



# **ESPE**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

## **DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD A FLEXIÓN DE UNA  
VIGA DE SECCIÓN COMPUESTA CON REFUERZO  
LONGITUDINAL PET RECICLADO**

**AUTORES: HONG HONG, ADÁN DAMIÁN**

**RUBIO PROAÑO, JOSÉ MIGUEL**

**DIRECTOR: ING. PEREZ, JOSÉ MSC.**

**SANGOLQUÍ**

**2016**

## CERTIFICADO

Certifico que el presente trabajo de titulación “**ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD A FLEXIÓN DE UNA VIGA DE SECCIÓN COMPUESTA CON REFUERZO LONGITUDINAL PET RECICLADO**”, fue desarrollado en su totalidad por los estudiantes **ADÁN DAMIÁN HONG HONG** y **JOSÉ MIGUEL RUBIO PROAÑO**, bajo mi dirección.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and horizontal strokes, is written over a solid horizontal line. The signature is somewhat stylized and difficult to read.

Ing. José Pérez MSc.

**DIRECTOR**

## AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

El presente trabajo de titulación “**ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD A FLEXIÓN DE UNA VIGA DE SECCIÓN COMPUESTA CON REFUERZO LONGITUDINAL PET RECICLADO**”, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado el derecho intelectual de terceros considerándolos en citas a pie de página y como fuentes en el registro bibliográfico.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance del proyecto en mención.



Adán Damián Hong Hong



José Miguel Rubio Proaño

## AUTORIZACIÓN

Nosotros, **ADÁN DAMIÁN HONG HONG** y **JOSÉ MIGUEL RUBIO PROAÑO**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” a publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD A FLEXIÓN DE UNA VIGA DE SECCIÓN COMPUESTA CON REFUERZO LONGITUDINAL PET RECICLADO**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, octubre del 2016



Adán Damián Hong Hong



José Miguel Rubio Proaño

## DEDICATORIA

Dedicamos este proyecto de titulación primeramente a Dios. a nuestros padres y hermanos. A Dios porque ha estado con nosotros en cada paso que hemos dado y dándonos fortaleza para continuar, a nuestros padres y hermanos, quienes a lo largo de nuestra vida han velado por nuestro bienestar y educación siendo nuestro apoyo incondicional en todo momento y la primera piedra en la construcción de nuestro camino profesional. Depositando su entera confianza en cada reto que se nos ha presentado sin dudar ni un solo momento de nuestras capacidades. Es por ellos que somos lo que somos ahora.

## **AGRADECIMIENTO**

Este proyecto es el resultado del esfuerzo conjunto de todos los que formamos el grupo de trabajo. Por esto agradecemos a nuestro director de titulación, Msc José Pérez, nuestros compañeros más cercanos, quienes a lo largo de la carrera han estado en las buenas y malas. A nuestros padres y hermanos quienes a lo largo de toda nuestra vida nos han apoyado y motivado nuestra formación académica. A nuestros profesores a quienes les debemos gran parte de nuestros conocimientos, gracias por su paciencia y enseñanza y finalmente un gran agradecimiento a la prestigiosa Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE la cual abrió sus puertas a jóvenes como nosotros, preparándonos para un futuro competitivo y formándonos como personas de bien.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO .....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
KEYWORDS: .....	xvi
CAPÍTULO I.....	1
1.    INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Objetivos .....	1
1.1.1.  Objetivo General .....	1
1.1.2.  Objetivos Específicos .....	1
1.2. Generalidades.....	1
1.3. Alcance del proyecto .....	3
1.4. Justificación del proyecto .....	3
CAPÍTULO II.....	6
2.    MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Tipos de vigas .....	6
2.2. Diseño de vigas en acero .....	6
2.2.1.  Varilla de acero corrugado ASTM A706 .....	7
2.3. Tipos de fallas en vigas .....	8
2.3.1.  Falla por flexión.....	8
2.3.2.  Falla por corte .....	9
2.4. Reforzamiento de vigas.....	9
2.4.1.  Refuerzo de vigas mediante el uso de fibras .....	10
2.4.2.  Adherencia de fibras al hormigón .....	12
2.5. Fibra de carbono en la construcción.....	13
2.6. Caracterización de las propiedades del PET .....	15
2.7. Diseño de vigas compuestas.....	17
2.7.1.  Hormigón Armado .....	17
2.7.2.  Esfuerzo en vigas de dos materiales .....	18
CAPÍTULO III.....	20
3.    DISEÑO Y SIMULACIÓN .....	20

3.1	Uso y manejos de norma para diseño de vigas compuestas .....	20
3.2	Diseño de la viga tipo sección compuesta .....	23
3.3	Diseño de la soldadura .....	27
3.4	Diseño y análisis del reforzamiento con fibras PET .....	31
3.5	Diseño y análisis del reforzamiento con fibras de carbono .....	33
3.6	Reforzamiento con fibras PET .....	35
3.7	Comprobación de diseño con software CAD, CAE .....	37
3.8	Generación de planos .....	40
CAPÍTULO IV .....		41
4.	CONSTRUCCIÓN .....	41
4.1	Construcción de vigas de acero con atiesadores .....	41
4.2	Construcción de vigas de acero sin atiesadores .....	43
4.3	Colocación de galgas extensiométricas .....	44
4.4	Fundición de hormigón en las vigas .....	45
4.4.1.	Dosificación de hormigón .....	45
4.4.2.	Encofrado .....	46
4.4.3.	Fundición de vigas .....	47
4.5	Proceso de curado del hormigón .....	48
4.6	Proceso de verificación de geometría .....	49
4.7	Colocación de fibras de refuerzo PET .....	50
4.8	Colocación de fibras de carbono .....	52
CAPÍTULO V .....		55
5.	ENSAYOS MECÁNICOS .....	55
5.1	Preparación para el ensayo a flexión hasta la plastificación, condiciones de apoyo y carga. ....	55
5.2	Ensayo a flexión de vigas sin reforzamiento PET .....	57
5.2.1.	Ensayo de adherencia PET – GRIFFON WDF-05 .....	58
5.2.2.	Ensayo de adherencia PET – SIKADUR 301 .....	59
5.2.3.	Ensayo de adherencia Fibra de Carbono – SIKADUR 301 .....	61
5.2.4.	Resistencia soportada por fibras por unidad de ancho .....	62
5.3	Ensayo a flexión en vigas sin reforzamiento de fibra de carbono .....	62
5.3.1.	Viga #1 .....	62
5.3.2.	Viga #2 .....	64
5.3.3.	Viga #3 .....	67

5.4	Ensayo a flexión de vigas con reforzamiento PET .....	69
5.4.1.	Viga #1 .....	69
5.4.2.	Viga #2 .....	73
5.4.3.	Viga #3 .....	76
5.5	Ensayo a flexión de vigas con reforzamiento de fibra de carbono .....	79
5.5.1.	Viga #1 .....	79
5.5.2.	Viga #2 .....	83
5.5.3.	Viga #3 .....	86
5.6	Medición de deflexión en vigas .....	90
5.7	Medición de grietas por flexión .....	91
CAPÍTULO VI .....		92
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	92
6.1	Análisis y calibración del modelo computacional con los resultados obtenidos en la parte experimental .....	92
6.2	Comparación de carga vs capacidad entre los diferentes tipos de vigas ensayadas .....	95
6.3	Comparación porcentual del aumento de capacidad de las vigas con y sin refuerzo .....	98
6.3.1.	Vigas con refuerzo de fibra de carbono vs vigas sin refuerzo ...	98
6.3.2.	Vigas con refuerzo de fibra PET vs vigas sin refuerzo .....	98
6.3.3.	Vigas con refuerzo de fibra de carbono vs vigas con refuerzo PET .....	98
6.4	Comparación de la generación y propagación de grietas en los dientes tipos de vigas .....	99
6.4.1.	Vigas sin revestimiento .....	100
6.4.2.	Vigas con refuerzo PET .....	100
6.4.3.	Vigas con refuerzo de fibra de carbono .....	101
CAPÍTULO VII .....		103
7.	EVALUACIÓN ECONOMICA Y FINANCIERA .....	103
7.1	Análisis económico .....	103
7.2	Costos directos e indirectos de fabricación .....	103
7.2.1.	Costos directos .....	103
7.2.2.	Costos indirectos .....	105
7.2.3.	Costo total .....	105

7.3 Comparación de costos entre el reforzamiento con fibras de carbono y PET .....	105
CAPÍTULO VIII .....	107
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	107
8.1 Conclusiones de diseño .....	107
8.2 Conclusiones de la construcción .....	107
8.3 Conclusiones de los ensayos .....	107
8.4 Conclusiones del análisis de resultados .....	108
8.5 Recomendaciones.....	109
BIBLIOGRAFÍA.....	110

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Viga compuesta (sección encerrada) .....	2
Figura 2. Viga con refuerzo PET .....	4
Figura 3. Tipos de vigas de acuerdo a su posición. ....	6
Figura 4. Áreas y peso de varillas de proveedores ecuatorianos. ....	7
Figura 5. Propiedades de varillas de acero ASTM A706. ....	8
Figura 6. Refuerzo de perfiles I con platinas soldadas en patines y alma. ...	10
Figura 7. Ejemplo de viga compuesta (Viga de hormigón armado). ....	10
Figura 8. Refuerzo de viga de hormigón a cortante .....	11
Figura 9. Refuerzo a cortante y a flexión en una viga. ....	11
Figura 10. Aplicación de resina sobre viga de hormigón preparada .....	12
Figura 11. Aplicación de tejido sobre resina (Ejemplo: Refuerzo a cortante)	13
Figura 12. Método para fabricación fibras de carbono. ....	14
Figura 13. Reforzamiento de columnas con fibra de carbono. ....	14
Figura 14. Fabricación de platinas preformadas. ....	14
Figura 15. Clasificación de los polímeros por su comportamiento mecánico/térmico. ....	15
Figura 16. Dosificación de hormigón. ....	18
Figura 17. Esquema sección transversal viga de dos materiales (concreto/acero). ....	19
Figura 18. Esquema viga equivalente transformada a un solo material (concreto). ....	19
Figura 19. Distribución de esfuerzos en viga reforzada con varillas. ....	21
Figura 20. Expresiones de la viga compuesta. ....	21
Figura 21. Esquema de ensayo de flexión pura sobre vigas. ....	23
Figura 22. Sección transversal viga compuesta .....	26
Figura 23. Zonas de compresión y tracción en la viga .....	27
Figura 24. Sección transversal viga transformada. ....	28
Figura 25. Diagrama de cuerpo libre del ensayo a flexión en vigas. ....	29
Figura 26. Valor del cortante máximo en ensayo a flexión sobre vigas. ....	29
Figura 27. Tramo de 10 m de SikaWrap 300C. ....	34
Figura 28. Hilo PET base. ....	36
Figura 29. Elaboración de tejido de prueba, para aprobación. ....	36
Figura 30. Tejido en proceso. ....	36
Figura 31. Tejido de fibra PET. ....	37
Figura 32. Tramo de tejido PET extendido. ....	37
Figura 33. Esquemmatización 3D de viga de hormigón armado. ....	38
Figura 34. Esquema de ensayo de flexión sobre viga con carga de 2910,5305 kgf. ....	39
Figura 35. Deformación obtenida de simulación con carga de 2910,5305 sobre viga. ....	39
Figura 36. Esquemmatización 3D de viga con reforzamiento lateral de atiesadores. ....	42

Figura 37. Esquema de ensayo a flexión sobre viga con atiesadores, con carga 2910,5305 kgf. ....	42
Figura 38. Deformación obtenida de simulación con carga 2910,5305 kgf sobre viga. ....	43
Figura 39. Comparador de reloj utilizado en ensayos. ....	44
Figura 40. Ensamble de encofrados. ....	46
Figura 41. Colocación de armaduras en el interior de los cajones. ....	47
Figura 42. Fundición de vigas. ....	47
Figura 43. Fundición de vigas (2).....	48
Figura 44. Fundición de vigas (3).....	48
Figura 45. Desencofrado de vigas. ....	49
Figura 46. Corte de fibra PET en medidas establecidas. ....	51
Figura 47. Colocación de vigas en posición para el reforzamiento.....	51
Figura 48. Impregnación de adhesivo epóxico sobre superficies de vigas. ...	52
Figura 49. Colocación de refuerzos sobre vigas. ....	52
Figura 50. Vigas reforzadas. ....	52
Figura 51. Corte de fibra de carbono en medidas establecidas. ....	53
Figura 52. Colocación de vigas en posición para reforzamiento. ....	53
Figura 53. Impregnación de pegamento Sikadur 301 sobre fibras. ....	53
Figura 54. Impregnación de pegamento Sikadur 301 sobre vigas.....	54
Figura 55. Colocación de refuerzos de fibras sobre vigas.....	54
Figura 56. Vigas reforzadas. ....	54
Figura 57. Vigas marcadas. ....	55
Figura 58. Viga colocada sobre rodillos de apoyo.....	56
Figura 59. Pesaje de viga de acero (precarga) por medio de celda de carga.....	56
Figura 60. Viga de hormigón con precarga (viga de acero).....	56
Figura 61. Comparador de reloj ubicado sobre viga de hormigón.....	57
Figura 62. Fibras PET empleando Griffon (PVC) para el pegado.....	59
Figura 63. Ensayo de tensión Fibra PET – Griffon – Hormigón.....	59
Figura 64. Fibras PET empleando Sikadur 301 para el pegado. ....	60
Figura 65. Ensayo de tensión Fibra PET – Sikadur 301 - Hormigón .....	60
Figura 66. Fibras de carbono adherido a hormigón por medio de Sikadur 301.....	61
Figura 67. Ensayo de tensión Fibra de carbono – Sikadur 301 – Hormigón.....	61
Figura 68. Gráfico fuerza - deformación – viga #1 sin refuerzo.....	64
Figura 69. Gráfico fuerza - deformación – viga #2 sin refuerzo.....	66
Figura 70. Gráfico fuerza - deformación – viga #3 sin refuerzo.....	69
Figura 71. Gráfico fuerza - deformación – viga #1 refuerzo PET.....	72
Figura 72. Gráfico fuerza - deformación – viga #2 refuerzo PET.....	75
Figura 73. Gráfico fuerza - deformación – viga #3 refuerzo PET.....	79
Figura 74. Gráfico fuerza - deformación – viga #1 refuerzo fibra de carbono.....	83
Figura 75. Gráfico fuerza - deformación – viga #2 refuerzo fibra de carbono.....	86

Figura 76. Gráfico fuerza - deformación – viga #3 refuerzo fibra de carbono.....	90
Figura 77. Esquematzación 3D de viga compuesta con refuerzo a tensión de fibra. ....	93
Figura 78. Esquema de ensayo con carga de 4520,4153 kgf sobre viga con reforzamiento PET. ....	93
Figura 79. Deformación obtenida de simulación con carga 4520,4153 kgf sobre viga con reforzamiento PET. ....	93
Figura 80. Esquema de ensayo con carga de 4950,0805 kgf sobre viga con refuerzo de fibra de carbono.....	94
Figura 81. Deformación obtenida de simulación con carga de 4950,0805 kgf sobre viga con reforzamiento de fibra de carbono. ....	94
Figura 82. Gráfica comparativa entre curvas fuerza (kg) – deformación (mm). ....	97
Figura 83. Falla en compresión por cortante.....	101
Figura 84. Esfuerzos en el círculo de Mohr.....	102
Figura 85. Plano de esfuerzos. ....	102

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades mecánicas del PET. ....	16
Tabla 2. Propiedades térmicas del PET. ....	16
Tabla 3. Propiedades químicas del PET. ....	17
Tabla 4. Centroides y áreas de viga transformada. ....	30
Tabla 5. Propiedades fibra PET. ....	31
Tabla 6. Propiedades del tejido SikaWrap 300C. ....	33
Tabla 7. Propiedades de varillas de acero en simulación. ....	38
Tabla 8. Propiedades del hormigón en simulación. ....	38
Tabla 9. Comparación de deformaciones real vs simulación en vigas sin revestimiento. ....	39
Tabla 10. Comparación de resultados de deformación entre viga sin atiesadores vs viga con atiesadores. ....	43
Tabla 11. Verificación de geometría. ....	50
Tabla 12. Datos ensayo flexión viga #1 sin refuerzo. ....	63
Tabla 13. Datos ensayo flexión viga #2 sin refuerzo. ....	64
Tabla 14. Datos ensayo flexión viga #3 sin refuerzo. ....	67
Tabla 15. Datos ensayo flexión viga #1 refuerzo de PET. ....	70
Tabla 16. Datos ensayo flexión viga #2 refuerzo de PET. ....	73
Tabla 17. Datos ensayo flexión viga #3 refuerzo de PET. ....	76
Tabla 18. Datos ensayo flexión viga #1 refuerzo de fibra de carbono. ....	79
Tabla 19. Datos ensayo flexión viga #2 refuerzo de fibra de carbono. ....	83
Tabla 20. Datos ensayo flexión viga #3 refuerzo de fibra de carbono. ....	86
Tabla 21. Deflexión en vigas ensayadas. ....	90
Tabla 22. Dimensiones grietas de vigas ensayadas. ....	91
Tabla 23. Propiedades de fibra PET en simulación. ....	92
Tabla 24. Propiedades de fibra de carbono en simulación. ....	92
Tabla 25. Comparación de deformaciones reales vs de simulación en vigas con reforzamiento de fibras. ....	94
Tabla 26. Resumen de resultados. ....	95
Tabla 27. Valores promedio de cargas, deflexión y trabajo. ....	95
Tabla 28. Comparación de grietas en las diferentes vigas. ....	99
Tabla 29. Costos ensayo adherencia. ....	103
Tabla 30. Costos directos – fabricación vigas. ....	104
Tabla 31. Costos directos – reforzamiento. ....	104
Tabla 32. Costos indirectos. ....	105
Tabla 33. Costo total del proyecto. ....	105
Tabla 34. Costos reforzamiento – fibra de carbono. ....	105
Tabla 35. Costos reforzamiento – Fibra PET. ....	106
Tabla 36. Costos compartidos de reforzamiento. ....	106

## RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo analizar el comportamiento a flexión sobre una viga compuesta reforzada longitudinalmente con PET reciclado. La idea fue planteada con el fin de impulsar el reciclaje e implementar el PET como refuerzo en estructuras que necesiten un aumento en su capacidad a flexión. El principal inconveniente con el PET es su pobre adherencia hacia otras superficies, por lo que antes de proceder a su diseño y construcción se investigó los posibles pegamentos que se pueden utilizar en el proyecto. Realizando pruebas de adherencia se pudo seleccionar una resina epóxica llamada SIKADUR 301 procedente a la empresa de SIKA. La viga se diseñó para una baja capacidad, para enfocarse en el comportamiento de las fibras PET. Para la validación de resultados se construyeron varias vigas con refuerzo longitudinal PET, fibra de carbono y sin revestimiento, para la comparación de deflexión y resistencias a la flexión. En el ensayo se utilizó el pórtico del laboratorio de mecánica de materiales de la universidad, con la finalidad de obtener un mejor resultado se realizó un ensayo aplicando flexión pura para eliminar los efectos del esfuerzo cortante, con una carga que iba aumentando gradualmente hasta que la viga llegue a su punto de rotura. La fibra PET aumenta la capacidad a flexión de las vigas, comparando con la capacidad a flexión de las vigas con refuerzo de fibra de carbono, las vigas con fibras PET tienen menor capacidad, pero el costo de producción de las fibras de PET es menor y por lo tanto es rentable.

### **PALABRAS CLAVES:**

- **FLEXIÓN**
- **FIBRA PET**
- **FIBRA DE CARBONO**
- **REFORZAMIENTO**
- **VIGAS**

## **ABSTRACT**

The research had as aim to analyze the flexural behavior for composite beam longitudinally reinforced with recycled PET. The idea was raised in order to encourage the recycling and to implement the PET as reinforcement for structural construction who need an augmentation of his flexural capacity. The principal issue about PET is his poor adhesion toward other surface, so before his design and construction, is necessary a preview investigation of possible adhesives which can be used for the project, carrying out adhesion tests helped with the selection of an epoxy resin called SIKADUR 301 made by SIKA's enterprise. The beam was designed for low capacity in order to focus only on the behavior of the PET fiber. To validate the results, the construction of numerous beams was made to compare the bending and tensile strength of beams reinforced with: carbon fiber and the PET fiber, also the beams non longitudinally reinforced. The gantry of the university was used to perform the essays, in order to obtain better results; the test was realized by applying pure bending to eliminate shear stress. A load which was gradually increasing was applied until the beam reaches its breaking point. The PET fiber increases flexural capacity of beams, compared to the flexural capacity of the reinforced carbon fiber beams, reinforced PET fiber beams has less capacity, but production cost of the PET fiber is less, therefore is cost effective.

### **KEYWORDS:**

- **FLEXION**
- **PET FIBER**
- **CARBON FIBER**
- **REINFORCEMENT**
- **BEAMS**

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUCCIÓN

#### 1.1. Objetivos

##### 1.1.1. Objetivo General

Analizar el comportamiento a flexión de vigas de sección compuesta mediante el uso de fibras recicladas PET como refuerzo a tensión.

##### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Diseñar la viga compuesta en base a los criterios de la Norma ACI 318-11.
- Construir los diferentes tipos de vigas propuestas en el diseño.
- Reforzar con fibras de PET dispuestas de manera longitudinal en la parte inferior del hormigón (zona a tensión).
- Comparar los resultados del diseño experimental con el análisis computacional, mediante software CAD/CAE.
- Comparar resultados de comportamientos a flexión de las distintas variantes entre vigas.
- Analizar los costos directos e indirectos de la viga reforzada.

#### 1.2. Generalidades

La idea del reforzamiento con materiales fibrosos se remonta a la antigüedad; en Egipto introducían paja al macizo arcilloso, con el objetivo de brindar una mayor resistencia a los ladrillos.

Las fibras con una adecuada resistencia mecánica a la tracción/flexión, homogéneamente distribuidas, constituyen una micro-armadura la cual confiere al hormigón la propiedad de ductilidad, la cual puede llegar a ser considerable en medida que se eleve la resistencia de las fibras y la cantidad de las mismas, confiriendo además al hormigón según las circunstancias un incremento en su tenacidad.

Generalmente sobre el hormigón no se realizan ensayos de tracción/flexión directos, para evaluar estas propiedades de resistencia, es común ensayar indirectamente mediante ensayos de flexión sobre vigas. (MACCAFERRI).

Una viga compuesta es más eficiente que una viga de hormigón no compuesta. La ventaja de una sección encerrada Figura 1, es que el hormigón brinda protección contra el fuego y corrosión a la sección de acero (Williams, 2011).



**Figura 1. Viga compuesta (sección encerrada)**

Fuente: (Williams, 2011).

Actualmente el reforzamiento de elementos para mejorar sus propiedades es algo común, por ello la necesidad de desarrollar esta investigación. La variedad de materiales creados por la naturaleza y manipulados por el hombre, nos brinda la oportunidad de buscar variantes o alternativas para las diferentes aplicaciones, en este caso de ingeniería; así como la oportunidad de reducir el impacto ambiental, que de ser el caso para esta investigación se pudiese encontrar una aplicación para la reutilización del plástico, el cual toma algunos años en degradarse por completo.

El presente proyecto tiene como finalidad analizar la propiedad de flexión de vigas compuestas reforzadas con PET, para así determinar si el reforzamiento con el uso de fibras PET recicladas, es una aplicación que se puede impulsar en la actual industria constructora.

El análisis de la capacidad a flexión de vigas compuestas reforzadas con fibra reciclada PET involucra áreas de conocimiento como: Mecánica de Materiales, Sistemas CAD, Sistemas CAE, Estructuras Metálicas, Ciencia de los Materiales.

### **1.3. Alcance del proyecto**

El alcance de este proyecto contempla el diseño y construcción de 9 vigas de sección compuesta acero/hormigón, con su respectiva instrumentación (galgas extensiométricas) las cuales son:

- Tres vigas compuestas (acero/hormigón) con refuerzo longitudinal PET.
- Tres vigas compuestas (acero/hormigón) con refuerzo longitudinal de fibra de carbono.
- Tres vigas compuestas (acero/hormigón) sin refuerzo.

Análisis y comparación del comportamiento a flexión de cada una de las vigas, para poder emitir criterios en cuanto a los resultados y establecer conclusiones contundentes en cuanto al uso de fibras PET como refuerzo a tensión.

En las 9 vigas se colocará galgas extensiométricas para medición de deformación unitaria, para poder comparar con un software de simulación para ingeniería y calibrar el modelo computacional.

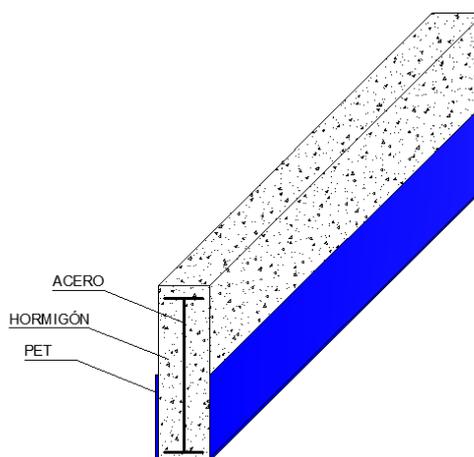
Mediante el diseño de la viga compuesta se obtendrá un costo aproximado de la fabricación incluyendo costos de los materiales y elementos que se requieran, mano del personal calificado que se requiere para su construcción, entre otros costos directos e indirectos que implican la construcción de la viga.

