la flexión y con ello ductilidad, tales valores fueron los utilizados en los modelos matemáticos para el diseño a cortante de las vigas de concreto, así como tomados en cuenta para la comparación con las fibras de acero (P50-100). El refuerzo longitudinal no fue ensayado, los datos de este elemento fueron tomados de la ficha técnica, varilla

corrugada con grado 42 y esfuerzo a la fluencia de $F_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$, el acero longitudinal fue colocado de tal manera que el elemento no fallara por flexión, así como no se sustituye este refuerzo por fibras de acero.

Tabla 9.
Resultados de ensayos a tensión del acero de refuerzo transversal.

Especímenes	Esfuerzo Kgf/cm^2					
	Fluencia		Máximo		Ruptura	
	Individual	Promedio	Individual	Promedio	Individual	Promedio
1	1768	1636	3115	3118	2730	2710
2	1560		3130		2710	
3	1580		3110		2690	



Figura 27. Muestras y ensayos a tensión del acero transversal.

3.3. Resistencia de las fibras de acero.

La norma ASTM A-820 establece un esfuerzo a tensión mínimo y requerimiento de flexión en fibras de acero; también establece la tolerancia, la longitud, diámetro, (diámetro equivalente), y relación de aspecto. El esfuerzo a tensión mínima de fluencia requerida por el comité ASTM A-820 es de 345 MPa. Por otro lado, en la especificación del comité JSCE requiere 552 MPa.

La fibra de acero P50-100 es utilizada en la experimentación como sustitución parcial de estribos de refuerzo, contando con una resistencia a la tensión de 11523 kg/cm^2 , obteniendo un refuerzo transversal en la viga de concreto en la falla por tensión a cortante diagonal.

3.4. Resistencia teórica a cortante por tensión diagonal en vigas de concreto.

Los cálculos de la resistencia a cortante por tensión diagonal de las vigas en esta investigación fueron realizados en sistema internacional y el resultado presentado en sistema métrico para la adaptación de los resultados experimentales.

El resultado teórico de la carga máxima aplicada a cortante por tensión diagonal se muestran en las tablas de la 10 a la 12, donde se muestra la aportación de los tres componentes que constituyen a la viga; aportación de concreto, acero de refuerzo y fibras de acero.

La tabla 10 muestra los resultados del diseño de las vigas de control, el cual se realizó siguiendo el código del Instituto Americano del Concreto (ACI 318), las tablas 11 y 12 muestran los resultados que se obtuvieron teóricamente con los modelos matemáticos utilizados, en los cuales se sustituye fibra de acero por estribos de refuerzo transversal, resultados que fueron comparados con los resultados obtenidos experimentalmente, con los porcentajes de fibras de acero, y la separación de estribos.

Los parámetros tomados en cuenta fueron la separación de estribos y el porcentaje de fibras de acero, así como las relaciones a/c .

Tabla 10.
Resistencia nominal teórica a cortante para las dos relaciones a/c .

Método ACI 318					
Relación a/c	$f'c$ kgf/cm ²	Vc kg	Fy kgf/cm ²	Vs kg	$Vn = Vc + Vs$ kg
0,55	250	3952	1636	2577	6529
0,35	350	4420	1636	2577	6997

En la tabla 11 y 12 se puede ver la comparación de resultados teóricos obtenidos con los modelos matemáticos utilizados en la presente investigación, donde se puede observar la diferencia que se encuentra en relación si se incrementa el porcentaje de fibras de acero, encontrando al modelo matemático de Narayanan más conservador en comparación del modelo de Swamy, es por ello, que para el arreglo del marco rígido y capacidad de carga donde se realizarían los ensayos de las vigas de

concreto fibroreforzado se siguieron los resultados de Swamy. Estos resultados se le pueden atribuir a las constantes con las que cuenta el modelo de Narayanan, presentando resultados conservadores.

Tabla 11.
Resistencia nominal teórica a cortante del modelo matemático de Swamy.

Modelo de Swamy y Mangat							
a/c= 0.55							
Fibra %	Separación S (cm)	f'c kgf/cm ²	Vc kg	Fy kgf/cm ²	Vs kg	Vf kg	Vn = Vc+Vs+Vf kg
0	15	250	3952	1636	2577	0	6529
0,3	25	250	3952	1636	1546	1325	6823
0,5	30	250	3952	1636	1288	1368	6608
0,7	35	250	3952	1636	1104	1411	6467
a/c = 0.35							
0	15	350	4420	1636	2577	0	6997
0,2	25	350	4420	1636	1546	1535	7501
0,4	30	350	4420	1636	1288	1577	7286
0,6	35	350	4420	1636	1104	1619	7144

Tabla 12.
Resistencia nominal teórica a cortante del modelo matemático de Narayanan.

Modelo de Narayanan							
a/c= 0.55							
Fibra %	Separación s(cm)	f'c kgf/cm ²	Vc kg	Fy kgf/cm ²	Vs kg	Vf kg	Vn = Vc+Vs+Vf kg
0	15	250	3952	1636	2577	0	6529
0,3	25	250	3952	1636	1546	208	5706
0,5	30	250	3952	1636	1288	242	5483
0,7	35	250	3952	1636	1104	275	5331
a/c = 0.35							
0	15	350	4420	1636	2577	0	6997
0,2	25	350	4420	1636	1546	264	6231
0,4	30	350	4420	1636	1288	300	6009
0,6	35	350	4420	1636	1104	333	5858

3.5. Resistencia experimental a cortante por tensión diagonal en vigas.

En este apartado son presentados los resultados experimentales de las vigas sujetas a cortante por tensión diagonal, datos que fueron comparados con los resultados teóricos de los modelos matemáticos antes mencionados.

Donde se analiza y compara el modo de falla con el aumento de fibra de acero, la aportación de las fibras a la aparición y resistencia de la primera grieta.

Los resultados mostrados pertenecen a las dos relaciones a/c, donde se analiza la resistencia al cortante por tensión diagonal, la aportación de las fibras de acero distribuidas en la matriz cementante para el aumento de la ductilidad y de la resistencia a cortante de los elementos. Se consideraron elementos con refuerzo transversal sin fibras de acero, así como, elementos con refuerzo transversal y fibras de acero. Además, elementos reforzados con solo fibras de acero.

Con lo anterior, se analizará la efectividad de diseñar elementos estructurales, donde se sustituya parcialmente la cantidad de refuerzo transversal, considerando los modelos matemáticos estudiados en esta investigación.

3.5.1. Resistencia experimental en vigas fibroreforzadas sin refuerzo transversal.

3.5.1.1. Modo de falla.

En todos los ensayos de las vigas sin refuerzo transversal (estribos), únicamente reforzadas con fibra de acero en el alma, el modo de falla fue muy similar; las grietas presentadas fueron de un ancho considerable, con una deflexión pequeña del elemento, así como una falla frágil y repentina, tal que, es considerada una falla de tensión diagonal. El modo de falla y agrietamiento de los elementos sometidos a dos cargas puntuales, donde la grieta puede aparecer súbitamente, sin señal previa, y extenderse inmediatamente hasta causar el colapso del elemento estructural (Gonzales, 1994).

Todos los elementos presentaron una falla por cortante diagonal frágil. En la figura 28 se puede observar el patrón de agrietamiento presentado en todas las vigas sin refuerzo transversal (estribos), las grietas presentadas por cortante diagonal son similares para las dos relaciones a/c y los porcentajes más altos de fibras de acero ($a/c= 0.55, 0.7\%$ y $a/c=0.35, 0.6\%$).

Por otro lado, las grietas por flexión en promedio se presentaron en mayor cantidad así como de mayor longitud en las vigas con relación $a/c= 0.35$, y con un porcentaje de fibras de acero de 0.6. Con lo anterior se puede inferir que una de las aportaciones de las fibras de acero es

uniformizar los esfuerzos en las vigas, ya que se puede observar que con un alto porcentaje de fibras de acero y una matriz cementante más densa, el patrón de agrietamiento por flexión aumenta, así como disminuye el ancho de grietas, esto a que las fibras proporcionan mayor entrelazamiento entre el agregado y la pasta de cemento en las vigas, originando un puenteo en las grietas.

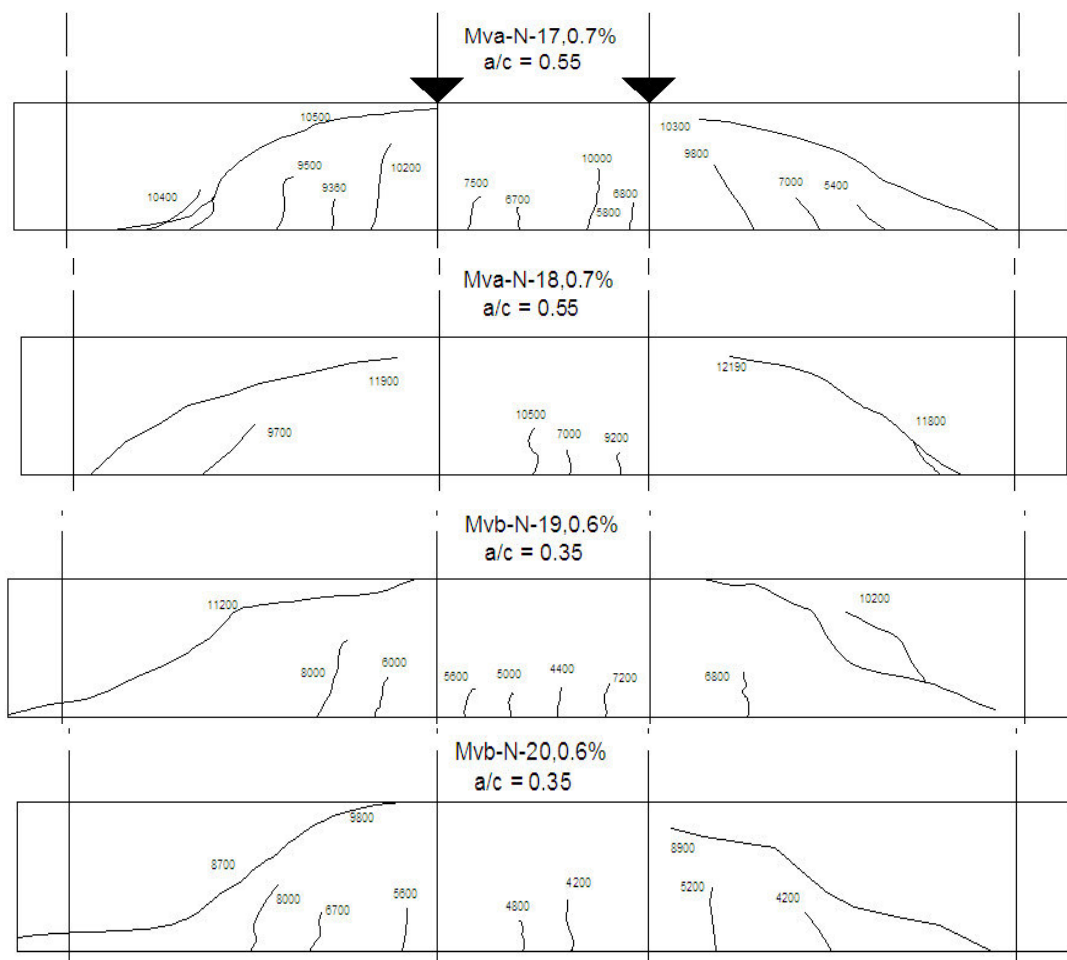


Figura 28. Patrón de agrietamiento para las vigas reforzadas con fibra de acero en el alma, para las dos relaciones (a/c).

Considerando lo mostrado se puede decir que las fibras de acero por si solas como refuerzo transversal, al parecer, no contribuyen a mejorar la ductilidad en el comportamiento a flexión de las vigas y aumentar la resistencia por cortante diagonal.

3.5.1.2. Influencia de la relación a/c en el comportamiento carga-deflexión.

En este punto se discute el comportamiento de las vigas de concreto fibroreforzado en lo referente a la carga-deflexión; considerando la relación a/c, y los más altos porcentajes de fibras aplicados, así como, la comparación de los resultados experimentales con los modelos matemáticos mencionados en el capítulo 2, y del mismo modo una comparación con los elementos diseñados y reforzados como lo presenta el código ACI-318.

En la figura 29 se muestra una comparación de los resultados de los elementos donde son consideradas las dos relaciones (a/c), y los más altos porcentajes de fibras de acero aplicados (0.7 y 0.6), mostrando que los elementos elaborados con la relación $a/c = 0.35$ quedaron por debajo que los elementos elaborados con la relación 0.55. Esto se puede considerar a la interacción de la fibra y matriz cementante, así como la relación de aspecto de la fibra en matrices densas y menos densas, como el acomodo de las fibras en los elementos con esas características. Los concretos con fibras de acero experimentan, por tanto, una disminución en

la ductilidad cuando aumenta el volumen de fibras, lo que implica que para asegurar la dispersión de las mismas se requiere emplear relaciones a/c entre 0.5 y 0.6, con dosificaciones de cemento altas (Fernández, 1981).

Así también se puede observar que el comportamiento de las vigas después de la falla mostraron un comportamiento frágil, aun a esto las vigas presentaron un aumento de la carga a la primera grieta en comparación al cálculo teórico arrojado por los modelos matemáticos, el comportamiento de los elementos se considera adecuado, considerando que mostró una buena dispersión de energía con las fibras distribuidas aleatoriamente en toda la matriz cementante. En base a lo anterior, se puede decir que las fibras de acero utilizadas en esta investigación presentan un comportamiento positivo en relación a una alta relación a/c sin refuerzo transversal, lo que quiere decir que se encontró una correcta interacción de las fibras y la matriz cementante, por otro lado, se puede comentar que las vigas con estas características no pueden ser reforzadas transversalmente con solo fibras de acero, requiriendo el mínimo refuerzo transversal para evitar la falla por cortante diagonal.

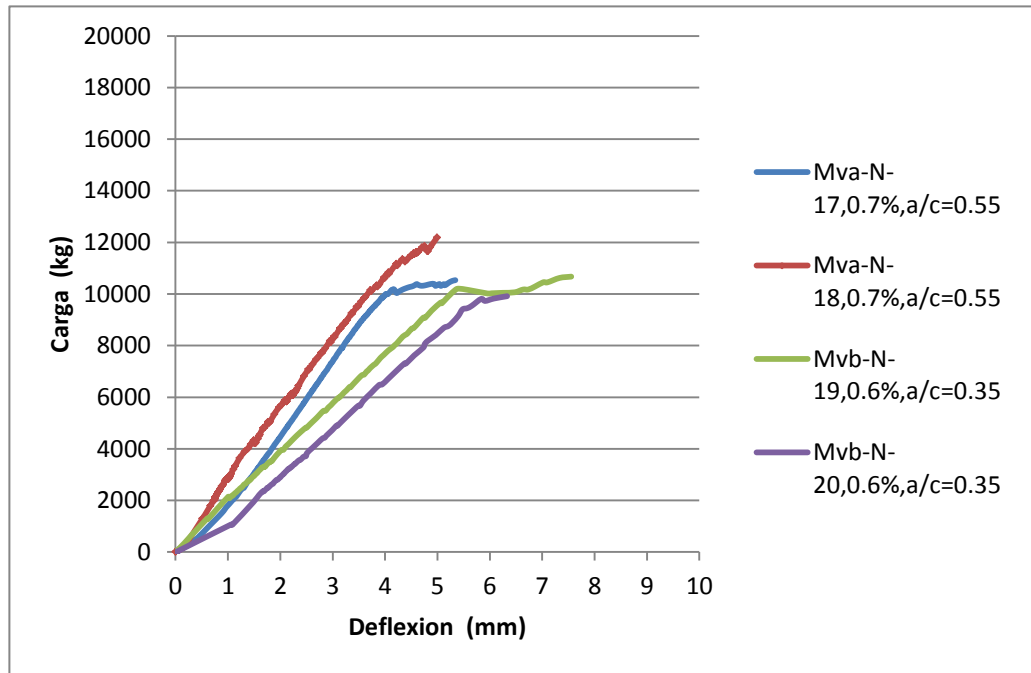


Figura 29. Grafica carga-deflexión de las vigas fibroreforzadas sin refuerzo transversal (estribos).

