“ANÁLISIS COMPARATIVO DE COMPORTAMIENTO Y COSTOS, EN EL REFORZAMIENTO DE VIGAS SOMETIDAS A FLEXION POR MEDIO DEL USO DE ENCAMISADO EN CONCRETO REFORZADO Y FIBRAS DE CARBONO”

OSCAR DAVID POLO REALES

EDWIN YAIR ULLOQUE CUADROS

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERO CIVIL

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA D. T y C. - BOLÍVAR
2013

“ANÁLISIS COMPARATIVO DE COMPORTAMIENTO Y COSTOS, EN EL REFORZAMIENTO DE VIGAS SOMETIDAS A FLEXION POR MEDIO DEL USO DE ENCAMISADO EN CONCRETO REFORZADO Y FIBRAS DE CARBONO”

Grupo De Investigación
Optimización De Costos De Las Estructuras (OPTICOS).

Línea De Investigación.
Optimización Estructural

Director De Proyecto
ING. ARNOLDO BERROCAL OLAVE.

Investigadores Principales.
OSCAR DAVID POLO REALES
EDWIN YAIR ULLOQUE CUADROS

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA D. T y C. - BOLÍVAR
2013

NOTA DE ACEPTACION

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del director

_____

Firma del jurado

_____

Firma del jurado

DEDICATORIA

Primeramente a Dios,
quien supo guiarme por el buen camino
y me dio las fuerzas para no
desfallecer en los momentos difíciles.
A mis padres por todo el sacrificio y el apoyo incondicional
que me han dado en este largo camino de alegría y tristezas.
A mis hermanos y sobrinos por su apoyo y
brindarme siempre un momento de alegría.
A mis familiares, amigos y compañeros por
su incansable y sus sabios consejos.
Oscar D. Polo R.

Primeramente a Dios,
Porque ha sido mi amigo incondicional
y quien me ha dado fuerzas y sabiduría para sobreponerme
a los momentos de grandes luchas y dificultades.
A mis padres y hermanas, quienes son el motor de mis logros.
A mis familiares y amigos por su constante apoyo.

Edwin Y. Ulloque C.

AGRADECIMIENTOS

Agradecerle primeramente a Dios por bendecirnos y permitirnos llegar hasta este punto tan importante en nuestras vidas y poder cumplir el sueño anhela de llegar a ser un profesional.

A nuestras familias y seres queridos por su constante ánirno y apoyo de forma incondicional durante todo este largo camino

Al ing. Arnoldo Berrocal Olave, director temático del proyecto, quien nos guio y colaboro durante la ejecución del mismo, quien con sus conocimientos, experiencia, amabilidad y paciencia nos motivó a terminar con éxitos el presente documento.

A Sika Colombia S. A. por el donativo de las fibras de carbono y el adhesivo epóxico, ya que fue una indispensable contribución al desarrollo de esta investigación.

A la empresa AICO Ltda., que nos facilitó las instalaciones de su laboratorio para la ejecución de los ensayos a flexión a las vigas.

A las empresas ARNOLDO BERROCAL INGENIERIA S.A.S y MIGUEL GARCIA MULFORD Y CIA LTDA en el suministro de los costos del reforzamiento estructural de los sistemas puestos en comparación.

A todos los docentes de la Universidad de Cartagena quienes compartieron sus conocimientos, dentro y fuera de clases, haciendo posible que nuestra formación profesional se resuma en satisfacciones académicas.

A nuestros compañeros de estudio y demás personas de una u otra forma hicieron posible que alcanzáramos esta meta. Por darnos su apoyo, sus consejos, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de nuestras vidas. A todo muchas gracias y que Dios los bendiga eternamente.

TABLA DE CONTENIDO

LISTADO DE TABLAS X
LISTADO DE ILUSTRACIONES XII
LISTADO DE GRAFICAS XIV
LISTADO DE FOTOGRAFIAS XV
R E S U M E N XVI
INTRODUCCIÓN 1
1. MARCO TEÓRICO 4
1.1 MATERIALES COMPUESTOS 4
1.1.1 Materiales Compuestos reforzados con fibras 5
1.1.2 Características de los CFRP 5
1.2 CRITERIOS DE DISEÑO A FLEXIÓN 7
1.2.1 Consideraciones generales – flexión 7
1.2.2 Diseño de secciones rectangulares que sólo tienen armadura de tracción 8
1.2.3 Diseño de secciones rectangulares con CFRP 10
1.3 INSPECCIÓN EVALUACIÓN Y DIAGNOSTICO 11
1.3.1 Investigación Preliminar 11
1.3.1.1 Antecedentes 11
1.3.1.2 Revisión del Proyecto Original 11
1.3.1.3 Selección de recursos para la investigación 12
1.3.1.4 Inspección visual 12
1.3.1.5 Mediciones 12
1.3.1.6 Auscultación de la estructura 13
1.3.1.7 Exploración de la estructura 13
1.3.1.8 Muestreo ensayo y análisis 14
1.3.1.9 Informe preliminar 14
1.3.2 Investigación profunda o detallada 14
1.3.2.1 Documentación del proyecto 15

1.3.2.2 Examen de la estructura 15
1.3.2.3 Ensayos a la estructura y toma de muestras 16
1.3.2.4 Ensayo y análisis de las muestras 16
1.3.2.5 Evaluación estructural 17
1.3.2.6 Informe final 17
1.4 PROCEDIMIENTO DE REHABILITACION CON MATERIALES COMPUESTOS 18
1.4.1 Preparación de la superficie 18
1.4.2 Método de limpieza 18
1.4.3 Mezclado del epóxico 19
1.4.4 Corte del tejido 20
1.4.5 Aplicación 20
1.5 PROCESO DE REHABILITACION DE LA MANERA TRADICIONAL 21
1.5.1 Revisión y preparación de los elementos estructurales 21
1.5.2 Limpiezas de las superficies 22
1.5.3 Procedimiento de colocación del material de reparación 23
1.6 FALLAS EN VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORZADAS A FLEXION CON FIBRAS DE CARBONO 24
1.7 MARCO NORMATICO 25
2. OBJETIVOS Y ALCANCE 27
2.1 OBJETIVO GENERAL 27
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 27
3. METODOLOGÍA 28
3.1 INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA 28
3.2 DISEÑO DE LA MEZCLA DE CONCRETO 29
3.2.1 Selección del asentamiento (sslump) 32
3.2.2 Tamaño máximo nominal del agregado 32
3.2.3 Contenido de aire 33
3.2.5 Resistencia de diseño 34
3.2.6 Relación agua-cemento 35

3.2.7 Calculo del contenido de cemento 36
3.2.8 Agregados 36
3.2.9 Agua libre 39
3.2.10 Cantidades de obra de mezcla de concreto hidráulico 40
3.2.11 Ensayo de cilindros 41
3.3 DISEÑO DE LAS VIGAS MODELO 41
3.3.1 Diseño de la sección modelo V-1 42
3.3.2 Diseño de la sección modelo V-2 46
3.3.3 Diseño de la sección modelo V-3 50
3.4 DISEÑO CON CFRP 54
3.4.1 Diseño de ejemplar V-1_cfrp 55
3.4.2 Diseño de ejemplar V-2_cfrp 56
3.4.3 Diseño de ejemplar V-3_cfrp 57
Para este diseño se empleó una capa de CFRP (Sikawrap Hex 103C) en la viga V-3 . 57
3.5 SECCIONES TIPO 58
3.6 DISEÑO DE MONTAJE PARA PRUEBA DE CARGA 60
3.7 PRUEBA DE CARGA 62
3.8 MAPA DE GRIETAS Y MEDICIÓN DE DEFLEXIONES 63
3.9 ANÁLISIS DE COSTOS 63
3.9.1 Estructura a reforzar 64
3.9.2 Avalúo, modelación y diseño viga V-B de la vivienda con la NSR-98 65
3.9.2.1 Avaluó 65
3.9.2.2 Combinaciones de diseño. 66
3.9.2.3 Resultados de la modelación 66
3.9.2.4 Diseño 67
3.9.3 Avalúo, modelación y diseño viga V-B de la vivienda con la nsr-10 67
3.9.3.1 Avalúo 67
3.9.3.2 Combinaciones 68
3.9.3.3 Diseño por los dos métodos de reforzamiento 68
3.10 CANTIDADES DE OBRA. 77

4. RESULTADOS 78
4.1 PRUEBA DE CARGA 78
4.2 MAPA DE GIRETAS 80
4.3 DEFORMACIONES 83
4.4 ANÁLISIS DE COSTOS 84
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 86
6. ANEXOS 89
6.1 MEMORIAS DE CÁLCULO 89
6.1.1 Granulometría del agregado grueso 89
6.1.2 Granulometría del agregado fino 91
6.2 ANEXOS FOTOGRÁFICOS 93
6.2.1 Formaletería y figurado del refuerzo 93
6.2.2 Aplicación de las fibras de carbono 93
6.2.3 Aspecto de vigas 96
6.2.4 Ensayo cilindros de concreto 100
6.2.5 Montaje para la prueba de carga 101
7. COSTOS 102
8. B I B L I O G R A F Í A 104

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1:1 Reglamentos utilizados en la presente investigación. 26
Tabla 3:1 Análisis granulométrico de agregado grueso. 29
Tabla 3:2 Análisis granulométrico de agregado fino 30
Tabla 3:3 Asentamientos recomendados para diversos tipos de construcción, sistemas de colocación y compactación. 32
Tabla 3:4 Contenido de aire 33
Tabla 3:5 Estimación del agua de mezclado para agregados de forma redondeada, sin aire incluido en la mezcla. 34
Tabla 3:6 Fórmulas para el cálculo de la resistencia de diseño de la mezcla 34
Tabla 3:7 Correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días de edad y la relación agua-cemento para los cementos colombianos, portland tipo I, concreto sin aire incluido. 35
Tabla 3:8 Cantidades de agregado grueso y fino por m3 de mezcla de concreto hidráulico por el método gráfico 38
Tabla 3:9 Cantidad de concreto en m3 necesario. 40
Tabla 3:10 Cantidad de material seco para 0,3 m3 de concreto. 40
Tabla 3:11 Resumen ensayo de cilindros 41
Tabla 3:12 Resumen secciones tipo 58
Tabla 3:13 Desplazamientos del riel por efecto de la carga (SAP2000 V 14.2.2) 62
Tabla 3:14Avalúo Vivienda_ NSR-98. 65
Tabla 3:15 Avalúo Vivienda_ NSR-10. 67
Tabla 3:16 Cantidades para un reforzamiento con Fibras de Carbono. Fuente: Arnoldo Berrocal Ingenieria S.A.S. 77
Tabla 3:17 Cantidades para un reforzamiento con encamisado en concreto reforzado. Fuente: Miguel García Mulford & Cia. Ltda. 77
Tabla 4:1 Resultados obtenidos en la prueba de carga 78
Tabla 4:2 Análisis de costos con fibras de Carbono 84
Tabla 4:3 Análisis de costos con encamisado en concreto reforzado. 84

Tabla 4:4 Tiempos en horas del proceso de los proceso de rehabilitación. 85
Tabla 6:1 Datos obtenidos en el laboratorio 89
Tabla 6:2 Método para determinar la densidad y la absorción de agregados gruesos. 90
Tabla 6:3 Datos obtenidos en el laboratorio 91
Tabla 7:1 Costos del trabajo de grado. 103

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Deformación específica y distribución equivalente de tensión en una sección rectangular. *9*
Ilustración 2 Distribución equivalente de tensión en una sección rectangular. *11*
Ilustración 3 Sistema de Encofrado y vaciado en el sitio. Fuente: Paulo Helene, Fernanda Pereira. "Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón". *23*
Ilustración 4 Modo de falla de vigas reforzadas a flexión con materiales compuestos. Fuente: Refuerzo y rehabilitación de estructuras. Cinpar 2010..... *24*
Para este diseño se empleó una capa de CFRP (Sikawrap Hex 103C) en la viga V-1
Ilustración 5 Resultados diseño viga V-1 con CFRP..... *55*
Ilustración 6 Resultados diseño viga V-2 con CFRP..... *56*
Ilustración 7 Resultados diseño viga V-3 con CFRP..... *57*
Ilustración 8 Secciones patrón..... *59*
Ilustración 9 Sección típica del riel *61*
Ilustración 10 Condición de apoyo y cargas aplicadas en el modelo. *61*
Ilustración 11Modelo en tres dimensiones, ETABS V.9.7.1. ..... *64*
Ilustración 12 Pórtico B...... *65*
Ilustración 13Área de acero requerida a flexión...... *66*
Ilustración 14 Sección típica viga V-B..... *67*
Ilustración 15 Área de acero requerida a flexión...... *69*
Ilustración 16 Sección típica de viga reforzada con barras de acero. *70*
Ilustración 17 Detalle unión Viga – Columna *71*
Ilustración 18 Hoja de cálculo para reforzamiento con fibras de carbono. *73*
Ilustración 19 Resumen de diseño a flexión...... *74*
Ilustración 20 Chequeo de esfuerzos en servicio..... *75*
Ilustración 21 Sección típica de Viga V-B con Sikawrap Hex 103C. *76*
Ilustración 22 Resumen de momentos últimos resistentes de las vigas ensayadas..... *78*
Ilustración 23 Mapa de grietas V-A..... *80*
Ilustración 24 Mapa de grietas V-B..... *80*

Ilustración 25 Mapa de grietas V-C1 ..... *81*
Ilustración 26 Mapa de grietas V-C2 ..... *81*
Ilustración 27 Mapa de grietas V-D1 ..... *81*
Ilustración 28 Mapa de grietas V-D2 ..... *82*
Ilustración 29 Mapa de grietas V-E1 ..... *82*
Ilustración 30 Mapa de grietas V-E2 ..... *82*
Ilustración 31 Mapa de grietas V-F *83*

LISTADO DE GRAFICAS

Grafica 1 Representación gráfica de combinación de agregados. 36
Grafica 2 Deformaciones para viga reforzada y sin reforzar con frp. 83

LISTADO DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1. Preparación y limpieza de la superficie, estadio Jaime Morón León. 19
Fotografia 2 Instalación de Materiales Compuestos en elementos estructurales, estadio Jaime Morón León 20
Fotografia 3. Escarificacion de estructura en reparacion. Fuente: manual de rehabilitacion de estructuras de hormigon. 21
Fotografia 4 Limpieza de susperficie de reparacion con chorros de agua a alta presion. Fuente manual de rehabilitacion de estructuras de hormigon. 22
Fotografía 5 Montaje para la prueba de carga 60
Fotografía 6 Montaje para la prueba de carga. 62
Fotografia 7 Esquema de viga agrietada 63
Fotografía 8 Formaleta múltiple y refuerzo de las vigas 93
Fotografia 9 Componentes A y B-Sikadur 301 93
Fotografía 10 Medición y corte del tejido 94
Fotografia 11 Instalación del tejido 94
Fotografía 12 Aplicación Sikadur 301 95
Fotografía 13 Impregnación del tejido 95
Fotografia 14 Montaje de V-A 96
Fotografia 15 V-A agrietada 96
Fotografia 16 Vigas V-A y V-B después de la prueba de carga. 97
Fotografia 17 Desprendimiento de la Fibra en la viga V-F 98
Fotografia 18 Aspecto general de las vigas después de la prueba de carga 98
Fotografía 19 Falla por desprendimiento de la fibra. 99
Fotografia 20 Ensayo a compresion 100
Fotografia 21 Rotura de los cilindros 100
Fotografía 22 Perfil de reacción y apoyos metálicos 101
Fotografía 23 Montaje de la viga V-A 101

R E S U M E N

Las técnicas de reforzamiento en estructuras de concreto, utilizando materiales compuestos como la Fibra de Carbono, han sido estudiadas y manejadas universalmente gracias a su fácil manejo (transporte), puesta en obra, resistencia a la corrosión y sus excelentes propiedades mecánicas. Sin embargo, el elevado costo unitario de estos materiales y la falta de conocimiento que existe al respecto han limitado su uso en países subdesarrollados como Colombia. Es muy común en nuestro país, el cambio de usos de las edificaciones, aumentando considerablemente las cargas y esforzando la estructura a estados para los cuales no fue diseñada, esto conlleva utilizar determinado sistemas de reforzamiento , que traducido, es un impacto negativo en los costos de la edificación, acompañado de traumatismos en la aplicación del sistema. El propósito de este trabajo es crear un enfoque diferente en el ámbito económico, respecto a los nuevos sistemas de reforzamiento que utilizan materiales de nuevas tecnologías. En el desarrollo de la investigación se realizaron unas pruebas de carga a nueve vigas en concreto reforzado con una sección típica de 10cmx15cm y una longitud de 150 cm y con reforzamiento representativos en su funcionalidad para los sistemas puestos en comparación. Todas estas vigas se ensayaron a flexión mediante una carga puntual aplicada en el centro de la luz de la viga. En las instalaciones del laboratorio de la empresa AICO LTDA. Luego se realizó un análisis comparativo de costos del reforzamiento por medio de los dos sistemas en comparación de una estructura típica o modelo, la cual tuvo un cambio de su uso. Los resultados muestran que el uso del reforzamiento con fibra de carbono además de presentar un buen comportamiento mecánico en los elementos reforzados, ofrece la posibilidad de menores tiempos constructivos y traumatismos, lo cual se traduce en ahorro. Sin lugar a duda los resultados obtenidos muestran que el uso de las fibras de carbono como materiales de reforzamiento o rehabilitación es un paso importante en la búsqueda de optimizar recursos sin dejar atrás el comportamiento estructural, el cual es el fundamento de esta investigación.

ABSTRACT

Reinforcement techniques in concrete structures using composite materials such as carbon fiber, have been studied and managed universally due to its easy handling (transportation), assembling, corrosion resistance and excellent mechanical properties. However, the high unit cost of these materials and people´s lack of knowledge have restricted their use in developing countries, like Colombia. It is very common in our country , the change of buildings uses, increasing loads significantly and striving the structure into states for which it wasn't designed , this entails the use a certain reinforcement systems , which in between lines, is a negative impact on building costs, wich is also matched by traumatisms in the system implementation . The purpose of this work is to create a different approachable focus in the economic field , respected to new systems of reinforcement materials trough the use of new technologies. In the development of the research conducted load tests were made to nine reinforced concrete beams with a typical section of 10cmx15cm and a 150 cm length , enhanced with a functionally representative reinforcement for the representative comparison between the systems . All these beams were bending tested by a applied point load to the center of the light of the beam in the laboratory facilities of the AICO LTDA company. After that, a performed comparative cost analysis of the beam´s reinforcement was made of a typical structure or model by the two systems in comparison , which already had a change of use. The results showed that the use of carbon fiber reinforcement, beside of presenting a good mechanical behavior at the reinforced elements, offers the possibility of a lower construction time and trauma, which gets translated in savings. Undoubtedly the results show that the use of carbon fibers as reinforcing or rehabilitation material is an important step in the quest to optimize resources without leaving behind the structural behavior, which is the foundation of this research.