### **1.4. Justificación del proyecto**

El reforzamiento de vigas se ha vuelto una necesidad, ya que la problemática de la actualidad es mejorar la eficiencia (capacidad) de las

mismas, es decir hacer vigas cada vez más pequeñas con mayores capacidades de carga.

Está comprobado que los reforzamientos de las vigas con fibras de carbono aumentan la capacidad a flexión y corte (Beltran, 2011, pag 87); sin embargo, como menciona en un artículo “Es raro el utilizar la fibra de carbono como material de construcción debido a su alto costo” (Artem, 2010, p.4).



**Figura 2. Viga con refuerzo PET**

El proyecto que se llevará a cabo implementando un reforzamiento de fibras a base de PET recicladas, en disposición longitudinal sobre una viga compuesta acero/hormigón/PET Figura 2, es un aporte para el área de estructuras, dando nuevos criterios para el diseño y reforzamiento de vigas.

El material que se va a emplear (PET), es de un coste muy bajo a comparación de la fibra de carbono, este se obtiene a partir de bases desechables, es decir de botellas que previamente fueron utilizadas y actualmente se encuentran en desuso.

La reducción en el impacto ambiental es un tema del cual se debate todo el tiempo, las investigaciones han demostrado que uno de los mayores contaminantes es en efecto el PET, aprovechar sus desechos implementándolos en las vigas, es una manera de reducir la contaminación que actualmente el PET está relacionado.

*“Nuestro país genera alrededor de 4 millones 57mil toneladas anuales de residuos sólidos, de las cuales el 25% (1’022.603 toneladas) son potencialmente reciclables (papel y cartón 9,4%, plástico 11%, vidrio 2,6% y chatarra 2,2%)”. (Ministerio del medio ambiente).*

*“La Estrategia Nacional para el Cambio de la Matriz Productiva se implementa mediante herramientas de planificación, acciones públicas (definidas por distintos niveles de gobierno) y por acciones privadas. Las cadenas productivas responden a un enfoque metodológico integral que permite complementar esfuerzos en industrias, productos y servicios para aprovechar las capacidades y potencialidades identificadas en el territorio.” (Vicepresidencia de la República del Ecuador)*

El reciclaje de residuos es una de las 13 cadenas productivas establecidas como prioridad por la Vicepresidencia de la República dentro de la Nueva Matriz Productiva del Estado.

## CAPÍTULO II

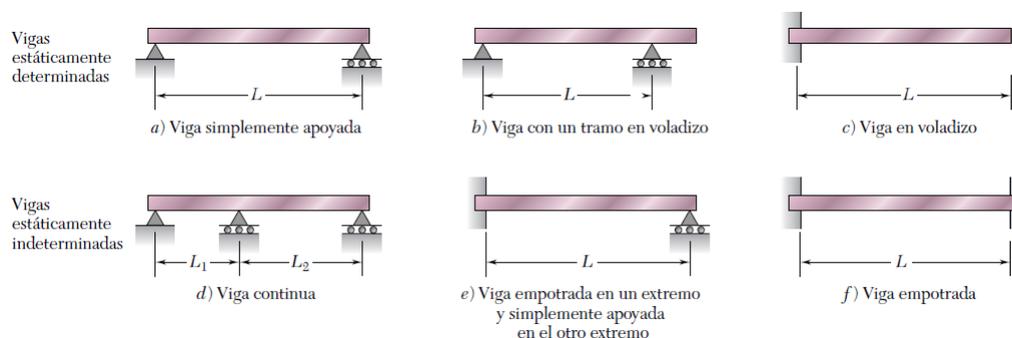
### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Tipos de vigas

Las vigas son usadas ampliamente en la industria, por lo tanto, su aplicación es muy amplia y variada.

Las vigas soportan cargas transversales, posicionados en forma horizontal y quedan sujetas a cargas por gravedad o verticales. (Williams, 2011).

Existen varias maneras de clasificar a las vigas, se mencionan solo el tipo de viga que se realizará en el proyecto, de acuerdo a su posición el tipo de viga que se utilizará es una simplemente apoyada.



**Figura 3. Tipos de vigas de acuerdo a su posición.**

Fuente: (Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek, 2010)

La distancia  $L$  mostrada en distintas partes de la Figura 3 se denomina el claro.

#### 2.2. Diseño de vigas en acero

El diseño de vigas en acero se lo puede realizar según los siguientes criterios, así lo menciona la AISC 360 (2010), las cuales son:

- Diseño de miembros a tensión.
- Diseño de miembros a compresión.
- Diseño de miembros a flexión.

- Diseño de miembros a corte.
- Diseño de miembros para fuerzas combinadas y torsión.

Es decir que existen fórmulas específicas de diseño dependiendo su campo de aplicación, para el diseño de los elementos, se deberán establecer los estados límite críticos para el diseño, los cuales se escogerán en cuanto a parámetros de esbeltez, compacticidad y no compacticidad, en sus elementos (patín y alma).

Para esta investigación el diseño del refuerzo de acero que estará embebido en la viga de hormigón consiste en seleccionar el diámetro necesario de varilla, ya que se realizará vigas de hormigón armado.

### 2.2.1. Varilla de acero corrugado ASTM A706

La varilla, también conocida como acero corrugado, es una barra común de acero al carbón laminado que comúnmente se utiliza como mecanismo de tensión en las estructuras de concreto reforzado y mampostería reforzada conservando el concreto en compresión.

$\phi$	Área por varilla	Pesos Nominales	
		kg/m	kg/12m
mm	cm <sup>2</sup>		
8	0.50	0.395	4.74
10	0.79	0.617	7.40
12	1.13	0.888	10.66
14	1.54	1.208	14.50
16	2.01	1.578	18.94
18	2.55	1.998	23.98
20	3.14	2.466	29.59
22	3.80	2.984	35.81
25	4.91	3.853	46.24
28	6.16	4.834	58.01
32	8.04	6.313	75.76

Figura 4. Áreas y peso de varillas de proveedores ecuatorianos.

Fuente: (NOVACERO, 2016)

ESPECIFICACIONES DE ACERO MICROALEADO			
NORMA DE PRODUCTO		NORMA NTE INEN 2167/ASTM A - 706	
PROPIEDADES MECANICAS		VALORES	UNIDADES
GRADO DEL ACERO		60 (42)	klb/plg <sup>2</sup> (kgf/mm <sup>2</sup> )
Límite de Fluencia (F <sub>y</sub> )	Min	420 (4200)	MPa (kgf/cm <sup>2</sup> )
	Max	540 (5400)	MPa (kgf/cm <sup>2</sup> )
Resistencia a la Tracción (F <sub>u</sub> )	Min	550 (5500)	MPa (kgf/cm <sup>2</sup> )
Alargamiento mínimo en L <sub>e</sub> =200 mm	Según diámetro	d ≤ 20	14
		22 ≤ d ≤ 36	12
		d > 40	10
SOLDABILIDAD		No Requiere Pre calentamiento según AWS D1.4	
(F <sub>t</sub> /F <sub>y</sub> ≥ 1.25)		La resistencia a tracción real debe ser igual o mayor a 1.25 veces el límite de fluencia real registrado en el ensayo de la probeta.	

**Figura 5. Propiedades de varillas de acero ASTM A706.**

Fuente: (NOVACERO, 2016)

Las varillas de acero corrugado especificadas anteriormente cumplen las siguientes normativas:

- NTE INEN 102
- NTE INEN 2167
- Norma Ecuatoriana de construcción NEC
- ACI 318 (capitulo 21)

### 2.3. Tipos de fallas en vigas

Los dos tipos de fallas que se pueden presentar en un ensayo a flexión sobre vigas es la falla por flexión y la falla por cortante.

En este estudio se busca reducir la probabilidad de falla por cortante, por lo cual se ensayará las vigas por medio del ensayo de flexión pura.

#### 2.3.1. Falla por flexión

La flexión en la viga se presenta por los esfuerzos flectores que son aplicados por una carga externa, la viga soporta deformación adicional conforme aumenta la carga, por lo que normalmente aparecen grietas,

conforme la carga aumenta continuamente, la viga falla cuando la carga externa alcanza la capacidad de la viga. (Guzman, 2008).

### **2.3.2. Falla por corte**

Los esfuerzos por cortante generalmente son mayores que los esfuerzos por flexión, por lo que en general la mayoría de los diseños se rigen a este tipo de esfuerzo. Existen dos tipos de acciones en el corte: el unidireccional (Viga) y el bidireccional (losa). (Bernal, 2005).

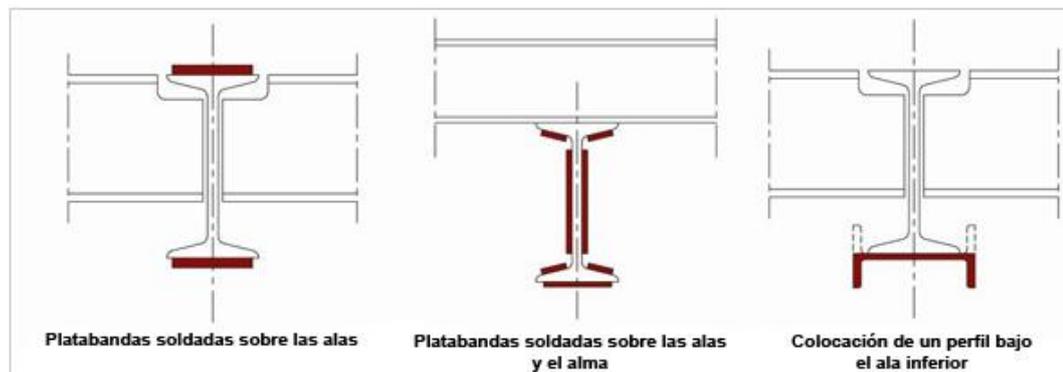
El comportamiento de la falla por cortante es diferente a la falla por flexión, las apariciones de grietas son más pronunciadas que las de flexión y la falla es repentina. (Guzman, 2008).

## **2.4. Reforzamiento de vigas**

El reforzamiento de elementos estructurales indudablemente tiene como objetivo “mejorar” alguna propiedad, por lo general la resistencia al cortante o a flexión, en la cual su desempeño no es el deseado. Al reforzar elementos estructurales resulta útil conocer en dónde, el material con el que se va a reforzar, es más eficaz, dónde va desarrollar mayor potencial.

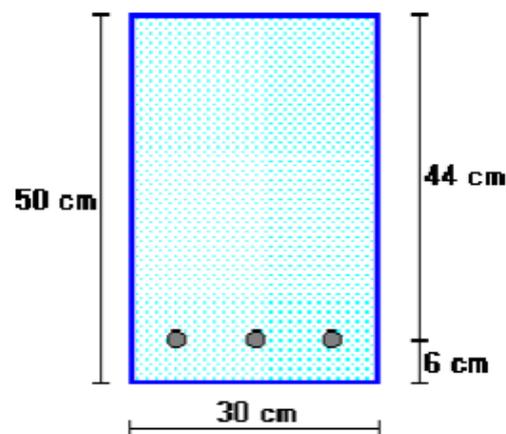
En ciertos casos, como en el diseño frente al sismo, añadir elementos imprudentemente puede conducir al debilitamiento de la estructura. (AcelorMittal, 2016).

Existen varias maneras de reforzar una viga, cuyo principal objetivo por lo general es mejorar su resistencia a flexión o cortante. Por ejemplo: el reforzamiento de vigas metálicas con platinas de metal (Figura 6), el reforzamiento de vigas de hormigón con perfiles metálicos o varillas metálicas (Figura 7), y a su vez ambos casos mencionados pueden ser reforzados con el uso de fibras externas.



**Figura 6. Refuerzo de perfiles I con platinas soldadas en patines y alma.**

Fuente: (AcelorMittal, 2016).



**Figura 7. Ejemplo de viga compuesta (Viga de hormigón armado).**

Fuente: (Ing. Marcelo Romo Proaño, 2016).

En este estudio, nos enfocaremos a analizar el refuerzo de vigas mediante el uso de fibras, para lo cual se ha definido previamente que la viga compuesta acero/hormigón, tendrá como geometría principal un cuadrado o un rectángulo, dependiendo de lo que demande el diseño, junto con varilla de acero, el cual servirá como refuerzo principalmente en la zona a tracción, pero también en la zona a compresión. Este tipo de vigas compuestas se les conoce comúnmente como vigas de hormigón armado (Figura 7).

#### **2.4.1. Refuerzo de vigas mediante el uso de fibras**

El reforzamiento en vigas mediante el uso de fibras se lo realiza en base a la propiedad que se desea fortalecer, existen dos alternativas para el refuerzo,

reforzar para mejorar la capacidad a flexión y reforzar para mejorar la capacidad de cortante.

Para unir las fibras junto con el hormigón, sea cual sea la disposición de las fibras, se necesita de un elemento “pegante”, los más comunes son los adhesivos de resina epóxica (liquido).

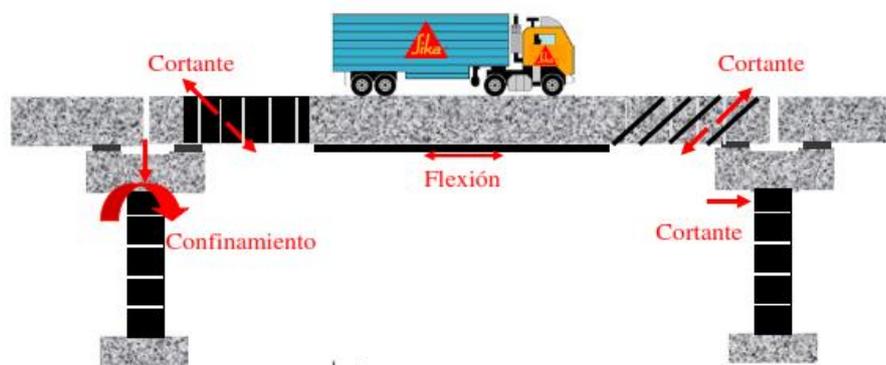


**Figura 8. Refuerzo de viga de hormigón a cortante**

Fuente: (SIKA, 2010)

Como se puede observar en la Figura 8, el reforzamiento a cortante se lo realiza colocando “tramos” de fibra, en sentido opuesto al longitudinal (transversal).

Para reforzar una viga con la intención de mejorar su capacidad a flexión, el reforzamiento se lo coloca de manera longitudinal, a lo largo de toda la viga.



**Figura 9. Refuerzo a cortante y a flexión en una viga.**

Fuente: (Rendón, 2015)

El reforzamiento de vigas mediante el uso de fibras resulta ser de aplicación fácil, debido la ligereza de los refuerzos, también debido a la

facilidad para seguir la geometría de la estructura. Los tiempos de aplicación de refuerzos son cortos.

#### **2.4.2. Adherencia de fibras al hormigón**

Un elemento importante que será parte de la viga reforzada, será el aditivo, ya que este juega un papel importante en el desarrollo de esta investigación. Existen varios tipos de aditivos, según la aplicación para el que se desee utilizarlos, en este caso un factor importante a analizar para la selección del aditivo será la compatibilidad de elementos hormigón – fibra (fibra de PET, fibra de carbono).

- **Consideraciones previas a proceso de pegado**

- i. El soporte debe estar limpio, libre de aceites, grasas, polvo, lechadas superficiales, pinturas antiguas, etc. Realizar una limpieza exhaustiva eliminando polvo, parte sueltas o mal adheridas.
- ii. El soporte debe estar nivelado. En caso de necesitar una regularización, el mortero o resinas usado para la reparación debe haber curado completamente antes de la aplicación del tejido.

- **Proceso de pegado de fibras**

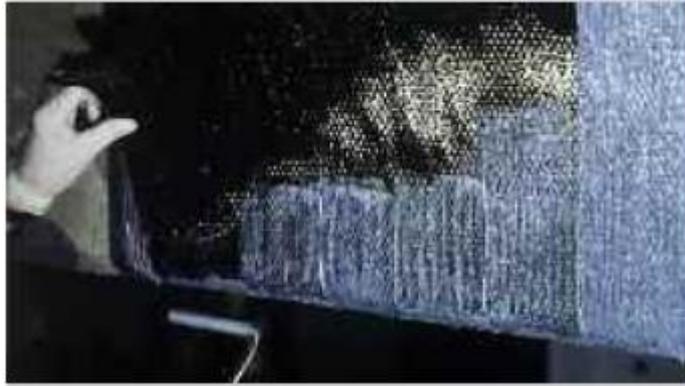
- i. Cortar fibras, en dimensiones establecidas.
- ii. Aplicar aditivo sobre superficie de hormigón con un rodillo.
- iii. Aplicar aditivo sobre una cara de la fibra.



**Figura 10. Aplicación de resina sobre viga de hormigón preparada**

Fuente: (SIKA, 2010).

- iv. Aplicar tejido (fibras) directamente sobre la resina.
- v. Extender tejido sobre la superficie previamente impregnada con resina.



**Figura 11. Aplicación de tejido sobre resina (Ejemplo: Refuerzo a cortante)**

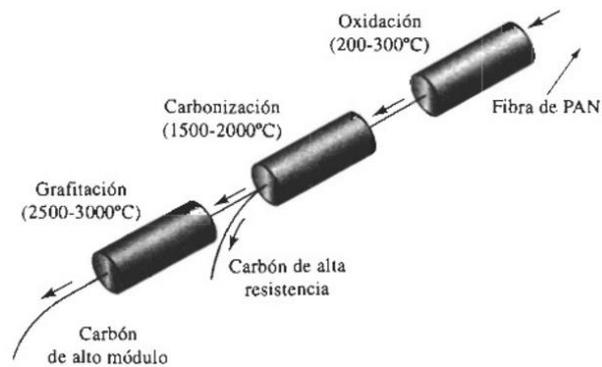
Fuente: (SIKA, 2010).

- vi. Presionar tejido con un rodillo especial, únicamente en dirección de las fibras.

## **2.5. Fibra de carbono en la construcción**

Los orígenes de la fibra de carbono se estima que su utilización fue a finales del siglo XIX, fue descubierto por Thomas Edison, quien usó fibras de carbono incipientes a base de fibra de bambú como filamentos para los primeros desarrollos de las bombillas eléctricas. (Askeland, 1998).

Las fibras de carbono se fabrican mediante carbonización o pirolización, de un filamento orgánico, el cual es más fácil estirar o hilar en tramos largos, delgados y continuos. El filamento orgánico, conocido como precursor, frecuentemente es rayón (un polímero celulósico), poliacrinolonitrilo (PAN) o resina (varios compuestos orgánicos aromáticos). Las altas temperaturas descomponen el polímero orgánico, extrayendo todos los elementos, excepto el carbono. Conforme se incrementa la temperatura de carbonización de 1000 a 3000 °C la resistencia a la tensión se reduce, en tanto que el módulo de elasticidad aumenta (Askeland, 1998).



**Figura 12. Método para fabricación fibras de carbono.**

Fuente: (Askeland, 1998).

En la industria ecuatoriana se implementa el uso de fibras de carbono como por ejemplo las columnas de los edificios, la empresa SIKA actualmente esta implementando el usos de reforzamientos en la construcción.



**Figura 13. Reforzamiento de columnas con fibra de carbono.**

Fuente: (SIKA, 2010)



**Figura 14. Fabricación de platinas preformadas.**

Fuente: (SIKA, 2010)

## 2.6. Caracterización de las propiedades del PET

El PET (polietileno tereftalato) es un material que pertenece a la familia de los polímeros. Los polímeros son materiales que consisten en macromoléculas en cadena con pesos moleculares promedio de 10000 a más 1000000 g/mol y que se forman al unir muchos meros mediante enlace químico (Askeland, 1998).

Los polímeros pueden clasificarse de varias formas, en esta investigación se mencionará la clasificación de los polímeros en base a su comportamiento mecánico y térmico.

Comportamiento	Estructura general	Ejemplo
Termoplástico	Cadenas lineales flexibles (sin o con ramificación)	Polietileno
Termoestables	Red tridimensional rígida (las cadenas pueden ser lineales o ramificadas)	Poliuretanos
Elastómeros	Termoplásticos o termoestables ligeramente entrelazados, en forma de moléculas en espiral	Hule natural

**Figura 15. Clasificación de los polímeros por su comportamiento mecánico/térmico.**

Fuente: (Askeland, 1998).

Una de las más importantes ventajas de algunos materiales plásticos de ingeniería son sus bajas densidades, la mayoría de plásticos tienen densidades cercanas a 1 g/cm<sup>3</sup>. (Smith & Havad, 2006).

Una desventaja para algunos diseños de ingeniería es que los materiales plásticos presentan resistencias a tensión relativamente bajas. La mayoría de plásticos tienen una resistencia a la tensión de menos de 10000 psi (69 MPa). (Smith & Havad, 2006).

Las ventajas principales del PET son (JQ, 2016):

- Resistencia a la fluencia elevada
- Rigidez elevada
- Elevada dureza de la superficie

- Estabilidad dimensional elevada
- Buena resistencia a la abrasión
- Buenas propiedades de fricción por deslizamiento
- Buen comportamiento como aislante eléctrico
- Elevada resistencia a sustancias químicas

A continuación, se muestran datos técnicos correspondientes a las propiedades del PET.

**Tabla 1.**  
**Propiedades mecánicas del PET.**

Propiedades mecánicas a 23°C	Unidad	ASTM	DIN	Valores
Peso específico	gr/cm <sup>3</sup>	D-792	53479	1.39
Resistencia a la tracción (Fluencia/Rotura)	Kg/cm <sup>2</sup>	D-638	53455	900/--
Resistencia a la compresión (1 y 2% Def.)	Kg/cm <sup>2</sup>	D-695	53454	260/480
Resistencia a la flexión	Kg/cm <sup>2</sup>	D-790	53452	1450
Resistencia al choque sin estalla	Kg.cm/cm <sup>2</sup>	D-256	53453	>50
Alargamiento a la rotura	%	D-638	53455	15
Módulo de elasticidad (tracción)	Kg/cm <sup>2</sup>	D-638	53457	37000
Dureza	Shore D	D-2240	53505	85-87
Coefficiente de roce estático s/acero		D-1894		--
Coefficiente De roce dinámico s/acero		D-1894		0.20
Resistencia al desgaste por roce				Muy buena

Fuente: (JQ, 2016).

**Tabla 2.**  
**Propiedades térmicas del PET.**

Propiedades térmicas	Unidad	ASTM	DIN	Valores
Calor específico	Kcal/Kg.°C	C-351		0.25
Temperatura de flexión B/carga (18.5Kg/cm <sup>2</sup> )	°C	D-648	53461	75
Temperatura de uso continuo en aire	°C			-20 a 110
Temperatura de fusión	°C			255
Coefficiente de dilatación lineal de 23 a 100°C	Por °C	D-696	52752	0.00008
Coefficiente de conducción térmica	Kcal/m.h.°C	C-177	52612	0.25

Fuente: (JQ, 2016).

**Tabla 3.**  
**Propiedades químicas del PET.**

<b>Propiedades químicas</b>	<b>Observaciones</b>
Resistencia a hidrocarburos	BUENA
Resistencia a ácidos débiles a temperatura ambiente	BUENA
Resistencia al álcalis débiles a temperatura ambiente	BUENA
Efecto de los rayos solares	Algo lo afectan
Aprobado para contacto con alimentos	SI
Comportamiento a la combustión	Arde con mediana dificultad
Propagación de la llama	Mantiene la llama
Comportamiento al quemarlo	Gotea
Color de la llama	Amarillo anaranjado tiznado
Olor al quemarlo	Aromático dulce

Fuente: (JQ, 2016).

## **2.7. Diseño de vigas compuestas**

### **2.7.1. Hormigón Armado**

También conocido como concreto reforzado, consiste en la mezcla de concreto con acero. El acero contribuye la resistencia a la tensión, y ya que el concreto presenta bajas resistencias a la tensión, a su vez aporta un aumento de resistencia a la compresión, se aplica en miembros estructurales, así como en columnas y vigas.

Para diseñar el concreto reforzado se utiliza el Building Code Requirements for Structural Concrete del Instituto Americano del Concreto (ACI 318), se lo emplea para la fabricación de edificios, otras especificaciones sobre el concreto reforzado son las de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y la American Railway Engineering Association (AREA).

El hormigón es un material que tiene buena resistencia a la compresión, pero su desventaja principal es su poca capacidad a tracción. Para mejorar esta desventaja se torna necesario introducir un material más resistente a la tracción, el cual comúnmente es acero. (Enrique & Luisa María, 2007).

El hormigón es una mezcla de cemento, agua y áridos como componentes principales.