3.5.1.3. Comportamiento carga-deflexión experimental contra el teórico.

En las figuras 30 y 31 se presentan los resultados de la resistencia experimental a cortante de las vigas de concreto fibroreforzados sin estribos, obtenidas para las dos relaciones (a/c) 0.35 y 0.55, en donde, los resultados experimentales y teóricos son comparados, tomando en cuenta los modelos matemáticos presentados en el capítulo 2.

En ambas graficas se puede señalar el resultado experimental de las vigas fibroreforzadas, donde se quedó por debajo o aproximadamente igual que el del modelo matemático de Swamy; observando la relación a/c

= 0.55 se puede ver que se encuentra por arriba con un 6% del promedio de las dos vigas fibroreforzadas y para la relación $a/c=0.35$ se encuentra con un 14% por arriba del promedio de las dos vigas, pero quedando en ambos casos por arriba del modelo de Narayanan; encontrándose con un 34% por abajo del promedio de las dos vigas fibroreforzadas para la relación $a/c=0.55$ y un 8% para la relación 0.35. Con lo anterior, el modelo matemático de Narayanan se puede considerar conservador para el diseño de vigas sin refuerzo transversal. El resultado obtenido se le puede atribuir a las constantes que son consideradas en el modelo matemático de Narayanan, tales como; el factor de adherencia según el tipo de fibras, las constantes adimensionales con las que cuenta este modelo, tales que no son consideradas en el modelo de Swamy que se presenta como un modelo más simple.

La finalidad de la comparación de los resultados experimentales con los resultados teóricos de los modelos matemáticos antes mencionados, es presentar una experimentación científica propia que valide los modelos matemáticos seleccionados, los cuales son base de otros estudios que se encuentran en la literatura (Haisam, 2011) y (Aoude et al, 2012), ajustando algunas variables, sin llegar a ser una modificación sustancial al modelo original.

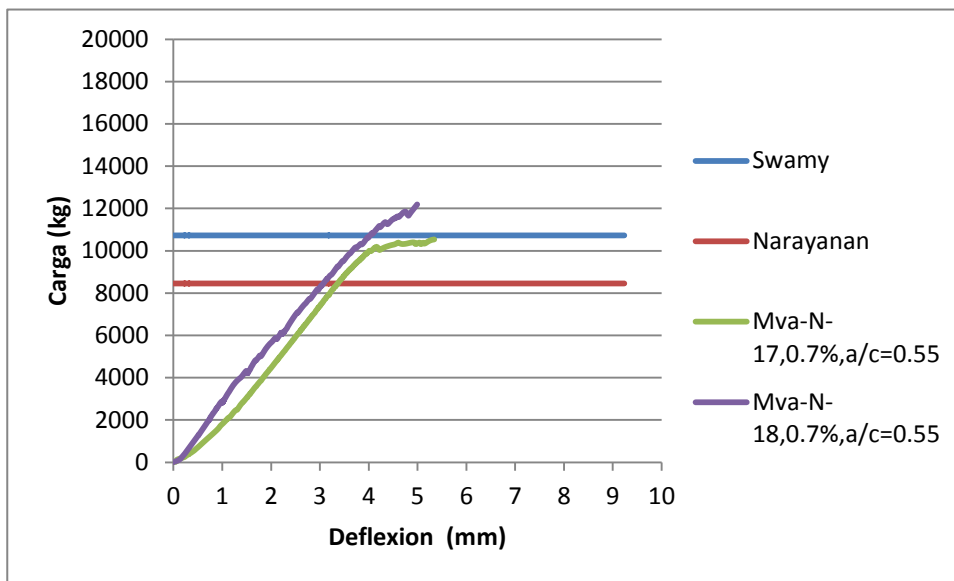


Figura 30. Grafica carga-deflexión de las vigas fibroreforzadas sin refuerzo transversal (estribos), reforzadas con fibras de acero comparada con los modelos matemáticos propuestos para la relación $a/c=0.55$.

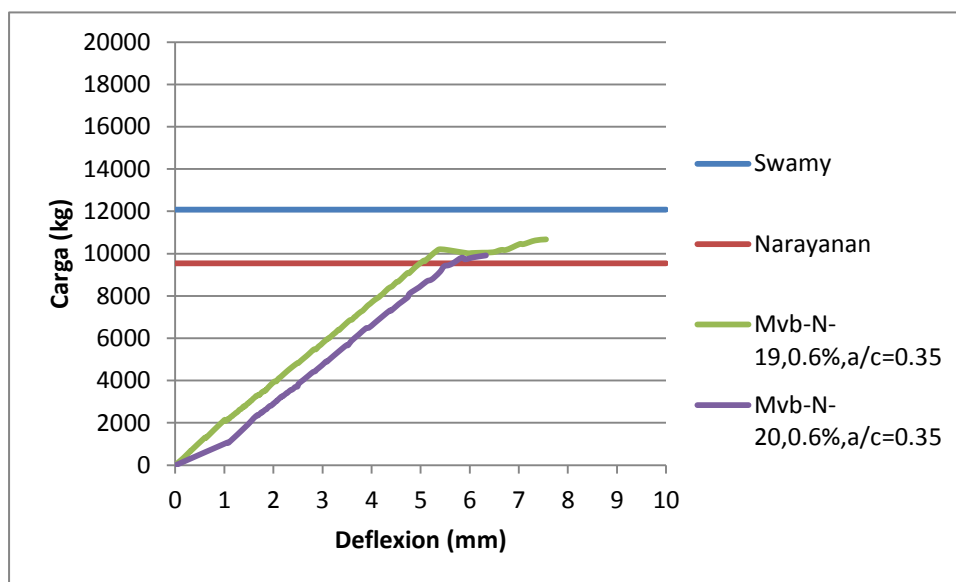


Figura 31. Grafica carga-deflexión de las vigas fibroreforzadas sin refuerzo transversal (estribos), reforzadas con fibras de acero, relación $(a/c) 0.35$, comparada con los modelos matemáticos propuestos.

3.5.2. Resistencia experimental en vigas fibroreforzadas con refuerzo transversal.

3.5.2.1. Modo de falla.

En las figuras 32 y 33 se muestran el patrón de agrietamiento de las vigas ensayadas bajo carga estática. Los elementos con relación $(a/c) = 0.55$ muestran un patrón de agrietamiento con un ancho de grieta más pronunciado que los elementos con relación $(a/c) = 0.35$, presentando grietas de cortante diagonal y grietas por flexión en mayor cantidad y longitud, respectivamente. Se puede ver que las vigas sin fibras de acero en la matriz presentaron una menor cantidad de agrietamiento, presentando grietas; de cortante diagonal más largas, anchas y en menor cantidad, así como menos grietas por flexión en comparación con las vigas con mayor porcentaje de fibras de acero, así también, las grietas por flexión se presentaron de un tamaño considerable, aproximadamente la mitad del peralte, en cambio, las vigas con el mayor porcentaje de fibras de acero presentaron una mayor cantidad de agrietamiento.

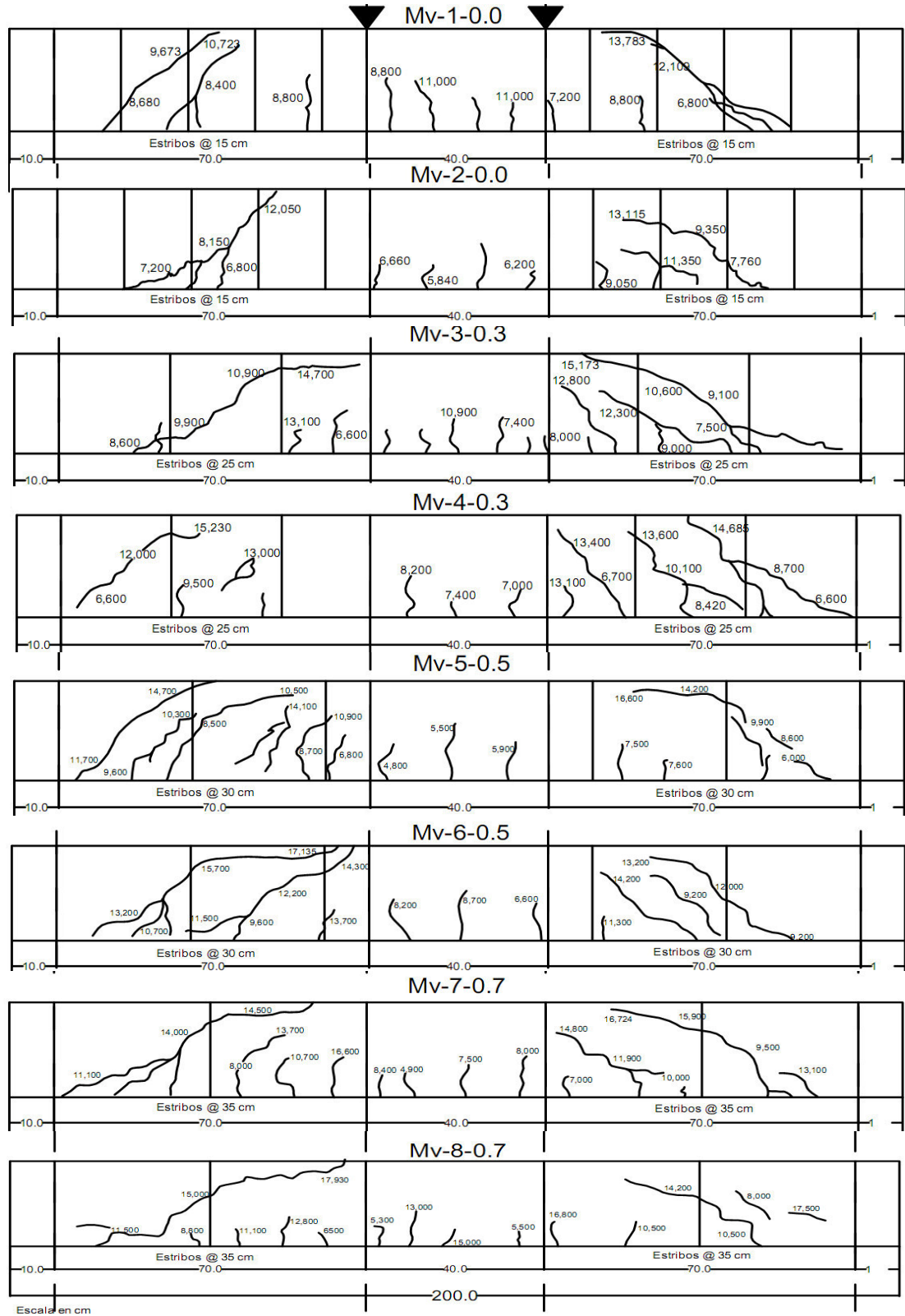


Figura 32. Patrón de agrietamiento para las vigas reforzadas transversalmente con fibras y estribos para la relación (a/c) 0.55.

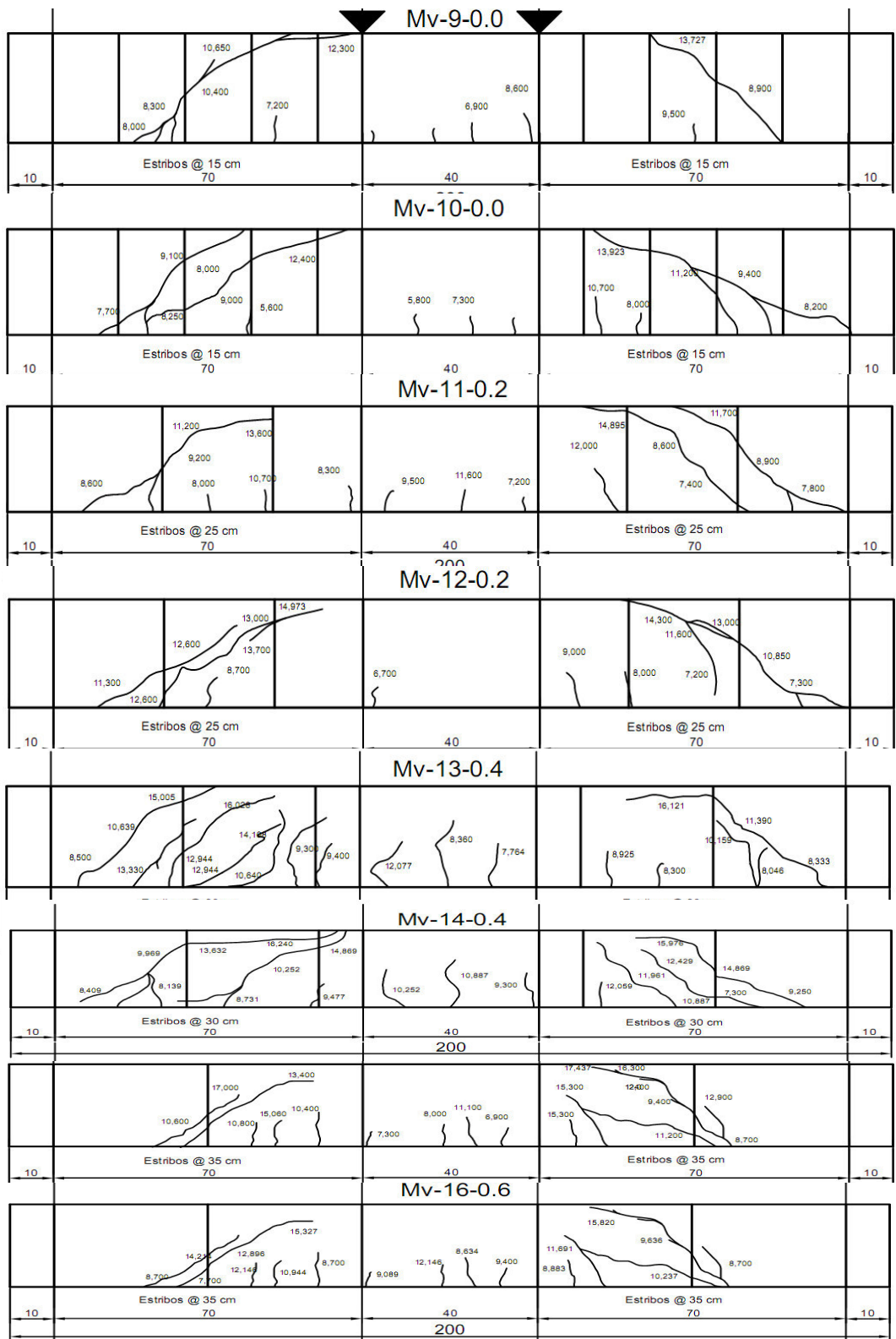


Figura 33. Patr3n de agrietamiento para las vigas reforzadas transversalmente con fibras y estribos para la relaci3n (a/c) 0.35.