INTRODUCCIÓN

Las estructuras de concreto simple o reforzado, durante su vida útil o de servicio están expuestas a diversos agentes físico-químicos, mecánicos y ambientales que la deterioran o que ponen en peligro su integridad estructural.

El incremento de cargas (cambios en el uso de edificios, nuevos volúmenes de tráfico en puentes, instalación de maquinaria pesada, etc.) reforzamiento sísmico, daño de partes estructurales (corrosión, impacto de vehículos y fuego), cambio en el sistema estructural o defectos de diseño y construcción, son los principales agentes que obligan a implementar distintos sistemas de reparación y reforzamiento, donde cabe resaltar el uso de fibras de carbono, la cual se aplica exteriormente mediante la impregnación de una resina epóxica.

El uso de las fibras de carbono con la impregnación de resinas epóxicas constituye una alternativa de solución a considerar, ya que dentro de sus principales ventajas está el fácil manejo (transporte) y puesta en obra, resistencia a la corrosión, etc. La eficacia de este método de refuerzo se ha demostrado a través de múltiples investigaciones a lo largo de varias décadas. *"Behavior of Reinforced Concrete Beams Streng the ned with Externally Bonded Hybrid Carbon Fiber–Glass Fiber Sheets" (*G. J. Xiong; J. Z. Yang, 2004) es una investigación en la cual se logró demostrar el aumento considerable de la capacidad de carga de elementos sometidos a flexión, además se realizó la comparación de los costos entre los distintos materiales compuestos utilizados.

Por tal razón esta investigación tiene como objetivo usar materiales compuestos que permitan aumentar la capacidad a flexión, mediante el estudio, análisis y ensayos de vigas dispuestas a esta condición de falla y seguidamente realizar unanálisis comparativo de costos entre el reforzamiento convencional y el reforzamiento con los materiales estudiados en esta investigación.

Estos objetivos surgieron de cuestionar ¿Se justificaría la implementación del sistema de reforzamiento estructural con fibras de carbono, considerando el alto costo que tienen estos materiales compuestos?

Con la apertura del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, que plantea como principal objetivo, el diseño de edificaciones que sean capaces de resistir fuerzas sísmicas, se ha introducido el concepto de durabilidad , definida como la resistencia que ofrece un material ante la acción del clima, ataques químicos, abrasión, entre otros. Es evidente que la utilización de materiales compuesto aventaja de una forma u otra los métodos constructivos que a su vez lo que buscan es un mejor rendimiento y de una u otra forma dar cumplimiento a lo reflejado en el reglamento.

Luego de conocer las propiedades mecánicas de los materiales compuestos es importante reflexionar y preguntarse qué tan viable económicamente pueden ser, su utilización como sistema de reforzamiento. Cabe resaltar que los métodos de reforzamiento que implementan materiales compuestos tienen un elevado precio, pero estos a su vez se ven restituidos por los cortos tiempos de ejecución, la ausencia de traumatismos ocasionados por el trasporte y almacenamiento de materiales ,ejecución y puesta en servicio de la obra.

Este trabajo de investigación consto con una etapa de diseño y construcción de vigas, a las cuales se le realizaron sus respectivas pruebas de carga, realizadas en el Laboratorio de AICO LTDA en el municipio de Turbaco del departamento de Bolívar. Las pruebas de cargas tienen como objetivo la comprobación teórica de la reproducción de dos sistemas de reforzamiento que responden de una misma manera a unas condiciones de servicio establecidas y que a su vez serian aplicables a la necesidad de reforzar una estructura determinada.

Una vez establecidas las comparaciones mecánicas de los dos sistemas de reforzamiento puestos en comparación, se procedió a realizar un análisis de costos, aplicados a un caso

hipotético en los cuales una estructura demanda un reforzamiento originado por unas nuevas condiciones de servicio.

Es importante que la Universidad siga demostrando su espíritu colaborador para la búsqueda de nuevas investigaciones y que así los estudiantes del programa de Ingeniería Civil puedan tomar como guía estos proyectos que se están desarrollando e incluso mejorar o continuar las investigaciones. Por ello este proyecto contribuye de manera muy positiva al desarrollo investigativo y a la búsqueda de nuevos sistemas de reforzamientos con los cuales se busca minimizar los tiempos y por ende los costos constructivos.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 MATERIALES COMPUESTOS

En ciencia de materiales reciben el nombre de materiales compuestos aquellos materiales que se forman por la unión de dos materiales para conseguir la combinación de propiedades que no es posible obtener en los materiales originales. Estos compuestos pueden seleccionarse para lograr combinaciones poco usuales de rigidez, resistencia, peso, rendimiento a alta temperatura, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad. Los materiales son compuestos cuando cumplen las siguientes características:

- Están formados de 2 o más componentes distinguibles físicamente y separables mecánicamente.
- Presentan varias fases químicamente distintas, completamente insolubles entre sí y separadas por una interface.
- Sus propiedades mecánicas son superiores a la simple suma de las propiedades de sus componentes (sinergia).
- No pertenecen a los materiales compuestos, aquellos materiales polifásicos; como las aleaciones metálicas, en las que mediante un tratamiento térmico se cambian la composición de las fases presentes

Estos materiales nacen de la necesidad de obtener materiales que combinen las propiedades de los cerámicos, los plásticos y los metales. Por ejemplo en la industria del transporte son necesarios materiales ligeros, rígidos, resistentes al impacto y que resistan bien la corrosión y el desgaste, propiedades éstas que rara vez se dan juntas.

1.1.1 Materiales Compuestos reforzados con fibras

Un componente suele ser un agente reforzante como una fibra fuerte: fibra de vidrio, cuarzo, kevlar, Dyneema o fibra de carbono que proporciona al material su fuerza a tracción, mientras que otro componente (llamado matriz) que suele ser una resina como epoxy o poliéster que envuelve y liga las fibras, transfiriendo la carga de las fibras rotas a las intactas y entre las que no están alineadas con las líneas de tensión. También, a menos que la matriz elegida sea especialmente flexible, evita el pandeo de las fibras por compresión. Algunos compuestos utilizan un agregado en lugar de, o en adición a las fibras.

En términos de fuerza, las fibras (responsables de las propiedades mecánicas) sirven para resistir la tracción, la matriz (responsable de las propiedades físicas y químicas) para resistir las deformaciones, y todos los materiales presentes sirven para resistir la compresión, incluyendo cualquier agregado.

Los golpes o los esfuerzos cíclicos pueden causar que las fibras se separen de la matriz, lo que se llama delaminación.

1.1.2 Características de los CFRP

Según la ficha técnica (Versión 01/2012): El Sikawrap Hex 103C es un tejido de fibras de carbono unidireccionales, de altaresistencia y alto módulo. El material es saturado en obra usando el sistemaepóxico Sikadur 301 para conformar un sistema de polímero reforzado confibras de carbono, usado para el reforzamiento de elementos estructurales.

- Propiedades de la fibra:

  Resistencia a tensión 3.790 N/mm2

  Módulo de tensión 234.400 N/mm2

  Elongación 1,5 %

  Dirección de la fibra 0o (unidireccional)

  Peso por m2 610 g

  Espesor 0,34 mm

  Densidad 1,80 g/cm3

Según la ficha técnica (Versión 01/2012):El Sikadur 301 es un adhesivo epóxico de 2 componentes, 100% sólidos, de alto módulo, alta resistencia y resistente a la humedad usado como resina de impregnación de los tejidos Sika Wrap para reforzamiento estructural.

- Propiedades del epóxico:

  (a 23°C y 50% H.R.)

  Color: Gris claro.

  Relación de mezcla: Componente 'A': Componente 'B' = 3:1 en volumen.

  Viscosidad (mezclado): Aprox. 2,700 cps.

  Vida en el recipiente: Aprox. 40 minutos (1 galón).

  Tiempo de contacto: Aprox. 90 minutos.

  Temperatura de deflexión (HDT)

  (ASTM D-648) 7 días: 47°C.

  Temperatura de transición vítrea

  (Tg) 7 días: 49°C.

- Propiedades mecánicas:

  Propiedades de tensión (ASTM D-638):
  Resistencia a tensión a 7 días: 8,000 psi (52.0 MPa).
  Módulo de elasticidad: 290 ksi (2,000 MPa).
  Elongación de rotura: 3.5%.
  Propiedades de flexión (ASTM D-790):
  Resistencia a flexión a 7 días: 13,000 psi (90.0 MPa).
  Módulo tangente: 500 ksi (3,448 MPa).
  Deformación unitaria de fluencia: 3.0%.

- Propiedades de compresión (ASTM D-695):

  Resistencia a la compresión: 1 día: 4,000 psi (27.6 MPa).
  3 días: 11,900 psi (82.1 MPa).
  7 días: 13,900 psi (96.0 MPa)
  Módulo de compresión: 250 ksi (1,725 MPa).

1.2 CRITERIOS DE DISEÑO A FLEXIÓN

1.2.1 Consideraciones generales – flexión

Para el diseño o la investigación de los elementos solicitados a flexión (vigas y losas), la resistencia nominal de la sección transversal (Mn) se debe reducir aplicando el factor de resistencia φ a fin de obtener la resistencia de diseño (φMn) de la sección. La resistencia de diseño (φMn) debe ser mayor o igual que la resistencia requerida (Mu). También se

deben satisfacer los requisitos de comportamiento en servicio para limitar las flechas y distribución de la armadura para limitar la figuración.

A continuación se describen procedimientos paso a paso para el diseño de secciones rectangulares que sólo tienen armadura de tracción, secciones rectangulares con múltiples capas de armadura y secciones rectangulares con armadura de compresión.

1.2.2 Diseño de secciones rectangulares que sólo tienen armadura de tracción

En el diseño de secciones rectangulares que sólo tienen armadura de tracción (*Ilustración 1).*las condiciones de equilibrio son las siguientes:

1. Equilibrio de fuerzas:

$$C = T$$ ***Ecuación (1)***

$$0.85f'_c\ ba = A_s\, f_y = \rho b d f_y$$ ***Ecuación (2)***

$$a = \frac{A_s\, f_y}{0.85f'_c\ b} = \frac{\rho d f_y}{0.85f'_c}$$ ***Ecuación (3)***

2. Equilibrio de momentos:

$$M_n = (C\ o'T)(d - \frac{a}{2})$$ ***Ecuación (4)***

$$M_n = \rho b d f_y (d - \frac{0{,}5\rho d}{0{,}85}\frac{f_y}{f'_c})$$ ***Ecuación (5)***

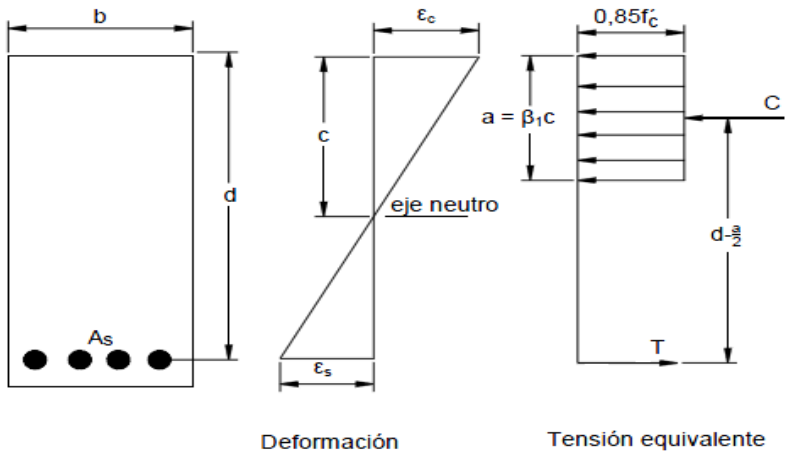


Ilustración 1 *Deformación específica y distribución equivalente de tensión en una sección rectangular.*

Dividiendo ambos lados de la Ec. (5) por bd2 se obtiene un coeficiente de resistencia nominal Rn:

$$\boldsymbol{R_n} = \frac{M_n}{\boldsymbol{bd^2}}\rho f_y (1 - \frac{0{,}5\rho d}{0{,}85}\frac{f_y}{f'_c})$$ ***Ecuación (6)***

Si b y d están prefijados, ρ se obtiene resolviendo la ecuación cuadrática para Rn:

$$\rho = \frac{0{,}85 f'_c}{f_y}(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0{,}85 f'_c}})$$ ***Ecuación (7)***

La Ecuación (5) se puede usar para determinar la cuantía de acero ρ conociendo Mu o viceversa si se conocen las propiedades de la sección b y d. Reemplazando Mn = Mu/φ en la Ecuación (5), y dividiendo ambos lados de la ecuación por f'c:

$$\frac{M_u}{\emptyset f'_c\, bd^2} = \frac{\rho f_y}{f'_c}\left(1 - \frac{\rho f_y}{0{,}85 f'_c}\right)$$ ***Ecuación (8)***

$$se\ define \qquad \omega = \frac{\rho f_y}{f'_c}$$ ***Ecuación (9)***

Reemplazando ω en la ecuación anterior:

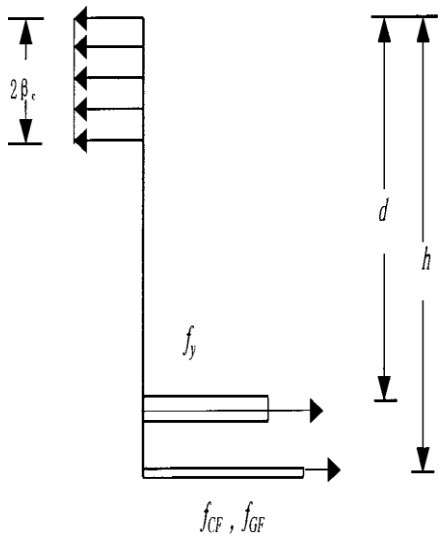
$$\frac{M_u}{\emptyset f'_c\, bd^2} = \omega(1 - 0{,}59\omega)$$ ***Ecuación (10)***

1.2.3 Diseño de secciones rectangulares con CFRP

- **Cálculo del Momento resistente a falla**

Aunque la tensión en la parte de compresión del hormigón nunca llegó a la etapa de fracturación para cualquier viga reforzada, el momento de falla todavía puede calcularse aproximadamente por la siguiente ecuación propuesta por Ross et al (1999) (*Ilustración 2)*

$$M_u = f_y A_S(d - \beta_c) + f_{yf} A_F(h - \beta_c)$$ ***Ecuación (11)***



Notación:

Los siguientes símbolos se utilizan en esta nota técnica:

A_F= *área de lámina de fibra (s)*

A_s= *área de barras de acero;*

d= *altura efectiva de viga de hormigón armado;*

f_F = *resistencia de lámina de fibra (s)*

f_y= *resistencia a la fluencia de las barras de acero.*

h= *profundidad de viga de hormigón armado;*

M_u= *momento ultimo resístete de la viga*

***d_c**= profundidad media de la zona de compresión de RC.*

***Ilustración 2** Distribución equivalente de tensión en una sección rectangular.*

1.3 INSPECCIÓN EVALUACIÓN Y DIAGNOSTICO

1.3.1 Investigación Preliminar

De acuerdo con el ACI 364, la investigación preliminar busca acopiar información inicial acerca de las condiciones de una estructura, el tipo y seriedad de los problemas que las afecta, la factibilidad de llevar a cabo una rehabilitación prevista, y la información necesaria para una posible investigación detallada.

1.3.1.1 Antecedentes

En primera instancia, debe recogerse toda la información general que sea posible, acerca del proyecto. Otro aspecto importante a documentar son las condiciones de posición de la estructura y la influencia del medio ambiente sobre la misma.

1.3.1.2 Revisión del Proyecto Original

Se lleva a cabo con el objeto de verificar los planos y las especificaciones con el comportamiento de la estructura; así como confirmar que los planos y especificaciones están en concordancia con lo que se encuentra construido.

Cuando no se dispone de ellos, se hace necesario recurrir a ensayos no destructivo, a mediciones físicas de la geometría de los elementos, a localizaciones del acero de repuestos, a levantamientos topográficos y altimétricos, etc.

1.3.1.3 Selección de recursos para la investigación

En la medida en que se valla cumpliendo la fase de antecedentes, debe identificarse el personal que debe intervenir en la inspección; así como seleccionar, los elementos y equipos más apropiados para adelantar la inspección.

1.3.1.4 Inspección visual

Es recomendable que la inspección visual de la estructura se lleve a cabo una vez se hallan cumplido las fases de antecedentes y revisión del proyecto original, pues la visita de inspección a la estructura debe basarse en la información recogida.

En este recorrido, se puede identificar y registrar daños como los siguientes:

- Desplomes
- Planos de fallos y fisuras por acciones físicas
- Fisuras estructurales
- Deflexiones y movimientos
- Fracturas y aplastamientos
- Descascaramiento
- Hinchamientos y reventones
- Cultivos biológicos
- Eflorescencias
- Lixiviación
- Expansión
- Corrección del acero de refuerzo
- Otros

1.3.1.5 Mediciones

En adicción a la expansión visual, las investigaciones de campos deben incluir mediciones de los miembros, longitud de luces, deflexiones y desniveles encontrados en la estructura

motivo de la investigación. En algunos casos, es indispensable revisar un levantamiento topográfico o altimétrico o batimétrico de las estructuras y localizar de manera precisa los daños. Los desplazamientos, fisuras, separaciones y distorsiones deben en la medida de lo posible, medirse y registrarse en el plano o "mapa de daños".

1.3.1.6 Auscultación de la estructura

Las observaciones y medidas, pueden ser complementadas con algunos ensayos de auscultación de la estructura y sus miembros mediante pruebas no destructivas. Sin embargo, debe tenerse presente que este tipo de ensayos ofrecen ayudas para identificar los sitios o zonas donde serían más utilices otro tipo de pruebas que puedan requerirse.

Algunas de las pruebas más usadas son las siguientes:

- Impacto acústico con martillo
- Localizador de barras y recubrimiento
- Radar y rayos x
- Martillo de revote o esclerómetro
- Resistencia a la penetración, pistola de Windsor
- Velocidad de pulso ultrasónico

1.3.1.7 Exploración de la estructura

Durante la inspección preliminar, es probable que también se requiera alguna exploración de la estructura, mediante la remoción de algunas porciones superficiales del concreto, de trozos de descascaramiento o desmoronamientos, partículas de polvo, capas de cultivos biológicos, productos de lixiviación, cristalización, reacciones deletéreas o corrosión.