Cuando el cemento se mezcla con el agua se produce una reacción química exotérmica de hidratación, con el paso del tiempo este se solidifica y se torna como una piedra. El agua necesariamente tiene que ser en mayor proporción que los demás elementos para que sea manejable, pero hay que tener cuidado con el exceso de agua ya que con el tiempo este se evapora y el resultado del hormigón es una estructura porosa. La resistencia del hormigón aumenta con el tiempo (Enrique & Luisa María, 2007).

En la Figura 16 se puede apreciar la dosificación para hormigón es de diferentes resistencias.

TIPO CONCR.	RESIST. p.s.i	MATERIALES				
		CEMENTO KG	ARENA M3	TRITUR. M3	AGUA LTR	PRODUCC. %
1:2:2	3500	420	0.67	0.67	250	5
1:2:3	3000	350	0.56	0.84	180	5
1:2:4	2500	300	0.48	0.95	170	5
1:3:4	2000	260	0.63	0.84	170	5
1:3:6	1500	210	0.5	1.00	160	5
1:2:3 IMP	3000	350	0.56	0.84	180	5
1:2:4 IMP	2500	300	0.48	0.95	170	5
CICLOPEO	---					

**Figura 16. Dosificación de hormigón.**

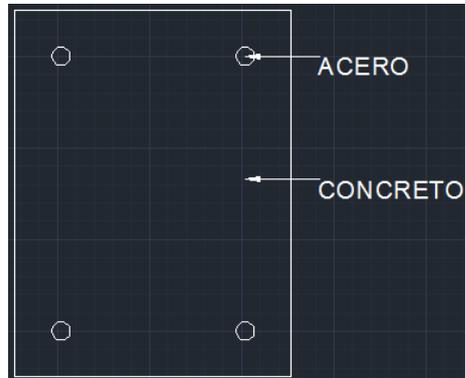
Fuente: (Construya Fácil, 2016)

### 2.7.2. Esfuerzo en vigas de dos materiales

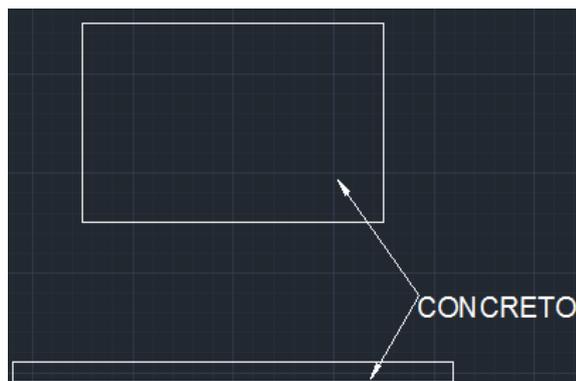
Para el cálculo del esfuerzo que va resistir cada elemento perteneciente a la viga, se debe realizar una transformación en la sección transversal de la viga, transformándolo como si fuera de un solo material.

- Las vigas compuestas están fabricadas de diferentes materiales. La aplicación de la fórmula de flexión requiere que la sección transversal de la viga sea transformada en un solo material, (Hibbeler, 2006).
- El factor de transformación es la razón de los módulos de elasticidad de los diferentes materiales de que está hecha la viga. Usado como un

multiplicador, este convierte las dimensiones de la sección transversal de la viga compuesta en una viga hecha de un solo material de modo que esta viga tenga la misma resistencia que la viga compuesta. Un material rígido será reemplazado por más del material menos rígido y viceversa. (Hibbeler, 2006).



**Figura 17. Esquema sección transversal viga de dos materiales (concreto/acero).**



**Figura 18. Esquema viga equivalente transformada a un solo material (concreto).**

## CAPÍTULO III

### 3. DISEÑO Y SIMULACIÓN

#### 3.1 Uso y manejos de norma para diseño de vigas compuestas

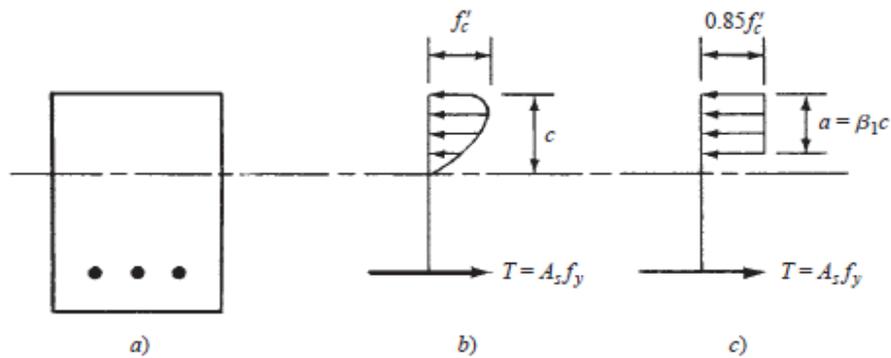
Existen 2 tipos para diseñar el concreto reforzado, los cuales se muestran a continuación:

Método WSD (Working Stress Design), el cual consiste en calcular las cargas vivas y muertas, posteriormente se determinan los tamaños de los miembros de la estructura, de modo que no exceda ciertos valores permisibles.

Método de diseño por resistencia última, este método usa un concepto más realista y seguro, en este caso las cargas muertas y vivas se multiplican por un factor de seguridad y valores resultantes, de modo que fallen por debajo de las cargas factorizadas.

El método que más se emplea es el de resistencia última, este método es necesario tomar en cuenta las incertidumbres de la resistencia de los materiales, dimensiones y mano de obra para que el cálculo sea más preciso. Es aquí donde influyen la resistencia nominal y el de reducción de resistencia que son generalmente valores por debajo de 1, varían de 0.9 en flexión y 0.65 para columnas.

Para el diseño, el reglamento permite el uso de una distribución rectangular de esfuerzos de compresión (bloque de esfuerzos) como reemplazo de distribuciones de esfuerzos más exactas. En el bloque rectangular equivalente de esfuerzos, se utiliza un esfuerzo promedio de  $0.85 \cdot f'_c$  con un rectángulo de altura  $a = \beta_1 \cdot c$ . Se ha determinado experimentalmente un valor de  $\beta_1$  igual a 0,85 para concreto con  $f'_c \leq 28$  MPa y menor en 0,05 por cada 7 MPa de  $f'_c$  sobre 28 MPa. (American Concrete Institute, 2011).



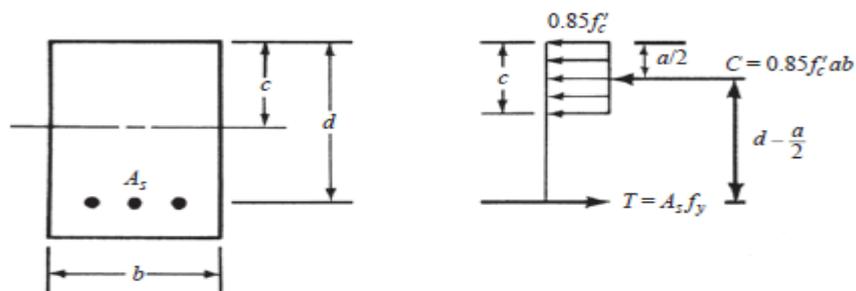
**Figura 19. Distribución de esfuerzos en viga reforzada con varillas.**

Para valores  $f'_c$  entre 17 y 28 MPa, el factor  $\beta_1$  se debe tomar como 0,85.

Los valores de  $\beta_1$  para concretos con valores superiores a 28 MPa pueden calcularse a su vez por la fórmula:

Para el SI:

$$\beta_1 = 0.85 - (0.008)(f'_c - 30) \geq 0.65$$



**Figura 20. Expresiones de la viga compuesta.**

Si igualamos las fuerzas C y T y despejamos a obtenemos la siguiente expresión.

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f'_c b}$$

Definimos el porcentaje de acero de tensión con la siguiente fórmula.

$$\rho = \frac{A_s}{bd}$$

Reemplazando,

$$a = \frac{\rho f_y d}{0.85 f'_c}$$

- **Factor  $\phi$  o reducción de resistencia**

Se usan para tener en cuenta las incertidumbres respecto a la resistencia de los materiales. El código 9.3 establece valores como.

- 0.90 para losas y vigas controladas por tensión
- 0.75 para cortante y torsión en vigas
- 0.65 o 0.75 para columnas
- 0.65 o 0.75 a 0.9 para columnas que sustentan cargas axiales muy pequeñas
- 0.65 para soporte en concreto.

También se puede calcular mediante el siguiente gráfico.

- **Cuantía máxima de acero**

Proporciona el comportamiento dúctil necesario para la mayoría de diseños.

$$\rho_{max} = 0,75\rho_b$$

- **Cuantía mínima de acero**

La cantidad mínima de refuerzo por flexión se lo puede escribir como un porcentaje y está dado por la fórmula.

$$\rho_{min} = \frac{0.8\sqrt{f'_c}}{f_y} \quad \text{O} \quad \rho_{min} = \frac{14.5}{f_y}$$

- **Cuantía de acero en equilibrio**

Bajo carga última el concreto fallará y el acero cederá simultáneamente, en donde necesitamos un porcentaje de acero balanceado.

$$\rho_b = \left(\frac{0.85\beta_1 f'_c}{f_y}\right) \left(\frac{6000}{6000 + f_y}\right)$$

La norma ACI 318-11 establece que: La cuantía de refuerzo  $\rho$ , proporcionado no debe exceder de 0,75 de la cuantía  $\rho_b$  que produciría en

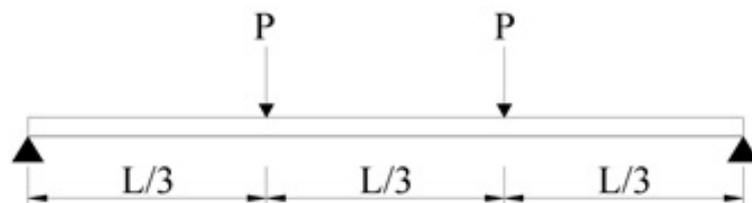
condiciones de deformación unitaria balanceada en la sección sometida a flexión sin carga axial. En elementos con refuerzo de compresión, la parte de  $\rho_b$  equilibrada por el refuerzo de compresión no necesita reducirse por medio del factor 0,75. (American Concrete Institute, 2011).

La deformación unitaria en el acero cuando el concreto alcanza la deformación unitaria ultima depende de la relación entre las áreas del refuerzo y el concreto y la relación entre las resistencias de los materiales  $f'_c$  y  $f_y$ . Si  $\rho \frac{f'_c}{f_y}$  es suficientemente baja, la deformación unitaria en el acero en tracción excederá en gran medida la deformación unitaria de fluencia cuando el concreto alcance su deformación unitaria ultima, con deflexión grande y amplia advertencias de falla inminente (condiciones de falla dúctil).

Con  $\rho \frac{f'_c}{f_y}$  mayor, la deformación unitaria del acero en tracción puede no alcanzar la deformación de fluencia cuando el concreto alcance su valor último, con una deflexión pequeña del elemento y poca advertencia de falla inminente (condiciones de falla frágil). En el diseño, se considera más conservador restringir la condición de resistencia nominal de manera que se puede esperar un modo de falla dúctil. (American Concrete Institute, 2011).

### 3.2 Diseño de la viga tipo sección compuesta

Para el diseño de la viga compuesta, se debe partir del esquema de cargas que va a soportar la viga.



**Figura 21. Esquema de ensayo de flexión pura sobre vigas.**

Para el diseño de la viga compuesta se deben conocer algunos parámetros necesarios para el diseño de esta, como lo son: distancia entre

apoyos, distancia entre fuerzas a aplicar, resistencia del hormigón, resistencia del acero (varilla) y carga de diseño.

Datos para el diseño:

- Longitud entre apoyos  $L_x = 1.5 \text{ m}$
- Distancia entre fuerzas  $x = 0.5 \text{ m}$
- Resistencia hormigón  $f_c = 210 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
- Resistencia acero  $f_y = 4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
- Carga de diseño  $F_t = 3 \text{ Ton}$

**Diseño de viga compuesta**

- Calculo de momento

$$M_v = x * \frac{F_t}{2} = 0.5\text{m} * 1.5\text{Ton} = 75000 \text{ kg} * \text{cm}$$

- Cuantía de acero ( $\rho$ )

$$\rho_{min} = \frac{14.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{f_y} = 0.003452$$

$B_i = 0.85$ , factor que depende de forma y resistencia, para hormigón es de 210 hasta 240.

$$\rho_b = \frac{0.85 * f_c}{f_y} * B_i * \frac{6100}{6100 + f_y} = 0.021394$$

$$\rho_{max} = 0.75 * \rho_b = 0.016046$$

- Asumir un valor de  $\rho$ , para iterar

$$\rho = 0.015$$

- Evaluar (q)

$$q = \frac{\rho * f_y}{f_c} = 0.3$$

- Evaluar (k)

$$k = q * (1 - 0.59 * q) = 0.2469$$

$$k = \frac{M_v}{\phi * f_c * b * d^2}$$

$$\phi_{flexion} = 0.90$$

$$\alpha = \frac{d}{b}, \text{ se puede aproximar a } \alpha = \sqrt{3}$$

- Despejando variables, calcular la base de la viga

$$b_a = \sqrt[3]{\frac{M_v}{\phi_{flex} * f_c * k * \alpha^2}} = 8.121802$$

El valor mínimo para la base será  $b_a$

Por facilidades geométricas y constructivas se asume  $b = 15\text{cm}$

- Calculo de (d) distancia entre lado más lejano de la viga al centro de la varilla

$$d = \alpha * b = 25.9807$$

El valor máximo de (d) será el calculado

- Definir dimensiones para b y d

b, será igual a 15 cm

d, será igual a 16.55 cm

- Calculo de la cuantía de acero dentro de la viga

$$k_a = \frac{M_v}{\phi_{flex} * f_c * b * d^2} = 0.096586$$

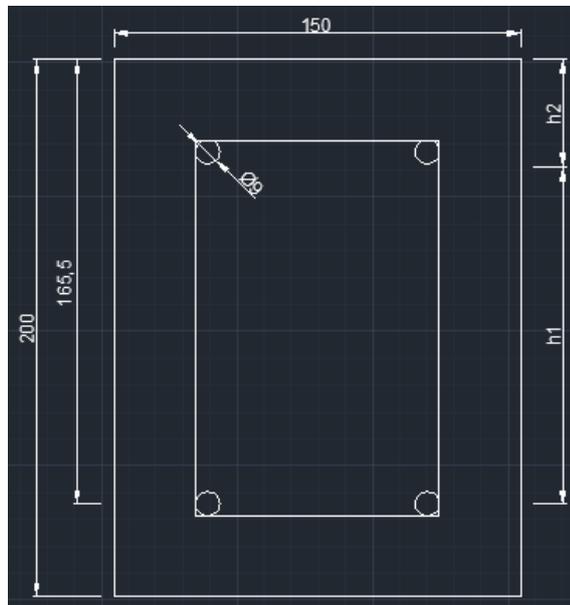
$$\rho_a = \frac{f_c}{f_y} * \left( \frac{1 - \sqrt{1 - 2.36k_a}}{1.18} \right) = 0.005141$$

El valor de  $\rho_a$  se encuentra entre el mínimo y el máximo, por lo tanto, es correcto.

$$\text{Área de acero necesario: } A_{acero} = \rho_a * b * d = 1.276296\text{cm}^2$$

$$\text{Diámetro de varilla requerido: } \phi_{acero} = \sqrt{\frac{4 * A_{acero}}{2 * \pi}} = 0.901396\text{cm}$$

- Para la zona a tracción serán necesarias 2 varillas de diámetro 9mm cada una.
- Para la zona a compresión se debería calcular el diámetro de varilla con la cuantía de acero mínima, pero por facilidades de construcción se utilizará del mismo diámetro de la zona a tracción.



**Figura 22. Sección transversal viga compuesta**

Se debe realizar el cálculo de la línea neutra en la viga de dos materiales, con el fin de diferenciar la zona de compresión de la zona de tracción, ya que el refuerzo longitudinal se lo hará en toda la zona a tracción.

Establecidas las dimensiones establecidas de la viga,  $b=15$  cm y  $d=16.55$  cm, se procede de la siguiente manera:

- Módulo de Young de los materiales de la viga,

$$E_{acero} = 2100000 \frac{kg}{cm^2}$$

$$E_{concreto} = 300000 \frac{kg}{cm^2}$$

$$N = \frac{E_{acero}}{E_{concreto}} = 7$$

Área de acero en zona a tracción  $A_{acero} = 2 * \frac{\pi * (9mm)^2}{4} = 1.272345cm^2$

- Ecuación cuadrática para la obtención de  $h_2$ , distancia de la parte superior de la viga hasta el punto de inicio de la zona a tracción

$$b * h_2 * \left(\frac{h_2}{2}\right) - N * A_{acero} * (d - h_2) = 0$$

$$h_2^2 + 1.187522h_2 - 20.187874 = 0$$

$$h_2 = 3.938393 \approx 4cm$$

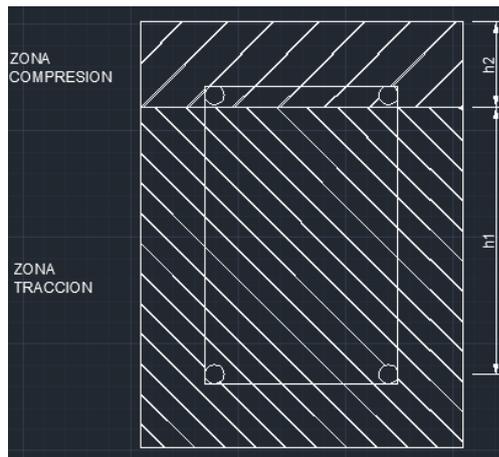


Figura 23. Zonas de compresión y tracción en la viga

### 3.3 Diseño de la soldadura

El diseño de la soldadura consiste en el cálculo del factor de seguridad que conlleva la soldadura con la cual se fijan las varillas de acero corrugado a los estribos, los cuales forman la armadura.

La soldadura es una sección rectangular, por lo que sus dimensiones son:

- $b = 4 mm$
- $h = 6 mm$

Para hallar el factor de seguridad de la soldadura, necesitamos la siguiente ecuación:

$$n = \frac{N * \tau_{fl}}{\tau_s}$$

Dónde:

$$\tau_{fl} = 0,577 \sigma_{fl}$$

$$\tau_s = \frac{V_s}{A_s} = \frac{V'}{bdx}$$

$$\tau = \frac{VQ}{Ib}$$

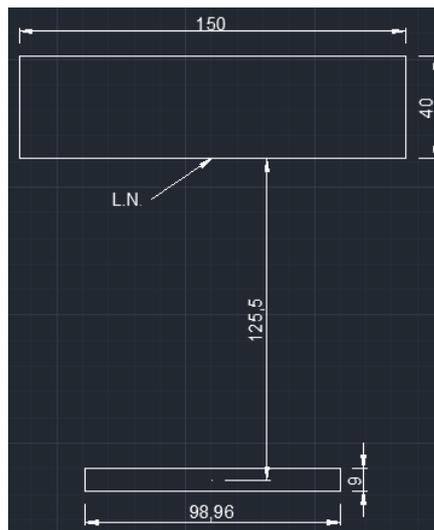
$$\tau = \tau_s$$

Igualando la ecuación tenemos la siguiente expresión:

$$V' = \frac{V * Q * dx}{I}$$

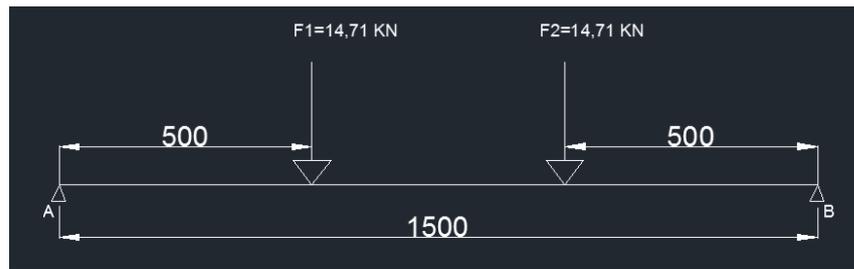
$$Q = N * A_{ac} * y'$$

Procedemos a calcular el esfuerzo cortante V de la viga, tomando en consideración que es una viga simplemente apoyada.



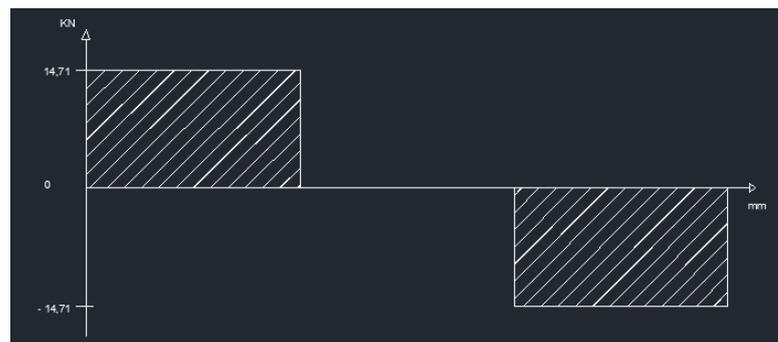
**Figura 24. Sección transversal viga transformada.**

Realizando sumatoria de momentos y sumatoria de fuerzas en y, obtenemos los valores de las reacciones.



**Figura 25. Diagrama de cuerpo libre del ensayo a flexión en vigas.**

Realizando el diagrama de cortante, se obtiene el valor del cortante máximo.



**Figura 26. Valor del cortante máximo en ensayo a flexión sobre vigas.**

El esfuerzo cortante máximo es:

$$V = 14,71 \text{ kN} = 1500 \text{ Kg.}$$

Se calculó la inercia de la viga transformada, por medio del teorema de Steiner.

En la Figura 24 se puede apreciar la geometría de la sección transversal de la viga compuesta transformada.

Tabla 4.

Centroides y áreas de viga transformada.

	$X_{CM}$ mm	$Y_{CM}$ mm	$A$ mm <sup>2</sup>
Rectángulo 1	75	150	6000
Rectángulo 2	75	4,5	890,64
$\sum A$			6890,64

$$\bar{x} = \frac{\sum A * X_{CM}}{\sum A} = 75 \text{ mm}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum A * Y_{CM}}{\sum A} = 131,19 \text{ mm}$$

$$I_{xx(R1)} = \frac{1}{12}bh^3 + Ad^2 = \frac{1}{12}150 * 40^3 + 6000(150 - 131,19)^2$$

$$= 2922896,6 \text{ mm}^4$$

$$I_{xx(R2)} = \frac{1}{12}98,96 * 9^3 + 890,64(4,5 - 131,19)^2 = 14301100,98 \text{ mm}^4$$

$$I_{xx(Total)} = 17223997,58 \text{ mm}^4$$

**Cálculo de Y'**

$$y' = 200 \text{ mm} - 34,5 \text{ mm} - 40 \text{ mm} = 125,5 \text{ mm}$$

**Cálculo de Q**

Siendo  $d_x = 150 \text{ mm}$ , distancia entre soldaduras (soldadura entre estribos y varillas de acero).

$$Q = N * A_{ac} * y' = 111771,555 \text{ mm}^3$$

**Cálculo de V'**

$$V' = \frac{V * Q * d_x}{I_{xx}} = 1460,09 \text{ kg}$$

$$\tau_s = \frac{V'}{A_s} = \frac{1460,09}{2 * 0,707 * 4 \text{ mm} * 6 \text{ mm}} = 43,02 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} = 61,19 \text{ Ksi}$$

$$\tau_{fl} = 0,577 \sigma_{fl}$$

Para el Electrodo E6011

$$\sigma_{fl} = 48 \text{ Ksi}$$

$$\tau_{fl} = 27,696 \text{ Ksi}$$

$$n = \frac{N * \tau_{fl}}{\tau_s}$$

$$n = \frac{7 * 27,696}{61,19} = 3,168$$

### 3.4 Diseño y análisis del reforzamiento con fibras PET

El diseño y análisis del reforzamiento con fibra de carbono se basa en calcular las propiedades equivalentes de la mezcla fibra PET con el adhesivo epóxico, mezcla la cual se podría considerar como material compuesto, siendo el adhesivo la matriz. Para lo cual es necesario conocer las propiedades tanto de la fibra como de la matriz.

El tejido de fibra PET fabricado artesanalmente es un tejido que se puede considerar unidireccional, cuyo objetivo es utilizar como reforzamiento estructural a flexión.

Para el cálculo de estas propiedades equivalentes es necesario conocer las propiedades mencionadas de la fibra y de la matriz, en el caso de la matriz las propiedades se obtuvieron de la ficha técnica del producto (VER ANEXO 2).

**Tabla 5.**

**Propiedades fibra PET.**

Propiedad	Unidades
Resistencia a la tensión	88 MPa
Densidad	1,39 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidad	3628 MPa

Con el fin de obtener las mejores propiedades en cuanto mayor resistencia, se recomienda que la fracción volumétrica máxima en cuanto a las fibras sea del 80%, más allá de esta cantidad las fibras ya no quedarían totalmente rodeadas de la matriz.