Así también, el patrón de agrietamiento muestra que a mayor cantidad de fibras de acero incorporadas en la matriz cementante la cantidad de grietas aumenta y el ancho de ellas disminuye, lo que quiere decir que las fibras distribuyen los esfuerzos por tensión, tomando parte de ellos; debido a que las fibras proporcionan mayor enlazamiento entre el agregado y la pasta de cemento en los elementos, con ello la deflexión de los elementos aumenta, proporcionando mayor ductilidad a las vigas fibroreforzadas.

El patrón de agrietamiento en comparación a la relación a/c se observó que a menor relación a/c y el más alto porcentaje de fibras de acero el agrietamiento aumenta en gran cantidad pero con un ancho de grieta menor de aproximadamente uno a dos milímetros, en comparación con la relaciones (a/c) mayores donde se observa la distribución de esfuerzos presentando mayor cantidad de agrietamiento y en diversas direcciones, lo que parece indicar que la fibra estudiada en esta experimentación tiene mayor desempeño en relaciones a/c 0.5 a 0.6. por lo anterior, se puede deducir que una de las aportaciones de las fibras es la de uniformizar los esfuerzos en el acero de refuerzo transversal y en la matriz del concreto.

Por otro lado, se puede considerar la deflexión que presentaron los elementos de estudio, donde se puede mencionar que a mayor cantidad de fibras de acero, la deflexión aumentó en las dos relaciones a/c , donde se incrementó de 6 mm de deflexión al centro del claro en vigas sin fibras hasta 10 mm con el más alto porcentaje de fibras de acero, lo que puede

indicar que a mayor cantidad de fibras de acero la ductilidad aumenta, presentando una mayor deflexión en los elementos, grietas más largas y delgadas, así como grietas por flexión en mayor cantidad.

En base al patrón de agrietamiento de las dos relaciones a/c , podemos deducir que las fibras de acero, combinadas con el refuerzo transversal (estribos), pueden llegar a sustituir hasta un 75% del refuerzo transversal(estribos) y a la vez proporcionándole al elemento estructural una ductilidad mayor.

3.5.2.2. Comportamiento teórico-experimental de vigas fibroreforzadas.

3.5.2.2.1. Resistencia máxima de las vigas con relación $a/c=0.55$.

Los resultados de la tabla 13, son los obtenidos con la relación (a/c) 0.55, donde se aprecia el aumento de la carga máxima aplicada con respecto al aumento del contenido de fibras y de la separación de los estribos, también se puede observar el aumento en la flecha en las vigas. Por otro lado, se presenta la comparación de los resultados de la carga máxima teórica obtenida con los modelos matemáticos mencionados anteriormente, encontrando que los resultados experimentales son mayores a los teóricos; se observa que para el porcentaje de fibra de 0.3 y separación de estribos de 25 cm, se tiene 13% mayor en comparación con las vigas de control, con el 0.5% de fibras y 30 cm de separación se encontró un

25% de incremento y finalmente con el porcentaje 0.7% de fibra para esta relación (a/c), se presentó hasta un 28% en comparación con los elementos de control sin fibra pero con la separación de estribos de acuerdo al código ACI 318.

Tabla 13.
Carga máxima aplicada a las vigas de concreto fibroreforzadas teórica y experimental, con relación a/c = 0.55.

F'c= 250 kg/cm ² : a/c=0.55					
Muestra	Separación de estribos cm	Carga máxima Experimental Kg	Deflexión mm	Carga de diseño de Swamy Kg	Carga de diseño de Narayanan Kg
Mv-1-0.0	15	13783	7.7	-	-
Mv-2-0.0	15	13115	7.6	-	-
Mv-3-0.3	25	15173	8.3	13646	11412
Mv-4-0.3	25	15230	9.5	13646	11412
Mv-5-0.5	30	16600	8.2	13216	10965
Mv-6-0.5	30	17135	9.3	13216	10965
Mv-7-0.7	35	16724	10.0	12934	10662
Mv-8-0.7	35	17930	10.0	12934	10662

En las figuras de la 34 a la 37 se hace una comparación con respecto a los elementos de control, donde se registra la carga máxima y la flecha presentada por los elementos. Las vigas se fabricaron por duplicado correspondientes al mismo porcentaje de fibras de acero y la misma separación de estribos, comparando con los elementos de control también fabricados por duplicado. En las figuras 34 a la 36, se presenta el comportamiento de las vigas fibroreforzadas en comparación con los elementos de control reforzados con refuerzo transversal, donde se puede observar como aumenta la carga y deflexión cuando se incrementa el

porcentaje de fibras de acero, aumentando la carga de un 10 % en los elementos con 0.3% de fibras, el 24% para los elementos con el 0.5% de fibras y hasta un 30% en los elementos con el 0.7% de fibras, esto también se puede ver en la flecha presentada encontrando una deflexión hasta de 10 mm y un aumento constante hasta llegar a su carga máxima. Del mismo modo, es de interés la figura 37 donde se comparan las vigas con el más alto porcentaje de fibras de acero, donde se presentó una flecha en la carga máxima de hasta 10 mm en los elementos reforzados con el más alto porcentaje de fibras de acero, observando en la imagen como la flecha de la viga aumentaba conforme aumenta la carga de aplicación, esto se le puede atribuir a las fibras de acero distribuidas en toda la matriz cementante, del mismo modo, se puede decir que las grietas presentadas en la matriz son contrarrestadas por las fibras. El ensayo de las vigas termina al llegar a la capacidad de la carga máxima, enseguida presentando la falla por cortante diagonal y del mismo modo la inestabilidad del elemento.

En la figura 37 se presenta la totalidad de la curva experimental, donde se puede observar como la deflexión correspondiente a la carga máxima aumenta en proporción al aumento del porcentaje de fibras de acero. Del mismo modo, la capacidad de la carga máxima se incrementó, esto puede ser debido a una dispersión correcta de las fibras en toda la matriz cementante que puede contrarrestar el micro-agrietamiento y aumentar la capacidad de carga a la primera grieta.

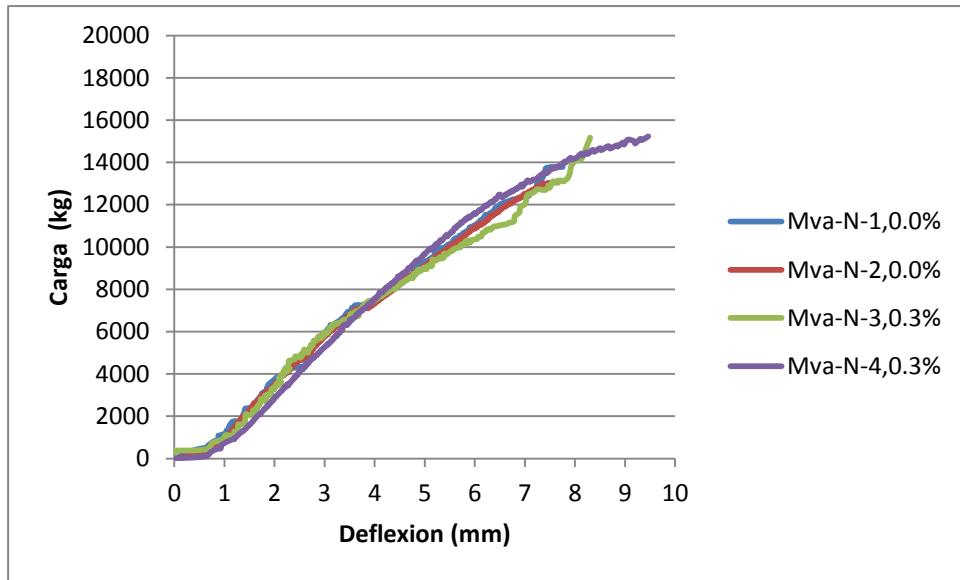


Figura 34. Grafica carga- deflexión de las vigas con una relación $a/c= 0.55$. Elemento de referencia y elementos con porcentaje de fibra de acero de 0.3%.

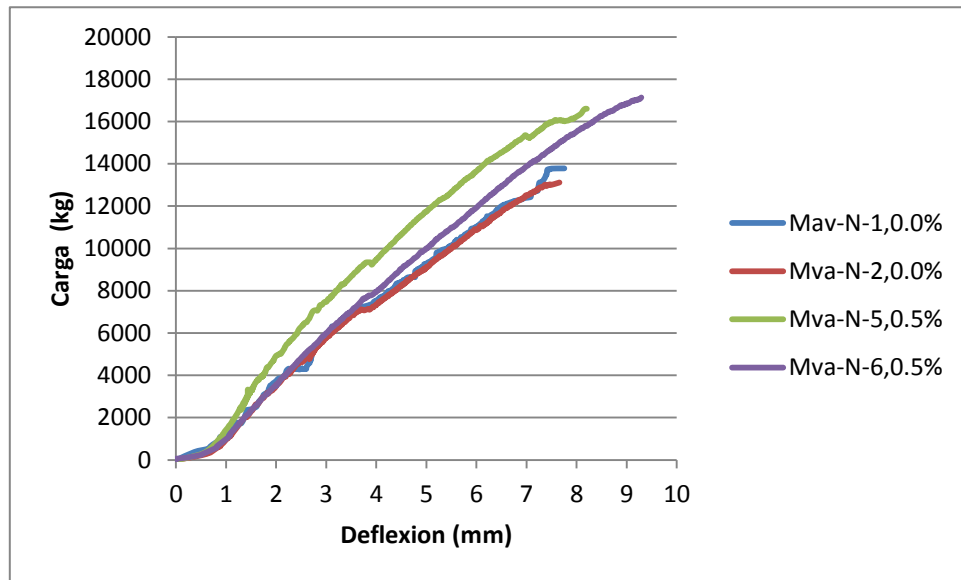


Figura 35. Grafica carga- deflexión de las vigas con una relación $a/c= 0.55$. Elemento de referencia y elementos con porcentaje de fibra de acero de 0.5%.

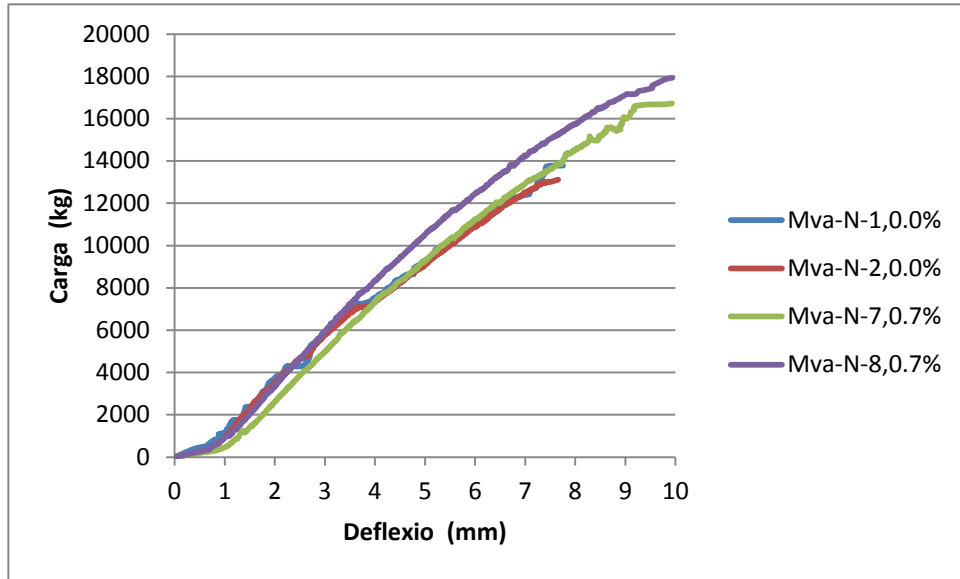


Figura 36. Grafica carga- deflexión de las vigas con una relación $a/c= 0.55$. Elemento de referencia y elementos con porcentaje de fibra de acero de 0.7%.

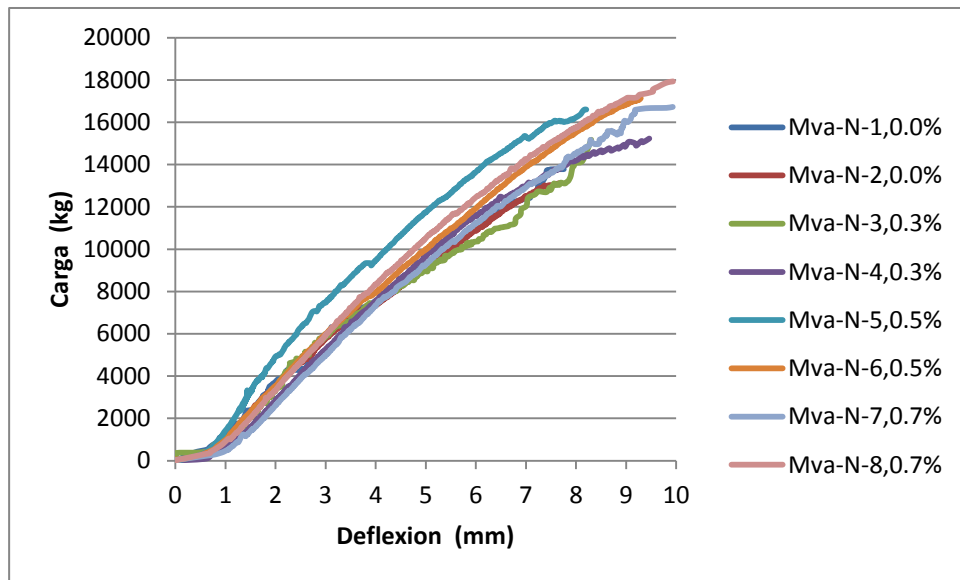


Figura 37. Grafica carga- deflexión de las vigas con una relación $a/c= 0.55$. Elemento de referencia y elementos con todos los porcentajes de fibra de acero.