1.3.1.8 Muestreo ensayo y análisis

En una investigación preliminar, rara vez se extraen muestras del concreto. Pero cuando se practica la extracción, estas muestras consisten en núcleos o pequeños especímenes para hacer exámenes de carácter petrográfico.

1.3.1.9 Informe preliminar

Con base en la información recogida, en la revisión de la capacidad estructural, en las observaciones adelantadas y en los resultados de los eventuales ensayos, se elabora un informe cuya estructura básica puede ser la siguiente:

- Objetivos
- Especificaciones de diseños y construcción
- Resultados de la inspección y ensayos
- Conclusiones
- Recomendaciones
-

1.3.2 Investigación profunda o detallada

Teniendo presente que la investigación profunda o detallada, es un complemento del investigación preliminar, el ACI 364 sugiere que los hallazgos de la investigación detallada influencien de manera directa: el resultado final del proceso de evaluación; la selección de los métodos de rehabilitación que se consideren; el costo estimando de cada alternativa de rehabilitación; y por último, la selección del método apropiado de rehabilitación. Por lo tanto, se debe poner especial cuidado en la planeación y ejecución de la investigación detallada. En general, es recomendable que una investigación detallada contemple los siguientes aspectos:

1.3.2.1 Documentación del proyecto

Es conveniente obtener y revisar todos los documentos adicionales que estén relacionados con la estructura. Esta información incluye:

- Información del diseño estructural
- Información de materiales
- Información de la etapa de construcción
- Historial de la estructura

1.3.2.2 Examen de la estructura

Es recomendable que el examen de la estructura se lleve a cabo una vez se hallan estudiados toda la documentación del proyecto, ya que la metodología y las estrategias que se adopten durante el examen de la estructura debe basarse en información recogida.

De otra parte, debido a que seguramente la información obtenida en la inspección visual, es de carácter superficial, es conveniente adelantar un examen detallada de la estructura no solamente en su superficie, sino también al interior de sus miembros. Para llevar a cabo este examen deben contemplarse los siguientes aspectos:

- Planeación y preparación para el examen
- Verificación de la estructura en campo
- Valoración de la condición actual
- Condiciones de seguridad
- Riesgo potencial

1.3.2.3 Ensayos a la estructura y toma de muestras

Cuando no se tiene la información adecuada o necesaria para establecer la condición de la estructura o sus materiales componentes, seguramente habrá necesidad de realizar ensayos complementarios a los que se efectuaron durante la investigación preliminar o extraer muestras de los materiales. Los ensayos a la estructura generalmente incluyen a la evaluación de la resistencia por medios no destructivos, para lo cual se recomienda los documentos ACI 437R y ACI 228.1R. La extracción de muestras para ser analizadas en el laboratorio es recomendable que se realice en zonas sanas y en zonas donde hay sospecha de materiales deletéreos.

1.3.2.4 Ensayo y análisis de las muestras

Dependiendo de los objetivos y el alcance de la investigación detallada se puede realizar los siguientes ensayos, previa inspección visual de las muestras y sus correspondientes registros fotográficos:

- Ensayos Físicos: Dimensiones, pesos, densidad, absorción capilar, porosidad abierta, permeabilidad, análisis térmico, ensayos sónicos.
- Ensayos Mecánicos: Ensayos de resistencia a la comprensión, ensayo de resistencia a la flexión, ensayo de resistencia a la tracción.
- Ensayos Químicos: Determinación del frente de carbonatación, contenido aproximado de cemento, sales de sodio, sales de potasio, sulfatos.
- Ensayos biológicos: Contenido aproximado de materia orgánica, desarrollo de cultivos microbiológicos, análisis químico elemental y analítico, difracción de rayos x.
- Ensayos microscópicos: Análisis petrográfico del concreto, microscopia electrónica de contaminaciones y microorganismos.

1.3.2.5 Evaluación estructural

La evaluación estructural se adelanta con el objeto de determinar la capacidad real que tiene la estructura para tolerar cargas. Esta labor es mejor adelantarla después de que se haya realizado el examen de la estructura, se hayan determinado las dimensiones y geometrías de los elementos; así como, los ensayos a la estructura y los materiales. Cuando hay sospechas de que la estabilidad estructural pueda estar comprometida, se hace indispensable adelantar una evaluación estructural. Esta se puede llevar a cabo mediante los siguientes métodos:

- Métodos empíricos
- Métodos analíticos
- Pruebas de cargas

1.3.2.6 Informe final

Tomando en consideración el informe preliminar y toda la información recogida en la investigación detallada, se elabora un informe cuya estructura básica puede ser la siguiente:

- Presentación
- Descripción de la estructura
- Documentación del problemas
- Levantamientos de daños
- Localización de muestras y determinación de ensayos
- Resultados de los ensayos
- Análisis y evaluación de los ensayos
- Evaluación estructural
- Diagnóstico de los daños
- Pronostico sobre el comportamiento de las estructura
- Recomendaciones de intervención
- Precauciones de seguridad

1.4 PROCEDIMIENTO DE REHABILITACION CON MATERIALES COMPUESTOS

Si bien la rehabilitación de las estructuras es necesaria y cada día adquiere mayor importancia por numerosas razones sociales, técnicas y económicas, hay aún mucha incertidumbre con relación a la confiabilidad en la efectividad de los trabajos que comúnmente son puestos en la práctica. El éxito de la rehabilitación de estructuras de concreto que han sido deterioradas depende fundamentalmente del diagnóstico, la evaluación estructural y de una acertada manera de rehabilitación con personal preparado y calificado para esta tarea. Por tal razón es indispensable conocer cada uno de los pasos necesarios para que este proceso de rehabilitación se concluya de manera exitosa y para que los resultados a largo plazo sean los esperados.

1.4.1 Preparación de la superficie

Según la ficha técnica de 01/2012 de Sika, La superficie debe estar limpia y sana. Puede estar seca o húmeda, pero libre de agua empozada o hielo. Remover polvo, lechada, grasa, compuestos curadores, impregnaciones, grasas, partículas extraña, material suelto o cualquier otro elemento que impida la adherencia. Cuando la superficie sea irregular debe ser nivelada con un mortero de reparación adecuado. La resistencia en adherencia del concreto debe ser verificada, después de la preparación de superficie por un ensayo aleatorio de resistencia de adherencia a tensión (ACI 503R) a criterio del ingeniero. La mínima resistencia a tensión debe ser de 15 kg/cm2 con falla del concreto.

1.4.2 Método de limpieza

Para la preparación de la superficie de concreto se recomienda utilizar chorro de arena o cualquier otro procedimiento de limpieza mecánica aprobado, que provea textura rugosa a la superficie.

***Fotografía 1**. Preparación y limpieza de la superficie, estadio Jaime Morón León. Fuente: Reporte de construcción Reconstrucciones s.a.s. Aplicador autorizado de productos Sika. 2012.*

1.4.3 Mezclado del epóxico

Para información sobre características y mezclado del **Sikadur 301** referirse a la hoja técnica de los productos. El consumo de la resina epóxica **Sikadur 301**, depende de la rugosidad de la superficie y la práctica que se tenga en el procedimiento de impregnación del tejido, sin embargo el consumo teórico aproximado es de 350 g/m2 de producto para la imprimación de la superficie del sustrato y 730 g/m2 para la saturación o impregnación del tejido.

1.4.4 Corte del tejido

El tejido puede ser cortado a la longitud apropiada usando tijeras de tipo industrial o para trabajo pesado. Debe evitarse el uso de cualquier elemento de corte sin filo que pueda debilitar o deshilachar la fibra.

1.4.5 Aplicación

Antes de la colocación del tejido, la superficie de concreto debe ser imprimada y sellada usando el epóxico **Sikadur 301**. En cualquier caso, la instalación debe ser realizada por un aplicador autorizado o personal calificado.

Fotografía 2 *Instalación de Materiales Compuestos en elementos estructurales, estadio Jaime Morón León. Fuente: Reporte de construcción Reconstrucciones s.a.s. Aplicador autorizado de productos Sika. 2012.*

1.5 PROCESO DE REHABILITACION DE LA MANERA TRADICIONAL

Según (Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigon. Reparacion, Refuerzo y Proteccion, 2003), *l*a calidad de la rehabilitación, depende en gran parte de la preparación y limpieza de la zona, por lo que se debe realizar con mayor cuidado, utilizando materiales apropiados y la mejor técnica constructiva para cada caso. Es indispensable conocer cada uno de los procesos que se tienen que dar en este tipo de rehabilitación para que la estructura pueda continuar siendo funcional y para poder cumplir con todo lo expuesto en el reglamento de construcción. Es importante tener en cuenta que para asegurar una buena rehabilitación la interface que se forma entre el hormigón existente y el nuevo debe poseer suficiente capacidad para desarrollar las propiedades mecánicas bajo las cuales se fundamenta el análisis estructural. Y además se debe asegurar que el acero de refuerzo, desarrollar los esfuerzos propios derivados de las condiciones de diseño. Para esto es necesario tener en cuento que el personal que realice la rehabilitación debe estar debidamente calificado y preparado para este tipo de actividad.

1.5.1 Revisión y preparación de los elementos estructurales

Esta parte consiste en todos los procedimientos que se debe realizar a los elementos estructurales antes de la limpieza de la superficie y de la colocación del nuevo concreto. Este proceso consiste en la delimitación de la zona a reparar, seguido de la escarificación dejando totalmente expuesto el acero más superficial.

Fotografía 3.*Escarificación de estructura en reparación. Fuente: Paulo Helene, Fernanda Pereira. "Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón".*

1.5.2 Limpiezas de las superficies.

Este procedimiento consiste en todo el conjunto de tareas que se deben realizar a los elementos estructurales antes de la aplicación de los materiales de la reparación. Entre los métodos de limpieza más utilizados se tiene, *chorro de agua fría a alta presión.* Este método se utiliza cuando se necesita hacer limpieza a grande y pequeñas áreas, de igual forma existen equipos de chorros de agua a baja presión, chorros de aire de alta y baja presión, solventes volátiles entre otros. Es indispensable que esta paso se realice a la perfección para que la adherencia entre el material de reparación y el existente se pueda de la mejor manera.

Fotografía 4. *Limpieza de superficie de reparación con chorros de agua a alta presión. Fuente: Paulo Helene, Fernanda Pereira. "Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón".*

1.5.3 Procedimiento de colocación del material de reparación

Este proceso es uno de los últimos y más importantes, consiste en el vaciado del material de reparación dentro del volumen o cavidad preparada. Existen muchos métodos para este proceso pero sin lugar a duda generan muchos traumatismos, pérdida de tiempo y mucha mano de obra.Es importante verificar mucho antes del proceso de colocación del material de reparación, que las barras de acero no se encuentran muy deterioradas debido a estar expuestas por mucho tiempo. De ser así se le deben unos tratamientos a las barras para luego si continuar con la colocación del material.

Existen otros métodos como el *Dry Packing, empaquetamiento seco*, el cual consiste en la colocación del material de reparación en forma manual, mediante el apisonamiento de capas sucesivas dentro del volumen o cavidad preparada. De igual forma existen otros métodos como *Concreto Lanzado vía seca, Agregado precolocado y grouting, Encofrado y bombeo, y Concreto lanzado víahúmeda.* Estos métodos son muy utilizados y recomendados pero de igual forma requieren de mucha mano de obra, generan mucho traumatismo y muchos costos. Para todos estos procedimientos es importante contar con un personal calificado el cual asegure que la rehabilitación quede de la mejor manera.

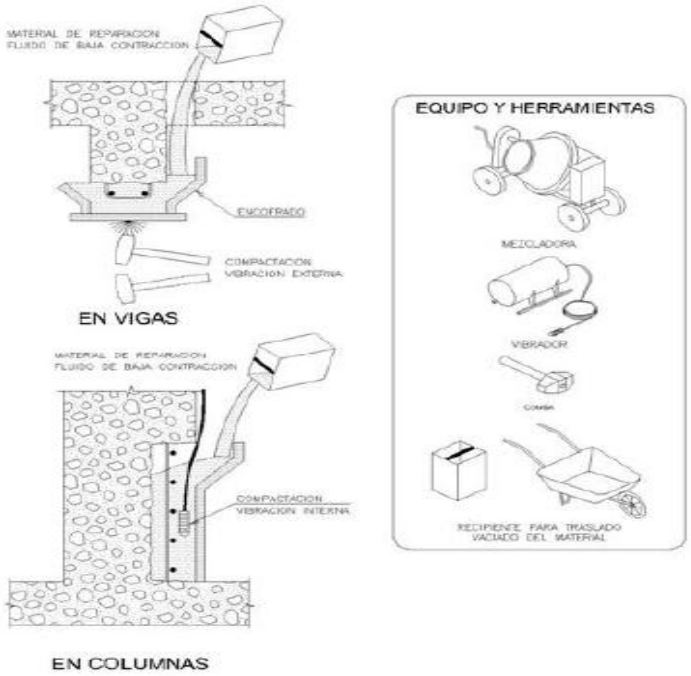


Ilustración 3 *Sistema de Encofrado y vaciado en el sitio. Fuente: Paulo Helene, Fernanda Pereira. "Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón".*

1.6 FALLAS EN VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORZADAS A FLEXION CON FIBRAS DE CARBONO

Dice *CINPRA 113*, el refuerzo a flexión de una viga de concreto armado con materiales compuestos (Fibra de carbono) se realiza adhiriendo el material a la parte inferior de la viga, el cual es el lugar donde se generan los esfuerzos a tracción. Por tal razón es importante que la zona a reforzar este libre de polvos, grasas e irregularidades. Por lo general las vigas reforzadas con materiales compuestos tienen fallas frágiles y repentinas, lo cual reduce la posibilidad de alcanzar su resistencia ultima de flexión. De acuerdo a lo expuesto en el artículo "*Vigas de hormigón armado reforzadas y/o reparadas con materiales compuestos"* (S. Echazu Lamas, 2010), los modos de falla de una viga reforzada a flexión con materiales compuestos se clasifican en siete categorías.

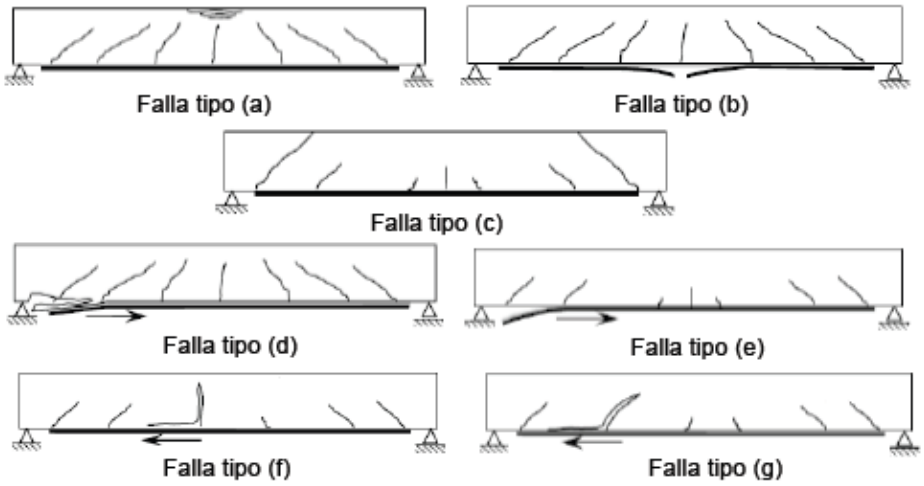


Ilustración 4 *Modo de falla de vigas reforzadas a flexión con materiales compuestos. Fuente: Refuerzo y rehabilitación de estructuras. Cinpar 2010*

- Falla tipo (a). Esta falla se produce por la rotura del hormigón en la zona de compresión.
- Falla tipo (b). Esta falla se da por la rotura del material compuesto.
- Falla tipo (c). Falla por corte.
- Falla tipo (d). Esta falla se produce por el desprendimiento del recubrimiento de hormigón.
- Falla tipo (e). Esta se produce por el desprendimiento del extremo final de la fibra.
- Falla tipo (f). Se produce por el despegue del refuerzo de material compuesto inducido por fisura de flexión.
- Falla tipo (g). Despegue del refuerzo de material compuesto inducido por fisura de corte.

1.7 MARCO NORMATICO

REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCION SISMO RESISTENTE NSR – 10

Este reglamento colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10) es una adecuación o mejora a la Norma Colombiana de Diseño y Construcción sismo resistente NSR – 98 y con la cual se pretende establecer todas las condiciones con las que deben contar todas las construcciones con el fin de que la estructura se comporte favorablemente ante un eventual sismo.

Además de la NSR-10 se utilizaron una serie de normas con los cuales se buscó tener la mayor confiabilidad y credibilidad en la realización de la investigación. A continuación se expondrán cada uno de estos reglamentos que se utilizaron para dicha investigación:

REGLAMENTO	DESCRIPCION
ASTM D421-58 Y D422-63	Análisis granulométrico
ICONTEC. Ensayos para materiales de construcción 176	Método para determinar la densidad y la absorción de agregados gruesos
ICONTEC. Ensayos para materiales de construcción. 237	Método para determinar el peso específico y la Absorción de agregados finos.
ACI 440.2R-02	

Tabla 1:1 Reglamentos utilizados en la presente investigación.

2. OBJETIVOS Y ALCANCE

2.1 OBJETIVO GENERAL

Comparar comportamientos y costos, en el reforzamiento de vigas sometidas a flexión por medio del uso de encamisado en concreto reforzado y fibras de carbono, las cuales serán sometidas a pruebas de cargas para determinar el sistema más viable.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar por medio de una prueba de carga el comportamiento de las vigas bajo ciertas condiciones de carga, considerando estados de esfuerzo, deflexiones, agrietamientos, ductilidad, relación rigidez - peso, etc.
- Cuantificar los costos en la implementación de los métodos de reforzamiento y rehabilitación.
- Determinar la mejor alternativa de aplicación considerando los dos parámetros comparativos (comportamiento - costo).
- Ratificar o no el buen desempeño de las fibras de carbono.
- Describir los procesos de evaluación, diagnóstico e intervención en la rehabilitación y reforzamiento de estructuras de Concreto.

3. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada en esta investigación se clasificó como mixta, ya que se tuvo en cuenta la naturaleza investigativa experimental y documental, es decir trabajar con datos cuantitativos y cualitativos en un mismo proyecto. Para llevar a cabo el objetivo de esta investigación, se realizaron las siguientes actividades:

3.1 INFORMACIÓN BIBLIOGRÁFICA

Para el efectivo desarrollo de este trabajo de grado Se utilizó el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, al igual que la ACI440-2R (*"Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures")*, como principales bases teóricas en el proceso del montaje experimental.

De igual forma se utilizaron de algunos manuales de rehabilitación de estructuras, diseño de mezclas de hormigón, análisis de precios unitarios y cantidades de obra, etc.

Durante el desarrollo del presente trabajo de grado se presentaron cuatro fases de diseño, las cuales son:

- Diseño de la dosificación de concreto.
- Diseño de las tres secciones patrón, que deberían garantizar una falla a flexión antes que a cortante.
- Diseño de la tres secciones reforzadas con FRP basados en la normativa americana ACI 440.2R-02
- Diseño del montaje para prueba de carga.

3.2 DISEÑO DE LA MEZCLA DE CONCRETO

Se diseñó una mezcla de concreto para fundir tres tipos de vigas patrón con sus respectivos refuerzos variables, teniendo en cuenta que no se presentarán ningún tipo de condiciones severas que afecten y comprometan la durabilidad y la apariencia de la estructura. La especificación estructural corresponde a un f`c=245 Kg/cm2 (3500 psi).

AGREGADO GRUESO

El agregado grueso que se utilizó es proveniente de Rotinet , Atlántico, y su caracterización cumple con la norma (Norma Tecnica Colombiana ICONTEC, 2006), NTC-174, *ESPECIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS PARA CONCRETOS*). Su análisis granulométrico se presenta a continuación:

Granulometría de Agregados Gruesos ICONTEC-77					
Abertura	Tamiz	Pes (g)	Retenido		Pasa (%)
			Parcial	Acumulado	
mm	ASTM		(%)	(%)	
40	(1 1/2")	0,0	0	0	100
25	(1")	0,0	0	0	100
20	(3/4")	150,0	3	3	97
12,5	(1/2")	2888,3	54	57	43
10	(3/8")	1449,0	27	84	16
5	Nº 4	850,1	16	99	1
2,5	(Nº8)	19,5	0	100	0
1,25	(Nº16)	0,0	0	100	0
0,63	(Nº30)	0,0	0	100	0
0,315	(Nº50)	0,0	0	100	0
0,16	(Nº100)	0,0	0	100	0
	Residuo=	13,8	0	100	0
	Suma (D)=	**5370,7**		*Pérdida*	

Tabla 3:1 *Análisis granulométrico de agregado grueso.*

Sus propiedades son:

- Masa unitaria suelta: 1630 Kg/m3
- Masa Unitaria compuesta: 1760 Kg/m3
- Densidad aparente seca: 2.58 g/cm3
- Absorción: 1.0%
- Humeda natural 0.99%
- Forma: Redondeada (Grava de rio)
- Tamaño máximo: 1"
- Tamaño máximo nominal: $\frac{3}{4}$"

AGREGADO FINO

El agregado fino que se utilizó es proveniente de Rotinet, Atlántico y su caracterización cumple con la (Norma Tecnica Colombiana ICONTEC, 2006) (NTC-174, *ESPECIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS PARA CONCRETOS*). Su análisis granulométrico se presenta a continuación:

Granulometria de Agregados Finos ICONTEC-77					
Abertura	Tamiz	Pes (g)	Retenido		Pasa (%)
			Parcial	Acumulado	
mm	ASTM		(%)	(%)	
10	(3/8")	0,0	0	0	100
5	Nº 4	52,9	4	4	96
2,5	(Nº8)	95,9	6	10	90
1,25	(Nº16)	99,4	7	17	83
0,63	(Nº30)	258,8	17	34	66
0,315	(Nº50)	715,7	48	82	18
0,16	(Nº100)	253,3	17	98	2
Residuo=		24,0	2	100	0
Suma (D)=		**1500,0**	*Pérdida*		

Tabla 3:2 *Análisis granulométrico de agregado fino*

Sus propiedades son:

- Masa unitaria suelta: 1500 Kg/m3
- Masa Unitaria compuesta: 1640 Kg/m3
- Densidad aparente seca: 2.52 g/cm3
- Absorción: 2.46%
- Humedad natural 3.51%
- Forma: redondeada (Arena de rio)
- Módulo de finura: 2.44

AGUA

El agua que se utilizo es potable.

- Densidad: 1.00g/cm3
- Masa unitaria suelta:1.00g/cm3

CEMENTO

El cemento que se usó en la mezcla es Cemento Portland tipo I.

- Densidad aparente seca: 3.10 g/cm3
- Masa unitaria suelta:1.10g/cm3

METODOLGIA DE DISEÑO

3.2.1 Selección del asentamiento (sslump)

De acuerdo con la tabla 4, para la obra a realizar el asentamiento escogido es 75mm

Consis-tencia	Asentamiento(mm)	Ejemplo de tipo de construccion	Sistema de colocación	Sistema de compactacion
muy seca	0-20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentacion	Con vibradores de formaleta,concretos lanzados	Secciones sujetas a vibraciones extremas,puede requerirse presión
Seca	20-35	pavimentos	Pavimentos con terminatoria vibratoria	Secciones sujetas a vibraciones intensas
Semi-seca	35-50	Pavimentos,fundaciones en concreto simple	Colocación con maquinas operadas manualmente	Secciones simplemente reforzadas,con vibración
Media	50-100	Pavimentos compactados a mano,losas,muros,vigas	colocación manual	Secciones simplemente reforzadas,con vibración
Humeda	100-150	elementos estructurales esbeltos	Bombeo	Secciones bastante reforzadas,sin vibración
Muy Humeda	150 o mas	Elementos muy esbeltos,pilotes fundidos in situ	Tubo Tremie	Secciones altamente reforzadas,normalmente no adecuados para vibrarse

Tabla 3:3 *Asentamientos recomendados para diversos tipos de construcción, sistemas de colocación y compactación.*

3.2.2 Tamaño máximo nominal del agregado

- 1/3 espesor de losa
- 1/5 menor distancia entre formaletas
- 3/4 espacio libre entre varillas de refuerzo: 3.75 cm usar 3/4"

3.2.3 Contenido de aire

Tamaño maximo nominal del agregado		Contenido de aire en porcentaje (por volumen)			
mm	pulg	Naturalmente atrapado	Exposicion Ligera	Exposicion moderada	Exposición severa
9,5	3/8	3,0	4,5	6,0	7,5
12,7	1/2	2,5	4,0	5,5	7,0
19,0	3/4	2,0	3,5	5,0	6,5
25,4	1	1,5	3,0	4,5	6,0
38,1	1 1/2	1,0	2,5	4,5	5,5
20,8	2	0,5	2,0	4,0	5,0
76,1	3	0,3	1,5	3,5	4,5
152,0	6	0,2	1,0	3,0	4,0

Tabla 3:4 *Contenido de aire*

Para un tamaño máximo nominal del agregado grueso de 3/4", el porcentaje de aire naturalmente atrapado es de 2,0%.

3.2.4 Estimación del agua de la mezcla

De la Tabla 6 para mezcla sin aire incluido , forma redondeada de los agregados, asentamiento de 75mm y tamaño máximo nominal del agregado grueso de 3/4", la cantidad de agua de mezclado necesaria es de 187 kg/m^3 o 187 l/m^3.

Asentamiento		Tamaño máximo del agregado, en mm (pulg.)							
		9.51 ¾"	12.7 ½"	19.0 ¾"	25.4 1"	38.1 1½"	50.8 2"	64.0 2½"	76.1 3"
mm	pulg	Agua de mezclado, en Kg/m³ de concreto							
0	0	213	185	171	154	144	136	129	123
25	1	218	192	177	161	150	142	134	128
50	2	222	197	183	167	155	146	138	132
75	3	226	202	187	172	160	150	141	136
100	4	229	205	191	176	164	154	144	139
125	5	231	208	194	179	168	156	146	141
150	6	233	212	195	182	172	159	150	143
175	7	237	216	200	187	176	165	156	148
200	8	244	222	206	195	182	171	162	154

Tabla 3:5 *Estimación del agua de mezclado para agregados de forma redondeada, sin aire incluido en la mezcla.*

3.2.5 Resistencia de diseño

Cuando no hay registro de pruebas de resistencia en donde se usaron materiales y condiciones similares a aquellas que serían empleadas, la resistencia de diseño de la mezcla se debe determinar de acuerdo con la siguiente tabla:

Resistencia especificada f'c(kg/cm^2)	Resistencia de diseño de la mezcla f'cr(kg/cm^2)
Menos de 210 Kg/cm^2	f´c + 70 kg/cm^2
De 210 kg/cm2 a 350 kg/cm^2	f´c + 85 kg/cm^2
Más de 350 Kg/cm^2	f´c + 100 kg/cm^2

Tabla 3:6 *Fórmulas para el cálculo de la resistencia de diseño de la mezcla*

Para *f´c:24,5Mpa*

$$f´cr = f'c + 85\ kg/cm^2 \qquad \textbf{Ecuación (12)}$$

$$f´cr = 245 + 85\ kg/cm^2$$

$$f´cr = 330\ kg/cm^2$$

3.2.6 Relación agua-cemento

Según la Tabla C.4.3.1 de la NSR-10 en la, la relación agua-cemento, teniendo en cuenta los requisitos de durabilidad para la categoría de exposición **C1** (Concreto expuesto a la humedad, pero no a una fuente externa de cloruros)

A/C por Durabilidad=0.5

- Según la Tabla 3:7, para cemento Portland tipo I, sin aire incluido y que se encuentra dentro del promedio de los cementos colombianos; se determinó que la relación A/C = 0.42 en la línea media para un *f´cr:33,0Mpa*.

  A/C promedio: 0.46

Resistencia a la compresión kg/cm^2	Relación agua - cemento en peso		
	Límite superior	Limite medio	Límite inferior
140	-	0,72	0,60
175	-	0,65	0,58
210	0,70	0,50	0,53
245	0,64	0,53	0,49
28	0,59	0,48	0,45
315	0,54	0,44	0,42
350	0,49	0,40	0,38

Tabla 3:7 *Correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días de edad y la relación agua-cemento para los cementos colombianos, portland tipo I, concreto sin aire incluido.*

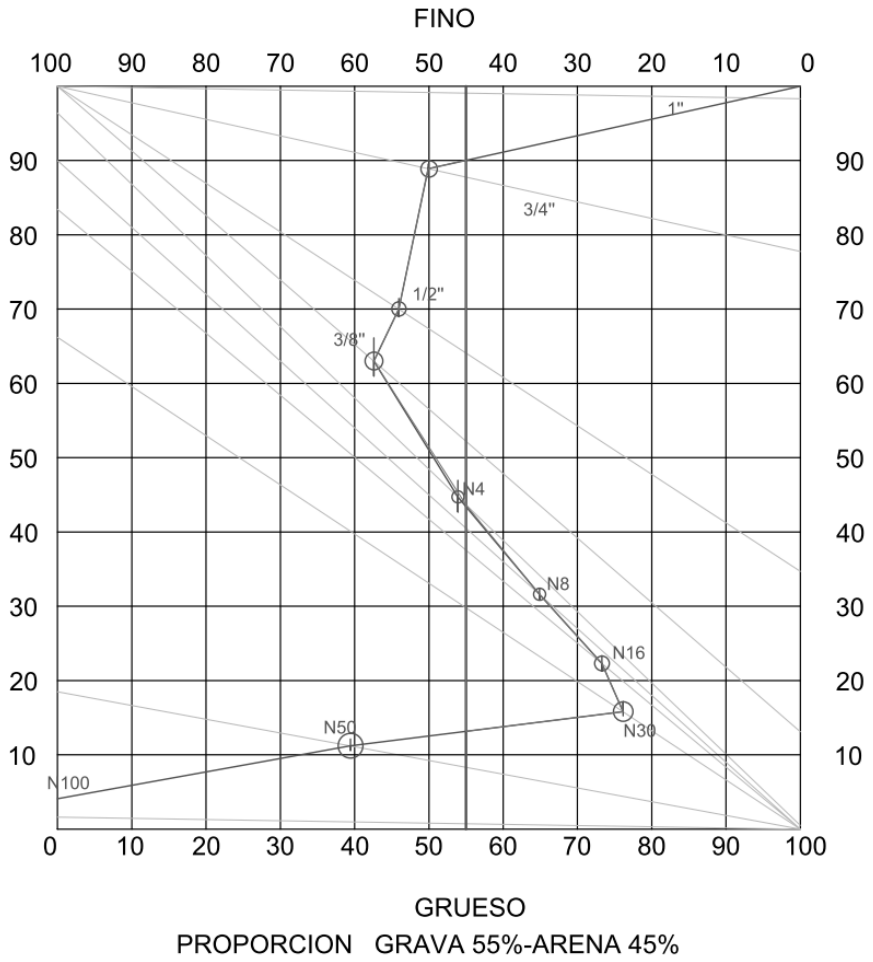
3.2.7 Calculo del contenido de cemento

$$\boldsymbol{Cemento = \frac{A}{A/C} = \frac{187}{0.46} = 406.5kg/m^3}$$

3.2.8 Agregados

- **Proporciones de agregado grueso y fino**

Método Grafico



Grafica 1 *Representación gráfica de combinación de agregados.*

De acuerdo con la Grafica 1 de combinación de agregados se determinó una combinación aproximada de 45% de agregado fino y 55% de agregado grueso.

Vol. Abs. Agregados + Vol. Abs. Agua+ Vol. Abs. Cemento= 1000 l/m^3 ***Ecuación (13)***

$$\text{Vol. Abs. Agregados} = 1000 - \frac{187}{1} - \frac{406.5}{3.1} = 681.8$$

$$\text{Vol. Abs. Agregados} = 681.8\ \text{l/m}^3$$

- **Densidad aparente seca combinada**

$$G\ promedio = \frac{100}{\sum \frac{\%i}{Gi}} = \frac{100}{\frac{45}{2.52} + \frac{55}{2.58}} = 2.553\ kg/m^3$$

$$G\ promedio = 2.553\ kg/m^3$$

- **Peso seco de los materiales combinados**

$$Pr = Vol.abs.Agregados * Gpromedio$$ ***Ecuación (14)***

$$Pr = 681.8 * 2.553\ kg/m^3$$

$$Pr = 1740.56\ kg$$

- **Peso seco agregado grueso**

$$Pag = Pr * \%A.G$$ ***Ecuación (15)***

$$Pag = 1740.56\ \frac{kg}{m^3} * 0.55$$

$$Pag = 957.31\ kg/m^3$$

- **Peso seco agregado fino**

$Paf = Pr * \%A.F$ ***Ecuación (16)***

$$Paf = 1740.56\ \frac{kg}{m^3} * 0.45$$

$$Paf = 783.25\ kg/m^3$$

Material	Peso seco(kg/m)	Peso especifico(g/cm)	Vol. ABS. (l/m)
Cemento	406,5	3,1	131,1
Agua	187	1	187,0
Aire	-	-	-
Agreg. Grueso	957,31	2,58	371,0
Agreg. Fino	783,25	2,52	310,8
total	2334,08		1000,0

Tabla 3:8 *Cantidades de agregado grueso y fino por m3 de mezcla de concreto hidráulico por el método gráfico*

Ajuste por humedad de los agregados

Debido a que los agregados están húmedos al momento de la mezcla se les agrega el porcentaje de agua que deben contener.

- Humedad agregado grueso: 0.99%
- Porcentaje de absorción agregado grueso: 1.0%
- Humedad agregado fino: 3.51%
- Porcentaje de absorción agregado fino: 2.46%

$$Peso\ humedo\ agregado\ grueso = 957{,}31 * 1.0099 = 966.78\ kg/m^3$$

$$Peso\ humedo\ agregado\ fino = 783.25 * 1.054 = 825.54\ kg/m^3$$

3.2.9 Agua libre

Para el cálculo del agua libre, se recalculo el porcentaje de humedad de los agregados, ya que el día en que se realizó el diseño de la mezcla sus condiciones de humedad habían variado, debido a que este se encontraba a la intemperie.

- **Humedad de agregado fino**

$$\%humedad = \frac{Peso\ humedo - Peso\ seco}{Peso\ seco} * 100$$ ***Ecuación (17)***

$Peso\ humedo = 490\ gr$

$Peso\ Seco = 465gr$

$$\%humedad = \frac{490 - 465}{465} * 100$$

$$\%humedad = 5{,}4\%$$

- **Humedad de agregado grueso**

$$\%humedad = 0{,}99\%$$

$$agua\ libre = -\sum Psi * (\%humedad - \%absorcion)$$ ***Ecuación (18)***

$$agua\ libre = -993.14 * (0.0099 - 0.01) - 812.57(0.054 - 0.0246)$$

$$agua\ libre = -22.93\ l/m^3$$

- **Agua de mezclado corregida**

$$agua\ mezclado\ corregida\ = agua\ mezclado + agua\ libre \qquad \textbf{\textit{Ecuación (19)}}$$

$$agua\ mezclado\ \ corregida = 187 + (-22.93)$$

$$agua\ mezclado\ \ corregida = 164{,}07\ l/m^3$$

3.2.10 Cantidades de obra de mezcla de concreto hidráulico

La siguientes tablas muestra la cantidad de concreto hidráulico y material necesario para la elaboración de nueve vigas y los cilindros de muestra para el cálculo de la resistencia del concreto

	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Total
Vigas(,10*,15*1,5)	m3	9	0,0225	0,203
Cilindros	m3	3	0,006	0,018
Desperdicio	%	1	8	0,080
			TOTAL(m3)	0,30

Tabla 3:9 *Cantidad de concreto en m3 necesario.*

Material	Peso seco(kg/m)	Peso especifico(g/cm)	Vol. ABS. (l/m)
Cemento	122,0	3,1	39,3
Agua	56,1	1	56,1
Aire	-	-	-
Agreg. Grueso	287,2	2,58	111,3
Agreg. Fino	235,0	2,52	93,2
total	700,22		300,0

Tabla 3:10 *Cantidad de material seco para 0,3 m3 de concreto.*

3.2.11 Ensayo de cilindros

Los ensayos de los cilindros se realizaron después de 28 días de haberse fundido las vigas. Inicialmente se habían tomado tres especímenes pero uno de ellos se averió

	Cilindro (6" x 12")	
	Pmax(lbf)	Esfuerzo Psi
M1	69805	2468
M2	74537	2636
	Promedio	**2552**

Tabla 3:11 *Resumen ensayo de cilindros*

Aunque el contenido de cemento, el tipo de cemento y las condiciones de curado se llevaron a cabalidad, la resistencia a la compresión del concreto no superó los 3500 Psi esperados.