$ff$ : fracción volumétrica de las fibras

$fm$ : fracción volumétrica de la matriz

$\rho_f$ : Densidad de la fibra

$\rho_m$ : Densidad de la matriz

$\sigma_f$ : Resistencia a la tracción de la fibra

$\sigma_m$ : Resistencia a la tracción de la matriz

$E_m$ : Módulo de elasticidad de la matriz

$E_f$ : Módulo de elasticidad de la fibra

$$ff = 0,8$$

$$fm = 0,2$$

$$\rho_m = 1,31 \frac{kg}{L}$$

$$\sigma_m = 52 MPa$$

$$\rho = fm * \rho_m + ff * \rho_f = 1,334 \frac{g}{cm^3}$$

$$\sigma = \sigma_m * fm + \sigma_f * ff = 80,8 MPa$$

$$E = E_f * ff = 2902,4 MPa$$

En el caso del módulo de elasticidad y cuando la carga aplicada esta en sentido paralelo a las fibras, la formula solo considera la fracción volumétrica y módulo de elasticidad de la fibra.

### 3.5 Diseño y análisis del reforzamiento con fibras de carbono

El diseño y análisis del reforzamiento con fibra de carbono se basa en calcular las propiedades equivalentes de la mezcla fibra de carbono con el adhesivo epóxico, mezcla la cual se podría considerar como material compuesto, siendo el adhesivo la matriz. Para lo cual es necesario conocer las propiedades tanto de la fibra como de la matriz.

El tejido de fibra de carbono denominado SikaWrap 300C es un tejido unidireccional, cuyo principal uso es el reforzamiento estructural. La tabla siguiente muestra las propiedades de la fibra de carbono, obtenidas de la ficha técnica de este producto (VER ANEXO 1).

**Tabla 6.**  
**Propiedades del tejido SikaWrap 300C.**

Propiedad	Unidades	Ventajas
Resistencia a la tensión	4200 N/mm <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Es flexible, puede colocarse envolviendo elementos de forma compleja</li> <li>- Alta resistencia, bajo peso y no se corroe</li> <li>- Resistencia a sustancias alcalinas y acidas</li> <li>- Bajo impacto estético y económico</li> <li>- Puede ser aplicado en seco o húmedo</li> </ul>
Módulo de elasticidad	240000 N/mm <sup>2</sup>	
Elongación	1,5%	
Dirección de la fibra	0° (unidireccional)	
Peso por metro cuadrado	300 g	
Espesor	0,17 mm	
Densidad	1,8 g/cm <sup>3</sup>	

Fuente: (SA, 2015)

Se calcularán los valores equivalentes correspondientes a resistencia a la tensión, densidad y módulo elasticidad. Para el cálculo de estos valores equivalentes se requiere conocer la fracción volumétrica de cada componente.

Con el fin de obtener las mejores propiedades en cuanto mayor resistencia, se recomienda que la fracción volumétrica máxima en cuanto a

las fibras sea del 80%, más allá de esta cantidad las fibras ya no quedarían totalmente rodeadas de la matriz.

$ff$ : Fracción volumétrica de las fibras

$fm$ : Fracción volumétrica de la matriz

$\rho_f$ : Densidad de la fibra

$\rho_m$ : Densidad de la matriz

$\sigma_f$ : Resistencia a la tracción de la fibra

$\sigma_m$ : Resistencia a la tracción de la matriz

$E_m$ : Módulo de elasticidad de la matriz

$E_f$ : Módulo de elasticidad de la fibra

$$ff = 0,8$$

$$fm = 0,2$$

$$\rho_m = 1,31 \frac{kg}{L}$$

$$\sigma_m = 52 MPa$$

$$\rho = fm * \rho_m + ff * \rho_f = 1,702 \frac{g}{cm^3}$$

$$\sigma = \sigma_m * fm + \sigma_f * ff = 3370,4 MPa$$

$$E = E_f * ff = 192000 MPa$$

En el caso del módulo de elasticidad y cuando la carga aplicada esta en sentido paralelo a las fibras, la formula solo considera la fracción volumétrica y módulo de elasticidad de la fibra.



**Figura 27. Tramo de 10 m de SikaWrap 300C.**

### 3.6 Reforzamiento con fibras PET

El reforzamiento de fibras PET se basó en asemejarse a un tejido parecido al de la fibra de carbono, es decir que los filamentos sean continuos a lo largo de toda la fibra, en sentido longitudinal.

El hilo base, el cual es en sí la fibra PET, se obtuvo de la empresa ENKADOR SA. Este hilo denominado por la empresa como **“Hilo de filamento continuo de poliéster texturizado eco amigable, producido a partir de 100% botellas PET post consumo, Diseñado para la elaboración de telas altamente resistentes, tejido plano, maquinas tensadoras, jacquard”**, cumple el parámetro inicial de esta investigación, el cual consiste en que el reforzamiento debe componerse de PET reciclado.

El hilo base, el cual viene en presentación de bobina de 5 kg, se lo procesó para obtener un tejido semejante al de la fibra de carbono. El procesado del hilo base hasta obtener un tejido uniforme longitudinal, se lo realizó en la ciudad de Salasaka, por medio de un artesano experimentado en elaboración de tejidos a partir de hilo.

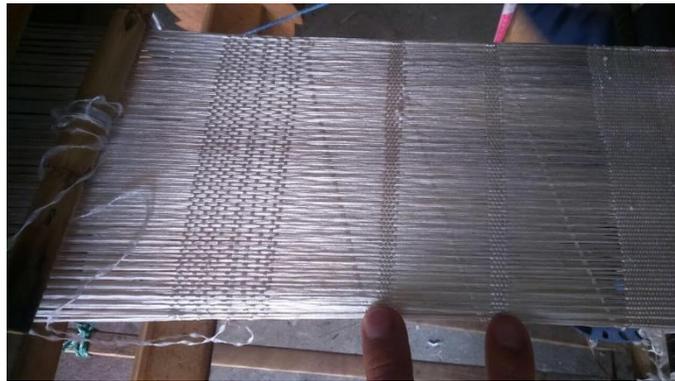
Requerimientos para la elaboración del tejido PET:

- Ancho del tejido: 50 cm
- Filamentos continuos en sentido longitudinal
- Fabricar 8 m de tejido
- Utilizar únicamente el hilo base entregado

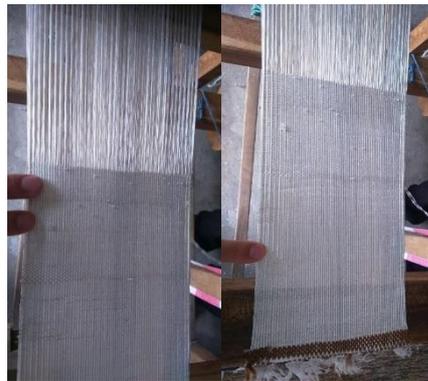
El tejido finalmente tuvo en total 1300 filamentos distribuidos uniformemente a lo ancho del tejido. Los filamentos en sentido longitudinal fueron compactados para no dejar espacios libres de filamento y “sostenidos” por medio de filamentos en sentido perpendicular, para evitar que el tejido se desarme.



**Figura 28. Hilo PET base.**



**Figura 29. Elaboración de tejido de prueba, para aprobación.**



**Figura 30. Tejido en proceso.**



**Figura 31. Tejido de fibra PET.**



**Figura 32. Tramo de tejido PET extendido.**

### **3.7 Comprobación de diseño con software CAD, CAE**

En base a los gráficos fuerza vs deformación, obtenidos de los ensayos a flexión de las vigas sin revestimiento, la comprobación de diseño consistió en comparar las deformaciones proporcionadas por el ensayo vs las deformaciones que brinda el software CAD/CAE, trabajando únicamente en el rango elástico (lineal) de las vigas.

Los valores de deformación real que se compararan, corresponden a valores promedio de deformaciones, obtenidas de los ensayos en tres diferentes vigas sin revestimiento.

Para la comprobación de diseño, se requiere ingresar en el software, las propiedades mecánicas tanto del hormigón como de las varillas de acero.

Tabla 7.

Propiedades de varillas de acero en simulación.

Propiedades del acero (varillas) ASTM A706	
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	7850
Módulo de elasticidad (MPa)	196133,04
Coefficiente de poisson	0,3
Resistencia a la fluencia (MPa)	420
Resistencia a la tensión (MPa)	550

Tabla 8.

Propiedades del hormigón en simulación.

Propiedades de hormigón de 210 kgf/cm <sup>2</sup>	
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2300
Módulo de elasticidad (MPa)	21280
Coefficiente de poisson	0,18
Resistencia a la tensión (MPa)	2,16
Resistencia a la compresión (MPa)	20,59

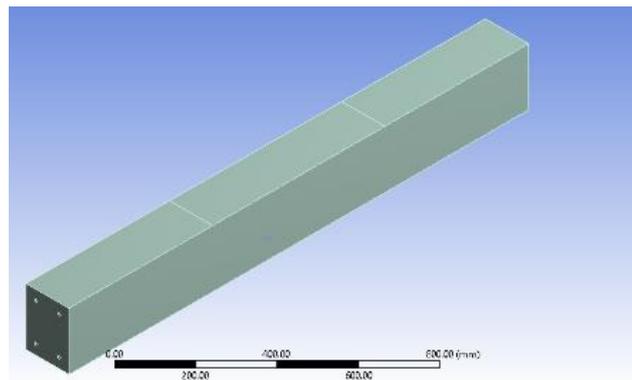


Figura 33. Esquematización 3D de viga de hormigón armado.

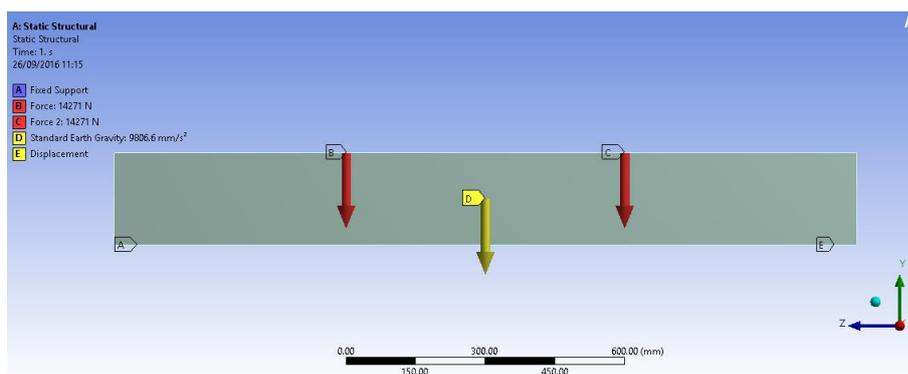


Figura 34. Esquema de ensayo de flexión sobre viga con carga de 2910,5305 kgf.

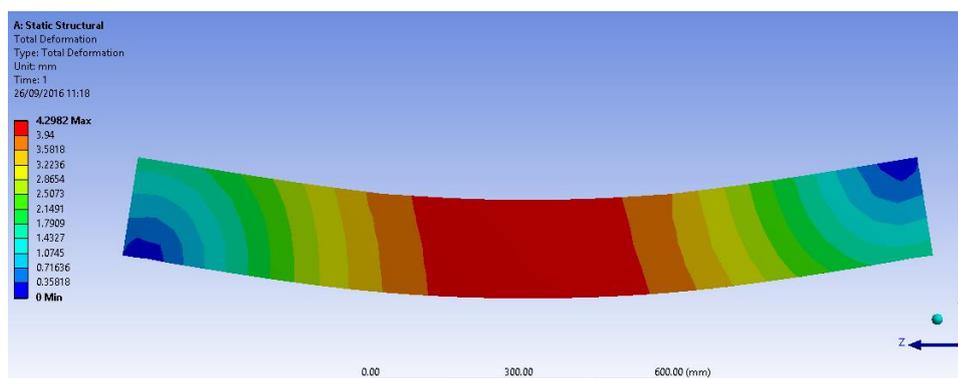


Figura 35. Deformación obtenida de simulación con carga de 2910,5305 sobre viga.

Tabla 9.

Comparación de deformaciones real vs simulación en vigas sin revestimiento.

Comparación de resultados		
	REAL	SIMULACIÓN
Carga (kgf)	Deformación (mm)	Deformación (mm)
1414,8605	1,925	2,1514
2910,5305	5,066	4,2982

Para los valores de deformaciones mostradas en la tabla anterior, el error porcentual de deformaciones para una carga de 1414,8605 kgf es de 10,52% mientras que para una carga de 2910,5305 kgf es de 17,86%.

Considerando los porcentajes de error mencionados y la variación de deformaciones existentes entre vigas ensayadas, se considera que el diseño de la viga es válido.

### **3.8 Generación de planos**

VER ANEXO 4

## CAPÍTULO IV

### 4. CONSTRUCCIÓN

Una vez establecidas las dimensiones de la sección transversal y de la armadura que se colocará internamente de la viga, se procedió a la obtención de los materiales necesarios para la construcción de las 9 vigas compuestas.

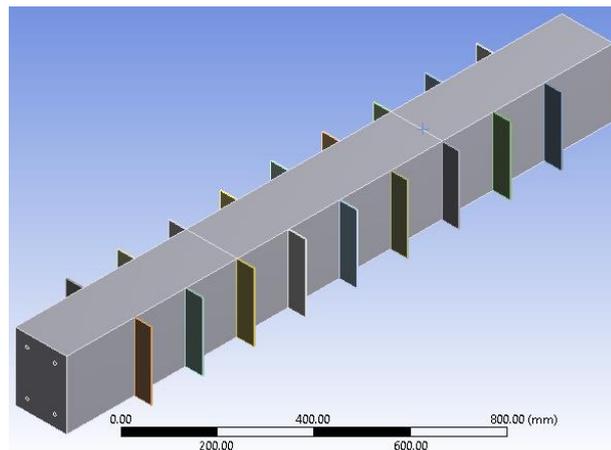
Para lo cual se compró armaduras, de las dimensiones establecidas es decir de 14 cm x 9 cm y con varilla de 9 mm de diámetro. La presentación de las armaduras es de 12 m de largo, para lo cual se requirió comprar dos armaduras en total (12 m cada una) y solicitando el corte en tramos de 1,6 m, obteniendo así los 9 tramos de 1,6 m. Este proceso se lo realizó por medio de la empresa DIPAC MANTA SA.

#### 4.1 Construcción de vigas de acero con atiesadores

La construcción de vigas con atiesadores no se realizó debido a que el proyecto se centró en el análisis del comportamiento de mecánico de las vigas con refuerzo de fibras, especialmente las vigas con refuerzo longitudinal PET.

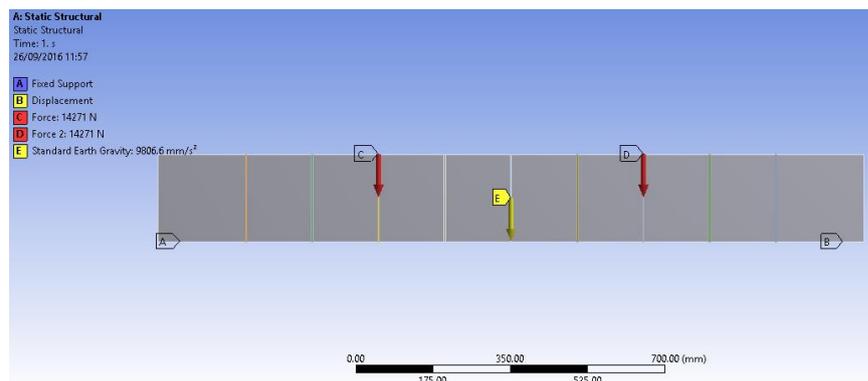
La utilización de atiesadores en este proyecto podría desviar la atención del objetivo principal de este proyecto, además de no ser un aporte concreto en la investigación. La utilización de los mismos pudiese ser causante de distorsión en los resultados, no permitiendo así dar la magnitud real de aporte del reforzamiento con fibras en la capacidad a flexión de las vigas compuestas.

Sin embargo, se realizó la simulación en software CAD, de una viga de hormigón armado, con atiesadores laterales para poder apreciar el aporte de estos en la capacidad a flexión.

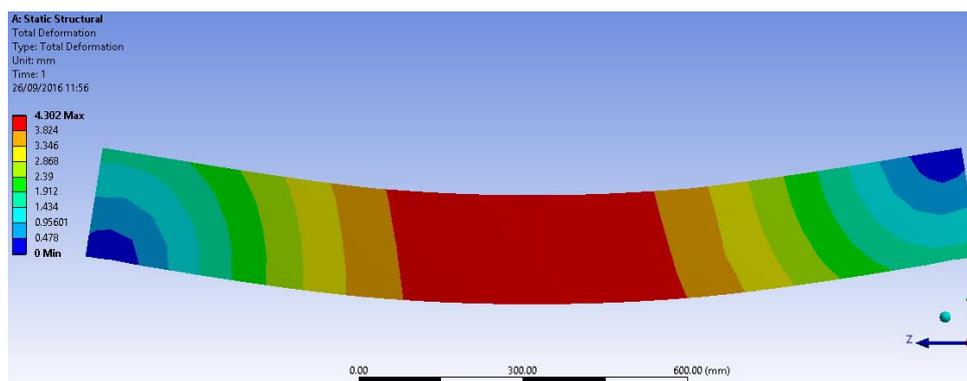


**Figura 36. Esquematación 3D de viga con reforzamiento lateral de atiesadores.**

El objetivo de esta simulación, es identificar si el uso de atiesadores metálicos (acero estructural) aportan a la viga en su capacidad a flexión, para ello se colocó 9 atiesadores por cada cara lateral de la viga de hormigón, sumando en total 18 atiesadores. Las medidas de los atiesadores fueron 200 mm de largo, 50 mm de ancho y 3 mm de espesor, separados entre ellos 150 mm.



**Figura 37. Esquema de ensayo a flexión sobre viga con atiesadores, con carga 2910,5305 kgf.**



**Figura 38. Deformación obtenida de simulación con carga 2910,5305 kgf sobre viga.**

**Tabla 10.**

**Comparación de resultados de deformación entre viga sin atiesadores vs viga con atiesadores.**

Comparación de resultados		
	VIGA SIN ATIESADORES SIMULACIÓN (SIMULACIÓN)	VIGA CON ATIESADORES (SIMULACIÓN)
Carga (kgf)	Deformación (mm)	Deformación (mm)
1414,8605	2,1514	2,156
2910,5305	4,2982	4,302

En la Tabla 10 se puede observar que la deflexión en el ensayo a flexión sobre una viga con atiesadores con respecto a una viga sin atiesadores es prácticamente la misma, con lo cual se puede afirmar que el uso de atiesadores transversales laterales no aporta en la capacidad a flexión de la viga.

## 4.2 Construcción de vigas de acero sin atiesadores

La construcción de las 9 vigas de hormigón armado conllevó el siguiente proceso:

- Diseño de la viga
- Obtención de materiales de construcción

En el caso del refuerzo de acero (varillas corrugadas) se adquirió la armadura en las dimensiones establecidas, es decir de 14 cm x 9 cm x 9 mm.

- Proceso de fundición de vigas

El proceso de fundición de las vigas conlleva subprocesos, los cuales se pueden dividir en dosificación de hormigón, encofrado y el proceso en sí de fundición.

La dosificación de hormigón consiste en determinar la cantidad de materiales necesarios para la elaboración de la mezcla del hormigón, el encofrado consiste en la elaboración de los cajones, en los cuales se colocará la armadura y se fundirá el hormigón y la fundición de vigas consiste en la elaboración de la mezcla del hormigón y la colocación de ella dentro de los cajones de madera, para así darle la forma geométrica deseada a la viga.

Se detallan en el punto 4,4 y 4.5 mayor información en cuanto a estos procesos.

### 4.3 Colocación de galgas extensiométricas

El objetivo del ensayo fue medir la deflexión de las vigas, mas no la deformación unitaria, por tanto, se decidió utilizar un comparador de reloj en vez de galgas extensiométricas.

El comparador de reloj utilizado tiene las siguientes características:

- Marca: Fowler
- Rango: 0 - 1 pulgada
- Apreciación: 0,001 pulgadas



**Figura 39. Comparador de reloj utilizado en ensayos.**

## 4.4 Fundición de hormigón en las vigas

### 4.4.1. Dosificación de hormigón

Se realizó la dosificación del hormigón, para obtener el mismo con una resistencia entre 210 – 240 kg/cm<sup>2</sup>, siguiendo el siguiente proceso.

- Para obtener la resistencia deseada se recomienda introducir 7 sacos de 50 kg de cemento por cada metro cubico de mezcla.
- Cálculo del volumen necesario para la construcción de las 9 vigas, añadiendo un factor de seguridad, para que no falte mezcla.

- Volumen unitario

$$V_u = 15\text{cm} * 20\text{cm} * 1.6\text{m} = 0.048\text{m}^3$$

- Volumen total, incluyendo factor de seguridad

$$V_t = 10 * V_u = 0.48\text{m}^3 \approx 0.6 \text{ m}^3$$

- Cálculo de sacos de cemento requeridos

$$7 \text{ sacos cemento} \text{ --- } 1 \text{ m}^3$$

$$X \text{ sacos cemento} \text{ --- } 0.6 \text{ m}^3$$

$$X \text{ sacos cemento} = 4.2 \approx 4.5 \text{ sacos de cemento}$$

La dosificación del hormigón se la realizó en base a los elementos disponibles para la construcción, para el cual se tiene un balde cúbico de volumen conocido.

- Volumen conocido de balde cubico

$$V_{balde} = 0.33\text{m} \times 0.33\text{m} \times 0.33\text{m} = 0.036 \frac{\text{m}^3}{\text{balde}}$$

- Volumen ocupado por los 4.5 sacos de cemento

$$0.036 \times 4.5 = 0.162\text{m}^3$$

- Volumen necesario de ripio y arena

$0.6\text{m}^3 - 0.162\text{m}^3 = 0.438\text{m}^3$ , este valor representa la cantidad en volumen a ocuparse entre arena y ripio en partes iguales para completar el medio metro cubico.

$$\frac{0.6 * 0.438\text{m}^3}{0.036 \frac{\text{m}^3}{\text{balde}}} = 7.3 \text{ baldes}$$

Es decir que serán necesarios 7 baldes de ripio y 7 baldes de arena. Se recomienda utilizar  $200\text{cm}^3$  de acelerante por cada saco de cemento, en este caso se agregó 1 litro de acelerante por toda la mezcla.

#### 4.4.2. Encofrado

Para la construcción del encofrado se solicitó el corte de madera Triplex de segunda mano, las cuales fueron de 15 mm de espesor.

Requiriendo así:

- 9 unidades de 18 cm de ancho por 1.6 m de largo, las cuales fueron utilizadas para las bases de las vigas.
- 18 unidades de 20 cm de ancho por 1.6 m de largo, las cuales fueron utilizadas para los costados de las vigas.
- Las tapas de los cajones, se obtuvieron de los sobrantes de madera cortada.
- Se construyó los cajones, uniéndolos por medio de clavos de dos pulgadas.

La construcción del encofrado se realizó el día 17 de junio del 2016, entre las 07H30 y 09H30.



**Figura 40. Ensamble de encofrados.**



**Figura 41. Colocación de armaduras en el interior de los cajones.**

#### **4.4.3. Fundición de vigas**

Para el proceso de fundición de las 9 vigas, se elaboró la mezcla del hormigón, mezclando todos los componentes antes mencionados, es decir:

- 4,5 sacos de cemento de 50 kg
- 7 baldes cúbicos de arena para hormigón
- 7 baldes cúbicos de ripio
- Agua
- 1 lt de acelerante

La fundición se realizó el día 17 de junio del 2016, entre las 10H00 y 12H30.



**Figura 42. Fundición de vigas.**



**Figura 43. Fundición de vigas (2).**



**Figura 44. Fundición de vigas (3).**

#### **4.5 Proceso de curado del hormigón**

Durante los 28 días en promedio que el hormigón alcanza su máxima resistencia, se humectaron las vigas de 3 a 4 veces por día con abundante agua, humectando así todas las caras de las vigas.



**Figura 45. Desencofrado de vigas.**

El desencofrado de las vigas se lo realizó el día 26 de junio del 2016, es decir 9 días después de haber sido fundidas. Proceso en el cual se retiraron las maderas que envolvían a las vigas para darles la geometría deseada, únicamente sin retirar las maderas bases, las cuales protegieron la superficie inferior de las vigas.

#### **4.6 Proceso de verificación de geometría**

El proceso de verificación de geometría, se realizó en las 9 vigas, antes de pasar al proceso de reforzamiento.

La verificación de geometría consistió en medir las vigas tanto en longitud como en dimensiones de sección transversal. Las dimensiones de sección transversal se realizaron en ambos extremos de la viga y en el centro de la viga.

La medición se realizó por medio de un flexómetro de capacidad 5 metros.

Vale la pena recordar las dimensiones establecidas:

- Longitud establecida: 1,6 metros
- Ancho: 15 centímetros
- Alto: 20 centímetros

**Tabla 11.**  
**Verificación de geometría.**

<b>Verificación de geometría</b>			
<b># Viga</b>	<b>Longitud (cm)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Ancho (cm)</b>
1 s/r	160,2	20,2	14,8
2 s/r	160,4	20	15
3 s/r	159,8	20,2	15
1 PET	160,6	19,8	15,2
2 PET	160,2	20,2	14,8
3 PET	160	19,8	14,8
1 FC	159,8	20	15
2 FC	160,4	20,2	15
3 FC	160	19,8	15,2

#### **4.7 Colocación de fibras de refuerzo PET**

Para este proceso se adquirió el adhesivo epóxico Sikadur 301, el cual se lo obtuvo en Colombia, por medio de la empresa COVAL.