3.5.2.2.2. Resistencia a cortante experimental y teórica.

En la tabla 14 se encuentran los valores máximos obtenidos por cortante por tensión diagonal, estos resultados como los de flexión son un promedio de los especímenes con el mismo porcentaje de fibra de acero, indicando el incremento de resistencia al cortante en proporción al aumento del porcentaje de fibra de acero de hasta un 28% de incremento en las vigas con el 0.7% de fibra en relación a las vigas de control, así del mismo modo se puede observar que todos los resultados teóricos quedaron por debajo del experimental, y por otro lado el modelo de Narayanan se presenta más conservador en relación a lo experimental, esto se puede deber a los parámetros y variables que considera para el diseño de elementos fibroreforzados. En la figura 38, donde se presenta una comparación de los resultados teóricos con los experimentales para cada separación de refuerzo transversal y porcentaje de fibras de acero aplicado.

Tabla 14.
Resistencia a cortante diagonal máxima teórica y experimental, de las vigas con relación a/c = 0.55.

Cargas máximas a cortante					
% vf	Separación de estribos cm	Cortante Experimental Kg	Deflexión mm	Resistencia a cortante Swamy Kg	Resistencia a cortante Narayanan Kg
0.0	15	6724.5	7.7	-	-
0.3	25	7600.7	8.8	6823.0	5706.0
0.5	30	8433.7	8.7	6608.0	5482.5
0.7	35	8663.5	10.0	6467.0	5331.0
0.7	0	5681.0	5.2	5362.0	4227.0

En la figura 38 se puede observar como la carga máxima a cortante por tensión diagonal se incrementa con el aumento de los porcentajes de fibras, así del mismo modo, se presenta en los resultados teóricos obtenidos, un incremento en relación al porcentaje de fibras de acero, aunque se encuentren por debajo de lo experimental. Es de gran interés observar en la figura 38 la comparativa de los especímenes de 0 % fibra y especímenes sin refuerzo transversal, donde se puede observar que no es recomendable sustituir todo el refuerzo transversal pero si gran parte del refuerzo, observando que la resistencia de las vigas reforzadas con solo fibra de acero se encuentra en un 18% por debajo de las vigas de control diseñadas por el método ACI, así como se puede observar como el modelo de Narayanan se encuentra por debajo del experimental y del modelo de Swamy, encontrándose conservador en las vigas fibroreforzadas sin refuerzo transversal, esto se le puede atribuir a las constantes que considera de seguridad, encontrándose en un 34% por debajo de los resultados experimentales.

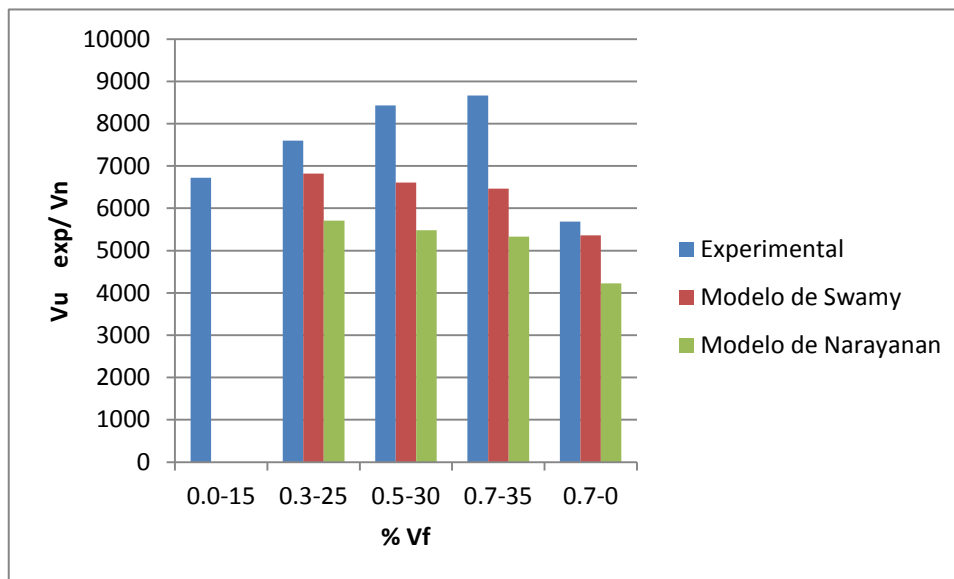


Figura 38. Esfuerzo a cortante diagonal máximo teórico y experimental en vigas fibroreforzadas con una relación $a/c=0.55$. Las barras se identifican con la separación de los estribos así como el porcentaje de fibra de acero.

3.5.2.2.3. Resistencia máxima de las vigas con relación $a/c=0.35$.

Los resultados de la tabla 15, son los correspondientes a la relación $a/c = 0.35$, en donde se observa el incremento del cortante por tensión diagonal similar a la relación $a/c= 0.55$. Los resultados de los elementos fibroreforzados se presentó un incremento de resistencia de hasta 18% en relación a los elementos de control, aunque los elementos elaborados con el porcentaje más alto de fibra de acero para esta relación y cantidad de acero de refuerzo transversal nulo quedo por debajo de los resultados teóricos y de los elemento elaborados con solo acero de refuerzo transversal, las fibras de acero con estas características funcionan como un complemento de la sustitución parcial del refuerzo transversal,

presentando; un aumento del 8% en la sustitución con el 0.2% de fibras, 17 por ciento mayor con el 0.4% de fibras y por último se incrementó un 20% con el más alto porcentaje de fibra (0.6%).

Esto quiere decir, que el esfuerzo a cortante por tensión diagonal puede ser resistido adecuadamente con un porcentaje de fibra de acero y una cantidad de refuerzo transversal, consiguiendo en los elementos mejores características mecánicas.

Tabla 15.
Carga máxima de las vigas de concreto fibroreforzadas teórica y experimental, con relación $a/c = 0.35$.

F'c=350 kg/cm ² ; a/c=0.35					
Muestra	Separación de estribos cm	Carga máxima Experimental Kg	Deflexión mm	Carga de diseño de Swamy Kg	Carga de diseño de Narayanan Kg
Mv-9-0.0	15	13727	6.9	13994	13995
Mv-10-0.0	15	13923	7.1	13994	13995
Mv-11-0.2	25	14895	8.3	15002	12498
Mv-12-0.2	25	14973	7.3	15002	12498
Mv-13-0.4	30	16121	9.1	14571	12050
Mv-14-0.4	30	16240	9.0	14571	12050
Mv-15-0.6	35	17437	9.7	14288	11750
Mv-16-0.6	35	15820	8.4	14288	11750

En las figuras de la 39 a la 42 se presenta la comparación de las vigas con relación $a/c=0.35$, correspondientes al porcentaje de fibras de acero y separación de estribos con los elementos de control con cero por ciento de fibras de acero, diseñados en base al código ACI, como los elementos con la relación $(a/c) 0.55$. El comportamiento de los elementos

con respecto al porcentaje de fibra de acero es similar que las vigas fabricadas con relación $a/c=0.55$, donde se incrementó la flecha con respecto a la de control, así como la carga máxima de aplicación, las gráficas 39 y 42 presentan un incremento en relación al aumento del porcentaje de fibras de acero, así del mismo modo la flecha del elemento, indicando que el comportamiento de la viga es ductil, esto se puede deber a la dispersión correcta de las fibras en toda la matriz cementante, aunque comparando los elementos con las dos relaciones (a/c), los elementos con relación $a/c=0.55$ presenta un mejor comportamiento, las vigas con relación $a/c=0.35$, presentando un incremento en la carga más bajo que la relación $a/c=0.55$ en comparación a los elementos de control, presentando un incremento de 8% con el porcentaje de fibras de 0.2%, así como un 17% en los elementos con el 0.4% de fibras y hasta un 25% en los elementos con el mas alto porcentaje de fibras de acero de 0.6%, estos porcentajes de incremento se pueden deber a la interacción de las fibras de acero y la matriz cementante más densa.

Lo anterior quiere decir, que el esfuerzo a cortante diagonal puede ser resistido con un porcentaje de fibra de acero y una cantidad de refuerzo transversal, consiguiendo en los elementos mejores características mecánicas como las que se presentaron en esta investigación las cuales son mostradas en la figura 42, mayor deflexión en los elementos sin llegar al colapso, esto por la distribución de las fibras de acero en toda la matriz cementante, que provocó que las grietas presentadas se

uniformizaran y no llegar a la grieta por cortante diagonal. Así como se puede observar que la deflexión aumenta con el aumento del porcentaje de fibras, aunque se presentó menor deflexión que las vigas con relación $a/c= 0.55$, indicando que para concretos con relaciones a/c menores se recomienda la aplicación de micro fibras, y del mismo modo, se encontraría mejor desempeño de las fibras en la matriz cementante.

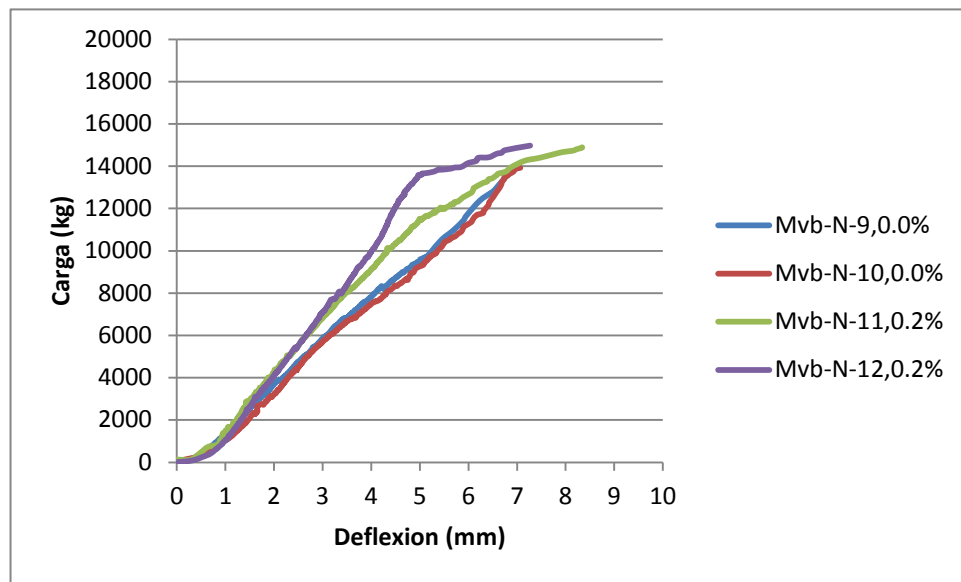


Figura 39. Grafica carga- deflexión de las vigas con una relación $a/c= 0.35$. Elemento de referencia y elementos con porcentaje de fibra de acero de 0.2%.

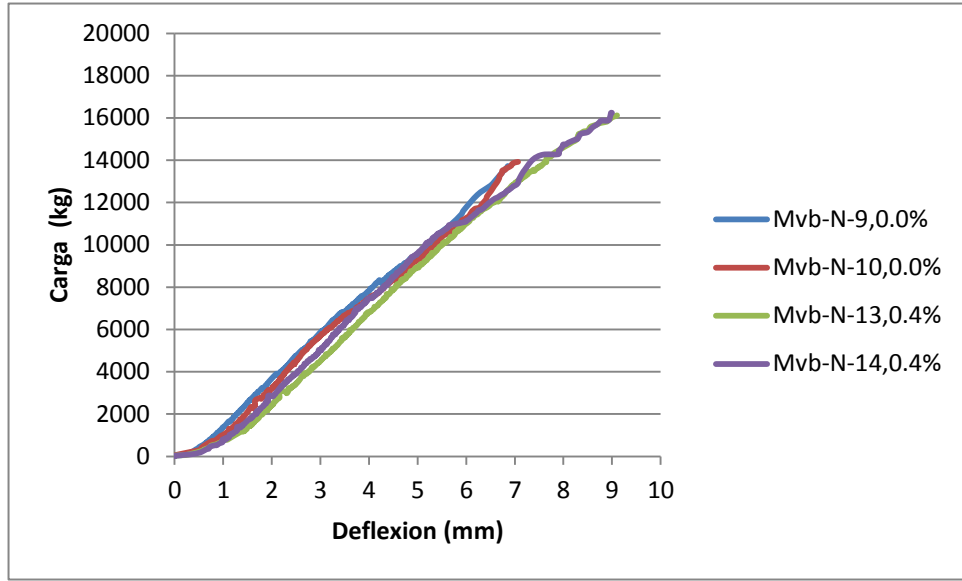


Figura 40. Grafica carga- deflexión de las vigas con una relación $a/c= 0.35$. Elemento de referencia y elementos con porcentaje de fibra de acero de 0.4%.

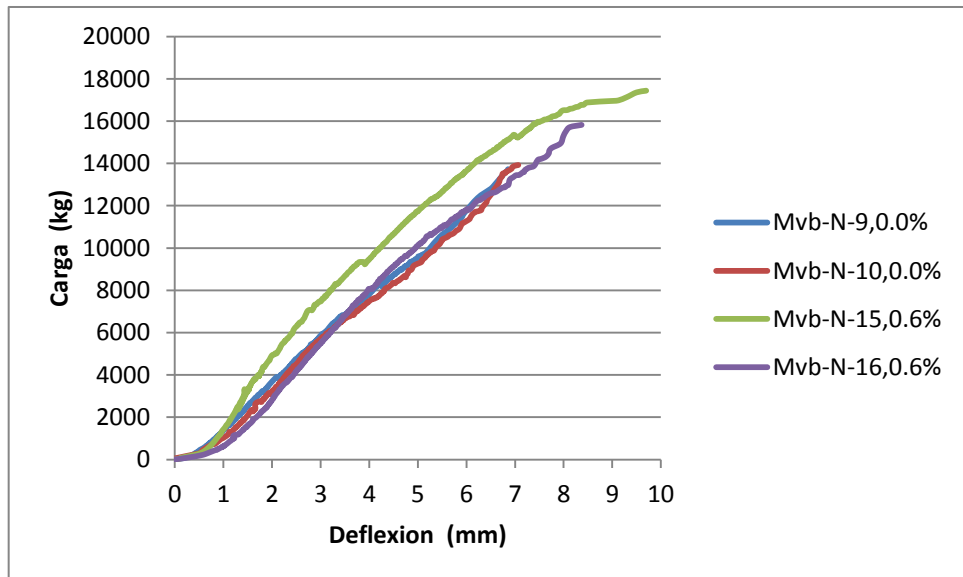


Figura 41. Grafica carga- deflexión de las vigas con una relación $a/c= 0.35$. Elemento de referencia y elementos con porcentaje de fibra de acero de 0.6%.