La baja resistencia obtenida, muy probablemente fue causada por la falta de un equipo de mezclado, ya que este trabajo se realizó manualmente, lo que ocasiona discrepancias en la dosificación de la mezcla especialmente en la relación A/C. Sin embargo este no fue un parámetro de gran impacto sobre la resistencia de las vigas en los ensayos de carga.

3.3 DISEÑO DE LAS VIGAS MODELO

Para las tres secciones modelo, se utilizó concreto y acero de las siguientes especificaciones:

Concreto f'c: 24,5 Mpa

Acero fy: 420 Mpa

3.3.1 Diseño de la sección modelo V-1

Este diseño representa una sección arbitraria

$b: 10\ cm$

$h: 15\ cm$

$recubrimiento\ superior\ e\ inferior: 3cm$

- **Altura efectiva a flexión**

$$d: 15cm\ - 3cm - \frac{0{,}635}{2}\ cm$$

$$d: 11{,}6825cm$$

- **Altura efectiva a compresión**

$$d': 3cm + \frac{0{,}635}{2}\ cm$$

$$d': 3{,}31\ cm$$

Refuerzo a flexión$A_s = 64mm^2$; $2\#2(\ 1/4\ '')$

Momento resistente $\emptyset Mn$

$$\emptyset Mn = \emptyset * A_s * f_y * (d - \frac{a}{2})$$ ***Ecuación (20)***

Calculo de *a:*

$$a = \frac{p * f_y}{0.85 * f'_c} * d$$ ***Ecuación (21)***

Calculo de la cuantía *(p)*:

$p = \frac{A_S}{b*d}$ ***Ecuación (22)***

$$p = \frac{64mm^2}{(100mm) * (116{,}825mm)} = 0{,}005478$$

Remplazando:

$$a = \frac{0{,}005478 * 420Mpa}{0.85 * 24{,}5Mpa} * 11{,}68cm$$

$$a = 1{,}105\ cm$$

Entonces $\emptyset Mn$:

$$\emptyset Mn = 0{,}9 * \frac{0{,}64cm^2}{10000cm^2} * 1m^2 * 42000 * (0{,}1168m - \frac{0{,}01105m}{2})$$

$$\emptyset Mn = 0{,}269\ Ton.m$$

Para la determinación del Momento real resistente (*Mn*), no deberá usarse el valor de reducción

$$\emptyset = 0{,}9$$

$Mn = \frac{\emptyset Mn}{0{,}9}$ ***Ecuación (23)***

$$Mn = \frac{0{,}269}{0{,}9} = 0{,}298\ Ton.m$$

- **Calculo de la carga de agrietamiento**

$$\boldsymbol{M = \frac{P_{falla} * l}{4} + \frac{w * l^2}{8}} \qquad \textbf{\textit{Ecuación (24)}}$$

P = Carga de agrietamiento del elemento.

l = Luz de la viga.

M = Momento resistente.

w = Carga repartida que actúa sobre el elemento, en este caso es el peso propio de la viga.

- Cálculo del peso propio de la viga (w):

$w = 2{,}4\, Ton/m^3 * (0{,}1m * 0{,}15m)$

$$w = 0{,}036\, Ton/m$$

- Calculo de la carga de agrietamiento despejando P_{falla} de la ecuación(24)

$$0{,}298\, Ton.m = \frac{P_{falla} * 1{,}4m}{4} + \frac{0{,}036 Ton/m * (1{,}4m)^2}{8}$$

$$P_{falla} = 0{,}826\, Ton$$

- **Diseño a cortante de la sección**

$V_u = cortante\ ultimo\ de\ diseño$

$\emptyset V_c = resistencia\ del\ concreto\ a\ una\ fuerza\ cortante$

$\emptyset V_s = resistencia\ del\ acero\ a\ una\ fuerza\ cortante$

$$V_u = \frac{P_{falla}}{2} = \frac{0{,}826\ Ton}{2}$$

$$V_u = 0{,}413\ Ton$$

$$V_u = \emptyset V_c + \emptyset V_s \qquad \textbf{\textit{Ecuación (25)}}$$

$$\emptyset V_c = \emptyset \frac{\sqrt{f'_c}}{6} * b * d \qquad \textbf{\textit{Ecuación (26)}}$$

$$\emptyset V_c = 0{,}75 * \frac{\sqrt{24{,}5Mpa}}{6} * (0{,}10m) * (0{,}1168m) * 100$$

$$\emptyset V_c = 0{,}722\ Ton$$

Ya que $V_u < \emptyset V_c$, entonces en teoría el concreto resiste la totalidad de la fuerza cortante, sin embargo se colocaran estribos por construcción.

$$S = \frac{d}{2} = \frac{11{,}68\ cm}{2}$$

$$S = 6cm$$

$$Cantidad\ de\ flejes = \frac{150cm - 2*3cm}{6cm} + 1 = 25\ estribos\ \#2\ (1/4\ '')$$

3.3.2 Diseño de la sección modelo V-2

Este diseño presenta un refuerzo a flexión igual a la viga V-1, pero con un refuerzo a superior conformado por 2 varillas #3(3/8'') con el objetivo de aumentar su resistencia a compresión.

$b: 10\ cm$

$h: 15\ cm$

$recubrimiento\ superior\ e\ inferior: 3cm$

- **Altura efectiva a flexión**

$d: 15cm\ - 3cm - \frac{0,635}{2}\ cm$

$d: 11,6825cm$

- **Altura efectiva a compresión**

$d': 3cm + \frac{0,635}{2}\ cm$

$d': 3,31\ cm$

$A_s = 64mm^2$; $2\#2(\ 1/4\ '')$

Momento resistente $\emptyset Mn$

$$\emptyset Mn = \emptyset * A_s * f_y * (d - \frac{a}{2})$$ ***Ecuación (20)***

Calculo de *a:*

$a = \frac{p*f_y}{0.85*f'_c} * d$ ***Ecuación (21)***

Calculo de la cuantía *(p)*:

$p = \frac{A_s}{b*d}$ ***Ecuación (22)***

$$p = \frac{64mm^2}{(100mm) * (116{,}825mm)} = 0{,}005478$$

Remplazando:

$$a = \frac{0{,}005478 * 420Mpa}{0.85 * 24{,}5Mpa} * 11{,}68cm$$

$$a = 1{,}105\ cm$$

Entonces$\emptyset Mn$:

$$\emptyset Mn = 0{,}9 * \frac{0{,}64cm^2}{10000cm^2} * 1m^2 * 42000 * (0{,}1168m - \frac{0{,}01105m}{2})$$

$$\emptyset Mn = 0{,}269\ Ton.m$$

Para la determinación del Momento real resistente (*Mn*), no deberá usarse el valor de reducción $\emptyset = 0{,}9$

$Mn = \frac{\emptyset Mn}{0{,}9}$ ***Ecuación (23)***

$$Mn = \frac{0{,}269}{0{,}9} = 0{,}298\, Ton.m$$

- **Calculo de la carga de agrietamiento**

$$\boldsymbol{M = \frac{P_{falla} * l}{4} + \frac{w * l^2}{8}} \qquad \textbf{\textit{Ecuación (24)}}$$

- Calculo de la carga de agrietamiento despejando P_{falla} de la ecuación(24)

P = Carga de agrietamiento del elemento.

l = Luz de la viga.

M = Momento resistente.

w = Carga repartida que actúa sobre el elemento, en este caso es el peso propio de la viga.

- Cálculo del peso propio de la viga (w):

$w = 2{,}4\, Ton/m^3 * (0{,}1m * 0{,}15m)$

$$w = 0{,}036\, Ton/m$$

$$0{,}298\, Ton.m = \frac{P_{falla} * 1{,}4m}{4} + \frac{0{,}036 Ton/m * (1{,}4m)^2}{8}$$

$$P_{falla} = 0{,}826\, Ton$$

- **Diseño a cortante de la sección**

$V_u = cortante\ ultimo\ de\ diseño$

$\emptyset V_c = resistencia\ del\ concreto\ a\ una\ fuerza\ cortante$

$\emptyset V_s = resistencia\ del\ acero\ a\ una\ fuerza\ cortante$

$V_u = \frac{P_{falla}}{2} = \frac{0{,}826\ Ton}{2}$

$$V_u = 0{,}413\ Ton$$

$$V_u = \emptyset V_c + \emptyset V_s \qquad \textbf{\textit{Ecuación (25)}}$$

$$\emptyset V_c = \emptyset \frac{\sqrt{f'_c}}{6} * b * d \qquad \textbf{\textit{Ecuación (26)}}$$

$$\emptyset V_c = 0{,}75 * \frac{\sqrt{24{,}5Mpa}}{6} * (0{,}10m) * (0{,}1168m) * 100$$

$$\emptyset V_c = 0{,}722\ Ton$$

Ya que $V_u < \emptyset V_c$, entonces en teoría el concreto resiste la totalidad de la fuerza cortante, sin embargo se colocaran estribos por construcción.

$S = \frac{d}{2} = \frac{11{,}68\ cm}{2}$

$$S = 6cm$$

$$Cantidad\ de\ flejes = \frac{150cm - 2*3cm}{6cm} + 1 = 25\ estribos\ \#2\ (1/4\ '')$$

3.3.3 Diseño de la sección modelo V-3

Este diseño presenta un refuerzo a flexión de 2 varillas de acero convencional de 11mm, se desea que esta viga sea una sección representativa en resistencia a flexión de las vigas V-1 y V-2 reforzadas con CFRP (Sikawrap Hex 103C).

$b: 10\ cm$

$h: 15\ cm$

$recubrimiento\ superior\ e\ inferior: 3cm$

- **Altura efectiva a flexión**

$d: 15cm\ - 3cm - \frac{1,1}{2}\ cm$

$d: 11,45cm$

- **Altura efectiva a compresión**

$d': 3cm + \frac{1,1}{2}\ cm$

$d': 3,55\ cm$

$A_s = 190mm^2 \quad ; \quad 2\ varillas\ de\ \ 11mm$

Momento resistente $\emptyset Mn$

$\emptyset Mn = \emptyset * A_s * f_y * (d - \frac{a}{2})$ ***Ecuación (20)***

Calculo de *a:*

$a = \frac{p*f_y}{0.85*f'_c} * d$ ***Ecuación (21)***

Calculo de la cuantía *(p)*:

$p = \frac{A_s}{b*d}$ ***Ecuación (22)***

$$p = \frac{190mm^2}{(100mm) * (114{,}5mm)} = 0{,}01659$$

Remplazando:

$$a = \frac{0{,}01659 * 420Mpa}{0.85 * 24{,}5Mpa} * 11{,}45cm$$

$$a = 3{,}34\ cm$$

Entonces $\emptyset Mn$:

$$\emptyset Mn = 0{,}9 * \frac{1{,}90cm^2}{10000cm^2} * 1m^2 * 42000 * (0{,}1145m - \frac{0{,}0334m}{2})$$

$$\emptyset Mn = 0{,}702\ Ton.m$$

Para la determinación del Momento real resistente (*Mn*), no deberá usarse el valor de reducción

$$\emptyset = 0{,}9$$

$Mn = \frac{\emptyset Mn}{0{,}9}$ ***Ecuación (23)***

$$Mn = \frac{0{,}702}{0{,}9} = 0{,}780\ Ton.m$$

- **Calculo de la carga de agrietamiento**

$$\boldsymbol{M = \frac{P_{falla} * l}{4} + \frac{w * l^2}{8}} \qquad \textbf{\textit{Ecuación (24)}}$$

P = Carga de agrietamiento del elemento.

l = Luz de la viga.

M = Momento resistente.

w = Carga repartida que actúa sobre el elemento, en este caso es el peso propio de la viga.

- Cálculo del peso propio de la viga (w):

$w = 2{,}4\ Ton/m^3 * (0{,}1m * 0{,}15m)$

$$w = 0{,}036\ Ton/m$$

- Calculo de la carga de agrietamiento despejando P_{falla} de la ecuación(24)

$$0{,}780\ Ton.m = \frac{P_{falla} * 1{,}4m}{4} + \frac{0{,}036 Ton/m * (1{,}4m)^2}{8}$$

$$P_{falla} = 2{,}203\ Ton$$

- **Diseño a cortante de la sección**

$V_u = cortante\ ultimo\ de\ diseño$

$\emptyset V_c = resistencia\ del\ concreto\ a\ una\ fuerza\ cortante$

$\emptyset V_s = resistencia\ del\ acero\ a\ una\ fuerza\ cortante$

$$V_u = \frac{P_{falla}}{2} = \frac{2{,}203\ Ton}{2}$$

$$V_u = 1{,}101\ Ton$$

$$V_u = \emptyset V_c + \emptyset V_s \qquad \textbf{\textit{Ecuación (25)}}$$

$$\emptyset V_c = \emptyset \frac{\sqrt{f'_c}}{6} * b * d \qquad \textbf{\textit{Ecuación (26)}}$$

$$\emptyset V_c = 0{,}75 * \frac{\sqrt{24{,}5Mpa}}{6} * (0{,}10m) * (0{,}1168m) * 100$$

$$\emptyset V_c = 0{,}722\ Ton$$

Remplazando $V_u\ y\ \emptyset V_c$:

$$1{,}101\ Ton = 0{,}722\ Ton + \emptyset V_s$$

$$\emptyset V_s = 0{,}379$$

Se calculó la separación necesaria para un estribo de Ø=1/4'' con $A_v = 64mm^2$

$$S = \frac{\emptyset * A_v * f_y * d}{\emptyset V_s} \qquad \textbf{\textit{Ecuación (27)}}$$

$$S = \frac{0{,}75 * 0{,}64cm^2 * 42000\, Ton/m^2 * 0{,}1145m}{0{,}379\, Ton * 10000}$$

$$S = 0{,}609m \approx 61cm$$

Ya que S>$d/2$,entonces se colocaran estribos por construcción.

$$S = \frac{d}{2} = \frac{11{,}68\, cm}{2}$$

$$S \approx 6cm$$

$$Cantidad\ de\ flejes = \frac{150cm - 2 * 3cm}{6cm} + 1 = 25\ estribos\ \#2\ (1/4\ '')$$

3.4 DISEÑO CON CFRP

El reforzamiento de los CFRP se empleará para algunas de las secciones V-1, V-2 y V-3 para mejorar su capacidad de carga. Para el diseño a flexión de la viga usando fibras de carbono, se utilizó la plantilla de cálculo de Sika, Versión 4.4 2003-2010 SI. Los datos de entrada, son los correspondientes de las secciones patrón (V-1, V-2 y V-3).

A continuación se mostraran los resultados del diseño

3.4.1 Diseño de ejemplar V-1_cfrp

Para este diseño se empleó una capa de CFRP (Sikawrap Hex 103C) en la viga V-1

RESUMEN DEL REFORZAMIENTO A FLEXION

Tabla 1 - Resumen de cargas de la sección sin reforzar

ΦM_n, sin reforzar (kN-m)	2,508	Momento resistente
M_u (kN-m)	2,800	Momento último requerido
FRP	SI	Se requiere reforzar con FRP?

Tabla 2 - Resumen del reforzamiento a flexión

ΦM_n, sección reforzada (kN-m)	7,06	Momento de la sección reforzada con FRP

Mu (kN-m)	2,80	Momento último requerido
Chequeo de la Sección Reforzada	OK	Verificar que $\Phi M_{n,\text{sección reforzada}} \geq M_u$
Chequeo antes del reforzamiento	OK	Chequeo de la resistencia existente del elemento estructural para satisfacer el ACI 440.2R-08 Sección 9.2, Eq. (9-1): $(\phi M_n)_{existing} \geq 1.1M_D + 0.75M_L \text{ or } 1.1M_D + 1.0M_L$

Chequeo del Esfuerzo de Servicio del Concreto	OK	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{c,s} \leq 0.45f'_c$
Chequeo del Esfuerzo de Servicio del Acero	OK	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{s,s} \leq 0.80f_y$
Chequeo del Esfuerzo de Servicio del Acero Tensionado	N/A	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{p,s} \leq 0.82f_{py} \text{ or } 0.74f_{pu}$
Chequeo del Esfuerzo de Servicio del FRP	OK	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{f,s} \leq \Psi_f f_{fu}$
CHEQUEO TOTAL A FLEXION	**OK**	

Tabla 3 - Resumen de los Parámetros Claves en Estado Ultimo

Ubicación del Eje Neutro (mm)	39,1	Ver de las líneas 254 a la 385 para la convención de signos.	
Modo de Falla	Falla del FRP		
	Deform. (mm/mm)	**Esfuerzo (MPa)**	**Fuerza (kN)**
bra Superior a Compresión del Concret	0,00278	21,89	72
Acero	0,00575	420,00	27
Acero Tensionado	0,00000	0,00	0
FRP	0,00778	485,15	49
Chequeo del Equilibrio de Fuerzas	-	-	0

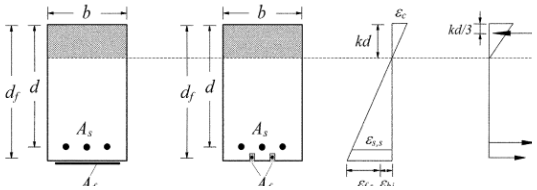


Ilustración 5 *Resultados diseño viga V-1 con CFRP*

3.4.2 Diseño de ejemplar V-2_cfrp

Para este diseño se empleó una capa de CFRP (Sikawrap Hex 103C) en la viga V-2

RESUMEN DEL REFORZAMIENTO A FLEXION

Tabla 1 - Resumen de cargas de la sección sin reforzar

ΦM_n, sin reforzar (kN-m)	2,327	Momento resistente
M_u (kN-m)	2,800	Momento último requerido
FRP	SI	Se requiere reforzar con FRP?