El reforzamiento externo con fibra PET de las vigas se lo realizó en la Universidad De Las Fuerzas Armadas el día 27 de julio del 2016, siguiendo el procedimiento detallado a continuación:

- Cortar fibra de PET en dimensiones establecidas, 50 cm x 1.60 m.
- Colocar vigas en la posición que facilite la actividad de reforzamiento.
- Eliminar suciedad, impurezas de las vigas, por medio de brocha.
- Eliminar suciedad, impurezas de suelo, en el cual se extenderán fibras.
- Preparar mezcla de pegamento, mezclar componente A (3/4 Galón) y componente B (1/4 Galón) del pegamento Sikadur 301 y mezclar con una varilla metálica uniformemente hasta obtener una mezcla homogénea de volumen total 1 galón.
- Impregnación de pegamento en sentido longitudinal sobre fibras, por medio de rodillo, de tal forma que no exista superficie de fibra sin humectación.

- Impregnación de pegamento en sentido longitudinal sobre vigas, por medio de rodillo, de tal forma que no exista superficie de hormigón sin humectación.
- Colocación de refuerzo sobre vigas manualmente.
- Asentamiento de fibras sobre superficies, por medio de rodillo, únicamente en sentido longitudinal, en las tres caras en las cuales se pegó la fibra.
- Para todo este procedimiento es necesario la utilización de equipo de seguridad, esencialmente guantes, mandil y mascarilla; debido a que los componentes A y B del pegamento son químicos que reaccionan, se calientan y emanan un olor picante.



**Figura 46. Corte de fibra PET en medidas establecidas.**



**Figura 47. Colocación de vigas en posición para el reforzamiento.**



**Figura 48. Impregnación de adhesivo epóxico sobre superficies de vigas.**



**Figura 49. Colocación de refuerzos sobre vigas.**



**Figura 50. Vigas reforzadas.**

#### **4.8 Colocación de fibras de carbono**

El procedimiento de colocación de fibras de carbono sobre vigas de hormigón, es el mismo que se detalla en el punto 4.7.

El reforzamiento externo con fibra de carbono de las vigas se lo realizó en la Universidad De Las Fuerzas Armadas el día 27 de julio del 2016.



**Figura 51. Corte de fibra de carbono en medidas establecidas.**



**Figura 52. Colocación de vigas en posición para reforzamiento.**



**Figura 53. Impregnación de pegamento Sikadur 301 sobre fibras.**



**Figura 54. Impregnación de pegamento Sikadur 301 sobre vigas.**



**Figura 55. Colocación de refuerzos de fibras sobre vigas.**



**Figura 56. Vigas reforzadas.**

## CAPÍTULO V

### 5. ENSAYOS MECÁNICOS

#### 5.1 Preparación para el ensayo a flexión hasta la plastificación, condiciones de apoyo y carga.

Los ensayos a flexión sobre las vigas sin reforzamiento, vigas con refuerzo PET y vigas con refuerzo de fibra de carbono se realizaron en el pódico del laboratorio de mecánica de materiales, para lo cual se midió la deflexión por medio de un comparador de reloj y la carga por medio de la celda de carga, la misma que mide deformación unitaria; por medio de una fórmula establecida se transformó estos valores de deformación unitaria en valores de fuerza en kg.

La fórmula para transformar la deformación unitaria en fuerza es la siguiente:

$$y \text{ (kg)} = 1,3597 * x(\text{Def. Unit}) + 3,7605$$

La preparación del ensayo de flexión sobre las vigas incluyo el siguiente procedimiento:

- Marcar líneas de apoyo, de carga, de centro y de tercios sobre todas las vigas a ensayar.



Figura 57. Vigas marcadas.

- Colocar vigas bajo el pórtico del laboratorio de mecánica de materiales, asentadas sobre rodillos de apoyo.



**Figura 58. Viga colocada sobre rodillos de apoyo.**

- Medición del peso de viga de acero por medio de celda de carga.



**Figura 59. Pesaje de viga de acero (precarga) por medio de celda de carga.**

- Colocación de viga de acero sobre viga de hormigón, asentada sobre rodillos, los cuales transmitirán la carga generada por el pistón.



**Figura 60. Viga de hormigón con precarga (viga de acero).**

- Colocación de comparador de reloj sobre viga de hormigón, para medir deflexión.



**Figura 61. Comparador de reloj ubicado sobre viga de hormigón.**

El peso de la viga de acero es de 51,4 kg, peso el cual se consideró como precarga para los ensayos de flexión, cuyo valor será sumado al valor de carga aplicada durante ensayos.

## **5.2 Ensayo a flexión de vigas sin reforzamiento PET**

En este punto se detalla los ensayos de adherencia hechos sobre superficie de hormigón, utilizando diferentes pegamentos, con el fin de seleccionar el pegamento óptimo.

Para este proyecto fue fundamental la realización de este ensayo, ya que la adherencia entre hormigón y fibra es fundamental en el estudio, haciendo una analogía con soldadura, cuando se realiza una soldadura y se somete el elemento a algún tipo de falla, lo que se espera es que falle el elemento mas no la soldadura, así mismo se debe considerar en este caso, el pegamento que hace las veces de soldadura, no debe fallar cuando se sometan las vigas a carga a flexión.

Para este ensayo se estudió varios tipos de pegamentos junto con dos tipos de fibra de PET, y una muestra de fibra de carbono.

Entre los pegamentos puestos a prueba estuvieron: Sikadur 31, Griffon WDF-05, Superbonder (Conocida como brujita), UHU (común y corriente) y Sikadur 301.

Descartando sin necesidad de un ensayo mecánico, debido a su pobre adherencia generada entre fibra PET y hormigón, los siguientes pegamentos: Sikadur 31, Superbonder y UHU.

Ya que el objetivo principal de este ensayo de adherencia fue conseguir el pegamento “ideal” para unir fibra PET con hormigón, en un principio la fibra de carbono no intervino en este ensayo,

Así mismo se puso a prueba dos tipos de fibra PET: fibra PET obtenida directamente de botellas recicladas y fibra PET a manera de hilo obtenida en la empresa ENKADOR SA.

Descartando sin necesidad de ensayo mecánico, debido a su pobre compatibilidad con pegamentos y con hormigón, la fibra PET que se obtiene directamente de botellas recicladas.

Quedando finalmente como sujetos de análisis, la compatibilidad entre: fibra PET (hilo) + Sikadur 301 junto con hormigón, fibra PET (hilo) + Griffon WDF-05 junto con hormigón y adicionalmente un ensayo extra para comprobar la adherencia de fibra de carbono con hormigón por medio del pegamento Sikadur 301, pegamento el cual es comúnmente utilizado para el reforzamiento de estructuras con fibra de carbono.

#### **5.2.1. Ensayo de adherencia PET – GRIFFON WDF-05**

Área de pegado:

- Largo: 73.5 mm
- Ancho: 29.3 mm



**Figura 62. Fibras PET empleando Griffon (PVC) para el pegado.**

En el primer ensayo que se realizó, se tomaron los siguientes valores de cargas:

- Carga Máxima: 175 kg
- Peso Cabezal: 136 kg.
- # Fibras PET= 28



**Figura 63. Ensayo de tensión Fibra PET – Griffon – Hormigón.**

En este ensayo de tensión, el pegamento, es decir el Griffon WDF-05 se despegó del hormigón, es decir falló el medio de unión entre fibra y hormigón, por lo cual se descarta el uso de este pegamento para reforzar las vigas.

### **5.2.2. Ensayo de adherencia PET – SIKADUR 301**

Área de pegado:

- Largo: 73.5 mm
- Ancho: 30.9 mm



**Figura 64. Fibras PET empleando Sikadur 301 para el pegado.**

En el segundo ensayo que se realizó, se tomaron los siguientes valores de cargas:

- Carga Máxima: 175 kg
- Peso Cabezal: 136 kg.
- # Fibras PET= 51



**Figura 65. Ensayo de tensión Fibra PET – Sikadur 301 - Hormigón**

La carga total que soporto la fibra fue de: 39 kg.

La resistencia de cada fibra fue:

$$39\text{kg}/51 \text{ fibras} = 0.7647 \text{ kg/fibra.}$$

En este ensayo de tensión, el elemento que falló fue la fibra de PET, por lo que se garantiza el pegado entre fibra PET y hormigón, por medio del pegamento Sikadur 301.

### 5.2.3. Ensayo de adherencia Fibra de Carbono – SIKADUR 301

Área de pegado:

- Largo: 73.5 mm
- Ancho: 24 mm



**Figura 66. Fibras de carbono adherido a hormigón por medio de Sikadur 301.**

En el tercer ensayo que se realizó, se tomaron los siguientes valores de cargas:

- Carga Máxima: 341 kg
- Peso Cabezal: 136 kg.

A las fibras de carbono se la dividió por grupos de fibras, en este caso se dividió en 6 grupos de fibras.



**Figura 67. Ensayo de tensión Fibra de carbono – Sikadur 301 – Hormigón.**

La carga total que soportó la fibra fue de: 205 kg.

La resistencia de cada grupo de fibras fue:

$$205 \text{ kg} / 6 \text{ G.F} = 34.167 \text{ kg} / \text{G.F.}$$

En este ensayo de tensión, el elemento que falló fue la fibra de carbono, por lo que se garantiza el pegado entre fibra de carbono y hormigón, por medio del pegamento Sikadur 301.

#### **5.2.4. Resistencia soportada por fibras por unidad de ancho**

Para este análisis, se tomó únicamente en cuenta dos variantes, fibra PET + sikadur 301 y fibra de carbono + sikadur 301, en los cuales, el ensayo de adherencia demostró que la unión fibra/hormigón por medio del pegamento mencionado, es correcta.

##### Fibra PET + Sikadur 301

- Carga soportada: 39 kg
- Ancho: 30.9 mm
- F/Ancho = 1.2621 kg/mm

##### Fibra de carbono + Sikadur 301

- Carga soportada: 205 kg
- Ancho: 24 mm
- F/Ancho = 8.5 kg/mm

Si sacamos una razón comparativa entre estos valores,  $8.5/1.2621=6.735$ , se puede concluir apresuradamente que la fibra carbono resiste a tensión 6.7 veces más que la fibra PET.

### **5.3 Ensayo a flexión en vigas sin reforzamiento de fibra de carbono**

#### **5.3.1. Viga #1**

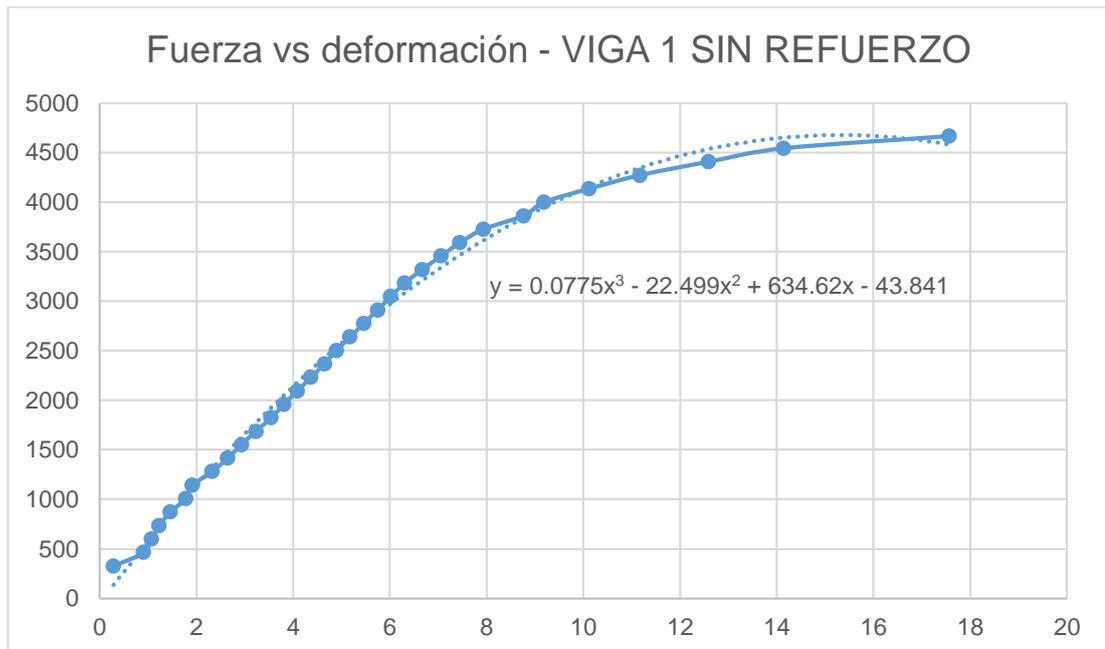
Datos del ensayo:

Tabla 12.

Datos ensayo flexión viga #1 sin refuerzo.

<b>Deformación unitaria</b>	<b>Fuerza (kg)</b>	<b>Precarga (kg)</b>	<b>Carga total (kg)</b>	<b>Deformación (mm)</b>
200	275,7005	51,4	327,1005	0,29
300	411,6705	51,4	463,0705	0,91
400	547,6405	51,4	599,0405	1,07
500	683,6105	51,4	735,0105	1,23
600	819,5805	51,4	870,9805	1,46
700	955,5505	51,4	1006,9505	1,78
800	1091,5205	51,4	1142,9205	1,92
900	1227,4905	51,4	1278,8905	2,32
1000	1363,4605	51,4	1414,8605	2,65
1100	1499,4305	51,4	1550,8305	2,93
1200	1635,4005	51,4	1686,8005	3,23
1300	1771,3705	51,4	1822,7705	3,55
1400	1907,3405	51,4	1958,7405	3,81
1500	2043,3105	51,4	2094,7105	4,09
1600	2179,2805	51,4	2230,6805	4,37
1700	2315,2505	51,4	2366,6505	4,65
1800	2451,2205	51,4	2502,6205	4,9
1900	2587,1905	51,4	2638,5905	5,18
2000	2723,1605	51,4	2774,5605	5,46
2100	2859,1305	51,4	2910,5305	5,75
2200	2995,1005	51,4	3046,5005	6,02
2300	3131,0705	51,4	3182,4705	6,31
2400	3267,0405	51,4	3318,4405	6,67
2500	3403,0105	51,4	3454,4105	7,06
2600	3538,9805	51,4	3590,3805	7,45
2700	3674,9505	51,4	3726,3505	7,94
2800	3810,9205	51,4	3862,3205	8,77
2900	3946,8905	51,4	3998,2905	9,19
3000	4082,8605	51,4	4134,2605	10,12
3100	4218,8305	51,4	4270,2305	11,17
3200	4354,8005	51,4	4406,2005	12,59
3300	4490,7705	51,4	4542,1705	14,15
3390	4613,1435	51,4	4664,5435	17,57





**Figura 68. Gráfico fuerza - deformación – viga #1 sin refuerzo.**

Una vez obtenida la gráfica esfuerzo – deformación, se obtuvo la ecuación de la curva que más se asemeja, la misma que se integró con límites, para obtener el valor del trabajo realizado por esta viga.

$$W=58339,71 \text{ kg*mm}$$

### 5.3.2. Viga #2

Datos del ensayo:

**Tabla 13.**

**Datos ensayo flexión viga #2 sin refuerzo.**

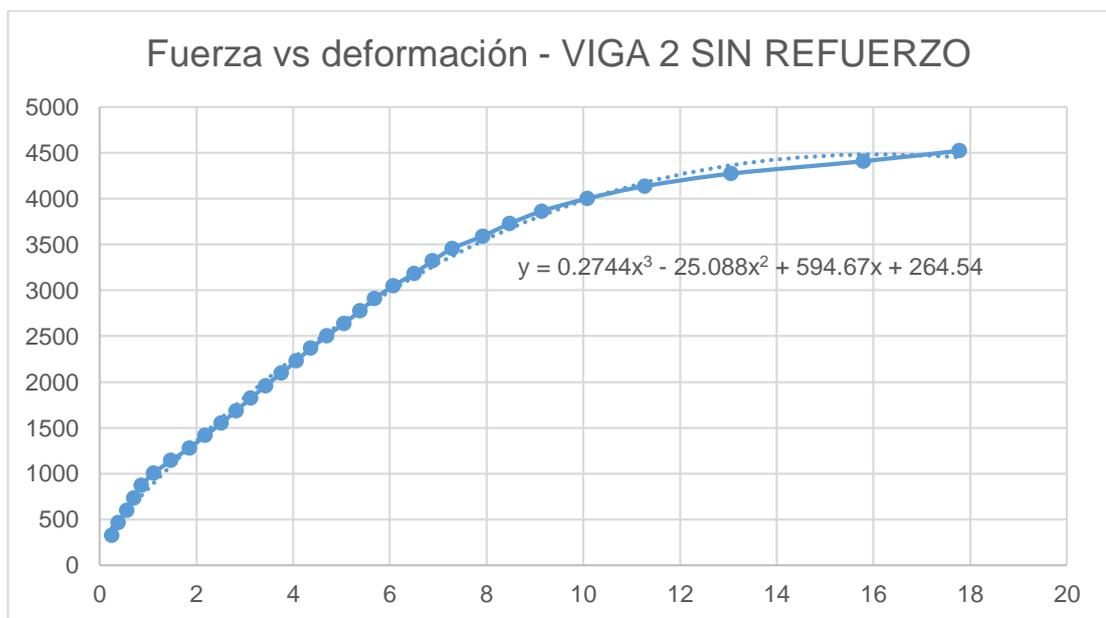
<b>Deformación unitaria</b>	<b>Fuerza (kg)</b>	<b>Precarga (kg)</b>	<b>Carga total (kg)</b>	<b>Deformación n (in)</b>	<b>Deformación (mm)</b>
200	275,700 5	51,4	327,1005	0,01	0,254
300	411,670 5	51,4	463,0705	0,015	0,381
400	547,640 5	51,4	599,0405	0,022	0,5588
500	683,610 5	51,4	735,0105	0,028	0,7112



600	819,580 5	51,4	870,9805	0,034	0,8636
700	955,550 5	51,4	1006,9505	0,044	1,1176
800	1091,52 05	51,4	1142,9205	0,058	1,4732
900	1227,49 05	51,4	1278,8905	0,073	1,8542
1000	1363,46 05	51,4	1414,8605	0,086	2,1844
1100	1499,43 05	51,4	1550,8305	0,099	2,5146
1200	1635,40 05	51,4	1686,8005	0,111	2,8194
1300	1771,37 05	51,4	1822,7705	0,123	3,1242
1400	1907,34 05	51,4	1958,7405	0,135	3,429
1500	2043,31 05	51,4	2094,7105	0,148	3,7592
1600	2179,28 05	51,4	2230,6805	0,16	4,064
1700	2315,25 05	51,4	2366,6505	0,172	4,3688
1800	2451,22 05	51,4	2502,6205	0,185	4,699
1900	2587,19 05	51,4	2638,5905	0,199	5,0546
2000	2723,16 05	51,4	2774,5605	0,212	5,3848
2100	2859,13 05	51,4	2910,5305	0,224	5,6896
2200	2995,10 05	51,4	3046,5005	0,239	6,0706
2300	3131,07 05	51,4	3182,4705	0,256	6,5024
2400	3267,04 05	51,4	3318,4405	0,271	6,8834



2500	3403,01 05	51,4	3454,4105	0,287	7,2898
2600	3538,98 05	51,4	3590,3805	0,312	7,9248
2700	3674,95 05	51,4	3726,3505	0,334	8,4836
2800	3810,92 05	51,4	3862,3205	0,36	9,144
2900	3946,89 05	51,4	3998,2905	0,397	10,0838
3000	4082,86 05	51,4	4134,2605	0,444	11,2776
3100	4218,83 05	51,4	4270,2305	0,514	13,0556
3200	4354,80 05	51,4	4406,2005	0,622	15,7988
3284	4469,01 53	51,4	4520,4153	0,7	17,78



**Figura 69. Gráfico fuerza - deformación – viga #2 sin refuerzo.**

Una vez obtenida la gráfica esfuerzo – deformación, se obtuvo la ecuación de la curva que más se asemeja, la misma que se integró con límites, para obtener el valor del trabajo realizado por esta viga.

$$W=58464,44 \text{ kg*mm}$$

### 5.3.3. Viga #3

Datos del ensayo:

**Tabla 14.**

**Datos ensayo flexión viga #3 sin refuerzo.**

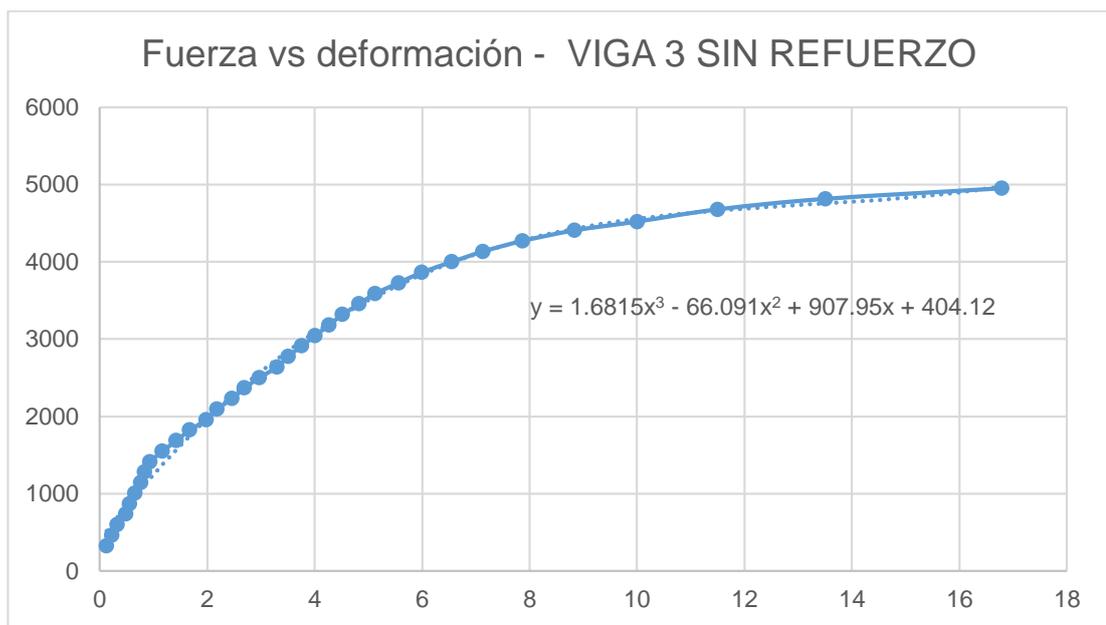
<b>Deformación unitaria</b>	<b>Fuerza (kg)</b>	<b>Precarga (kg)</b>	<b>Carga total (kg)</b>	<b>Deformación n (in)</b>	<b>Deformación (mm)</b>
200	275,700 5	51,4	327,1005	0,005	0,127
300	411,670 5	51,4	463,0705	0,009	0,2286
400	547,640 5	51,4	599,0405	0,013	0,3302
500	683,610 5	51,4	735,0105	0,019	0,4826
600	819,580 5	51,4	870,9805	0,022	0,5588
700	955,550 5	51,4	1006,9505	0,026	0,6604
800	1091,52 05	51,4	1142,9205	0,03	0,762
900	1227,49 05	51,4	1278,8905	0,033	0,8382
1000	1363,46 05	51,4	1414,8605	0,037	0,9398
1100	1499,43 05	51,4	1550,8305	0,046	1,1684
1200	1635,40 05	51,4	1686,8005	0,056	1,4224
1300	1771,37 05	51,4	1822,7705	0,066	1,6764



1400	1907,34 05	51,4	1958,7405	0,078	1,9812
1500	2043,31 05	51,4	2094,7105	0,086	2,1844
1600	2179,28 05	51,4	2230,6805	0,097	2,4638
1700	2315,25 05	51,4	2366,6505	0,106	2,6924
1800	2451,22 05	51,4	2502,6205	0,117	2,9718
1900	2587,19 05	51,4	2638,5905	0,13	3,302
2000	2723,16 05	51,4	2774,5605	0,138	3,5052
2100	2859,13 05	51,4	2910,5305	0,148	3,7592
2200	2995,10 05	51,4	3046,5005	0,158	4,0132
2300	3131,07 05	51,4	3182,4705	0,168	4,2672
2400	3267,04 05	51,4	3318,4405	0,178	4,5212
2500	3403,01 05	51,4	3454,4105	0,19	4,826
2600	3538,98 05	51,4	3590,3805	0,202	5,1308
2700	3674,95 05	51,4	3726,3505	0,219	5,5626
2800	3810,92 05	51,4	3862,3205	0,236	5,9944
2900	3946,89 05	51,4	3998,2905	0,258	6,5532
3000	4082,86 05	51,4	4134,2605	0,281	7,1374
3100	4218,83 05	51,4	4270,2305	0,31	7,874
3200	4354,80 05	51,4	4406,2005	0,348	8,8392



3284	4469,01 53	51,4	4520,4153	0,394	10,0076
3400	4626,74 05	51,4	4678,1405	0,453	11,5062
3500	4762,71 05	51,4	4814,1105	0,532	13,5128
3600	4898,68 05	51,4	4950,0805	0,661	16,7894



**Figura 70. Gráfico fuerza - deformación – viga #3 sin refuerzo.**

Una vez obtenida la gráfica esfuerzo – deformación, se obtuvo la ecuación de la curva que más se asemeja, la misma que se integró con límites, para obtener el valor del trabajo realizado por esta viga.

$$W=63788,09 \text{ kg*mm}$$

## **5.4 Ensayo a flexión de vigas con reforzamiento PET**

### **5.4.1. Viga #1**

Datos del ensayo:

Tabla 15.