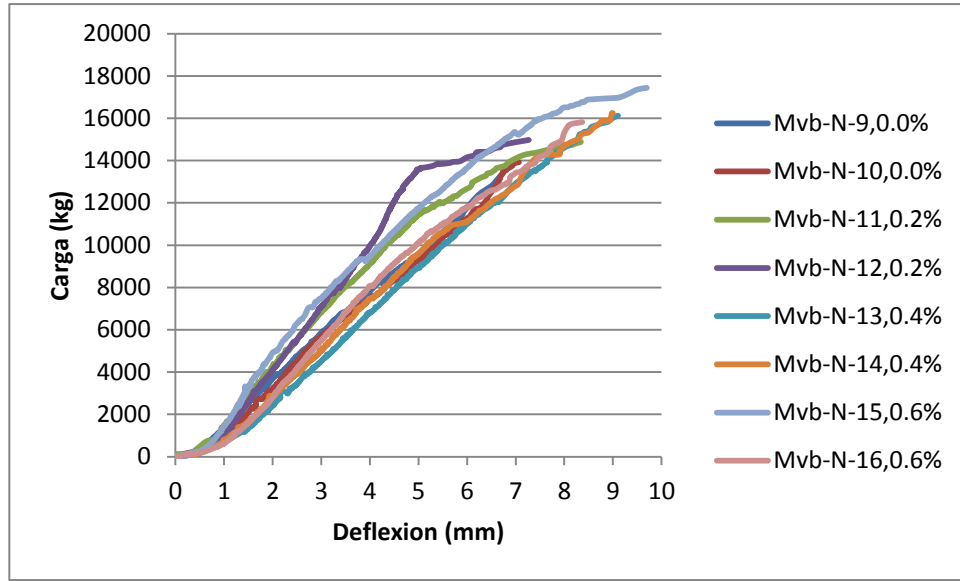


Figura 42. Grafica carga- deflexión de las vigas con una relación a/c= 0.35. Elemento de referencia y elementos con todos los porcentajes de fibra de acero.

3.5.2.2.4. Resistencia a cortante experimental y teórica.

En la tabla 16, se encuentran los promedios de los elementos fabricados con la relación a/c=0.35, correspondiente a los porcentajes de fibras de acero como sustituto parcial o total, donde se muestra un comportamiento similares a los presentados en la tabla 14, encontrando un aumento de la resistencia al cortante por tensión diagonal de hasta un 20% de las vigas con el más alto porcentaje de fibras de acero (0.6%) con relación a las vigas de control, del mismo modo se encontró un aumento de los demás elementos en relación al aumento de fibras de acero.

Tabla 16.
Resistencia a cortante diagonal máxima teórica y experimental, de las vigas con relación $a/c = 0.35$.

Cargas máximas a cortante					
% vf	Separación de estribos cm	Cortante Experimental Kg	Deflexión mm	Resistencia a cortante Swamy Kg	Resistencia a cortante Narayanan Kg
0.0	15	6912.5	6.9	-	-
0.2	25	7467.0	7.8	7501.0	6249.0
0.4	30	8090.2	9.5	7285.5	6025.0
0.6	35	8314.2	9.3	7144.0	5875.0
0.6	0	5146.5	6.9	6039.5	4770.0

En los resultados presentados en las figuras 38 y 43 se analiza un incremento en la resistencia al cortante por tensión diagonal en relación al incremento de las fibras de acero, considerando los resultados en porcentaje es claro que se encontró mayor desempeño en las vigas con una relación $a/c=0.55$ (13%-0.3%Vf, 25%-0.5%Vf, 28%-0.7%Vf), $a/c=0.35$ (8%-0.2%Vf, 17%-0.4%Vf, 20%-0.6%Vf). Estos porcentajes son considerados como un indicativo al modelo analítico utilizado. Sin embargo, es importante mencionar que el comportamiento presentado en las dos relaciones a/c , puede ser debido a las fibras que permitieron reducir el ancho de grieta presentadas por tensión diagonal, propiciando una redistribución de esfuerzos en los estribos haciendo más eficiente.

La efectividad del reforzamiento con fibras combinado con el uso de estribos ya fue reportado encontrando una mejora en la resistencia ultima a cortante y en la ductilidad (Sarhat, 2006).

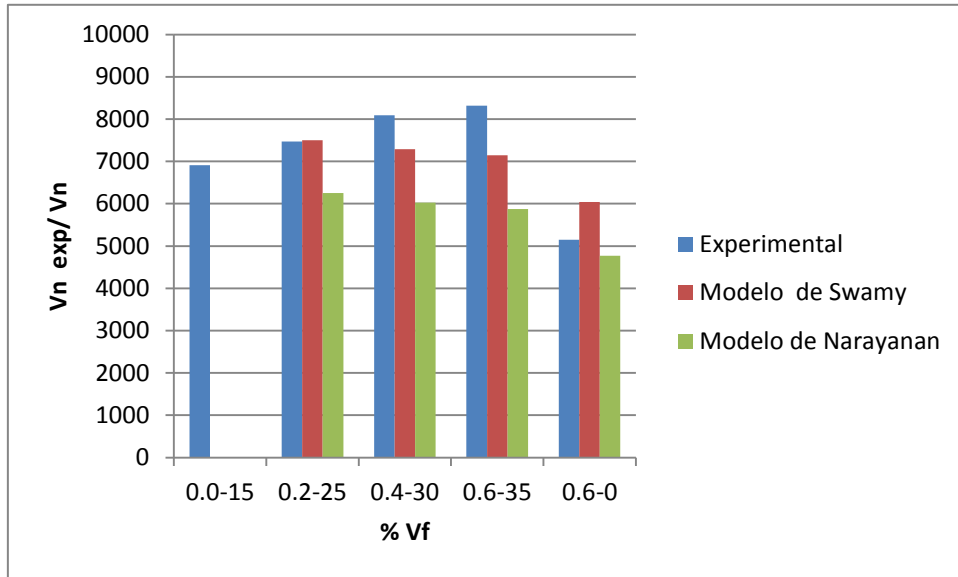


Figura 43. Esfuerzo a cortante diagonal máximo teórico y experimental en vigas fibroreforzadas con una relación $a/c=0.35$. Las barras se identifican con la separación de los estribos así como el porcentaje de fibra de acero.

3.6. Comportamiento carga-deflexión experimental de vigas fibroreforzadas y con refuerzo transversal.

Se presenta la comparativa de los especímenes de referencia diseñados con refuerzo transversal en base al código ACI 318 y elementos diseñados con el más alto porcentaje de fibras de acero, donde se puede observar en las figuras 44 y 45 que no es recomendable sustituir todo el refuerzo transversal, pero si hasta un 75%, comportamiento que se puede observar donde las propiedades mecánicas se incrementan, reduciendo el micro-agrietamiento y el cortante por tensión diagonal.

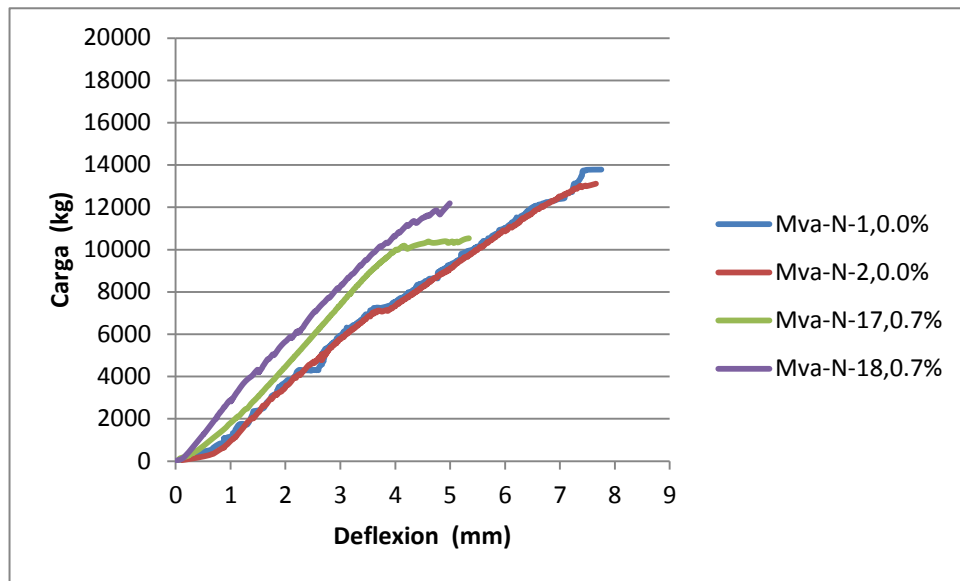


Figura 44. Grafica esfuerzo- deformación de las vigas con una relación $a/c=0.55$. Elemento de referencia (estribos 15 cm y 0% fibra) y elementos sin refuerzo transversal y 0.7% de fibras de acero.

La figura 44 muestra los resultados de los especímenes control con refuerzo transversal en comparación con los especímenes sin refuerzo en el alma para la relación $a/c=0.55$, donde se puede observar como los especímenes con refuerzo transversal logran obtener mayor capacidad al cortante diagonal que los elementos con la mayor cantidad de fibras de acero, pero tales especímenes tienden a presentar una falla por cortante diagonal más rápido que las vigas con refuerzo transversal esto se puede deber a la concentración de esfuerzos en una sola dirección, en cambio, los especímenes con refuerzo transversal logran obtener menor capacidad al esfuerzo cortante, pero después de la falla presentan una mayor capacidad para la absorción de energía, esto a la distribución de esfuerzos de las fibras de acero transmitidos a los estribos, generando una

disminución de agrietamiento y mayor concentración de esfuerzos, lo que nos quiere decir que para mejorar las propiedades físicas del elemento se requiere la combinación de ambos refuerzos, dando con el refuerzo transversal mejor confinamiento al concreto y la fibras de acero una mejor dispersión de energía en todo el elemento, garantizando mayor resistencia al cortante por tensión diagonal y ductilidad en el elemento.

Del mismo modo se hace la comparación de los elementos de control con refuerzo transversal y los elementos con el más alto porcentaje de fibra de acero 0.6% para la relación $a/c=0.35$, los cuales son mostrados en la figura 45, donde los elementos tienden al mismo patrón que los elementos con relación $a/c=0.55$ del desarrollo de esfuerzo- deformación. En donde las fibras de acero tienen menor capacidad de absorción de energía en elementos con concreto de mayor resistencia a la compresión. El comportamiento encontrado puede deberse a la forma geométrica con la que cuenta la fibra de acero y la interacción con la matriz cementante, así como otros factores que se le pueden atribuir; la elaboración de los elementos con diferentes relaciones agua/cemento, el vibrado, acabado, entre otros más que pueden afectar en los resultados obtenidos.

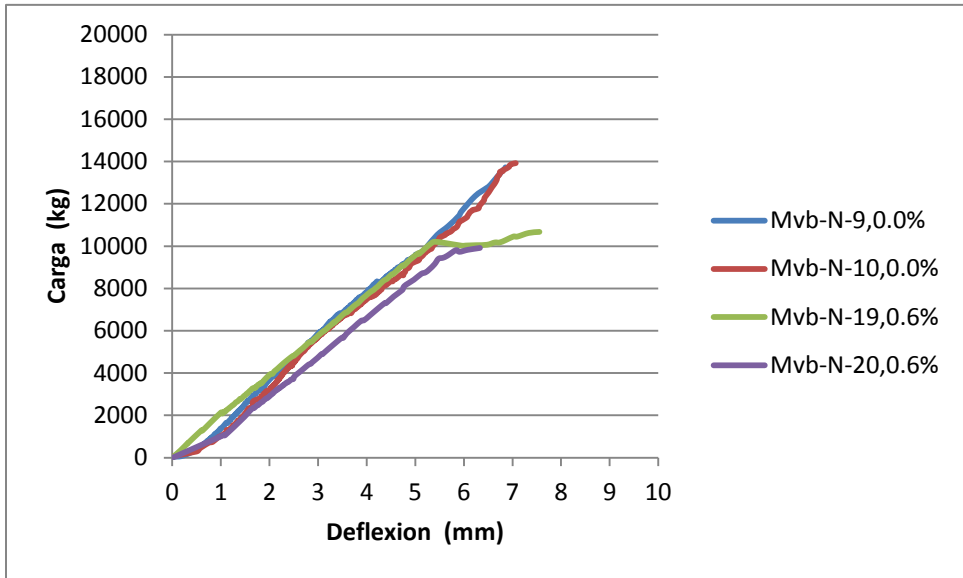


Figura 45. Grafica esfuerzo- deformación de las vigas con una relación $a/c=0.35$. Elementos de referencia (estribos 15 cm y 0% fibra) y elementos sin refuerzo transversal y 0.6% de fibras de acero.

3.7. Relación teórica-experimental de las vigas fibroreforzadas sujetas a cortante.

Los resultados obtenidos desde el punto de vista del comportamiento estructural del concreto reforzado, la presencia de las fibras de acero como refuerzo adicional para las vigas con estribos y sin estribos, permite incrementar de manera significativa la resistencia ultima a cortante, por lo que resulta justificable utilizar modelos matemáticos que permitan predecir con certidumbre una resistencia teórica a cortante apegada a la obtenida de manera experimental, y que sea una ayuda de diseño para este tipo de elementos estructurales.

Existen estudios previos que proponen modelos analíticos basados en resultados experimentales (Dinh, 2010) (Aoude, 2012), y otros que analizan datos experimentales provenientes de varias fuentes y utilizan un número importante de modelos analíticos para hacer comparaciones (Haisam, 2011).

El objetivo del presente trabajo fue hacer una investigación experimental propia que sea corroborada por modelos matemáticos seleccionados, los cuales han sido la base de muchos otros que se encuentren en la literatura y que su mérito radica en una personalización de las variables, sin llegar a ser una modificación sustancial al modelo original.

Las figuras 46 a la 49 muestran la comparación de los resultados experimentales obtenidos de los elementos fabricados con relación $a/c=0.55$,

y los resultados teóricos calculados con los modelos matemáticos de Narayanan y Swamy presentados en el capítulo 2.

Las gráficas muestran como los resultados experimentales son mejores que los teóricos en todas las condiciones para los diferentes porcentajes de fibra. Del mismo modo, es importante ver como los resultados obtenidos con el modelo de Narayanan son menores a lo experimental, esto puede ser porque este modelo contiene factores de seguridad, haciendo este más conservador al momento de aplicarlo al cálculo de elementos estructurales, pero del mismo modo con una mayor confiabilidad para su utilización en los diseños estructurales aplicando fibras de acero.

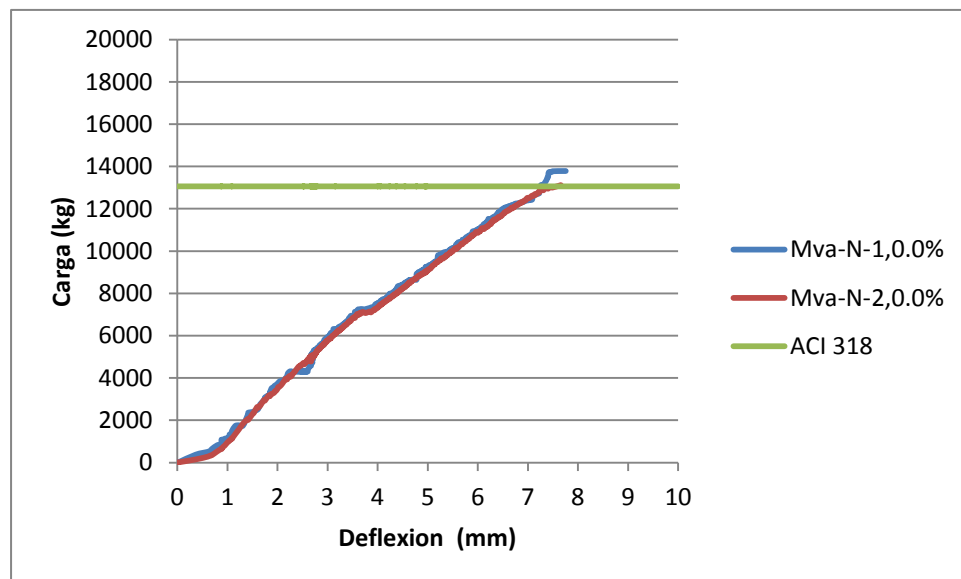


Figura 46. Grafica carga- deformación de las vigas con relación $a/c=0.55$, comparación de los resultados experimentales y teóricos en vigas de 0.0% fibras.