Tabla 2 - Resumen del reforzamiento a flexión

ΦM_n, sección reforzada (kN-m)	7,17	Momento de la sección reforzada con FRP

Mu (kN-m)	2,80	Momento último requerido
Chequeo de la Sección Reforzada	OK	Verificar que $\Phi M_{n,\text{sección reforzada}} \geq M_u$
Chequeo antes del reforzamiento	OK	Chequeo de la resistencia existente del elemento estructural para satisfacer el ACI 440.2R-08 Sección 9.2, Eq. (9-1): $(\phi M_n)_{existing} \geq 1.1M_D + 0.75M_L \text{ or } 1.1M_D + 1.0M_L$

Chequeo del Esfuerzo de Servicio del Concreto	OK	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{c,s} \leq 0.45f_c'$
Chequeo del Esfuerzo de Servicio del Acero	OK	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{s,s} \leq 0.80f_y$
Chequeo del Esfuerzo de Servicio del Acero Tensionado	N/A	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{p,s} \leq 0.82f_{py} \text{ or } 0.74f_{pu}$
Chequeo del Esfuerzo de Servicio del FRP	OK	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{f,s} \leq \Psi_f f_{fu}$
CHEQUEO TOTAL A FLEXION	**OK**	

Tabla 3 - Resumen de los Parámetros Claves en Estado Ultimo

Ubicación del Eje Neutro (mm)	35,6	Ver de las líneas 254 a la 385 para la convención de signos.	
Modo de Falla	Falla del FRP		
	Deform. (mm/mm)	**Esfuerzo (MPa)**	**Fuerza (kN)**
bra Superior a Compresión del Concret	0,00246	22,72	65
Acero	0,00582	420,00	27
Acero Tensionado	0,00000	0,00	0
FRP	0,00778	485,15	49
Chequeo del Equilibrio de Fuerzas	-	-	0

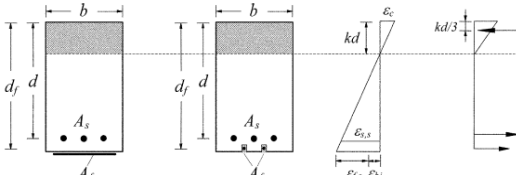


Ilustración 6 *Resultados diseño viga V-2 con CFRP*

3.4.3 Diseño de ejemplar V-3_cfrp

Para este diseño se empleó una capa de CFRP (Sikawrap Hex 103C) en la viga V-3

RESUMEN DEL REFORZAMIENTO A FLEXION

Tabla 1 - Resumen de cargas de la sección sin reforzar

ΦM_n, sin reforzar (kN-m)	7,389	Momento resistente
M_u (kN-m)	2,800	Momento último requerido
FRP	NO	Se requiere reforzar con FRP?

Tabla 2 - Resumen del reforzamiento a flexión

ΦM_n, sección reforzada (kN-m)	8,99	Momento de la sección reforzada con FRP

Mu (kN-m)	2,80	Momento último requerido
Chequeo de la Sección Reforzada	OK	Verificar que $\Phi M_{n,\text{sección reforzada}} \geq M_u$
Chequeo antes del reforzamiento	OK	Chequeo de la resistencia existente del elemento estructural para satisfacer el ACI 440.2R-08 Sección 9.2, Eq. (9-1): $(\phi M_n)_{existing} \geq 1.1M_D + 0.75M_L \; or \; 1.1M_D + 1.0M_L$

Chequeo del Esfuerzo de Servicio del Concreto	OK	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{c,s} \leq 0.45f_c'$
Chequeo del Esfuerzo de Servicio del Acero	OK	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{s,s} \leq 0.80f_y$
Chequeo del Esfuerzo de Servicio del Acero Tensionado	N/A	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{p,s} \leq 0.82f_{py} \; or \; 0.74f_{pu}$
Chequeo del Esfuerzo de Servicio del FRP	OK	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{f,s} \leq \Psi_f f_{fu}$
CHEQUEO TOTAL A FLEXION	**OK**	

Tabla 3 - Resumen de los Parámetros Claves en Estado Ultimo

Ubicación del Eje Neutro (mm)	56,0	Ver de las líneas 254 a la 385 para la convención de signos.	
Modo de Falla	lastamiento del concre		
	Deform. (mm/mm)	**Esfuerzo (MPa)**	**Fuerza (kN)**
bra Superior a Compresión del Concret	0,00300	20,87	102
Acero	0,00343	420,00	80
Acero Tensionado	0,00000	0,00	0
FRP	0,00493	307,70	31
Chequeo del Equilibrio de Fuerzas	-	-	0

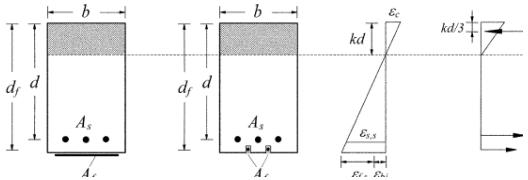


Ilustración 7 *Resultados diseño viga V-3 con CFRP*

3.5 SECCIONES TIPO

	Número de ejemplares	Viga Patrón	CFRP		ØMn (Ton/m)	Mu (Ton/m)	Hipótesis de falla
			Reforzada	N capas			
V-A	1	V-1	No	-	0,269	0,299	Fluencia acero de tracción
V-B	1	V-2	No	-	0,269	0,299	Fluencia acero de tracción
V-C	2	V-1	Sikawrap Hex 103C	1	0,754	0,837	Rotura concreto a compresión
V-D	2	V-2	Sikawrap Hex 103C	1	0,717	0,797	Fluencia acero de tracción
V-E	2	V-3	No	-	0,702	0,780	Fluencia acero de tracción
V-F	1	V-3	Sikawrap Hex 103C	1	0,899	0,999	Rotura concreto a compresión

Tabla 3:12 *Resumen secciones tipo*

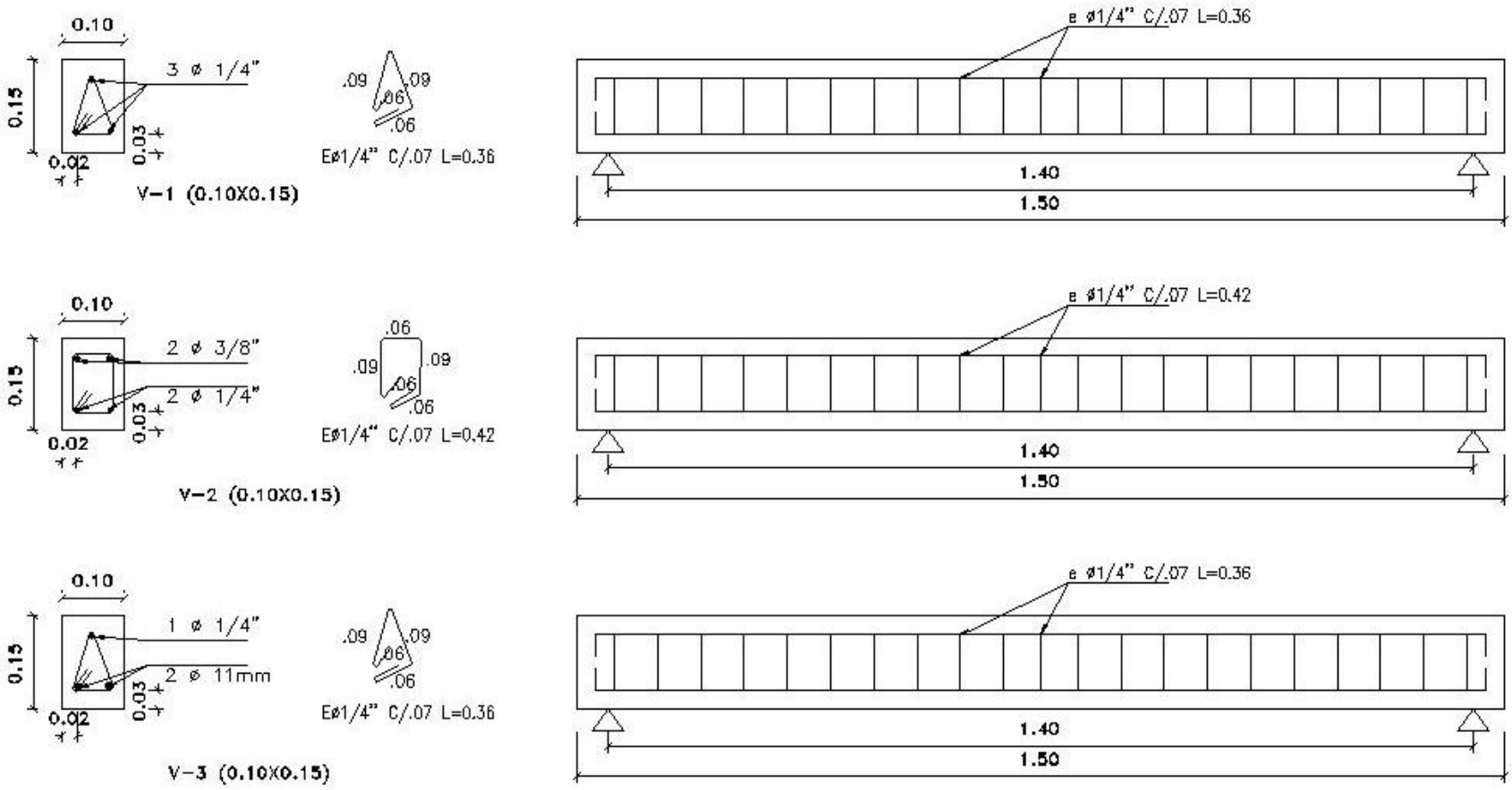


Ilustración 8 *Secciones patrón*

3.6 DISEÑO DE MONTAJE PARA PRUEBA DE CARGA

El objetivo principal es la comparación de dos sistemas de reforzamiento. Se realizaron dos modelos representativos. Sin embargo la principal limitante del modelo, fueron las condiciones del laboratorio de Resistencia de Materiales de la Facultad de Ingeniería, ya que no se cuenta con los equipos necesarios para realizar un montaje a gran escala.

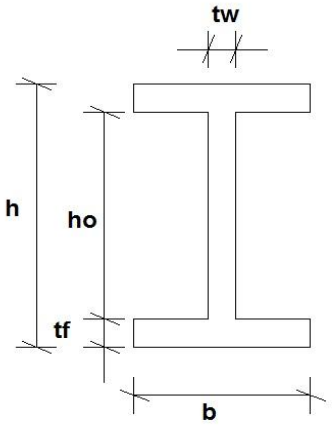
La *Fotografía 5.* muestra el montaje que se utilizó en la prueba de carga, constituidos por un riel metálico que sirvió de reacción con dos apoyos metálicos en los extremos sobres los cuales se apoyaron las vigas que fueron sometidas a una carga puntual en el centro de la luz por medio de la máquina de ensayo.

Fotografía 5 *Montaje para la prueba de carga*

Este riel se modeló con el Programa Sap2000 (Licencia_A.B.O. Ingeniería S.A.S.), en el cual se realiza un análisis estructural para las condiciones en las que estaría expuesto.

Este riel debe ser lo suficientemente rígido para garantizar que no se presentaran grandes deformaciones al ser trasmitidas las reacciones extremas.

- Características del riel:



h=140mm

ho=110mm

b=70mm

tf=15mm

tw=12mm

Longitud entre apoyos=1400 mm

Ilustración 9 *Sección típica del riel*

- La viga se modelo con un apoyo empotrado en el centro de la luz y una carga P =1.70 Ton en los extremos, que genera un momento M_{model}=1.5*Mu(aumento en un cincuenta por ciento del mayor momento ultimo resistentes de las vigas a ensayar)

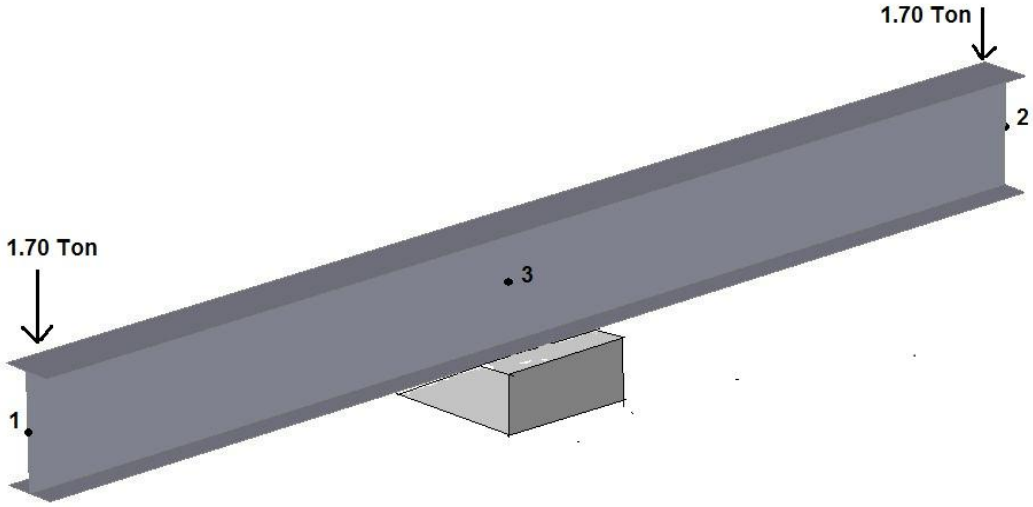


Ilustración 10 *Condición de apoyo y cargas aplicadas en el modelo.*

Después de la modelación se obtuvieron unas deformaciones aceptables para la prueba de carga:

TABLE: Joint Displacements					
Joint	**OutputCase**	**CaseType**	**U1**	**U2**	**U3**
Text	Text	Text	m	M	m
1	DEAD	LinStatic	0	0	-0,001153
2	DEAD	LinStatic	0	0	-0,001519
3	DEAD	LinStatic	0	0	0

Tabla 3:13 *Desplazamientos del riel por efecto de la carga (SAP2000 V 14.2.2)*

3.7 PRUEBA DE CARGA

Las pruebas de carga se ejecutaron en las instalaciones del laboratorio de AICO LTDA. bajo la estricta supervisión y orientación del laboratorista. Esto permitió corroborar la base teórica que reproduce los diseños de reforzamiento representativos, usando materiales distintos, y establecer ciertas propiedades tales como esfuerzo de rotura, deflexiones, fisuras y agrietamientos.

Fotografía 6 *Montaje para la prueba de carga.*

3.8 MAPA DE GRIETAS Y MEDICIÓN DE DEFLEXIONES

Esta etapa consistió en la realización de los diagramas de fisura o mapa de grietas y la medición de las respectivas deflexiones de las vigas.

Fotografía 7 *Esquema de viga agrietada.*

3.9 ANÁLISIS DE COSTOS

Este es uno de los elementos más importantes a determinar en esta investigación, ya que se está poniendo en cuestión dos métodos de reforzamiento que serían aplicables en un proyecto de repotenciación de estructuras.

Este análisis se hará de manera tradicional en el cual se involucran las variables de Costos Directos (mano de obra, materiales, equipos y herramientas) y costos indirectos (gastos generales, utilidad), valorizando ciertas cualidades de los sistemas como tiempos de ejecución y traumatismos causados.

3.9.1 Estructura a reforzar

Para realizar una comparación de los costos de reforzamiento se optó por considerar un caso hipotético de una vivienda de dos plantas diseñada con las antiguas Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente _NSR 98, la cual además de cambiar su ocupación o uso de residencial a reunión con silletería móvil, también será actualizada al Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente _NSR-10.Este análisis se realizara solo a la viga V-B del piso 2

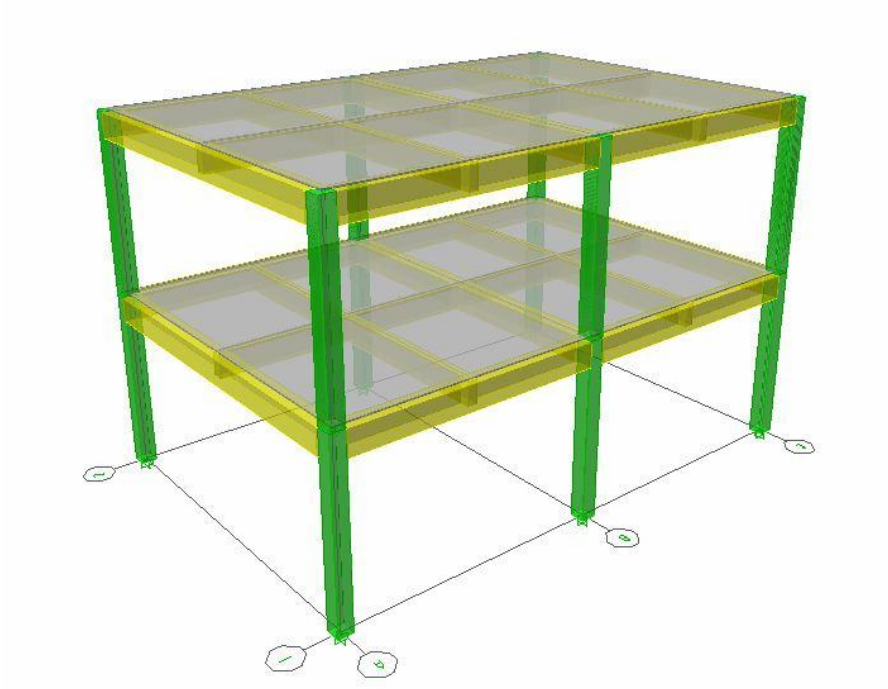


Ilustración 11*Modelo en tres dimensiones, ETABS V.9.7.1.*

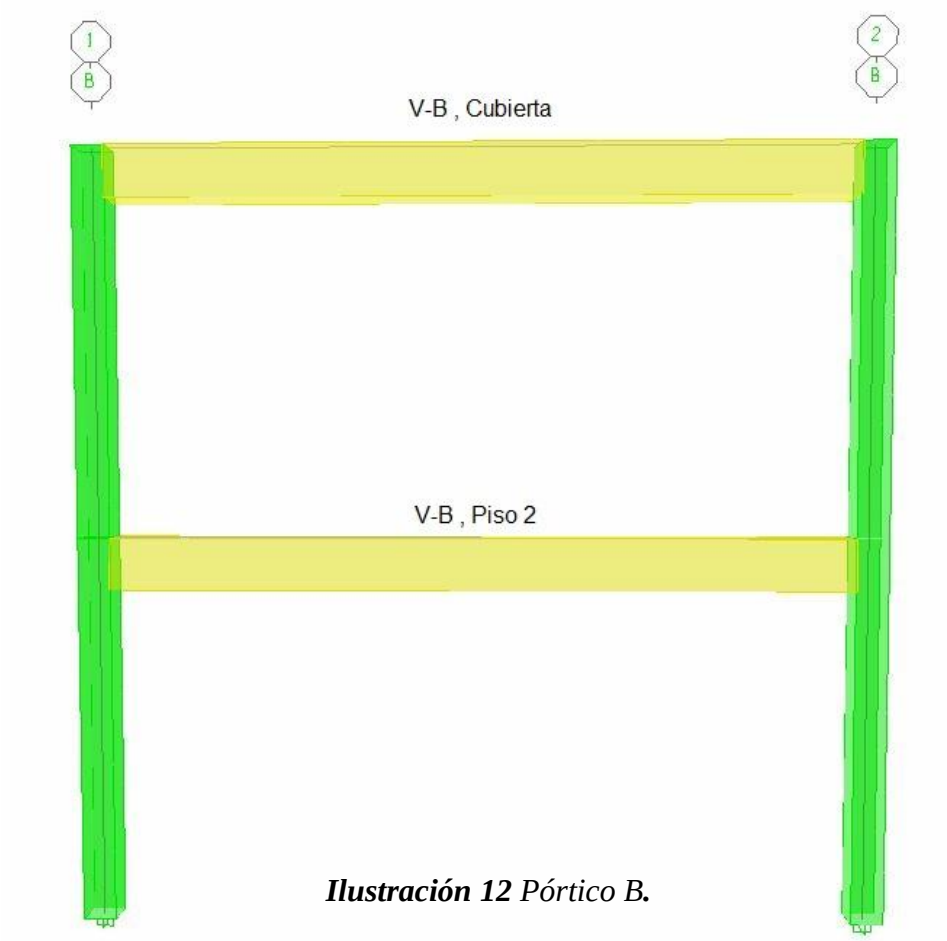


Ilustración 12 *Pórtico B.*

3.9.2 Avalúo, modelación y diseño viga V-B de la vivienda con la NSR-98

3.9.2.1 Avaluó

	Uso: Residencial	
	Cargas(Ton/m2)	
	CM	CV
PISO 2	0,24	0,18
CUBIERTA	0,15	0,18

Tabla 3:14*Avalúo Vivienda_ NSR-98.*

3.9.2.2 Combinaciones de diseño.

NSR-98, Capítulo B.2.4- "Combinaciones de carga para estructuras de concreto o mampostería estructural, usando el método del estado límite de resistencia"