## Datos ensayo flexión viga #1 refuerzo de PET.

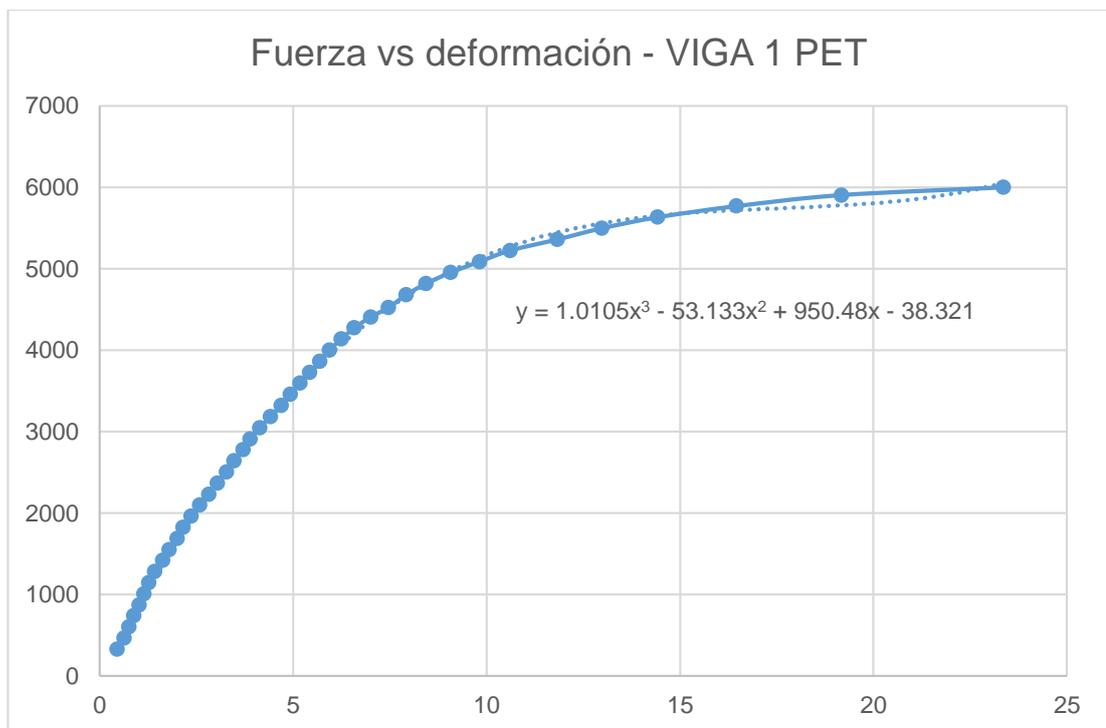
Deformación unitaria	Fuerza (kg)	Precarga (kg)	Carga total (kg)	Deformación (in)	Deformación (mm)
200	275,700 5	51,4	327,1005	0,018	0,4572
300	411,670 5	51,4	463,0705	0,025	0,635
400	547,640 5	51,4	599,0405	0,03	0,762
500	683,610 5	51,4	735,0105	0,035	0,889
600	819,580 5	51,4	870,9805	0,04	1,016
700	955,550 5	51,4	1006,9505	0,045	1,143
800	1091,52 05	51,4	1142,9205	0,05	1,27
900	1227,49 05	51,4	1278,8905	0,056	1,4224
1000	1363,46 05	51,4	1414,8605	0,064	1,6256
1100	1499,43 05	51,4	1550,8305	0,071	1,8034
1200	1635,40 05	51,4	1686,8005	0,079	2,0066
1300	1771,37 05	51,4	1822,7705	0,085	2,159
1400	1907,34 05	51,4	1958,7405	0,093	2,3622
1500	2043,31 05	51,4	2094,7105	0,102	2,5908
1600	2179,28 05	51,4	2230,6805	0,111	2,8194
1700	2315,25 05	51,4	2366,6505	0,12	3,048



1800	2451,22 05	51,4	2502,6205	0,129	3,2766
1900	2587,19 05	51,4	2638,5905	0,137	3,4798
2000	2723,16 05	51,4	2774,5605	0,146	3,7084
2100	2859,13 05	51,4	2910,5305	0,153	3,8862
2200	2995,10 05	51,4	3046,5005	0,163	4,1402
2300	3131,07 05	51,4	3182,4705	0,174	4,4196
2400	3267,04 05	51,4	3318,4405	0,185	4,699
2500	3403,01 05	51,4	3454,4105	0,194	4,9276
2600	3538,98 05	51,4	3590,3805	0,204	5,1816
2700	3674,95 05	51,4	3726,3505	0,214	5,4356
2800	3810,92 05	51,4	3862,3205	0,224	5,6896
2900	3946,89 05	51,4	3998,2905	0,234	5,9436
3000	4082,86 05	51,4	4134,2605	0,246	6,2484
3100	4218,83 05	51,4	4270,2305	0,259	6,5786
3200	4354,80 05	51,4	4406,2005	0,276	7,0104
3284	4469,01 53	51,4	4520,4153	0,294	7,4676
3400	4626,74 05	51,4	4678,1405	0,312	7,9248
3500	4762,71 05	51,4	4814,1105	0,332	8,4328
3600	4898,68 05	51,4	4950,0805	0,357	9,0678



3700	5034,65 05	51,4	5086,0505	0,387	9,8298
3800	5170,62 05	51,4	5222,0205	0,418	10,6172
3900	5306,59 05	51,4	5357,9905	0,466	11,8364
4000	5442,56 05	51,4	5493,9605	0,511	12,9794
4100	5578,53 05	51,4	5629,9305	0,568	14,4272
4200	5714,50 05	51,4	5765,9005	0,648	16,4592
4300	5850,47 05	51,4	5901,8705	0,755	19,177
4370	5945,64 95	51,4	5997,0495	0,92	23,368



**Figura 71. Gráfico fuerza - deformación – viga #1 refuerzo PET.**

Una vez obtenida la gráfica esfuerzo – deformación, se obtuvo la ecuación de la curva que más se asemeja, la misma que se integró con límites, para obtener el valor del trabajo realizado por esta viga.

$$W=107879,64 \text{ kg*mm}$$

#### 5.4.2. Viga #2

Datos del ensayo:

**Tabla 16.**

**Datos ensayo flexión viga #2 refuerzo de PET.**

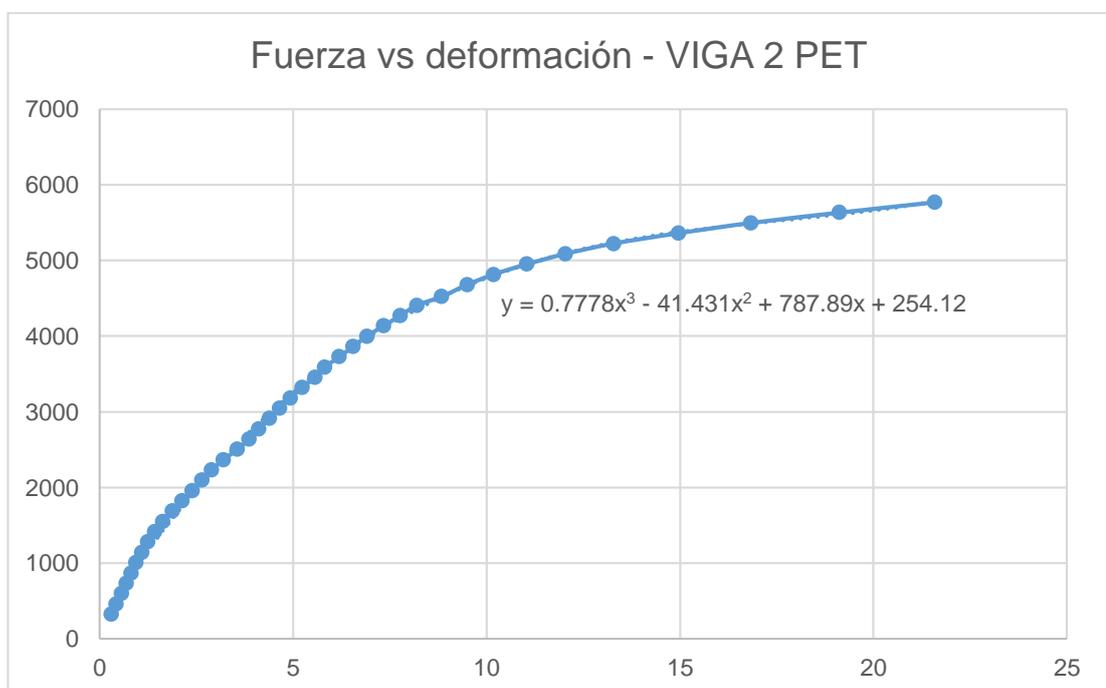
<b>Deformación unitaria</b>	<b>Fuerza (kg)</b>	<b>Precarga (kg)</b>	<b>Carga total (kg)</b>	<b>Deformación (in)</b>	<b>Deformación (mm)</b>
200	275,700 5	51,4	327,1005	0,012	0,3048
300	411,670 5	51,4	463,0705	0,017	0,4318
400	547,640 5	51,4	599,0405	0,022	0,5588
500	683,610 5	51,4	735,0105	0,027	0,6858
600	819,580 5	51,4	870,9805	0,032	0,8128
700	955,550 5	51,4	1006,9505	0,037	0,9398
800	1091,52 05	51,4	1142,9205	0,043	1,0922
900	1227,49 05	51,4	1278,8905	0,049	1,2446
1000	1363,46 05	51,4	1414,8605	0,056	1,4224
1100	1499,43 05	51,4	1550,8305	0,064	1,6256
1200	1635,40 05	51,4	1686,8005	0,074	1,8796
1300	1771,37 05	51,4	1822,7705	0,084	2,1336



1400	1907,34 05	51,4	1958,7405	0,094	2,3876
1500	2043,31 05	51,4	2094,7105	0,104	2,6416
1600	2179,28 05	51,4	2230,6805	0,114	2,8956
1700	2315,25 05	51,4	2366,6505	0,126	3,2004
1800	2451,22 05	51,4	2502,6205	0,14	3,556
1900	2587,19 05	51,4	2638,5905	0,152	3,8608
2000	2723,16 05	51,4	2774,5605	0,162	4,1148
2100	2859,13 05	51,4	2910,5305	0,173	4,3942
2200	2995,10 05	51,4	3046,5005	0,183	4,6482
2300	3131,07 05	51,4	3182,4705	0,194	4,9276
2400	3267,04 05	51,4	3318,4405	0,206	5,2324
2500	3403,01 05	51,4	3454,4105	0,219	5,5626
2600	3538,98 05	51,4	3590,3805	0,229	5,8166
2700	3674,95 05	51,4	3726,3505	0,244	6,1976
2800	3810,92 05	51,4	3862,3205	0,258	6,5532
2900	3946,89 05	51,4	3998,2905	0,272	6,9088
3000	4082,86 05	51,4	4134,2605	0,289	7,3406
3100	4218,83 05	51,4	4270,2305	0,306	7,7724
3200	4354,80 05	51,4	4406,2005	0,323	8,2042



3284	4469,01 53	51,4	4520,4153	0,348	8,8392
3400	4626,74 05	51,4	4678,1405	0,374	9,4996
3500	4762,71 05	51,4	4814,1105	0,401	10,1854
3600	4898,68 05	51,4	4950,0805	0,435	11,049
3700	5034,65 05	51,4	5086,0505	0,474	12,0396
3800	5170,62 05	51,4	5222,0205	0,523	13,2842
3900	5306,59 05	51,4	5357,9905	0,589	14,9606
4000	5442,56 05	51,4	5493,9605	0,663	16,8402
4100	5578,53 05	51,4	5629,9305	0,753	19,1262
4200	5714,50 05	51,4	5765,9005	0,85	21,59



**Figura 72. Gráfico fuerza - deformación – viga #2 refuerzo PET.**

Una vez obtenida la gráfica esfuerzo – deformación, se obtuvo la ecuación de la curva que más se asemeja, la misma que se integró con límites, para obtener el valor del trabajo realizado por esta viga.

$$W=92267,69 \text{ kg*mm}$$

### 5.4.3. Viga #3

Datos del ensayo:

**Tabla 17.**

**Datos ensayo flexión viga #3 refuerzo de PET.**

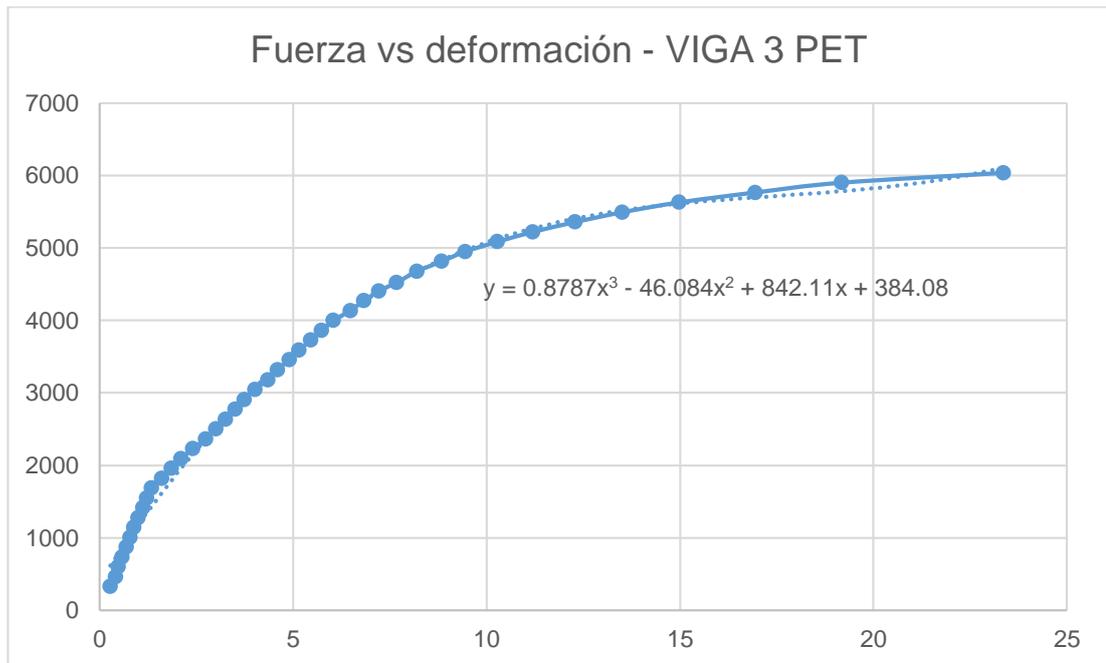
<b>Deformación unitaria</b>	<b>Fuerza (kg)</b>	<b>Precarga (kg)</b>	<b>Carga total (kg)</b>	<b>Deformación (in)</b>	<b>Deformación (mm)</b>
200	275,700 5	51,4	327,1005	0,011	0,2794
300	411,670 5	51,4	463,0705	0,016	0,4064
400	547,640 5	51,4	599,0405	0,019	0,4826
500	683,610 5	51,4	735,0105	0,023	0,5842
600	819,580 5	51,4	870,9805	0,027	0,6858
700	955,550 5	51,4	1006,9505	0,031	0,7874
800	1091,52 05	51,4	1142,9205	0,035	0,889
900	1227,49 05	51,4	1278,8905	0,039	0,9906
1000	1363,46 05	51,4	1414,8605	0,044	1,1176
1100	1499,43 05	51,4	1550,8305	0,048	1,2192
1200	1635,40 05	51,4	1686,8005	0,053	1,3462
1300	1771,37 05	51,4	1822,7705	0,063	1,6002



1400	1907,34 05	51,4	1958,7405	0,073	1,8542
1500	2043,31 05	51,4	2094,7105	0,083	2,1082
1600	2179,28 05	51,4	2230,6805	0,095	2,413
1700	2315,25 05	51,4	2366,6505	0,108	2,7432
1800	2451,22 05	51,4	2502,6205	0,118	2,9972
1900	2587,19 05	51,4	2638,5905	0,128	3,2512
2000	2723,16 05	51,4	2774,5605	0,138	3,5052
2100	2859,13 05	51,4	2910,5305	0,147	3,7338
2200	2995,10 05	51,4	3046,5005	0,158	4,0132
2300	3131,07 05	51,4	3182,4705	0,171	4,3434
2400	3267,04 05	51,4	3318,4405	0,181	4,5974
2500	3403,01 05	51,4	3454,4105	0,193	4,9022
2600	3538,98 05	51,4	3590,3805	0,203	5,1562
2700	3674,95 05	51,4	3726,3505	0,215	5,461
2800	3810,92 05	51,4	3862,3205	0,226	5,7404
2900	3946,89 05	51,4	3998,2905	0,238	6,0452
3000	4082,86 05	51,4	4134,2605	0,255	6,477
3100	4218,83 05	51,4	4270,2305	0,269	6,8326
3200	4354,80 05	51,4	4406,2005	0,284	7,2136



3284	4469,01 53	51,4	4520,4153	0,302	7,6708
3400	4626,74 05	51,4	4678,1405	0,323	8,2042
3500	4762,71 05	51,4	4814,1105	0,348	8,8392
3600	4898,68 05	51,4	4950,0805	0,372	9,4488
3700	5034,65 05	51,4	5086,0505	0,405	10,287
3800	5170,62 05	51,4	5222,0205	0,441	11,2014
3900	5306,59 05	51,4	5357,9905	0,484	12,2936
4000	5442,56 05	51,4	5493,9605	0,532	13,5128
4100	5578,53 05	51,4	5629,9305	0,59	14,986
4200	5714,50 05	51,4	5765,9005	0,667	16,9418
4300	5850,47 05	51,4	5901,8705	0,755	19,177
4400	5986,44 05	51,4	6037,8405	0,92	23,368



**Figura 73. Gráfico fuerza - deformación – viga #3 refuerzo PET.**

Una vez obtenida la gráfica esfuerzo – deformación, se obtuvo la ecuación de la curva que más se asemeja, la misma que se integró con límites, para obtener el valor del trabajo realizado por esta viga.

$$W=108245 \text{ kg*mm}$$

## 5.5 Ensayo a flexión de vigas con reforzamiento de fibra de carbono

### 5.5.1. Viga #1

Datos del ensayo:

**Tabla 18.**

**Datos ensayo flexión viga #1 refuerzo de fibra de carbono.**

Deformación unitaria	Fuerza (kg)	Precarga (kg)	Carga total (kg)	Deformación n (in)	Deformación (mm)
200	275,700 5	51,4	327,1005	0,012	0,3048



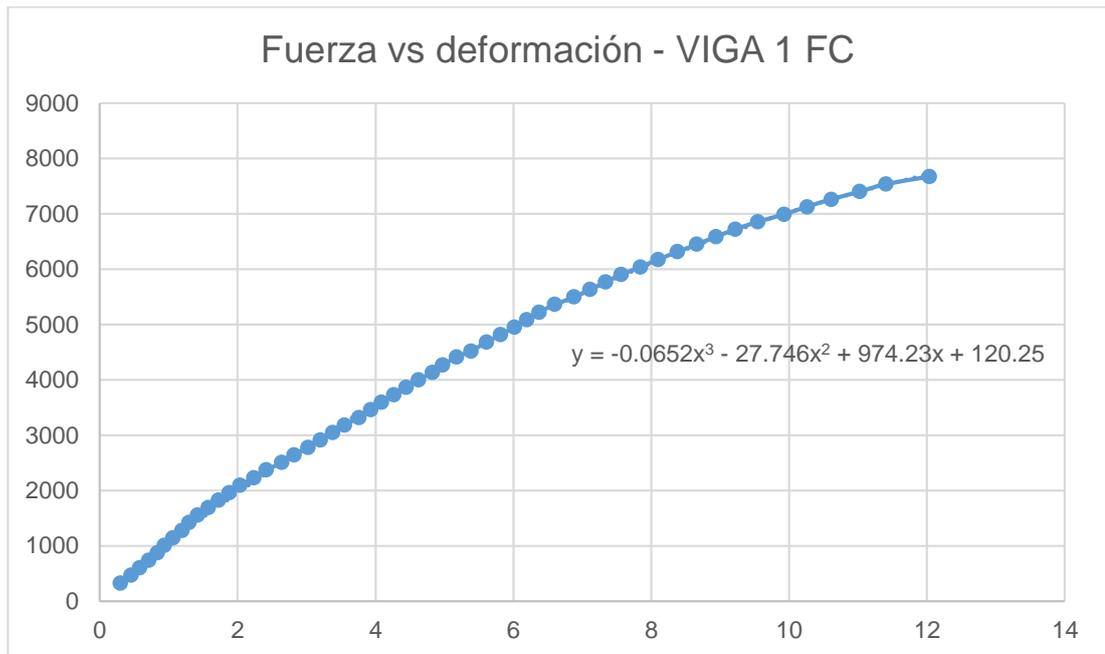
300	411,670 5	51,4	463,0705	0,018	0,4572
400	547,640 5	51,4	599,0405	0,023	0,5842
500	683,610 5	51,4	735,0105	0,028	0,7112
600	819,580 5	51,4	870,9805	0,033	0,8382
700	955,550 5	51,4	1006,9505	0,037	0,9398
800	1091,52 05	51,4	1142,9205	0,042	1,0668
900	1227,49 05	51,4	1278,8905	0,047	1,1938
1000	1363,46 05	51,4	1414,8605	0,051	1,2954
1100	1499,43 05	51,4	1550,8305	0,056	1,4224
1200	1635,40 05	51,4	1686,8005	0,062	1,5748
1300	1771,37 05	51,4	1822,7705	0,068	1,7272
1400	1907,34 05	51,4	1958,7405	0,074	1,8796
1500	2043,31 05	51,4	2094,7105	0,08	2,032
1600	2179,28 05	51,4	2230,6805	0,088	2,2352
1700	2315,25 05	51,4	2366,6505	0,095	2,413
1800	2451,22 05	51,4	2502,6205	0,104	2,6416
1900	2587,19 05	51,4	2638,5905	0,111	2,8194
2000	2723,16 05	51,4	2774,5605	0,119	3,0226
2100	2859,13 05	51,4	2910,5305	0,126	3,2004



2200	2995,10 05	51,4	3046,5005	0,133	3,3782
2300	3131,07 05	51,4	3182,4705	0,14	3,556
2400	3267,04 05	51,4	3318,4405	0,148	3,7592
2500	3403,01 05	51,4	3454,4105	0,155	3,937
2600	3538,98 05	51,4	3590,3805	0,161	4,0894
2700	3674,95 05	51,4	3726,3505	0,168	4,2672
2800	3810,92 05	51,4	3862,3205	0,175	4,445
2900	3946,89 05	51,4	3998,2905	0,182	4,6228
3000	4082,86 05	51,4	4134,2605	0,19	4,826
3100	4218,83 05	51,4	4270,2305	0,196	4,9784
3200	4354,80 05	51,4	4406,2005	0,204	5,1816
3284	4469,01 53	51,4	4520,4153	0,212	5,3848
3400	4626,74 05	51,4	4678,1405	0,221	5,6134
3500	4762,71 05	51,4	4814,1105	0,229	5,8166
3600	4898,68 05	51,4	4950,0805	0,237	6,0198
3700	5034,65 05	51,4	5086,0505	0,244	6,1976
3800	5170,62 05	51,4	5222,0205	0,251	6,3754
3900	5306,59 05	51,4	5357,9905	0,26	6,604
4000	5442,56 05	51,4	5493,9605	0,271	6,8834



4100	5578,53 05	51,4	5629,9305	0,28	7,112
4200	5714,50 05	51,4	5765,9005	0,289	7,3406
4300	5850,47 05	51,4	5901,8705	0,298	7,5692
4400	5986,44 05	51,4	6037,8405	0,309	7,8486
4500	6122,41 05	51,4	6173,8105	0,319	8,1026
4600	6258,38 05	51,4	6309,7805	0,33	8,382
4700	6394,35 05	51,4	6445,7505	0,341	8,6614
4800	6530,32 05	51,4	6581,7205	0,352	8,9408
4900	6666,29 05	51,4	6717,6905	0,363	9,2202
5000	6802,26 05	51,4	6853,6605	0,376	9,5504
5100	6938,23 05	51,4	6989,6305	0,391	9,9314
5200	7074,20 05	51,4	7125,6005	0,404	10,2616
5300	7210,17 05	51,4	7261,5705	0,418	10,6172
5400	7346,14 05	51,4	7397,5405	0,434	11,0236
5500	7482,11 05	51,4	7533,5105	0,449	11,4046
5600	7618,08 05	51,4	7669,4805	0,474	12,0396