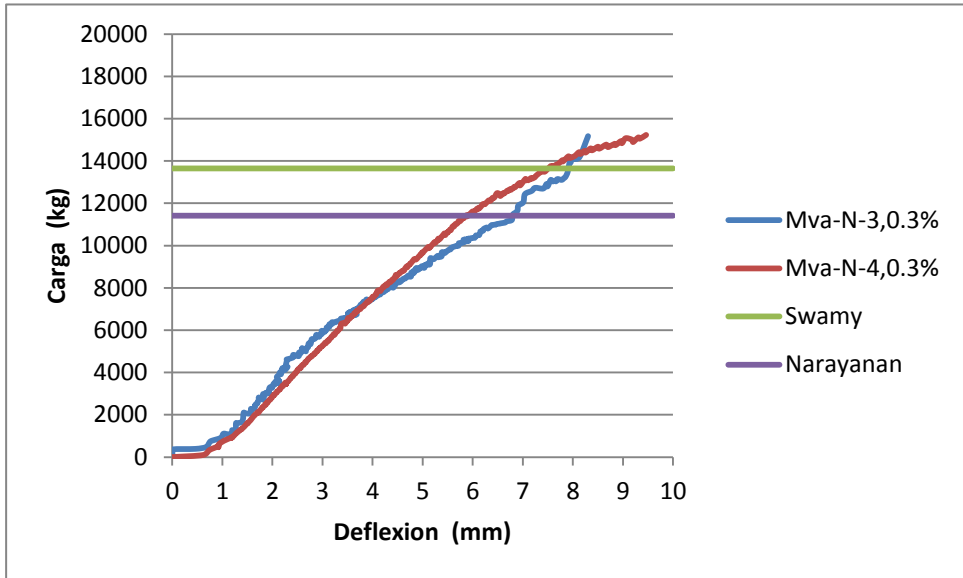


Figura 47. Grafica carga- deformación de las vigas con relación $a/c=0.55$, comparación de los resultados experimentales y teóricos en vigas de 0.3% fibras.

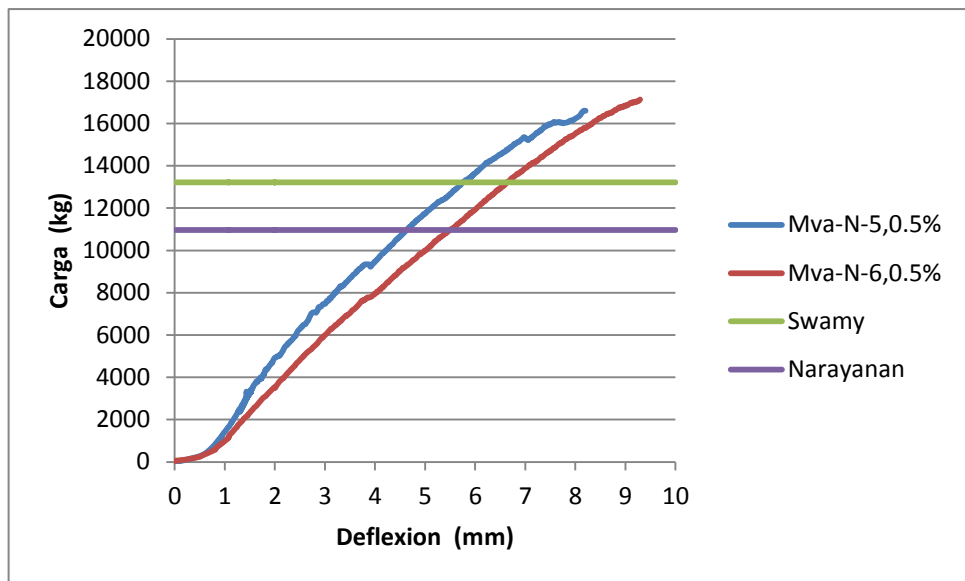


Figura 48. Grafica carga- deformación de las vigas con relación $a/c=0.55$, comparación de los resultados experimentales y teóricos en vigas de 0.5% fibras.

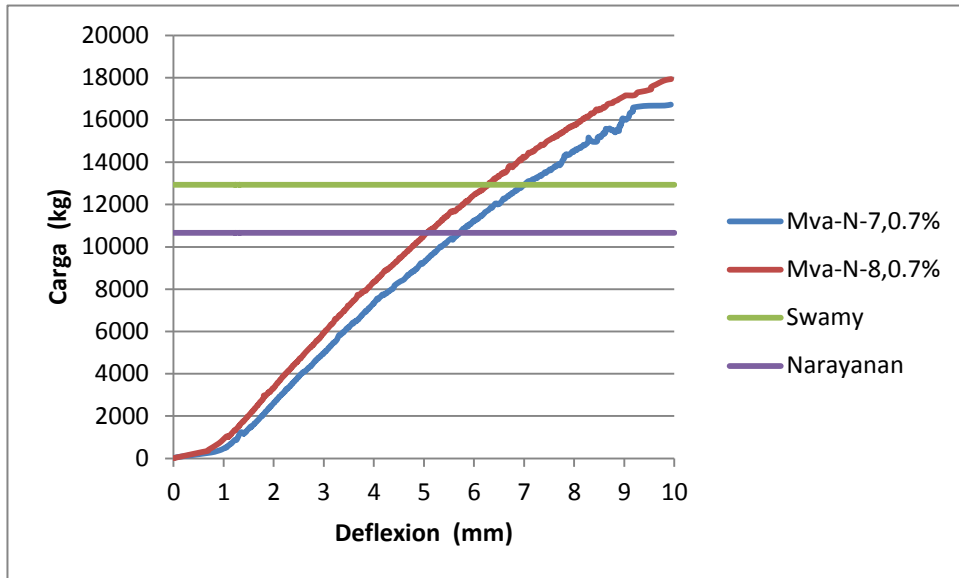


Figura 49. Grafica carga- deformación de las vigas con relación $a/c=0.55$, comparación de los resultados experimentales y teóricos en I vigas de 0.7% fibras.

Los resultados de las vigas para la relación $a/c=0.35$, son mostradas en las figuras de la 50 a la 53, donde muestran de igual manera que las anteriores, la comparación de los resultados experimentales con los resultados teóricos calculados en base a los modelos matemáticos considerados en esta investigación. De igual manera, los resultados experimentales son mayores que los teóricos, en relación a los modelos matemáticos se observa que también para estas relaciones $a/c=0.35$, el modelo de Swamy propone valores menos conservadores que Narayanan, esto se puede deber a los factores y constantes que este modelo considera, donde el modelo de Narayanan tiene mayor cantidad de factores de seguridad así como constantes adimensionales considerando la geometría de las fibras a utilizar, con ello el modelo se considera más

conservador para el cálculo del cortante diagonal en elementos fibroreforzados.

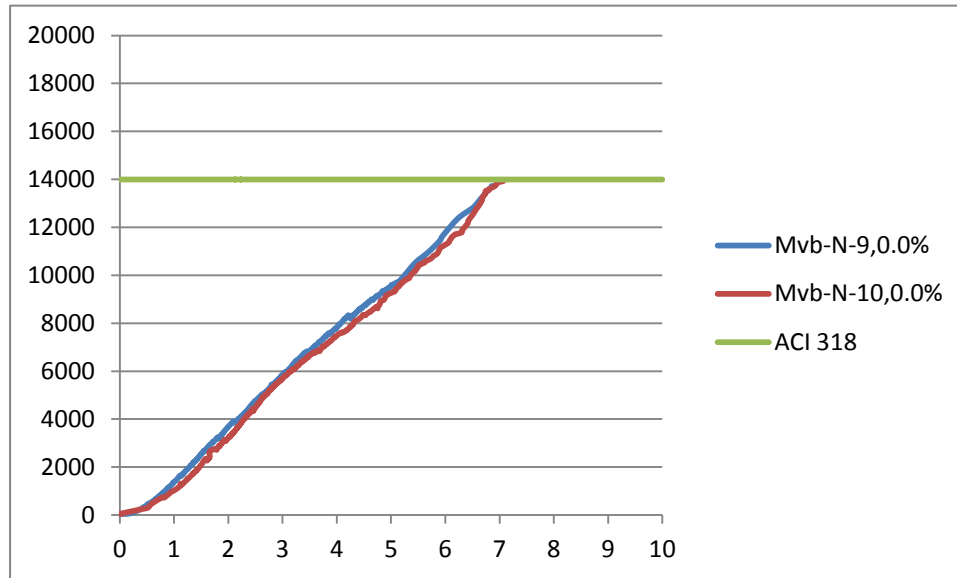


Figura 50. Grafica carga- deformación de las vigas con relación a/c=0.35, comparación de los resultados experimentales y teóricos en vigas de 0.0% fibras.

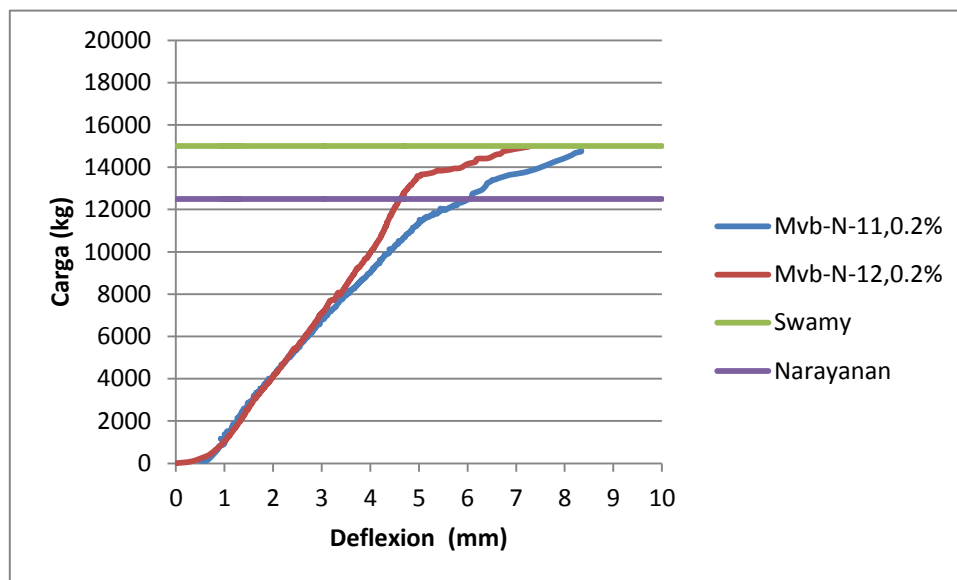


Figura 51. Grafica carga- deformación de las vigas con relación a/c=0.35, comparación de los resultados experimentales y teóricos en vigas de 0.2% fibras.

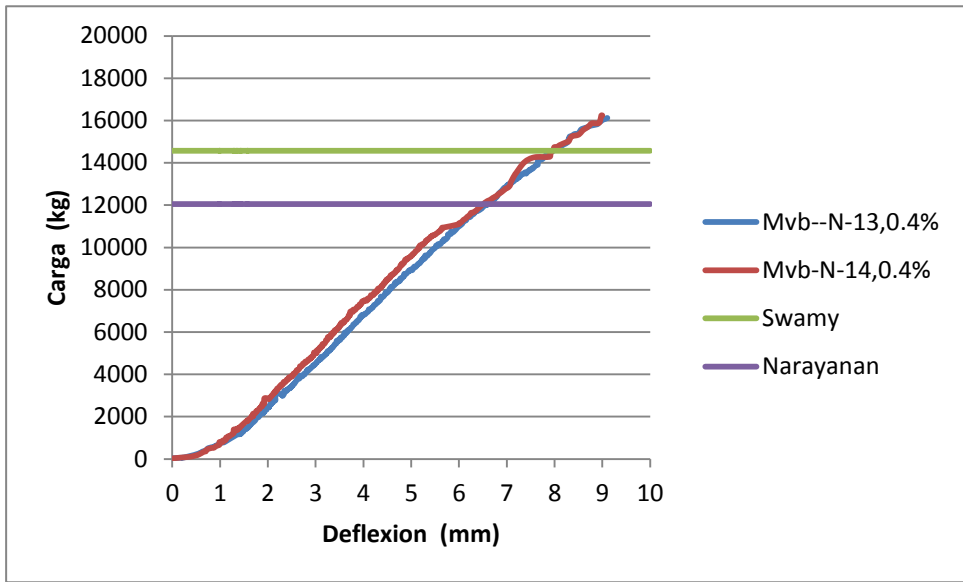


Figura 52. Grafica carga- deformación de las vigas con relación a/c=0.35, comparación de los resultados experimentales y teóricos en vigas de 0.4% fibras.

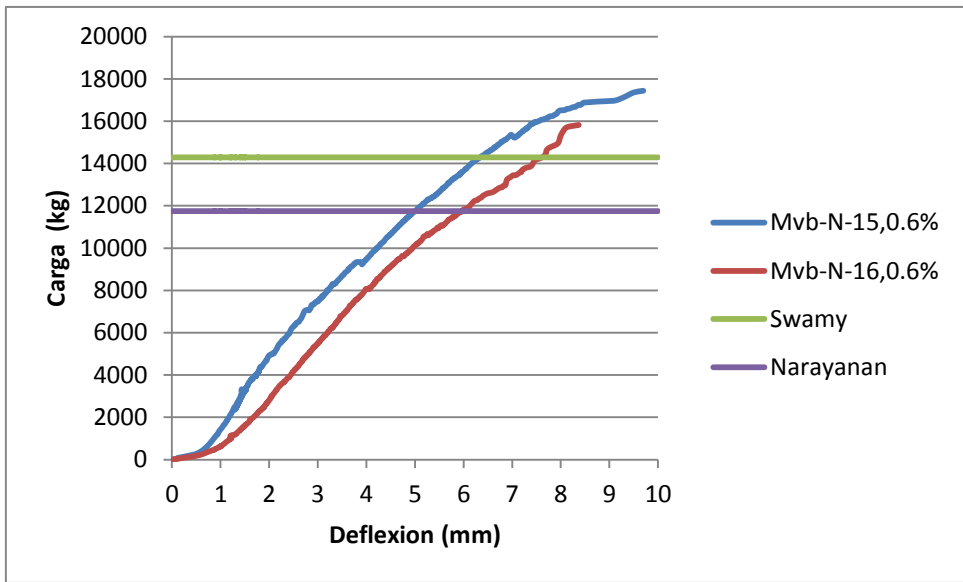


Figura 53. Grafica carga- deformación de las vigas con relación a/c=0.35, comparación de los resultados experimentales y teóricos en vigas de 0.6% fibras.