1.4D + 1.7L	**(B.2.4-1)**
1.05D + 1.28L + 1.28W	**(B.2.4-2)**
0.9D + 1.3W	**(B.2.4-3)**
1.05D + 1.28L + 1.0E	**(B.2.4-4)**
0.9D + 1.0E	**(B.2.4-5)**
1.4D + 1.7L + 1.7H	**(B.2.4-6)**
1.05D + 1.28L + 1.05T	**(B.2.4-7)**
1.4D + 1.4T	**(B.2.4-8)**

La viga V-B solo será diseñada con la Combinación **1.4D+ 1.7L** (B.2.4-1)

3.9.2.3 Resultados de la modelación

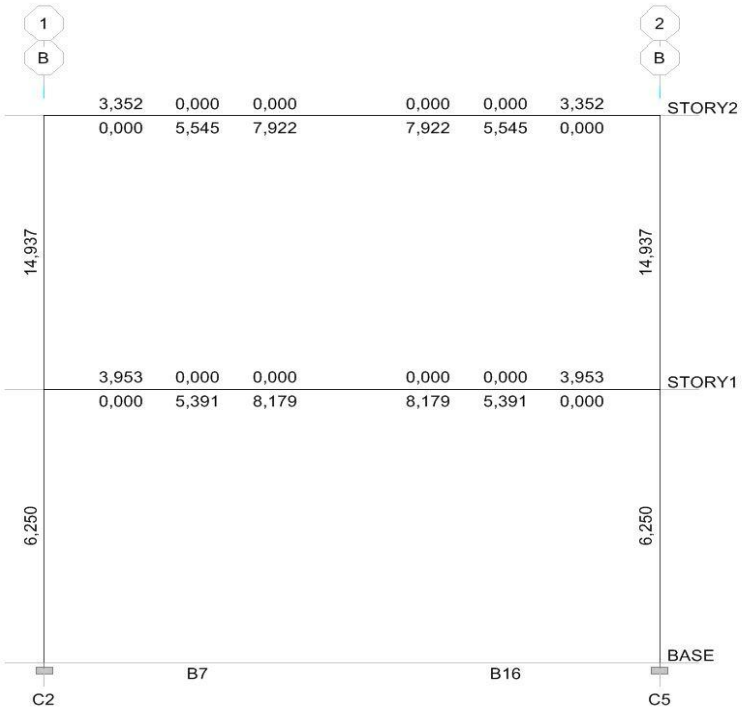


Ilustración 13*Área de acero requerida a flexión.*

3.9.2.4 Diseño

- Después de obtener el área de acero se procedió al diseño de la sección

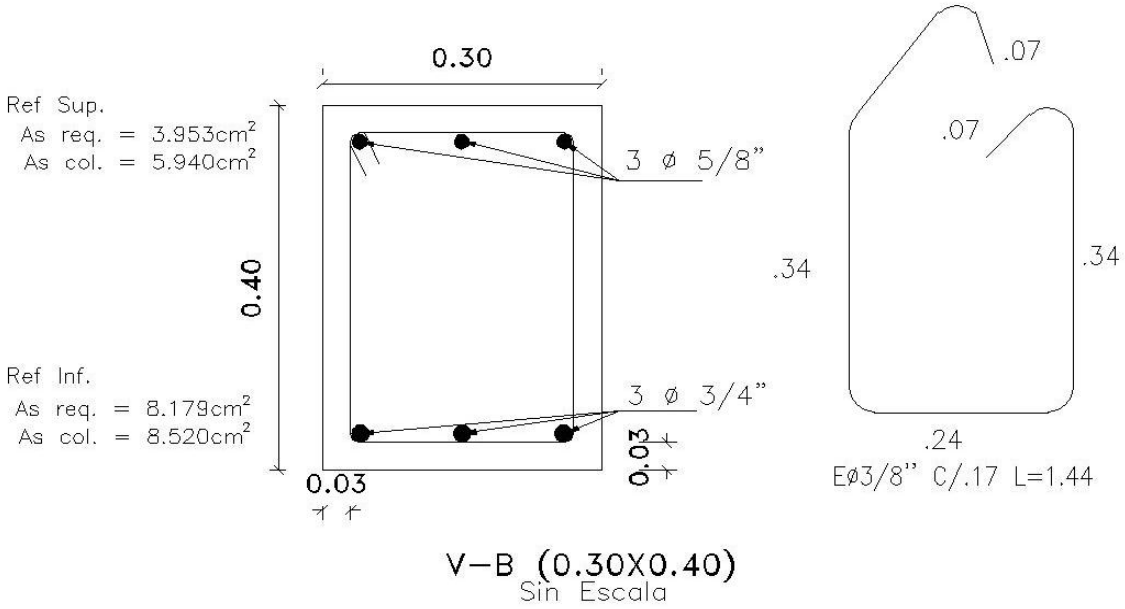


Ilustración 14 *Sección típica viga V-B*

3.9.3 Avalúo, modelación y diseño viga V-B de la vivienda con la nsr-10

3.9.3.1 Avalúo

	Uso: reunión (Silletería móvil)	
	Cargas(Ton/m2)	
	CM	CV
PISO 2	0,24	0,50
CUBIERTA	0,15	0,50

Tabla 3:15 *Avalúo Vivienda_ NSR-10.*

3.9.3.2 Combinaciones

NSR-10, B.2.4 — "Combinaciones de cargas mayoradas usando el método de Resistencia"

$$1.4(D+F) \qquad \text{(B.2.4-1)}$$

$$1.2(D+F+T)+1.6(L+H)+0.5(L_r \text{ ó } G \text{ ó } L_e) \qquad \text{(B.2.4-2)}$$

$$1.2D+1.6(L_r \text{ ó } G \text{ ó } L_e)+(L \text{ ó } 0.8W) \qquad \text{(B.2.4-3)}$$

$$1.2D+1.6W+1.0L+0.5(L_r \text{ ó } G \text{ ó } L_e) \qquad \text{(B.2.4-4)}$$

$$1.2D+1.0E+1.0L \qquad \text{(B.2.4-5)}$$

$$0.9D+1.6W+1.6H \qquad \text{(B.2.4-6)}$$

$$0.9D+1.0E+1.6H \qquad \text{(B.2.4-7)}$$

La viga V-B solo será diseñada con la Combinación **1.2D+ 1.6L** (B.2.4-2)

3.9.3.3 Diseño por los dos métodos de reforzamiento

- **Reforzamiento con encamisado de acero**

  La Ilustración 15 muestra el área de acero de la sección con las nuevas solicitaciones de carga.

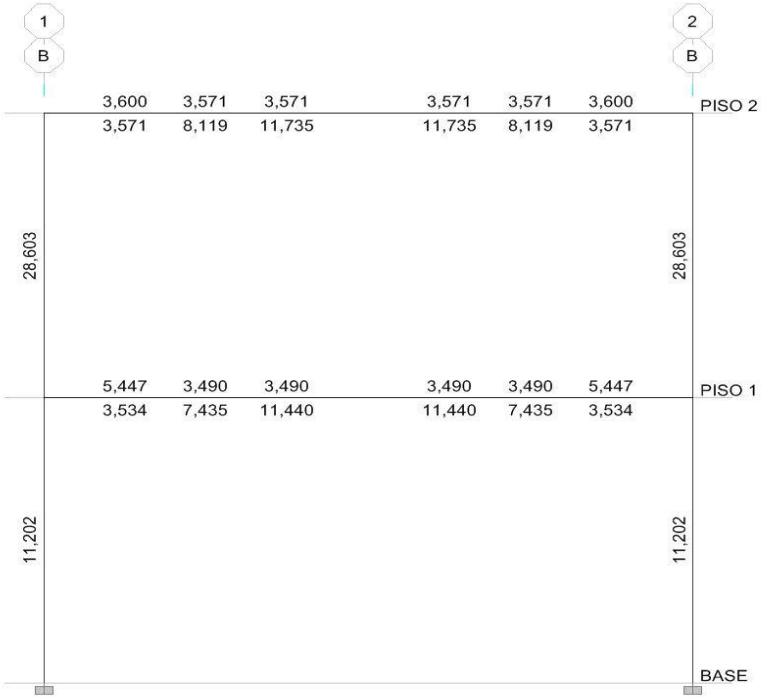


Ilustración 15 *Área de acero requerida a flexión.*

El acero adicional de la sección será el delta de acero requerido entre la nueva demanda y el colocado anteriormente, esto sin tener en cuenta el nuevo "d" (altura efectiva a flexión) de la viga lo que le da un rango de seguridad adicional.

$$As_{adic.} = 11.440cm^2 - 8.520cm^2$$

$$As_{adic.} = 2.92cm^2 \;\; = \;\; 3 \; \emptyset \; 1/2 \; "$$

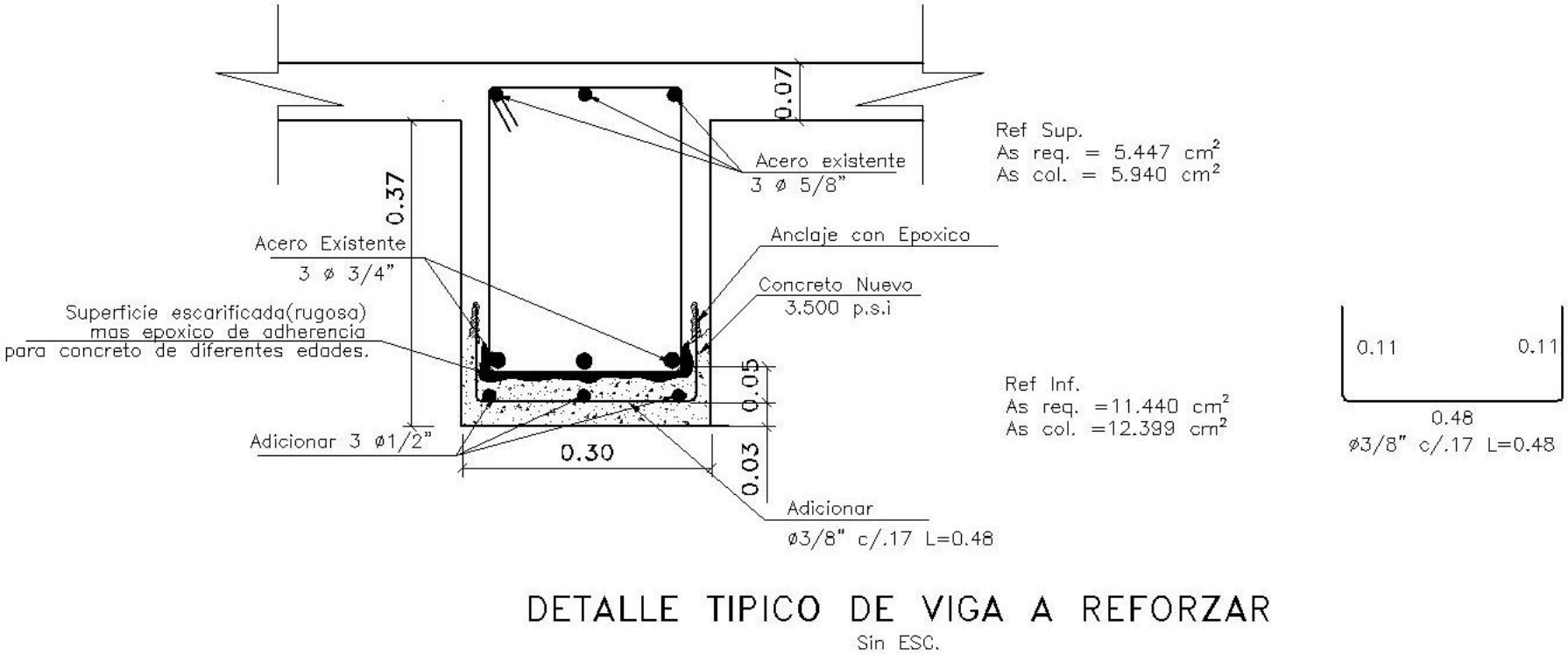


Ilustración 16 *Sección típica de viga reforzada con barras de acero.*

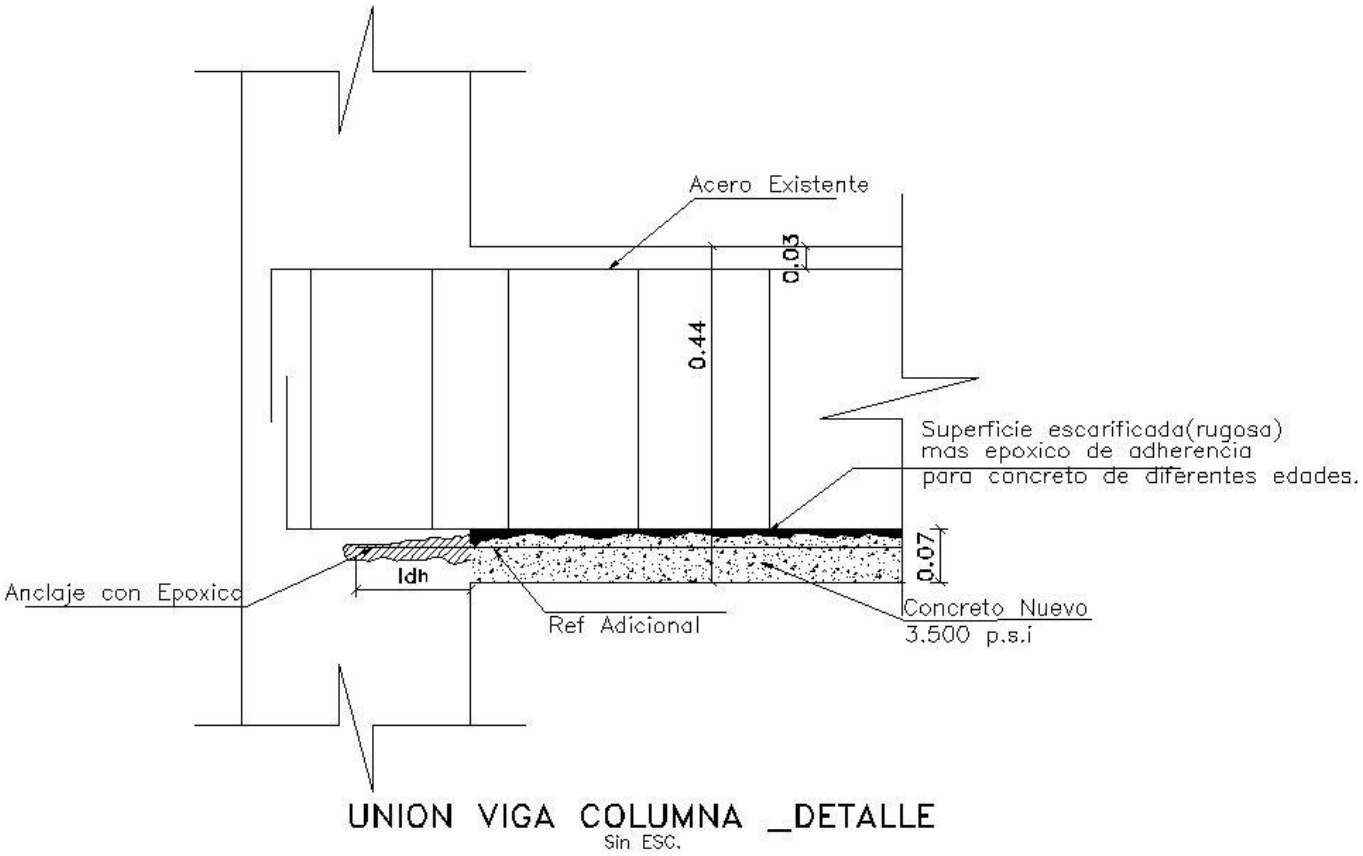


Ilustración 17 *Detalle unión Viga – Columna*

- **Reforzamiento con fibras de carbono**

Para el diseño a flexión de la viga usando fibras de carbono, se utilizó la plantilla de cálculo de Sika, Versión 4.4 2003-2010 SI.

Las solicitaciones de carga, son los momentos (KN-m) sin mayorar originados por la carga muerta y carga viva. Cabe recordar que no se tienen en cuenta los parámetros sísmicos.

Datos de Entrada

Geometría de la Sección

h =	400	mm	Altura de la sección
b =	300	mm	Ancho de la losa o viga rectangular
b_w =	300	mm	Ancho del alma de la viga T (bw = b para secciones rectangulares, bw < b para secciones en T)
h_f =	0	mm	Espesor de la losa superior de la viga T (hf = 0 para secciones rectangulares)
	NO		Está la sección fisurada en el momento de la instalación del FRP? (Cargas en el pasado u otras razones). Introduzca "YES" or "NO". Si "YES" es introducido, los chequeos Mi>Mcr (línea 214) y Ms>Mcr (línea 432) no se realizan y la sección es considerada fisurada automáticamente.