**Figura 74. Gráfico fuerza - deformación – viga #1 refuerzo fibra de carbono.**

Una vez obtenida la gráfica esfuerzo – deformación, se obtuvo la ecuación de la curva que más se asemeja, la misma que se integró con límites, para obtener el valor del trabajo realizado por esta viga.

$$W=55494,56 \text{ kg*mm}$$

### 5.5.2. Viga #2

Datos del ensayo:

**Tabla 19.**

**Datos ensayo flexión viga #2 refuerzo de fibra de carbono.**

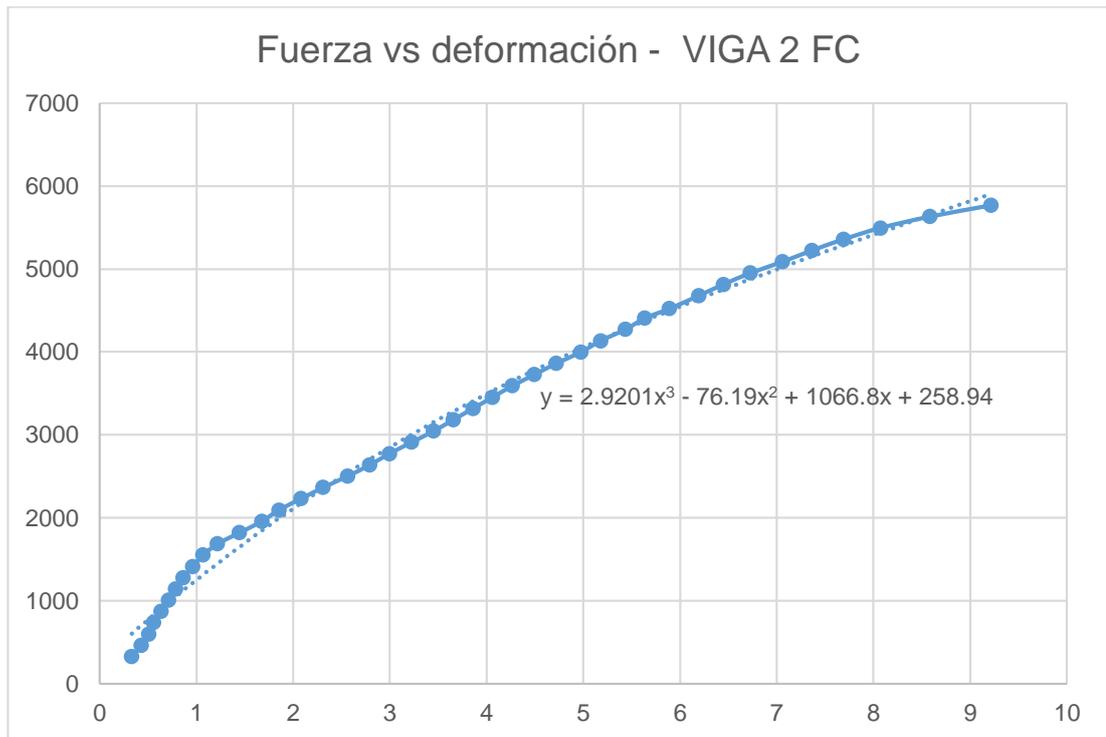
Deformación unitaria	Fuerza (kg)	Precarga (kg)	Carga total (kg)	Deformación n (in)	Deformación (mm)
200	275,700 5	51,4	327005	0,013	0,3302
300	411,670 5	51,4	463,0705	0,017	0,4318
400	547,640 5	51,4	599,0405	0,02	0,508
500	683,610 5	51,4	735,0105	0,022	0,5588



600	819,580 5	51,4	870,9805	0,025	0,635
700	955,550 5	51,4	1006,9505	0,028	0,7112
800	1091,52 05	51,4	1142,9205	0,031	0,7874
900	1227,49 05	51,4	1278,8905	0,034	0,8636
1000	1363,46 05	51,4	1414,8605	0,038	0,9652
1100	1499,43 05	51,4	1550,8305	0,042	1,0668
1200	1635,40 05	51,4	1686,8005	0,048	1,2192
1300	1771,37 05	51,4	1822,7705	0,057	1,4478
1400	1907,34 05	51,4	1958,7405	0,066	1,6764
1500	2043,31 05	51,4	2094,7105	0,073	1,8542
1600	2179,28 05	51,4	2230,6805	0,082	2,0828
1700	2315,25 05	51,4	2366,6505	0,091	2,3114
1800	2451,22 05	51,4	2502,6205	0,101	2,5654
1900	2587,19 05	51,4	2638,5905	0,11	2,794
2000	2723,16 05	51,4	2774,5605	0,118	2,9972
2100	2859,13 05	51,4	2910,5305	0,127	3,2258
2200	2995,10 05	51,4	3046,5005	0,136	3,4544
2300	3131,07 05	51,4	3182,4705	0,144	3,6576
2400	3267,04 05	51,4	3318,4405	0,152	3,8608



2500	3403,01 05	51,4	3454,4105	0,16	4,064
2600	3538,98 05	51,4	3590,3805	0,168	4,2672
2700	3674,95 05	51,4	3726,3505	0,177	4,4958
2800	3810,92 05	51,4	3862,3205	0,186	4,7244
2900	3946,89 05	51,4	3998,2905	0,196	4,9784
3000	4082,86 05	51,4	4134,2605	0,204	5,1816
3100	4218,83 05	51,4	4270,2305	0,214	5,4356
3200	4354,80 05	51,4	4406,2005	0,222	5,6388
3284	4469,01 53	51,4	4520,4153	0,232	5,8928
3400	4626,74 05	51,4	4678,1405	0,244	6,1976
3500	4762,71 05	51,4	4814,1105	0,254	6,4516
3600	4898,68 05	51,4	4950,0805	0,265	6,731
3700	5034,65 05	51,4	5086,0505	0,278	7,0612
3800	5170,62 05	51,4	5222,0205	0,29	7,366
3900	5306,59 05	51,4	5357,9905	0,303	7,6962
4000	5442,56 05	51,4	5493,9605	0,318	8,0772
4100	5578,53 05	51,4	5629,9305	0,338	8,5852
4200	5714,50 05	51,4	5765,9005	0,363	9,2202



**Figura 75. Gráfico fuerza - deformación – viga #2 refuerzo fibra de carbono.**

Una vez obtenida la gráfica esfuerzo – deformación, se obtuvo la ecuación de la curva que más se asemeja, la misma que se integró con límites, para obtener el valor del trabajo realizado por esta viga.

$$W=32958,29 \text{ kg*mm}$$

### 5.5.3. Viga #3

Datos del ensayo:

**Tabla 20.**

**Datos ensayo flexión viga #3 refuerzo de fibra de carbono.**

<b>Deformación unitaria</b>	<b>Fuerza (kg)</b>	<b>Precarga (kg)</b>	<b>Carga total (kg)</b>	<b>Deformación n (in)</b>	<b>Deformación (mm)</b>
200	275,700 5	51,4	327,1005	0,011	0,2794
300	411,670 5	51,4	463,0705	0,016	0,4064
400	547,640 5	51,4	599,0405	0,021	0,5334



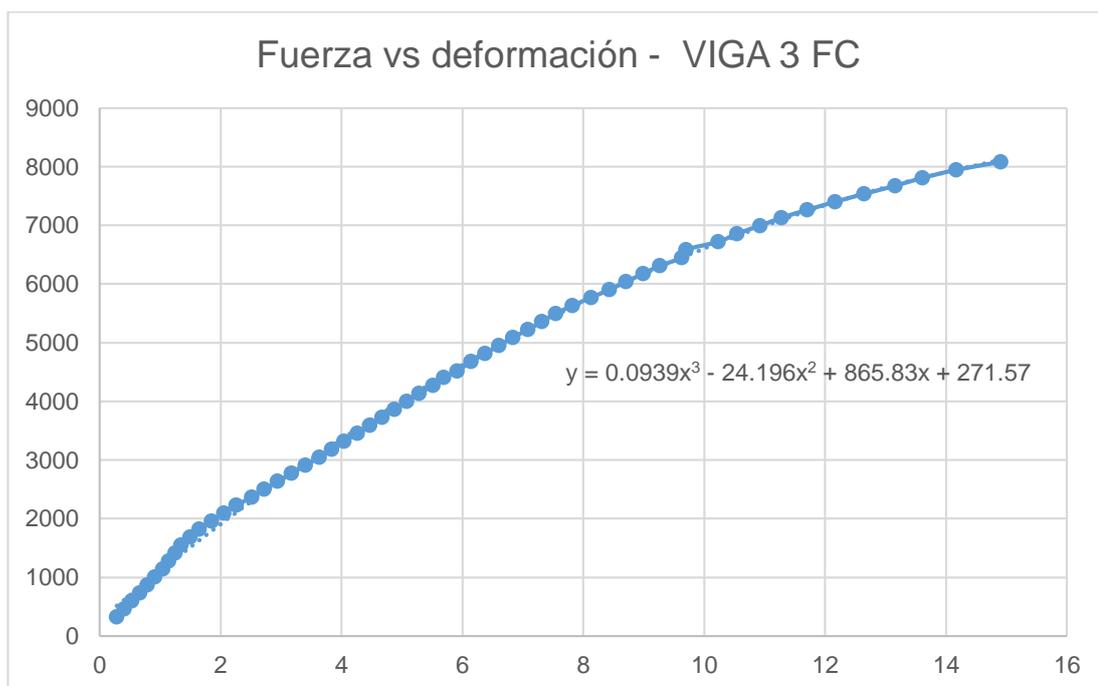
500	683,610 5	51,4	735,0105	0,026	0,6604
600	819,580 5	51,4	870,9805	0,031	0,7874
700	955,550 5	51,4	1006,9505	0,036	0,9144
800	1091,52 05	51,4	1142,9205	0,041	1,0414
900	1227,49 05	51,4	1278,8905	0,045	1,143
1000	1363,46 05	51,4	1414,8605	0,049	1,2446
1100	1499,43 05	51,4	1550,8305	0,053	1,3462
1200	1635,40 05	51,4	1686,8005	0,059	1,4986
1300	1771,37 05	51,4	1822,7705	0,065	1,651
1400	1907,34 05	51,4	1958,7405	0,073	1,8542
1500	2043,31 05	51,4	2094,7105	0,081	2,0574
1600	2179,28 05	51,4	2230,6805	0,089	2,2606
1700	2315,25 05	51,4	2366,6505	0,099	2,5146
1800	2451,22 05	51,4	2502,6205	0,107	2,7178
1900	2587,19 05	51,4	2638,5905	0,116	2,9464
2000	2723,16 05	51,4	2774,5605	0,125	3,175
2100	2859,13 05	51,4	2910,5305	0,134	3,4036
2200	2995,10 05	51,4	3046,5005	0,143	3,6322
2300	3131,07 05	51,4	3182,4705	0,151	3,8354



2400	3267,04 05	51,4	3318,4405	0,159	4,0386
2500	3403,01 05	51,4	3454,4105	0,168	4,2672
2600	3538,98 05	51,4	3590,3805	0,176	4,4704
2700	3674,95 05	51,4	3726,3505	0,184	4,6736
2800	3810,92 05	51,4	3862,3205	0,192	4,8768
2900	3946,89 05	51,4	3998,2905	0,2	5,08
3000	4082,86 05	51,4	4134,2605	0,208	5,2832
3100	4218,83 05	51,4	4270,2305	0,217	5,5118
3200	4354,80 05	51,4	4406,2005	0,224	5,6896
3284	4469,01 53	51,4	4520,4153	0,233	5,9182
3400	4626,74 05	51,4	4678,1405	0,242	6,1468
3500	4762,71 05	51,4	4814,1105	0,251	6,3754
3600	4898,68 05	51,4	4950,0805	0,26	6,604
3700	5034,65 05	51,4	5086,0505	0,269	6,8326
3800	5170,62 05	51,4	5222,0205	0,279	7,0866
3900	5306,59 05	51,4	5357,9905	0,288	7,3152
4000	5442,56 05	51,4	5493,9605	0,297	7,5438
4100	5578,53 05	51,4	5629,9305	0,308	7,8232
4200	5714,50 05	51,4	5765,9005	0,32	8,128



4300	5850,47 05	51,4	5901,8705	0,332	8,4328
4400	5986,44 05	51,4	6037,8405	0,343	8,7122
4500	6122,41 05	51,4	6173,8105	0,354	8,9916
4600	6258,38 05	51,4	6309,7805	0,365	9,271
4700	6394,35 05	51,4	6445,7505	0,379	9,6266
4800	6530,32 05	51,4	6581,7205	0,382	9,7028
4900	6666,29 05	51,4	6717,6905	0,403	10,2362
5000	6802,26 05	51,4	6853,6605	0,415	10,541
5100	6938,23 05	51,4	6989,6305	0,43	10,922
5200	7074,20 05	51,4	7125,6005	0,444	11,2776
5300	7210,17 05	51,4	7261,5705	0,461	11,7094
5400	7346,14 05	51,4	7397,5405	0,479	12,1666
5500	7482,11 05	51,4	7533,5105	0,498	12,6492
5600	7618,08 05	51,4	7669,4805	0,518	13,1572
5700	7754,05 05	51,4	7805,4505	0,536	13,6144
5800	7890,02 05	51,4	7941,4205	0,558	14,1732
5900	8025,99 05	51,4	8077,3905	0,587	14,9098



**Figura 76. Gráfico fuerza - deformación – viga #3 refuerzo fibra de carbono.**

Una vez obtenida la gráfica esfuerzo – deformación, se obtuvo la ecuación de la curva que más se asemeja, la misma que se integró con límites, para obtener el valor del trabajo realizado por esta viga.

$$W=74606,81 \text{ kg*mm}$$

## 5.6 Medición de deflexión en vigas

La medición de la deformación en las vigas, se realizó por medio de un comparador de reloj. Las deformaciones correspondientes a cada valor de carga de cada viga ensayada se encuentran detalladas en las tablas anteriores. A continuación, se evidencian los gráficos deformación unitaria vs deflexión por cada viga.

**Tabla 21.**

**Deflexión en vigas ensayadas.**

Descripción Vigas	Deflexión total (mm)	Deflexión promedio (mm)
Viga #1 S/R	17,57	17,376
Viga #2 S/R	17,78	
Viga #3 S/R	17,78	



Viga #1 PET	23,37	22,776
Viga #2 PET	21,59	
Viga #3 PET	23,37	
Viga #1 FC	12,04	13,47
Viga #2 FC	9,22	
Viga #3 FC	14,9	

## 5.7 Medición de grietas por flexión

La medición de grietas consistió en medir el ancho en la zona en que comenzó la grieta, longitud de la grieta y ángulo de inclinación de la grieta con respecto a la base de la viga (sentido longitudinal).

En la Tabla 28 se muestra evidencia fotográfica de las grietas detalladas en la tabla a continuación.

**Tabla 22.**

### Dimensiones grietas de vigas ensayadas.

Dimensiones grietas					
# Viga	Ancho de grieta (mm)	Longitud de grieta (mm)	Angulo (°)	Ubicación de grieta	Inicio de grieta
1 s/r	2	125	90	Centro viga	Base (zona de tensión)
2 s/r	8	140	90	Centro viga	Base (zona de tensión)
3 s/r	6	142	90	Centro viga	Base (zona de tensión)
1 PET	6	150	90	Apoyo	Base (zona de tensión)
2 PET	5	155	90	Apoyo	Base (zona de tensión)
3 PET	6	145	90	Apoyo	Base (zona de tensión)
1 FC	49	280	45,58	Apoyo de carga	Apoyo carga (zona compresión)
2 FC	35	270	47,79	Apoyo de carga	Apoyo carga (zona compresión)
3 FC	40	290	43,60	Apoyo de carga	Apoyo carga (zona compresión)

## CAPÍTULO VI

### 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 6.1 Análisis y calibración del modelo computacional con los resultados obtenidos en la parte experimental

El análisis y calibración del modelo computacional consistió en simular en software el comportamiento de las vigas con reforzamiento y comparar los valores de deformaciones con respecto a los valores promedios obtenidos de los ensayos a flexión.

Para la simulación se procedió a esquematizar los sólidos interactuantes, agregando a cada elemento sus correspondientes propiedades mecánicas. En este caso se manejó tres materiales a la vez: concreto, acero (varillas) y tejido (PET/Fibra de carbono).

Las propiedades utilizadas para el concreto se pueden revisar en la Tabla 8 y para las propiedades utilizadas en varillas de acero se puede revisar en la Tabla 7.

Las propiedades utilizadas tanto para la fibra de carbono como para la fibra PET, se detallan a continuación:

**Tabla 23.**

**Propiedades de fibra PET en simulación.**

<b>Propiedades de la fibra PET</b>	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.39
Módulo de elasticidad (MPa)	3628
Resistencia a la tensión (MPa)	88

**Tabla 24.**

**Propiedades de fibra de carbono en simulación.**

<b>Propiedades de la fibra de carbono</b>	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1,8
Módulo de elasticidad (MPa)	240000
Resistencia a la tensión (MPa)	4200

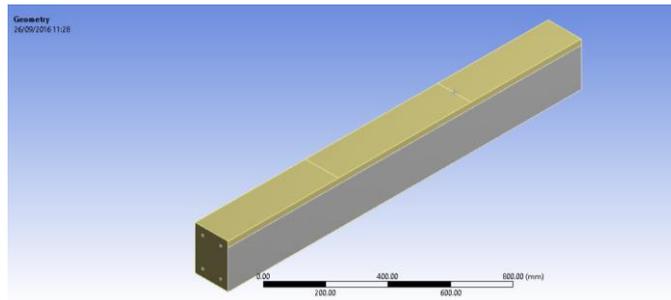


Figura 77. Esquemización 3D de viga compuesta con refuerzo a tensión de fibra.

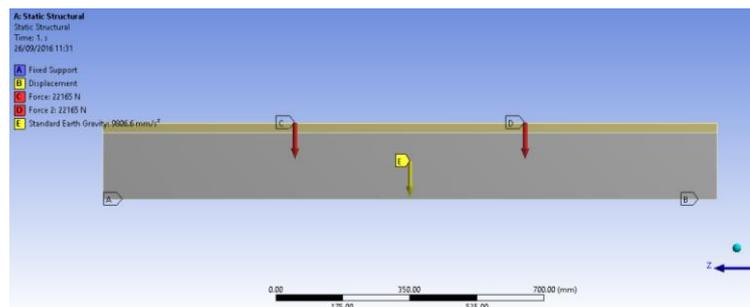


Figura 78. Esquema de ensayo con carga de 4520,4153 kgf sobre viga con reforzamiento PET.

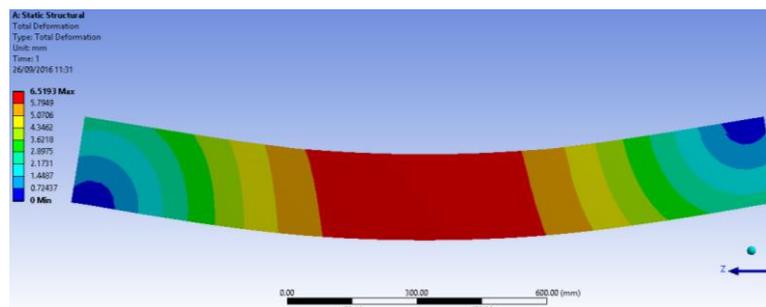
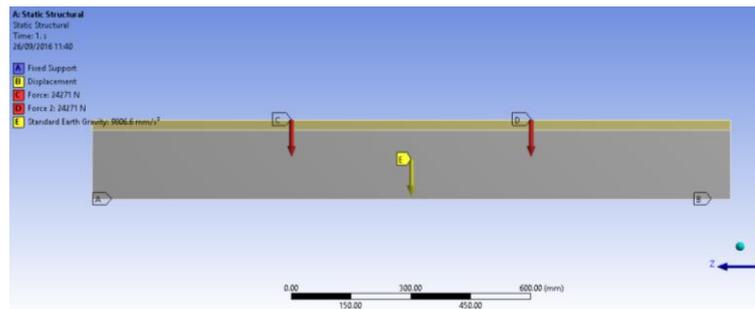
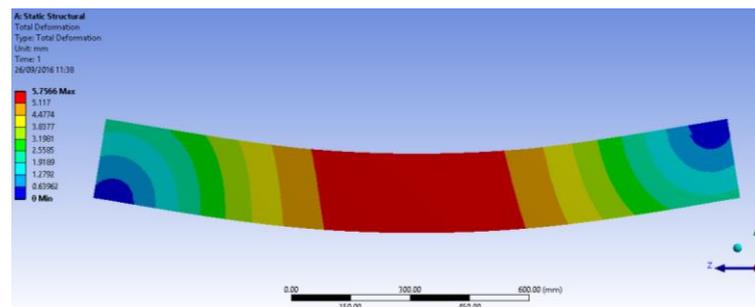


Figura 79. Deformación obtenida de simulación con carga 4520,4153 kgf sobre viga con reforzamiento PET.



**Figura 80. Esquema de ensayo con carga de 4950,0805 kgf sobre viga con refuerzo de fibra de carbono.**



**Figura 81. Deformación obtenida de simulación con carga de 4950,0805 kgf sobre viga con reforzamiento de fibra de carbono.**

**Tabla 25.**

**Comparación de deformaciones reales vs de simulación en vigas con reforzamiento de fibras.**

Comparación de resultados obtenidos					
Vigas con reforzamiento PET			Vigas con reforzamiento de fibra de carbono		
Carga (kgf)	Deformación real (mm)	Deformación simulación (mm)	Carga (kgf)	Deformación real (mm)	Deformación simulación (mm)
2774,5605	3,776	4,0473	3182,4705	3,683	3,7352
4520,4153	7,993	6,5193	4950,0805	6,452	5,7566

El error promedio calculado para las vigas con reforzamiento PET es de 14,65% y el error promedio calculado para las vigas con reforzamiento de fibra de carbono es de 6,74%, considerando las variaciones de deformaciones entre vigas ensayadas, se considera que el modelo computacional es correcto.

## 6.2 Comparación de carga vs capacidad entre los diferentes tipos de vigas ensayadas

Tabla 26.

Resumen de resultados.

	Carga máxima (TON)	Deflexión máxima (mm)	Trabajo realizado (kg*mm)
VIGA 1 S/R	4,664	17,57	58339,71
VIGA 2 S/R	4,520	17,78	58464,44
VIGA 3 S/R	4,950	17,78	63788,09
VIGA 1 FC	7,669	12,04	55494,56
VIGA 2 FC	<u>5,765</u>	<u>9,22</u>	<u>32958,29</u>
VIGA 3 FC	8,077	14,9	74606,81
VIGA 1 PET	5,997	23,37	107879,64
VIGA 2 PET	5,765	21,59	92267,69
VIGA 3 PET	6,037	23,37	108245

NOTA: los resultados obtenidos de la viga #2 con refuerzo de fibra de carbono, no fueron considerados, debido a que su comportamiento no se ajustó al patrón establecido por las otras dos vigas con refuerzo de fibra de carbono.