En la figura 54 se encuentra una relación entre los resultados de la resistencia experimental última a cortante y los resultados de los modelos matemáticos. Se observa que la predicción de los valores obtenidos de los modelos que se aproximan a la diagonal es igual a la experimental, en caso contrario, todos los valores por debajo de esta diagonal son poco conservadores. De esta manera, los modelos de Swamy y Narayanan presentan una similitud en los resultados y se pueden considerar modelos conservadores ya que se encuentran la mayoría de los resultados por encima de la diagonal.

En la presente investigación se pretendió mostrar resultados donde la resistencia a cortante se incrementa sustancialmente cuando se utilizan fibras de acero y que teniendo conocimiento de modelos matemáticos de aplicación simple, puedan convertirse en una herramienta útil para el análisis y diseño de vigas de concreto fibroreforzado con estribos.

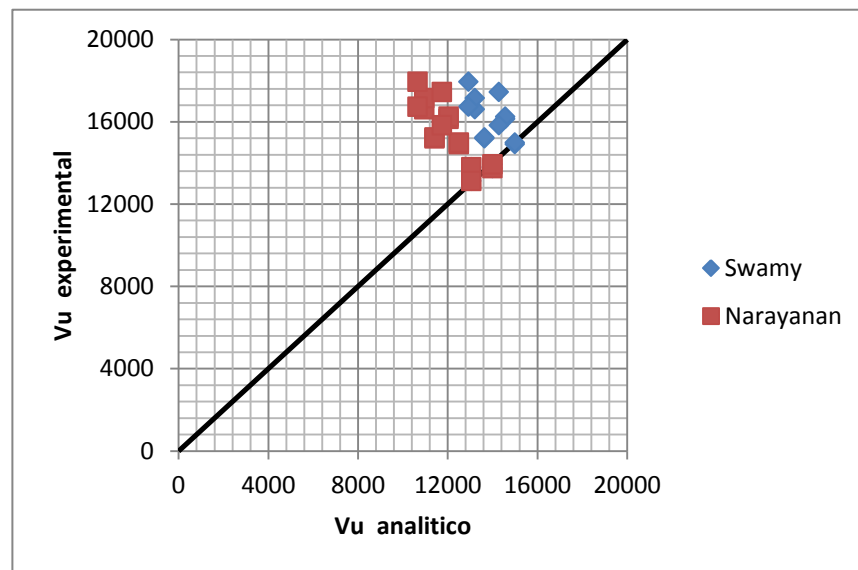


Figura 54. Resistencia experimental a cortante y resistencia teórica a cortante obtenida por los dos modelos analíticos propuestos, para vigas fibroreforzadas con ambas relaciones a/c

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES.

Capítulo 4.

Conclusiones.

1. Las fibras de acero P50-100 de la empresa Deacero, tienen poca influencia en la resistencia a la compresión del concreto fibroreforzado para las dos relaciones a/c.
2. El comportamiento de las fibras de acero en el ensayo a tensión por compresión diametral, demostró como las fibras al puentear la grita incrementa la resistencia a cortante consiguiendo que no se parta el espécimen, con ello muestra el comportamiento positivo para la sustitución parcial de estribos en las vigas sometidas a una falla por cortante diagonal.
3. El refuerzo parcial con fibras de acero incrementa sustancialmente la resistencia experimental ultima a cortante por tensión diagonal, en las vigas de concreto con estribos.
4. Los resultados teóricos de la resistencia a cortante obtenidos por los modelos matemáticos de Swamy y Narayanan, fueron conservadores con respecto a la resistencia experimental ultima a cortante por tensión diagonal para vigas de concreto fibroreforzado.
5. Los modelos matemáticos pueden ser utilizados para el diseño de vigas estructurales fibroreforzadas.
6. El reforzamiento con fibras de acero no pueden sustituir totalmente el acero de refuerzo transversal, debido a que los estribos

proporcionan un comportamiento dúctil en las vigas, tal comportamiento no se presentó de la misma manera, en los elementos reforzados únicamente con fibras.

7. Con una mayor relación a/c , resulta más efectiva la aportación a la resistencia proporcionada por las fibras de acero trabajando en conjunto con el acero transversal.
8. El múltiple agrietamiento presentado en todas las vigas fibroreforzadas es generado por la presencia de las fibras distribuidas en toda la matriz cementante en conjunto con el refuerzo transversal.

CAPÍTULO 5

RECOMENDACIONES.

Capítulo 5.

Recomendaciones.

Con base en los resultados en este proyecto, podemos decir que es necesario desarrollar más investigación sobre el tema de cortante por tensión diagonal del concreto reforzado con fibras de acero, a fin de reunir más elementos que permitan justificar la aplicación práctica de los modelos matemáticos para predecir la resistencia al cortante.

A continuación se presentaran recomendaciones para futuras investigaciones relacionadas al tema de estudio.

1. Es recomendable utilizar resultados experimentales de las resistencias a compresión y tensión diametral obtenidos de especímenes de concreto fibroreforzado, lo que permitirá que los modelos analíticos tengan una adecuada predicción de la resistencia ultima a cortante por tensión diagonal teórica.
2. Investigar el comportamiento de vigas al cortante por tensión diagonal reforzadas con refuerzo transversal y micro fibras poliméricas, así como usar relaciones a/c más bajas.

3. Estudiar el comportamiento del concreto reforzado con fibras de acero, en uniones de elementos estructurales sometidos a cargas dinámicas que provoquen altos esfuerzos a cortante por tensión diagonal.
4. Investigar la durabilidad de los concretos con fibras de acero cuando son expuestos a ambientes agresivos que generen alto grado de corrosión.
5. Desarrollar modelos analíticos que permitan predecir con más eficiencia el alcance de la fibra en la falla a cortante.

REFERENCIAS.

Referencias.

- 1; ACI 318. (2014). *Reglamento para las Construcciones de Concreto Estructural y Comentarios*. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto.
- 2; ACI-211. (1981). Standard practice for selecting proportions for normal . *Heavyweight and Mass Concrete*.
- 3; ACI-318. (1986). Reglamento para las construcciones de concreto estructural y comentarios. *State of the Report on Fiber Reinforced Concrete ACI Committee*, 13-14.
- 4; ACI-318. (2011). Reglamento para las construcciones de concreto estructural y comentarios. *Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto*, 13-14.
- 5; ACI-318. (2014). *Reglamento para las Construcciones de Concreto Estructural y Comentarios*. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto.
- 6; Aoude et al, H. B. (2012). Response of steel fiber-reinforced concrete beams with and without stirrups. *ACI Structural Journal*, 109(3), 359-367.
- 7; ASTM-A615. (2014). Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement.
- 8; ASTM-A7-55. (1955). Steel for bridges and buildings. *American Society for Testing and Materials*, 3.
- 9; ASTM-A820-96. (1996). Standard Specification for Steel Fibers-Reinforced Concrete. *American Society for Testing and Materials*, 1-3.
- 10; ASTM-C-136. (1984). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. *American Society for Testing and Materials*, 1-5.
- 11; ASTM-C-143. (2000). Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete. *American Society for Testing and Materials*, 1-3.
- 12; ASTM-C-149-96. (2000). Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. *American Society for Testing and Materials*.

- 13; ASTM-C-192-98. (1999). Practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. *American Society for Testing and Materials*, 6.
- 14; ASTM-C-33. (2001). Standard specification for concrete aggregates. *American Society for Testing and Materials*, 2-8.
- 15; ASTM-C370-88. (1999). Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. *American Society for Testing and Materials*, 6.
- 16; ASTM-C39. (2014). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- 17; ASTM-C496. (2011). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- 18; Barros, J. V. (2005). Post- Cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*, 47-56.
- 19; Birol et al. (2016). Effect of different steel fiber type and content in flexural behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete. *Department of civil, Engineering Balicer University Turkey*.
- 20; Blanco, A. (2008). *Durabilidad del hormigon con fibras de acero, Tesis de maestria*. Barcelona, España: Universidad Politecnica de Cataluña (UPC).
- 21; C.Gonzalez, R. (1994). *Aspectos fundamentales del concreto reforzado*. Limusa.
- 22; Caggiano et al. (2016). Experimental characterization of the post-cracking response in hybrid steel/polypropylene fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*.
- 23; Carrillo et al. (2014). Evaluacion del desempeño a tension por compresion diametral del concreto reforzado con fibras de acero ZP-306. *Ingenieria y Competividad*, 247-258.
- 24; Carrillo, J. (2010). Diseño sismico de VIS construidas con muros de concreto. *Escuela colombiana de ingenieria*, 80, 7-17.
- 25; Carrillo, J. B. (2014). Evaluacion del desempeño a tension por compresion diametral del concreto con fibras de acero ZP-306. *Ingenieria y Competividad*, 16, 247-258.

- 26; Carrillo, J. G. (2013). Correlaciones entre las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de acero. *Investigación y tecnología*, 14, 435-450.
- 27; Cowan, J. (1989). *Diseño de estructuras de concreto* (Nueva ed.). Continental.
- 28; Cuenca, E. E. (2015). influence of concrete matrix and type of fiber on the shear behavior of Self-Compacting fiber reinforced concrete beams. *Composites Part B*, 135-147.
- 29; Dariel et al. (2015). Evaluación del comportamiento de vigas en voladizo de concreto reforzado con fibras ante la aplicación de cargas cíclicas. *Ingeniería de Construcción RIC*.
- 30; Dinh, H. P.-M. (2010). Shear behavior of steel fiber- reinforced concrete beams without stirrup reinforcement. *ACI Structural Journal*, 107(5), 597-606.
- 31; Dipti et al. (2015). Effect of steel and synthetic fibers on shear strength of RC beams without shear strups. *Construction and Building Materials*.
- 32; EHE. (2008). *Instrucción del Hormigón Estructural, Comisión Permanente del Hormigón*. Ministerio de fomento.
- 33; Emma et al, S. M. (2012). Predicting the shear strength of steel fiber reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*.
- 34; F. Zhang, Y. D. (2016). Shear strength prediction for steel fiber reinforced concrete beams without stirrups. *Engineering Structures*.
- 35; Ferguson, M. (1969). *Fundamentos del concreto reforzado*. Continental.
- 36; Fernández, M. (1981). Hormigones reforzados con fibras de acero. *Consejo de Investigaciones Científicas (CSIC)*, 7-8.
- 37; Gonzales, C. R. (1994). *Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado*. Limusa.
- 38; Haisam, E. (2011). Shear stress prediction: Steel fiber- Reinforced concrete beams without stirrups. *ACI Structural Journal*, 108(3), 304-314.
- 39; Harmsen, T. E. (2005). *Diseño de estructuras de concreto* (4ta ed.). Pontificia Universidad Católica de Perú.

- 40; Harsha et al. (2016). Enhancing flexural capacity of steel fiber reinforced high strength concrete beams. *International Journal of Scientific Research (Engineering Technology)*.
- 41; Izaguirre, M. (2006). *Capacidad a cortante por tension diagonal en vigas de concreto reforzado*. Universidad Autonoma de Nuevo Leon.
- 42; Jimmy et al, S. (2011). Effectiveness of steel fiber as minimum shear reinforcement. *ACI Structural Journal*.
- 43; Juarez, C. (2015). Comportamiento Analitico-Experimental a cortante en vigas de concreto fibroreforzado. *Concreto y Cemento*.
- 44; Julian, C. A.-P. (2014). Evaluacion del desempeño a tension por compresion diametral del concreto reforzado con fibras de acero ZP-306. *Ingenieria y Competividad*, 16(1), 261-272.
- 45; k. kartheek, K. R. (2015). Experimental investigation on hybrid fibre reinforced concrete beams. *International Journal of Scientific*.
- 46; Kosmatka et al. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto PCA* (Primera ed.).
- 47; Metha, K. M. (1998). *Concreto, Estructura, Propiedades y Materiales*. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto, 197-286.
- 48; N. Harsha, K. K. (2016). Enhancing flexural capacity of steel fiber reinforced high strength concrete beams. *International Journal of Scientific Research(Engineering Technology)*.
- 49; Narayanan et al. (1987). Use of steel fibers as shear reinforcement. *ACI Structural Journal*, 216-226.
- 50; Nilson, H. (1999). *Diseño de estructuras de concreto* (Duodécima ed.). Mc Graw Hill.
- 51; Park et al. (1990). *Estructuras de concreto reforzado* (Nueva ed.). Limusa Noriega.
- 52; Ponce, D. (2008). *Hormigones de altas presentaciones, proyecto de grado*. Cartagena, Colombia: Universidad Politecnica de Cartagena.
- 53; R. Dariel, R. C. (2015). Evaluacion del comportamiento de vigas en voladizo de concreto reforzado con fibras ante la aplicacion de cargas ciclicas. *Ingenieria de Construccion RIC*.

- 54; R. Dipti, K. M. (2015). Effect of steel and synthetic fibers on shear strength of RC beams without shear strups. *Construction and Bulding Materials*.
- 55; R. Narayanan, I. D. (May-June de 1987). Use of steel fibers as shear reinforcement. *ACI Structural Jornal*, 216-226.
- 56; R. Swamy, H. B. (March de 1985). The effectiveness of steel fibers as shear reinforcement. *Concrete International, Design and Contruction*, 7(3), 35-40.
- 57; RILEM-TC162. (2003). Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete Sigma-Epsilon-Design Method. *Materials and Structures, RILEM Publications SARL*, 36(262), 560-567.
- 58; S. Emma, M. A. (2012). Predicting the shear strength of steel fiber reinforced concrete beams. *Construction and Bulding Materials*.
- 59; S. Jimmy, G. P. (2011). Effectivehess of steel fiber as minimum shear reinforcement. *ACI Structural Jornal*.
- 60; Sarhat, S. A.-A. (2006). The Combined Use of Steel Fibers and Stirrups as Shear Reinforcement in Reinforced Concrete Beams. *SP, American Concrete Institute*, 235, 269-282.
- 61; Steven H. Kosmatka, B. K. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto(PCA)* (Primera ed.).
- 62; Steven, H. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*.
- 63; Swamy et al. (1985). The effectiveness of steel fibers as shear reinforcement. *Concrete International, Design and Construction* , 35-40.
- 64; T.Birol, U. H. (2016). Effect of different steel fiber type and content in flexural behavior of ultra higt performace fiber reinforced concrete. *Department of civil Engineering Ballicer University Turkey*.
- 65; Tahenni et al. (2016). Effect of steel fibers on the shear behavior of high strength concrete beams . *Construction and Bulling Materials*.
- 66; Zhang et al. (2016). Shear strength prediction for steel fiber reinforced concrete beams without stirrups. *Engineering Structures*.
- 67; Zhang et al. (2016). Shear strength prediction for steel fiber rein forced concrete beams without stirrups. *Engineering Structures*.

68; Zhu et al. (2002). Non-linear finite-element analysis of thin shell SFRC structures. *Magazine of Concrete Research*, 54(4), 291-298.

ANEXO.

Anexo.

Calculo para determinar el valor de la carga a aplicar en las vigas, a 70 cm de los apoyos.