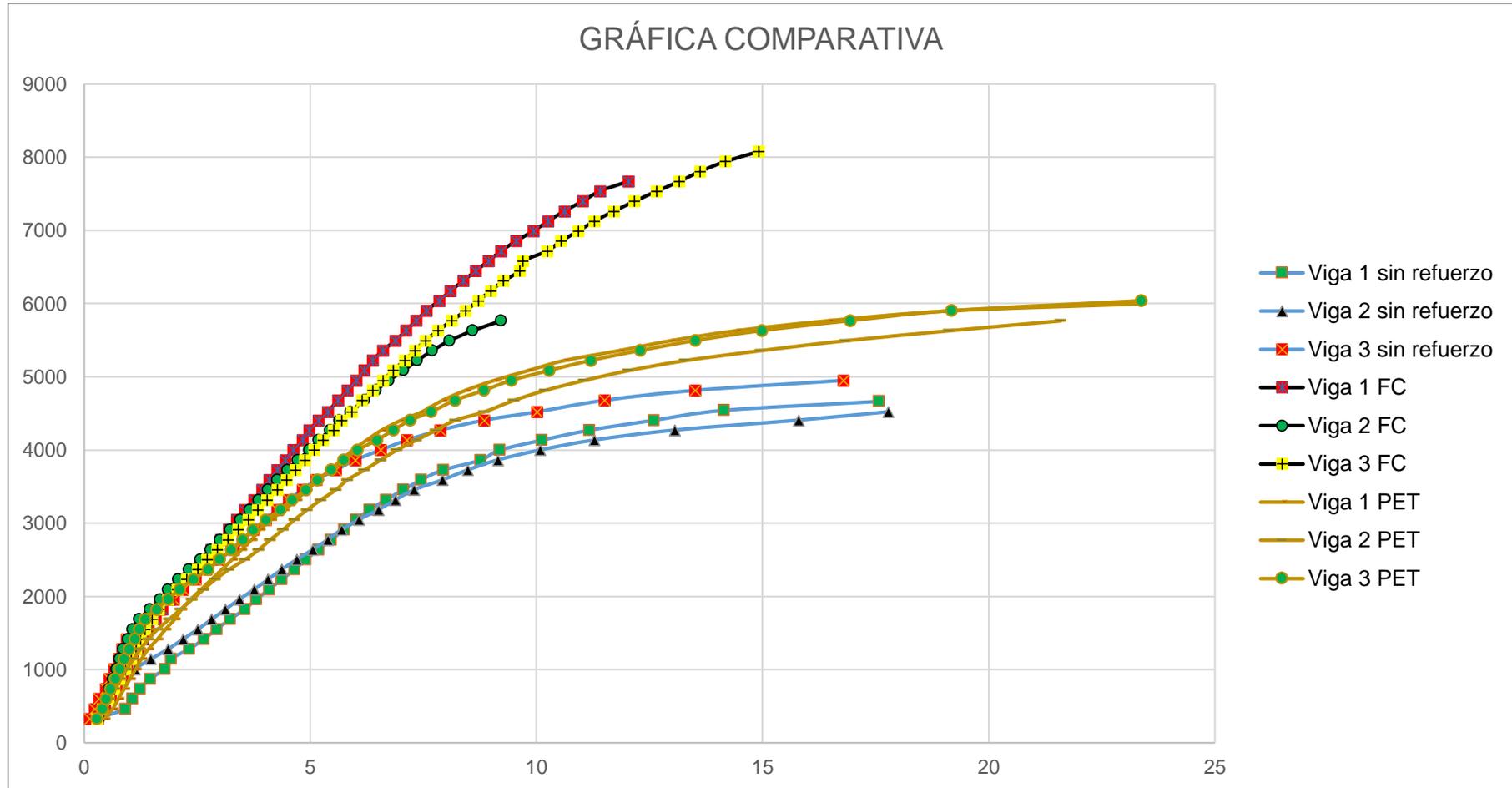
Tabla 27.

Valores promedio de cargas, deflexión y trabajo.

	Carga máxima (TON)	Deflexión máxima (mm)	Trabajo realizado (kg*mm)
VIGA 1 S/R	4,711	17,376	60197,41
VIGA 2 S/R			



<b>VIGA 3 S/R</b>			
<b>VIGA 1 FC</b>	7,873	13,47	65050,69
<b>VIGA 2 FC</b>			
<b>VIGA 3 FC</b>			
<b>VIGA 1 PET</b>	5,933	22,776	102797,44
<b>VIGA 2 PET</b>			
<b>VIGA 3 PET</b>			



**Figura 82. Gráfica comparativa entre curvas fuerza (kg) – deformación (mm).**

### 6.3 Comparación porcentual del aumento de capacidad de las vigas con y sin refuerzo

#### 6.3.1. Vigas con refuerzo de fibra de carbono vs vigas sin refuerzo

- Fuerza

$$\frac{7,873 - 4,711}{4,711} = 0,6712 = 67,12\%$$

- Deflexión

$$\frac{13,47 - 17,376}{17,376} = -0,2248 = -22,48\%$$

- Trabajo

$$\frac{65050,69 - 60197,41}{60197,41} = 0,0806 = 8,06\%$$

#### 6.3.2. Vigas con refuerzo de fibra PET vs vigas sin refuerzo

- Fuerza

$$\frac{5,933 - 4,711}{4,711} = 0,2594 = 25,94\%$$

- Deflexión

$$\frac{22,776 - 17,376}{17,376} = 0,3108 = 31,08\%$$

- Trabajo

$$\frac{102797,44 - 60197,41}{60197,41} = 0,7076 = 70,76\%$$

#### 6.3.3. Vigas con refuerzo de fibra de carbono vs vigas con refuerzo PET

- Fuerza

$$\frac{7,873 - 5,933}{5,933} = 0,3270 = 32,70\%$$

- Deflexión

$$\frac{13,47 - 22,776}{22,776} = -0,4086 = -40,86\%$$

- Trabajo

$$\frac{65050,69 - 102797,44}{102797,44} = -0,4713 = -47,13\%$$

## 6.4 Comparación de la generación y propagación de grietas en los dientes tipos de vigas

Tabla 28.

Comparación de grietas en las diferentes vigas.

Viga 1 s/r		Viga 1 PET	
Viga 2 s/r		Viga 2 PET	
Viga 3 s/r		Viga 3 PET	



Viga 1 FC		Viga 3 FC	
Viga 2 FC			

#### 6.4.1. Vigas sin revestimiento

Las vigas sin revestimiento fallaron entre los tercios de las cargas, es decir en el punto de deflexión máxima. Los agrietamientos comenzaron de igual manera en esta zona, el agrietamiento principal, el cual causo la rotura de las vigas, se generó en la zona a tensión de las vigas y en cuanto al sentido del agrietamiento, se puede decir que fue perpendicular al sentido longitudinal de la base.

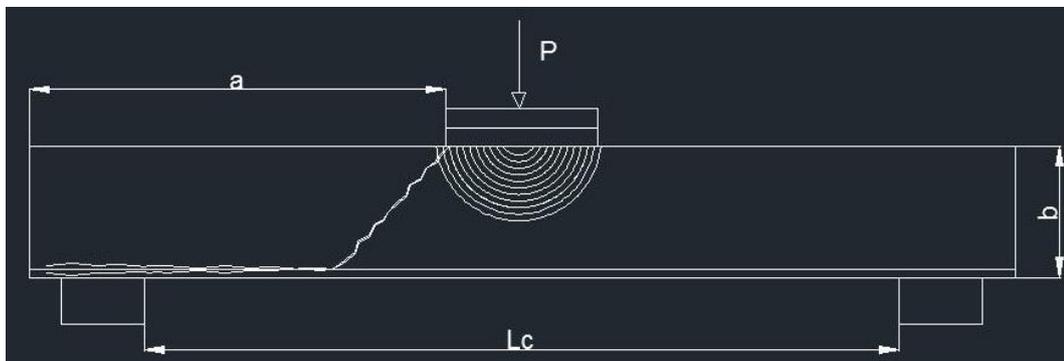
#### 6.4.2. Vigas con refuerzo PET

Las vigas con refuerzo de fibra PET fallaron justo a la altura de uno de los apoyos de carga. El agrietamiento principal, causante de la rotura de las vigas, se generó en la zona a tensión de las vigas, debido a la deflexión. Se puede decir que el sentido de la grieta fue perpendicular al sentido longitudinal de la base. En cuanto al reforzamiento, la falla se transmitió a la fibra como si la fibra y viga fueran un solo elemento, es decir que la fibra se rompió en el punto

en el que se generó la grieta principal y de igual manera en sentido perpendicular al sentido longitudinal de la fibra.

#### 6.4.3. Vigas con refuerzo de fibra de carbono

Las vigas con refuerzo de fibra de carbono presentaron un modo de falla diferente al de las demás vigas, su agrietamiento principal comenzó en la línea de uno de los apoyos que transmiten la carga, y se transmitió a lo largo de un ángulo de  $45,66^\circ$  en promedio, esto se debe a que el refuerzo de fibra de carbono al no permitir que la viga falle por tensionamiento en la zona media, el siguiente modo de falla es por esfuerzo cortante, ya que en este tipo de ensayo el esfuerzo cortante máximo se presenta en las cargas “puntuales” que se aplican y debido a la deflexión que presenta la viga en ese instante, el agrietamiento se produce en forma diagonal.



**Figura 83. Falla en compresión por cortante.**

El agrietamiento comenzó en la zona de compresión de la viga, esto se debe a que la viga falló por aplastamiento en la zona de compresión, al reducirse la zona disponible para soportar los esfuerzos de compresión originados por la flexión, esta forma de falla se denomina como compresión por cortante.

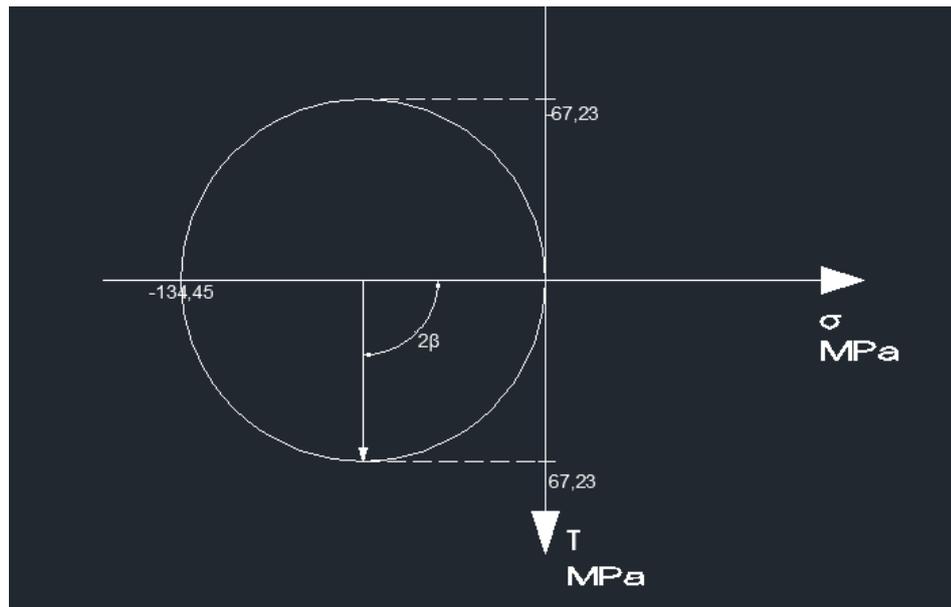


Figura 84. Esfuerzos en el círculo de Mohr.

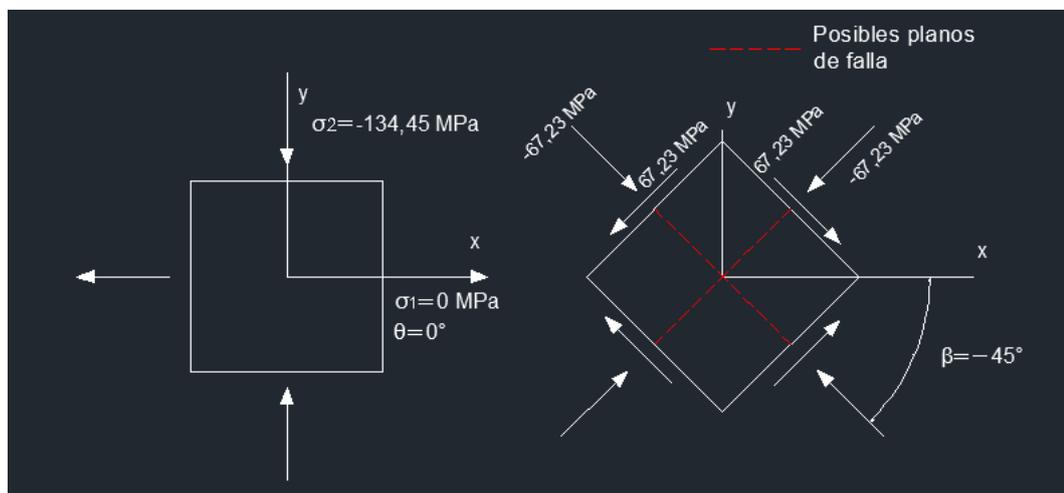


Figura 85. Plano de esfuerzos.

## CAPÍTULO VII

### 7. EVALUACIÓN ECONOMICA Y FINANCIERA

#### 7.1 Análisis económico

Considerando que el costo total del proyecto fue de 1171,56 \$, presupuesto detallado en el punto 7.2, presupuesto con el cual se elaboró la investigación sobre la fibra de PET y obteniendo resultados contundentes en cuanto a capacidad a flexión y costos comparativos en cuanto a la fibra de carbono, se puede decir que se puede considerar factible la utilización de refuerzo de fibra PET para flexión como reemplazo de la fibra de carbono.

El costo de fabricación de la fibra PET se podría abaratar, si el proceso de elaboración del tejido se lo hace por medio de maquinaria textil, con lo cual se beneficia su elaboración en cuanto a tiempo de fabricación y se mejoraría la calidad del tejido, abaratando así aún más el reforzamiento de estructuras por medio de fibra PET.

#### 7.2 Costos directos e indirectos de fabricación

##### 7.2.1. Costos directos

Tabla 29.

##### Costos ensayo adherencia

<b>Costos ensayo de adherencia</b>			
<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>P. unitario (\$)</b>	<b>P. total (\$)</b>
2	Perfiles soldados en U	15,00	30,00
1	Griffon 250 ml	15,00	15,00
1	UHU	1,42	1,42
1	SuperBonder	3,83	3,83
1	Pegatanque	6,00	6,00
1	Sikadur 31 – 2.5 kg	31,00	31,00
1	Sikadur 301 - 4 kg	142,00	142,00
1	Fibra de carbono MUESTRA	0,00	0,00
1	Relleno concreto MUESTRA	0,00	0,00
<b>Total, costos ensayo adherencia</b>			<b>229,25</b>

Tabla 30.

**Costos directos – fabricación vigas**

<b>Costos fabricación vigas</b>			
<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>P. unitario (\$)</b>	<b>P. total (\$)</b>
5	Madera Triplex 144X160	16,00	80,00
2	Armaduras 14x9x9,5x12MTS	38,00	76,00
1,5	Clavos 2" (lb)	1,08	1,62
1	Alambre de amarre (lb)	1,08	1,08
4,5	Cemento 50 kg	8,15	36,68
5	Ripio (Carretillas)	1,80	9,00
4	Arena (Carretillas)	1,80	7,20
1	Acelerante (1 lt)	2,85	2,85
7	Costales	0,50	3,50
1	Mano de obra	70,00	70,00
<b>Total, costos fabricación vigas</b>			<b>287,93</b>

Tabla 31.

**Costos directos – reforzamiento.**

<b>Costos reforzamiento</b>			
<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>P. unitario (\$)</b>	<b>P. total (\$)</b>
1	Sikadur 301 4 - Kg - CO	95,61	95,61
10	SikaWrap 300 C (m)	23,82	238,20
2	Hilo PET - 5 Kg	15,90	31,80
1	Mano de obra tejido PET - 8 m	120,00	120,00
2	Rodillos	2,50	5,00
<b>Total, costos reforzamiento</b>			<b>490,61</b>

### 7.2.2. Costos indirectos

Tabla 32.

Costos indirectos.

<b>Costos indirectos</b>			
<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>P. unitario (\$)</b>	<b>P. total (\$)</b>
1	Envío armadura	30,00	30,00
1	Envío SIKA CO a Ipiales	23,34	96,19
1	Traslado vigas	9,00	9,00
1	Envío Hilo PET	4,00	4,00
30	Cortes Madera	0,50	15,00
10	Cortes Armaduras	1,00	10,00
<b>Total, costos indirectos</b>			<b>164,19</b>

### 7.2.3. Costo total

Tabla 33.

Costo total del proyecto

<b>Costos totales</b>	
Costos directos	1007,37
Costos indirectos	164,19
<b>Costo total - proyecto</b>	<b>1171,56</b>

## 7.3 Comparación de costos entre el reforzamiento con fibras de carbono y PET

Tabla 34.

Costos reforzamiento – fibra de carbono.

<b>Costos reforzamiento Fibra de carbono</b>			
<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>P. unitario (\$)</b>	<b>P. total (\$)</b>
10	SikaWrap 300 C (MTS)	23,82	238,20
1	Envío SIKA CO a Ipiales	23,34	96,19
<b>Total, costos reforzamiento</b>			<b>334,39</b>

Tabla 35.

**Costos reforzamiento – Fibra PET.**

<b>Costos reforzamiento Fibra PET</b>			
<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>P. unitario (\$)</b>	<b>P. total (\$)</b>
2	Hilo PET 5 KG	15,90	31,80
1	Mano de obra tejido PET 8 MTS	120,00	120,00
1	Envío Hilo PET	4,00	4,00
<b>Total, costos reforzamiento</b>			<b>155,80</b>

Tabla 36.

**Costos compartidos de reforzamiento.**

<b>Costos compartidos</b>			
<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>P. unitario (\$)</b>	<b>P. total (\$)</b>
1	Sikadur 301 4 - KG CO	95,61	95,61
2	Rodillos	2,50	5,00
<b>Total, costos reforzamiento</b>			<b>100,61</b>

Asumiendo que los costos compartidos se dividen 50% para reforzamiento PET y 50% para reforzamiento con fibra de carbono, los costos totales de reforzamiento son:

- Reforzamiento con fibra de carbono: 384, 70 \$
- Reforzamiento con fibra PET: 206,11 \$

El coste de reforzamiento detallado en la parte superior incluye toda la materia prima sobrante, con esta aclaración, para este proyecto el coste de reforzar las 3 vigas por medio de fibra de carbono represento un 86,64% mayor al coste de reforzar las 3 vigas por medio de fibra PET

## CAPÍTULO VIII

### 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 8.1 Conclusiones de diseño

- Se considera que el diseño de la viga compuesta es válido ya que la viga sin revestimiento falló en un valor de resistencia en un rango entre 4,5 a 4,9 toneladas, valores superiores al de diseño, el cual fue de 3 toneladas en total para fluencia, distribuidas en dos cargas de 1,5 toneladas cada una, ejerciendo un momento de 75000 kg\*cm.

#### 8.2 Conclusiones de la construcción

- La madera Triplex de buena calidad previamente preparada sus superficies de contacto con el hormigón junto con la humectación en abundancia de las vigas, brindan un acabado liso a la viga fundida. Con lo cual no se requiere de procedimientos extras de regulaciones de superficies, para el posterior reforzamiento.
- La construcción de las vigas siguiendo la geometría establecida con la mayor exactitud posible, garantizaron que las condiciones sean iguales para todas las vigas. Lo cual se comprueba con el comportamiento similar de las vigas sin revestimiento durante los ensayos a flexión.

#### 8.3 Conclusiones de los ensayos

- Las vigas sin refuerzo longitudinal fallaron de acuerdo a la norma ASTM C78 en el rango de 1/3 a 2/3 de la luz de la viga, los ensayos correspondientes a las tres vigas sin refuerzo precisamente fallaron en la mitad de la viga, es decir en el punto máximo de deformación de la misma, en base a la observación de la forma en que aparecen las grietas debido a la falla, se determina que la viga falla por flexión.

- Las vigas con refuerzo PET fallaron precisamente en el 1/3 de la viga, es decir a la altura de uno de los rodillos que transmiten la carga, el ensayo se considera válido ya que la falla (rotura) se encuentra precisamente dentro del rango en el cual debe fallar, es decir en el rango de 1/3 a 2/3 de la luz de la viga, en base a la observación de la forma en que aparecen las grietas debido a la falla, y comparando con la viga sin revestimiento, se determina que la viga falla por flexión.
- Las vigas con refuerzo de fibra de carbono fallaron de forma diferente al resto de vigas, su agrietamiento principal comenzó justo en uno de los apoyos que transmitieron la carga, es decir en el 1/3 de la viga, en base a la observación de la forma e inclinación del agrietamiento principal, se determina que la viga falla por cortante. Explícitamente la viga falló en la zona de compresión, es decir falla por aplastamiento en esta zona, zona en la cual comenzó el agrietamiento con una inclinación de 45.66° en promedio.

#### **8.4 Conclusiones del análisis de resultados**

- Las vigas con refuerzo de fibra de carbono resisten en promedio 67,12% más que las vigas sin reforzamiento.
- Las vigas con refuerzo PET resisten en promedio 25,94% más que las vigas sin reforzamiento.
- Las vigas con refuerzo de fibra de carbono resisten en promedio 32,70% más que las vigas con refuerzo PET.
- Las vigas con refuerzo de fibra de carbono presentaron una deflexión promedio menor en 22,48% con respecto a las vigas sin refuerzo.
- Las vigas con refuerzo PET presentaron una deflexión promedio mayor en 31,08% con respecto a las vigas sin refuerzo.
- Las vigas con refuerzo de fibra de carbono presentaron una deflexión promedio menor en 40,86% con respecto a las vigas con refuerzo PET.
- Las vigas con refuerzo de fibra de carbono realizaron un trabajo promedio mayor en 8,06% con respecto a las vigas sin reforzamiento.

- Las vigas con refuerzo de fibra PET realizaron un trabajo promedio mayor en 70,76% con respecto a las vigas sin reforzamiento.
- Las vigas con refuerzo de fibra de carbono realizaron un trabajo promedio menor en 47,13% con respecto a las vigas con refuerzo PET.

## **8.5 Recomendaciones**

- Utilizar una máquina textilera para la fabricación del tejido PET para mejorar la calidad de la malla y para poder añadir mayor cantidad de filamentos, ya que mientras más filamentos exista en la malla mayor será la resistencia del tejido.
- Utilizar un motor de bajas revoluciones para mezclar los componentes A y B del pegamento epóxico Sikadur 301, para facilitar el mezclado y obtener una mezcla más homogénea.
- Realizar el proceso de reforzamiento con el uso de equipo de protección personal, principalmente porque al mezclar los componentes A y B del pegamento epóxico, este reacciona y genera calor.
- En lo posible, solicitar concreto de alguna fábrica concretera, con los requerimientos necesarios, para garantizar la calidad y resistencia del concreto.
- En lo posible tener a disposición un montacargas pequeño, para el traslado de vigas de un lugar a otro, ya que estas son pesadas y para evitar daños en las caras exteriores de las vigas.

## BIBLIOGRAFÍA

- AcelorMittal. (03 de 02 de 2016). *Constructalia*. Obtenido de [http://www.constructalia.com/espanol/rehabilitacion\\_con\\_acero/iii\\_tecnicas\\_de\\_refuerzo\\_de\\_vigas#.VrIUBUArEqN](http://www.constructalia.com/espanol/rehabilitacion_con_acero/iii_tecnicas_de_refuerzo_de_vigas#.VrIUBUArEqN)
- AHMSA. (s.f.). Manual de diseño para la construcción con acero.
- AISC. (2010). *Specification for Structural Steel Buildings*.
- American Concrete Institute. (2011). *Requisitos del reglamento para concreto estructural (ACI 318S-11)*.
- Arroyo, S., & Sanchez, D. (2016). *ESTUDIO DE VIGAS DE SECCIÓN COMPACTA INCREMENTANDO SU CAPACIDAD A FLEXIÓN MEDIANTE ATIESADORES Y BLOQUES DE HORMIGÓN CON CUESCO*. Sangolquí.
- Askeland, D. (1998). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. International Thompson Editores.
- Beer, F. P., Johnston, R., DeWolf, J., & Mazurek, D. (2010). *Mecánica de Materiales*. México D.F: Mc Graw Hill.
- Bernal, I. R. (2005). *Zapatatas*. Buenos Aires: Voros S.A.
- Construya Fácil. (26 de 08 de 2016). *Construya Fácil*. Obtenido de <http://www.construyafacil.org/2012/05/dosificaciones-por-volumen-en-mezclas.html>
- Enrique, H. M., & Luisa María, G. M. (2007). *Hormigón Armado Y Pretensado*. Granada: Grupo de Investigación TEP-190 Ingeniería e infraestructuras .
- Guzman, L. R. (2008). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA VIGA DE CONCRETO ARMADO, ENSAYADA A FLEXIÓN, REFORZADA CON BARRAS DE FIBRA DE CARBONO* . Guatemala.
- Hendy, C. R., & Iles, D. C. (2015). *Guidance notes on best practice in steel bridge construction*. Berkshire: SCI.
- Hibbeler, R. (2006). *MECANICA DE MATERIALES*. Pearson.
- Ing. Marcelo Romo Proaño, M. (21 de 09 de 2016). *Temas de hormigón armado*. Obtenido de <http://publiespe.espe.edu.ec/academicas/hormigon/hormigon04-a.htm>
- JQ, I. (28 de 01 de 2016). *PET-propiedades*. Obtenido de <http://www.jq.com.ar/Imagenes/Productos/PET/dtecnicos/propiedades.htm>
- MACCAFERRI. (s.f.). *Fibras como elemento estructural para el refuerzo del hormigón*.
- Medina, E. (2008). *Construcción de estructuras de Hormigón Armado Edificación*. Madrid: Jacaryan S.A.

NOVACERO. (21 de 09 de 2016). *El acero del futuro Novacero*. Obtenido de <http://www.novacero.com/catalogo-productos/cpvarilla-microaleada/varilla-recta.html#especificaciones-t%C3%A9cnicas>

Rendón, I. J. (28 de 11 de 2015). REFORZAMIENTO DE ESTRUCTURAS CON MATERIALES COMPUESTOS FRP, SISTEMA SIKA CARBODUR. 265. Colombia.

SA, S. C. (2015). *Hoja tecnica de producto SikaWrap 300C*.

SIKA. (2010). Refuerzo Estructural Con Sistemas a Base de Fibra de Carbono.

Smith, W., & Havad, H. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. Mc Graw Hill.

Williams, A. (2011). *Steel Structures Design*. Mc Graw Hill.