H= Altura de la viga.

bw= Base de la viga.

Rec= Recubrimiento de concreto a las varillas de acero de refuerzo.

d= Distancia del paño del apoyo a cortante máximo ideal.

Para encontrar la carga de aplicación se procede a igualar.

$\phi V_n = V_u$ donde $V_u = P$.

Dónde:

ϕ = Factor de seguridad para cortante igual a 0.75.

ϕV_n = Cortante nominal en kg.

V_u = Cortante último en kg.

Por lo tanto:

$V_n = P / \phi$. entonces $P = (V_s + V_c) \phi$.

Dónde:

V_s = Resistencia al cortante en kg.

V_c = Resistencia al cortante aportada por el concreto en kg.

El cortante critico se encuentra a una distancia d del apoyo, pero al tratarse de cargas puntuales, el cortante critico actúa en todo el claro del elemento porque $V_u = P$.

Distancia desde el apoyo hasta el punto de aplicación de una de las dos cargas (claro de cortante).

La=70 cm.

Lt= Longitud de desarrollo de la carga.

$$\frac{Lt}{d} = \frac{70}{21.57} = 3.25$$

Resistencia al cortante aportada por los estribos separados a una distancia máxima S.

Separación entre estribos(S).

Por facilidad de esparcimientos tenemos:

Área de acero.

$$Av = \left(\frac{dv}{4}\right)^2 \left(\frac{\pi * 2}{4}\right)$$

Dónde:

Av= Área de los estribos (dos ramas) en cm².

dv= Diámetro de la varilla para estribos en cm.

$$Av = \left(\frac{2.54}{4}\right)^2 \left(\frac{\pi * 2}{4}\right) = 0.633 \text{ cm}^2$$

Separación d estribos.

$$S = \left(\frac{d}{2}\right)$$

Dónde:

d= Peralte efectivo en cm

S= Separación entre estribos en cm.

$$s = \left(\frac{21.57}{42} \right) = 10.785 \text{ cm}^2$$

$$S1 = 15 \text{ cm}^2$$

Resistencia al cortante.

$$V_s = \left(\frac{F_y * A_v * d}{S1} \right)$$

Dónde:

Vs= Resistencia al cortante en kg.

Fy= Resistencia a tensión del acero (alambrón) en cm².

Av= Área de acero de estribos en cm².

d= Peralte efectivo en cm.

S1= Separación de estribos.

$$V_s = \left(\frac{2800 * 0.633 * 21.57}{15} \right) = 2550 \text{ kg}$$

Resistencia al cortante aportada por el concreto (Vc).

$$V_c = 2 * \sqrt{F'_c} * b_w * d$$

Dónde:

V_c = Resistencia al cortante aportada por el concreto en kg.

F'_c = Resistencia a la tensión del concreto en $\text{kg/cm}^2 = 250 \text{ kg/cm}^2$.

b_w = Ancho efectivo en cm.

d = Peralte efectivo en cm.

$$V_s = 2 * \sqrt{250} * 15 * 21.57 = 2558 \text{ kg}$$

Reacción en los extremos de la viga (p).

$$P = V_s + V_c$$

Dónde:

P = Reacción en los extremos de la viga en kg.

V_s = Resistencia al cortante de los estribos en kg.

V_c = Resistencia al cortante del concreto en kg.

$$P = 2550 + 2558 = 5108 \text{ kg}$$

Carga ultima aplicada a la viga (P_u).

$$P_u = 2 * P$$

Dónde:

P_u = Carga ultima aplicada en kg.

P = Reacción en los extremos de la viga en kg.

$$P = 2 * 5108 = 10216 \text{ kg}$$

Momento último (M_u).

$$M_u = P * L_a$$

Dónde:

M_u = Momento último en kg-cm.

L_a = Distancia desde el apoyo hasta el punto de aplicación de una de las dos cargas (claro de cortante) en cm.

P = Reacción en los extremos de la viga en kg.

$$M_u = 5108 * 70 = 357,571 \text{ kg} - \text{cm}$$

Calculo de área de acero.

Cálculo de ω

$$\omega a = 0.85 - \sqrt{0.7225 - \frac{1.7 * Mu}{bw * d^2 * F'c}}$$

Dónde:

ω = Índice de refuerzo.

Mu= Momento último en kg – cm.

bw = Ancho efectivo en cm.

d= Peralte efectivo en cm.

F'c Resistencia a la tensión del concreto en kg/ cm².

$$\omega a = 0.85 - \sqrt{0.7225 - \frac{1.7 * 357571}{15 * 21.57^2 * 250}} = 0.238$$

Esfuerzo de fluencia del acero longitudinal.

$$fy = 4294 \text{ kg/cm}^2$$

Calculo de porcentaje de acero.

$$\rho = \omega a \left(\frac{Fy}{F'c} \right)$$

Dónde:

ω_a = Índice de refuerzo.

ρ = Porcentaje de acero %.

F_y = Esfuerzo de fluencia del acero longitudinal kg/cm².

F'_c = Resistencia a tensión del concreto kg/cm².

$$\rho = \frac{4294}{250} = 0.014$$

Área de acero.

$$A_{sa} = \rho * b_w * d$$

Dónde:

A_{sa} = Área de acero en cm²

ρ = Porcentaje de acero %.

b_w = Ancho efectivo en cm.

d = Peralte efectivo en cm.

$$A_{sa} = 0.014 * 15 * 21.57 = 4.49 \text{ cm}^2$$

Como $P_{max} > P$, la falla se supone dúctil.

$$P_{ba} = \left(\frac{6000}{6000 + F_y} \right) (0.871 * 0.85) \left(\frac{F'_c}{F_y} \right) = 0.025$$

Dónde:

P_{ba} = Porcentaje de refuerzo balanceado

F_y = Esfuerzo de fluencia del acero longitudinal kg/cm^2 .

F'_c = Resistencia a tensión del concreto kg/cm^2 .

$$P_{ba} = \left(\frac{6000}{6000 + 4294} \right) (0.871 * 0.85) \left(\frac{250}{4294} \right) = 0.025$$

$$P_{max} = 0.75 * P_{ba}$$

$$P_{max} = 0.75 * 0.025 = 0.019$$

$$P_{max} > P$$

Para asegurar una falla tipo cortante y no por flexión se proponen 3 varillas del número 5, se revisa el momento nominal en el cual debe ser mayor que el momento último.

$$A_{spa} = 3 * \left(\frac{5}{8} * 2.54 \right)^2 \left(\frac{\pi}{4} \right) = 5.94 \text{ cm}^2$$

Calculo de Momento nominal

$$a = \frac{a_{spa} * F_y}{F'_c * d}$$

Dónde:

a = Brazo de palanca en cm.

A_{spa} = Área de acero en cm^2 .

F_y = Esfuerzo de fluencia del acero longitudinal kg/cm^2 .

F'_c = Resistencia a tensión del concreto kg/cm^2 .

d = Peralte efectivo en cm.

$$a = \frac{5.94 * 4294}{250 * 21.57} = 4.73 \text{ cm}$$

Momento nominal

$$M_n = A_s f_y * \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

Dónde:

M_n = Momento nominal en kg-cm .

A_s = Área de acero cm^2 .

F_y = Esfuerzo de fluencia del acero longitudinal kg/cm^2 .

D = Peralte efectivo en cm.

a = Brazo de palanca en cm.

$$M_n = 5.94 * 4294 * \left(21.57 - \frac{4.73}{2} \right) = 489,850 \text{ kg} - \text{cm}$$

Como $M_n > M_u$ se asegura que la falla será por cortante y no por flexión.

$$Mn = 489,850 \text{ kg} - \text{cm}$$

$$Mu = 357571 \text{ kg} - \text{cm}$$

$$Mn > Mu$$

Cortante nominal

$$Vu = p$$

$$Vc = 0.5 * \sqrt{F'c} + 176 * \rho * \frac{P * d}{Mu * a} * bw * d$$

Dónde:

Vc= Cortante en kg.

F'c= Resistencia a tensión del concreto kg/cm^2 .

ρ = Porcentaje de acero.

P= Reacción en los extremos de la viga en kg.

d= Peralte efectivo en cm.

Mu= Momento último en kg-cm.

a= Brazo de palanca en cm.

bw= Ancho efectivo.

$$V'c = 0.5 * \sqrt{250} + 176 * 0.014 * \frac{5108 * 21.57}{357571 * 4.73} * 15 * 21.57 = 2801 \text{ kg}$$

$$\frac{v'c}{vc} = \frac{2801}{2558} = 1.10$$

$$\frac{Vu}{Mu} * d = \frac{5108}{357571} * 21.57 = 0.31$$

$$Vn = Vs + V'c$$

Dónde:

Vn= Cortante nominal en kg.

Vs= Resistencia al cortante de los estribos en kg.

V'c= Resistencia al cortante en el concreto en kg.

$$Vn = 2550 + 2801 = 5351.67 \text{ kg}$$

$$P * Mn = 10216 * 489850 = 5004456909$$

$$1.5PVn = 1.5 * 10,216 * 5351.67$$

Ficha técnica de la fibra de acero.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Fibras **Deacero**

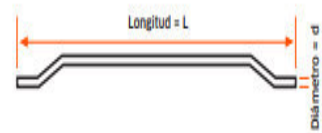
DEACERO

Diseño	Longitud (L)	Diámetro (d)	Relación de aspecto	Rendimiento	Resistencia a la tensión
	mm	mm	L/d	fibras/kg	kg/cm ²
P50-100	50	1.00	50	3,200	11,523
P50-75	50	0.75	67	5,700	12,542
L33-75	33	0.75	44	8,600	12,542

Las Fibras Deacero cumplen con las normas de calidad **ASTM A 820-11, UNE-EN-14889-1:2006**

Ejemplos para lectura de nomenclaturas

P50-100	L33-75
P = Piso	L = Lanzado
50 = Longitud	33 = Longitud
100 = Diámetro en centésimas de mm	75 = Diámetro en centésimas de mm



PLASTOL PRECAST LV

ADITIVO REDUCTOR DE AGUA DE ALTO RANGO PARA MEZCLAS DE BAJA VISCOSIDAD

DESCRIPCION

PLASTOL PRECAST LV es un aditivo reductor de agua de alto rango hiperfluidificante base policarboxilato diseñado especialmente para dar alta fluidez y alta reducción de agua. Está diseñado principalmente para concretos con baja relación agua/cemento (menor a 0.35), confiriéndole a la mezcla una baja viscosidad, facilitando el manejo y colocación de las mezclas de concreto.

Cumple con la norma ASTM-494 tipo A y F como reductor de agua de alto rango. **PLASTOL PRECAST LV** no contiene iones cloruros adicionados que puedan promover la corrosión en el concreto.

APLICACIONES PRINCIPALES

PLASTOL PRECAST LV está especialmente recomendado cuando se requiere:

- Concreto para elaboración de elementos prefabricados.
- Concretos auto-consolidables.
- Concretos fluidos.
- Concretos de alto desempeño.
- Concretos de resistencia rápidas en sinergia con otros aditivos.
- Concretos bombeados.

BENEFICIOS

- Reducción de la viscosidad de las mezclas de concreto con bajas relaciones agua/cemento (menores a 0.35).
- Menores relaciones agua / cemento en la matriz de concreto.
- Mejora la apariencia de la mezclas de concreto auto-consolidable.
- Reduce los tiempos de descarga en las cimbras.
- Disminuye el rechazo en piezas coladas y en general eficiencia en mano de obra, materiales y equipo.
- Proporciona alta fluidez en mezclas secas.
- Altas resistencias a todas las edades.

INFORMACIÓN TÉCNICA

Resultados típicos de ingeniera

Apariencia: Líquido color ámbar.

Densidad: 1.09 +/- 0.002 g / cc

Está formulado para cumplir con las especificaciones para aditivos ASTM C-494 Tipo A y F.

INSTRUCCIONES DE USO

PLASTOL PRECAST LV es dosificado en un rango de 4 a 15 cc / kg de cemento.

- Adicione a su diseño de mezcla toda el agua y homogenice materiales.
- Posteriormente adicione directamente el aditivo en las dosis establecida (4 a 7 cc / kg de cemento dependiendo del diseño y aplicación) y proceda a mezclar durante 5 a 10 minutos.
- Para aplicaciones de este aditivo se recomienda contactar a nuestros Asesores Técnico Comerciales con el objetivo de establecer claramente las condiciones del diseño y aplicación.

Nota: Para mayor información sobre este producto dirjase al Departamento de Atención a Clientes The Euclid Chemical Company México o a su Asesor Técnico - Comercial en la Región. Los resultados que se obtengan con nuestros productos pueden variar a causa de las diferencias en la composición de los sustratos sobre los que se aplica o por efectos de la variación de la temperatura y otros factores. Por ello recomendamos hacer pruebas representativas previas a su empleo en gran escala. The Euclid Chemical Company se esfuerza por mantener la alta calidad de sus productos, pero no asume responsabilidad alguna por los resultados que se obtengan como consecuencia de su empleo incorrecto o en condiciones que no estén bajo su control directo. La única garantía sobre los productos Euclid, fabricados o comercializados por The Euclid Chemical Company, se describe en la página 1 de este catálogo.

- **PLASTOL PRECAST LV** puede ser adicionado a pie de obra.
- Como fluidificante adiciona el aditivo a una mezcla de consistencia normal para obtener unas características de concreto bombeable.
- Como reductor de agua dosificar en última parte del agua de mezcla.
- El desarrollo rápido de resistencias está en función del tipo de cemento, los mejores resultados para la aplicación de prefabricados donde no es una limitante las resistencias a sulfatos, pueden ser obtenidos con el uso de **PLASTOL PRECAST LV** y cemento CPC 40 R.
- Si por el contrario se requiere mejorar el tiempo de retención de la consistencia del aditivo se sugiere el uso en sinergia con el Eucon MR Precast, Eucon Retarder M o Eucon WO.

ENVASE

PLASTOL PRECAST LV se ofrece en las siguientes presentaciones:

- A Granel
- Cubeta 19 L
- Tambor de 200 L

Se recomienda mantener el aditivo siempre tapado en envase original.

PRECAUCIONES/RESTRICCIONES

- Es muy sensible cuando se combina con inclusores de aire ya que puede incrementarse significativamente cuando aumenta el tiempo de mezclado.
- Se recomienda aplicarlo a pie de obra para dar la fluidez requerida.
- Se recomienda realizar las mezclas de prueba para determinar la compatibilidad del aditivo con el cemento a emplear, al igual que para determinar las dosis apropiadas.
- En concretos fluidos se debe ajustar el diseño para mantener la homogeneidad de la mezcla y evitar segregación.
- No usar aire comprimido para su agitación.
- No mezclar con aditivos base Naftaleno.

Vida útil: 12 meses en el envase original cerrado.



EUCLID CHEMICAL

The Euclid Chemical Company
 01 800 8 EUCLID, Centro (55) 5864 9970
 Norte (81) 8048 0810, Occidente (33) 3633 6031
www.eucomex.com.mx



The Euclid Chemical Company México
 ISO 9001-2008
 Certificado No. 20003232 QM36