Información del acero existente

A_s =	800	mm^2	Area del acero a tracción
d =	396	mm	Profundidad efectiva del acero a tracción
$A_{s'}$ =	400	mm^2	Area del acero a compresión (introduzca "0" si no hay acero a compresión)
d' =	36	mm	Profundidad efectiva del acero a compresión (entre el valor de d si no hay acero a compresión)
A_p =	0	mm^2	Area del acero tensionado adherido* (introduzca "0" si no hay acero tensionado)
d_p =	365	mm	Profundidad efectiva del acero tensionado (entre el valor de d si no hay acero tensionado)
			* Las aplicaciones no adheridas están por fuera del alcance de este documento

Información de las cargas

M_D =	51,92	kN-m	Momento total de carga muerta sin mayorar que será resistido por el elemento a reforzar
M_i =	51,92	kN-m	Momento total sin mayorar actuando en el elemento antes del reforzamiento (usualmente el mismo M_D)
M_L =	46,61	kN-m	Momento total de carga viva sin mayorar (incluida la carga cíclica) que será resistido por el miembro a refor
	NO		Se espera sostener la carga viva? (depósitos y otras aplicaciones similares). Introduzca "YES" o "NO". Si "YES" es introducido se hará el chequeo $\phi M_n > 1.1M_D + 1.0\ M_L$. Si "NO" es introducido, se hará el chequeo $\phi M_n > 1.1M_D + 0.75\ M_L$.

Propiedades de los materiales de la sección

f_y =	420	MPa	Esfuerzo de fluencia del acero
E_s =	200000	MPa	Módulo de elasticidad del acero
f'_c =	24,6	MPa	Esfuerzo a compresión del concreto
f_{pu} =	1860	MPa	Esfuerzo último del acero tensionado (el programa solo tiene en cuenta valores de 1720 MPa y 1860 MPa para los torones)
f_{py} =	1690	MPa	Esfuerzo de fluencia del acero tensionado
f_{pe} =	1138	MPa	Esfuerzo efectivo en el acero tensionado
E_p =	196500	MPa	Módulo de elasticidad del acero tensionado

Propiedades del sistema FRP

Tipo de FRP	SikaWrap Hex 103C		Seleccione un sistema FRP SIKA. Al selecionar, los campos con las propiedades del material respectivas se actualizan automáticamente. Las propiedades del SikaWrap 300C se basan en pruebas con el SikaWrap Hex 117C, que tiene fibras similares y la misma matriz - contacte a Sika para más detalles.
b_{sheet} =	300,00	mm	Ancho de diseño nominal de un tejido o platina FRP. Introduzca "0" para platinas FRP
n_{layers} =	1	-	Número de capas de tejido (introduzca "1.00" para platinas FRP; solo se permite una capa)
n_{sheet} =	1	-	Escoja el número de tejidos/platinas FRP colocadas lado a lado
n_{NSM_bars} =	0	-	Número de barras FRP SIKA (introduzca "0" si esta no es una aplicación NSM)
$A_{NSM\ bar}$ =	0,00	mm^2	Area de sección transversal de una barra FRP SIKA (Introduzca "0" si no es una aplicación NSM)
f_{fu}^* =	651	MPa	Esfuerzo a tracción último del FRP
ε_{fu}^* =	0,00910	mm/mm	Deformación unitaria última de rotura
E_f =	62354	MPa	Módulo de elasticidad del FRP
t_f =	1,0160	mm	Espesor de diseño nominal de un tejido o platina FRP
b_f =	300,00	mm	Ancho de diseño nominal de un tejido o platina FRP
A_f =	304,8000	mm^2	Area total del FRP
Ambiente	Interior		Seleccione un ambiente apropiado basado en condiciones de servicio. Al seleccionar, se actualizará automáticamente el valor del factor de reducción ambiental
C_e =	0,95	-	Factor de reducción por exposición ambiental (ACI 440.2R-08, Tabla 9.1): 0.95 para interior, 0.85 para exterior y exposición a ambientes agresivos.
C_{cr} =	0,55	-	Esfuerzo de rotura límite (Creep) (ACI 440.2R-08, Tabla 10.1; $0.20f_{fu}$ para vidrio, $0.30f_{fu}$ para arámida, $0.55f_{fu}$ para carbono)
ψ_f =	0,85	-	Factor de reducción adicional, con base en las recomendaciones del Comité ACI 440

Ilustración 18 *Hoja de cálculo para reforzamiento con fibras de carbono.*

RESUMEN DEL REFORZAMIENTO A FLEXION

Tabla 1 - Resumen de cargas de la sección sin reforzar

ΦM_n, sin reforzar (kN-m)	121,949	Momento resistente
M_u (kN-m)	136,880	Momento último requerido
FRP	SI	Se requiere reforzar con FRP?

Tabla 2 - Resumen del reforzamiento a flexión

ΦM_n, sección reforzada (kN-m)	160,41	Momento de la sección reforzada con FRP

Mu (kN-m)	136,88	Momento último requerido
Chequeo de la Sección Reforzada	OK	Verificar que $\Phi M_{n,\text{sección reforzada}} \geq M_u$
Chequeo antes del reforzamiento	OK	Chequeo de la resistencia existente del elemento estructural para satisfacer el ACI 440.2R-08 Sección 9.2, Eq. (9-1): $(\phi M_n)_{existing} \geq 1.1M_D + 0.75M_L \text{ or } 1.1M_D + 1.0M_L$

Chequeo del Esfuerzo de Servicio del Concreto	NG	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{c,s} \leq 0.45f'_c$
Chequeo del Esfuerzo de Servicio del Acero	OK	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{s,s} \leq 0.80f_y$
Chequeo del Esfuerzo de Servicio del Acero Tensionado	N/A	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{p,s} \leq 0.82f_{py} \text{ or } 0.74f_{pu}$
Chequeo del Esfuerzo de Servicio del FRP	OK	Chequeo del esfuerzo límite en servicio: $f_{f,s} \leq \Psi_f f_{fu}$
CHEQUEO TOTAL A FLEXION	**NG**	

Tabla 3 - Resumen de los Parámetros Claves en Estado Ultimo

Ubicación del Eje Neutro (mm)	74,6	Ver de las líneas 254 a la 385 para la convención de signos.	
Modo de Falla	Falla del FRP		
	Deform. (mm/mm)	**Esfuerzo (MPa)**	**Fuerza (kN)**
bra Superior a Compresión del Concret	0,00198	22,44	383
Acero	0,00853	420,00	358
Acero Tensionado	0,00000	0,00	0
FRP	0,00778	485,15	148
Chequeo del Equilibrio de Fuerzas	-	-	0

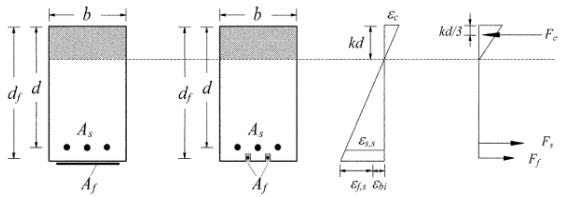


Ilustración 19 *Resumen de diseño a flexión.*

Chequear los esfuerzos en servicio

Calcular los esfuerzos en la fibra superior del concreto en estado de servicio

$f_{c_s} = E_c \varepsilon_{ts} =$	13,71	MPa	(compresión tiene signo positivo)

Chequear el esfuerzo límite del concreto en estado de servicio

$0.45f'_c =$	11,07	MPa	NG

Calcular los esfuerzos en el acero en estado de servicio

$f_{s_s} = E_s \varepsilon_{ss} =$	306	MPa	(tensión tiene signo posiivo)

Chequear el esfuerzo límite del acero en estado de servicio

$0.80f_y =$	336	MPa	OK

Calcular los esfuerzos en el acero tensionado en estado de servicio

$f_{p_s} = E_p \varepsilon_{ps} =$	N/A	MPa	(tensión tiene signo posiivo)

Chequear el esfuerzo límite en el acero tensionado

$0.82f_{py} =$	1386	MPa	N/A
$0.74f_{pu} =$	1376	MPa	N/A

Calcular los esfuerzos en el FRP en estado de servicio

$f_{f_s} = E_f \varepsilon_{fs} =$	43	MPa	(tensión tiene signo posiivo)

Chequear el esfuerzo límite del FRP en estado de servicio

$C_{c_f} f_{fu} =$	340	MPa	OK

Ilustración 20 *Chequeo de esfuerzos en servicio*

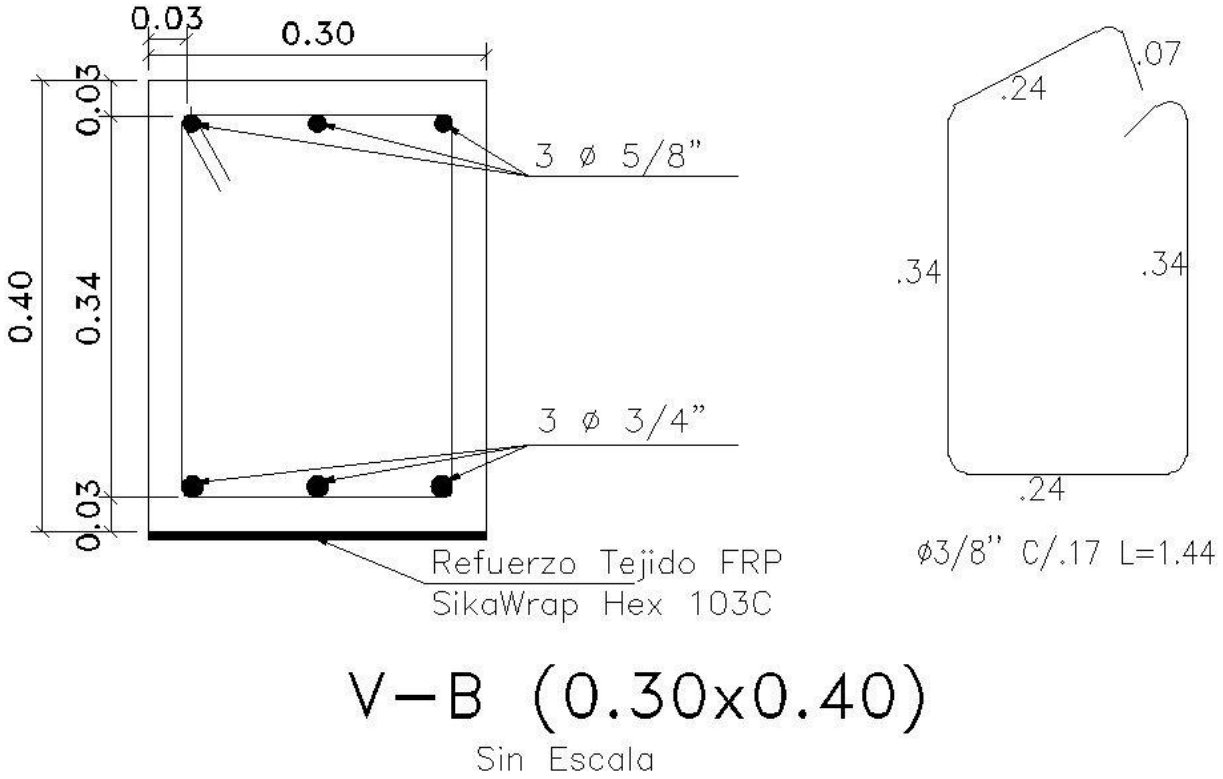


Ilustración 21 *Sección típica de Viga V-B con Sikawrap Hex 103C.*

El diseño de la sección con fibras de carbono, prevé que la falla se presente por la rotura del CFRP, seguida por la fluencia del acero y finalmente la rotura del concreto en la zona de compresión

3.10 CANTIDADES DE OBRA.

Una vez establecidos los dos diseños se procedió a calcular las cantidades de obra, según las actividades definidas por dos empresas reconocidas a nivel local.

- **Reforzamiento con fibras de carbono**

ARNOLDO BERROCAL INGENIRIA S.A.S		
reforzamiento estructural a todo costo		
Descripción	**unidad**	**cantidad**
preparación de superficie base	ml x b=10cm	17,1
regularización de superficie base	ml x b=10cm	17,1
suministro e instalación de Sikawrap Hex 103C	ml x b=10cm	17,1

Tabla 3:16 *Cantidades para un reforzamiento con Fibras de Carbono. Fuente: Arnoldo Berrocal Ingenieria S.A.S.*

- **Reforzamiento con encamisado en concreto reforzado.**

Miguel García Mulford & Cia Ltda.		
Descripción	**unidad**	**cantidad**
Demolición parcial de concretos en vigas y losas	dm3	46,2
Anclaje de acero de refuerzo (con mortero epoxico)	un	6
Acero de refuerzo nuevo (con inhibidor EpoCem)	kg	17,9
concreto de reparación predosificado en vigas y losas	dm3	114,6

Tabla 3:17 *Cantidades para un reforzamiento con encamisado en concreto reforzado. Fuente: Miguel García Mulford & Cia. Ltda.*

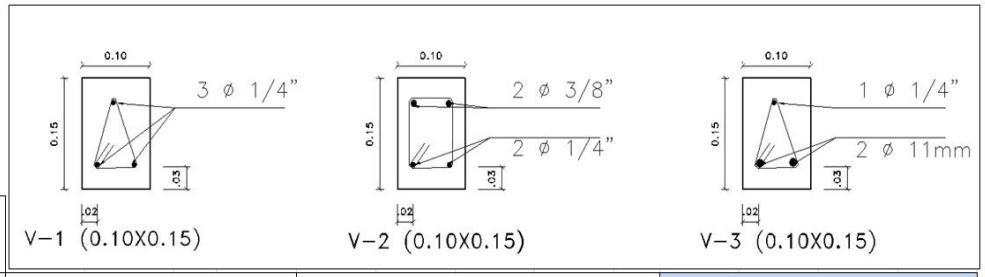
4. RESULTADOS

4.1 PRUEBA DE CARGA

De los ensayos realizados a las vigas se muestra la siguiente tabla.

			Pagrt(Ton)	Pmax(Ton)	Mu (Ton-m)	M. Resistente teórico (Ton-m)	Mu teórico (Ton-m)
	vigas referencia	V-A(v-1)	1,390	1,498	0,524	0,2691	0,299
		V-B(v-2)	1,38	1,839	0,644	0,2691	0,299
Vigas en Comparación	Reforzada con barras de acero	V-E1(v-3)	2,10	3,084	1,080	0,702	0,780
		V-E2(v-3)	2,35	2,610	0,913	0,702	0,780
	Reforzada con fibras de Carbono	V-D1(v-2_f)	2,05	2,285	0,800	0,7173	0,797
		V-D2(v-2_f)	2,97	3,206	1,122	0,7173	0,797
	Mejoramiento de V-1	V-C1(v-1_f)	1,75	2,842	0,995	0,7056	0,784
		V-C2(v-1_f)	1,94	2,111	0,739	0,7056	0,784
	Mejoramiento de V-3	V-F(v-3_f)	2,61	3,049	1,067	0,899	0,999

Tabla 4:1 *Resultados obtenidos en la prueba de carga*



Momento Ultimo (Ton.m)	V−1 (0.10X0.15)	V−2 (0.10X0.15)	V−3 (0.10X0.15)
VIGA PATRON	0,524	0,644	0,997
Reforzada con Frp	0,867	0,961	1,067

Vigas con los sistemas de reforzamiento puestos comparación

Ilustración 22 *Resumen de momentos últimos resistentes de las vigas ensayadas*

Según la Tabla 4:1 las vigas V-A y V-B que son representativas en su resistencia teórica, presentan una discrepancia del 18,63% en la resistencia al momento flector, y el valor experimental respecto a los teórico es 1,75 y 2,15 veces mayores.

Las vigas V-E1 y V-E2 reforzadas con barras de acero son representativas a las vigas V-D1 y V-D2 reforzadas con fibras de carbono, presentan una diferencia entre $Mu_{teórico}$ y $Mu_{experimental}$ del 27,75% y para las vigas V-D1 y V-D2 esta diferencia es del 17,06 % .

Los valores experimentales de las vigas puestas en comparación como alternativas de reforzamiento presenta una diferencia del 3,69 % en el promedio de sus valores, esto indica que la base teórica que pretendía reproducir dos métodos de reforzamiento (encamisado con barras de acero vs Fibras de Carbono) tuvo un grado aceptable de veracidad.

Además de realizarse la comparación teórica del comportamiento de los dos sistemas de reforzamiento, las vigas V-C1 y V-C2 permitieron establecer que la resistencia de la viga V-A ante, aumentó su capacidad en un 65,45 % al ser instaladas las fibras, ya que paso de Mu=0,524 Ton.m a Mu= 0.867 Ton.m(promedio). De igual forma la viga V-B aumento en un 44,73 % al pasar con un Mu=0,644 Ton.m a un Mu= 0.961 Ton.m (promedio de las vigas V-D1 y V-D2).

Mientras que para la viga V-F, la cual tiene una sección con las mismas características de las vigas V-E1 y V-E2, pero adicionándole fibras de carbono en la zona de tracción, no hubo un aumento significativo de su resistencia, ya que solo presento un aumento del 7,07%.Sin embargo su valor teórico con el experimental presento un error del 3,87%.

4.2 MAPA DE GIRETAS

En todos los casos de las vigas ensayadas sin fibras la falla se presentó por agrietamientos en la zona de tracción, seguida por fluencia del acero y final mente rompimiento del concreto en la zona de compresión, sin embargo, las fallas en los elementos reforzados con fibras de carbono se presentaron por desprendimiento del desprendimiento del extremo final del refuerzo para las vigas V-D2 y V-F y desprendimiento del recubrimiento de hormigón para las vigas V-C1, V-C2 y V-D1.

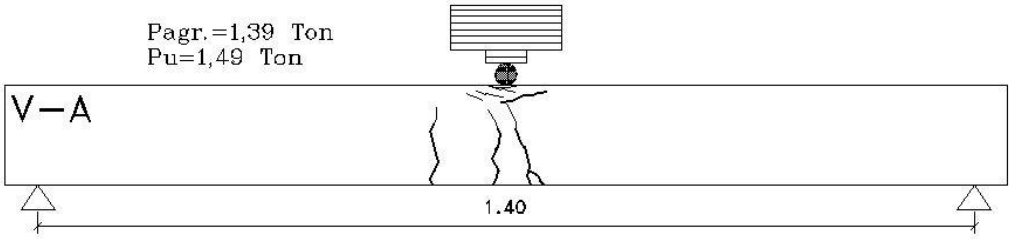


Ilustración 23 *Mapa de grietas V-A*

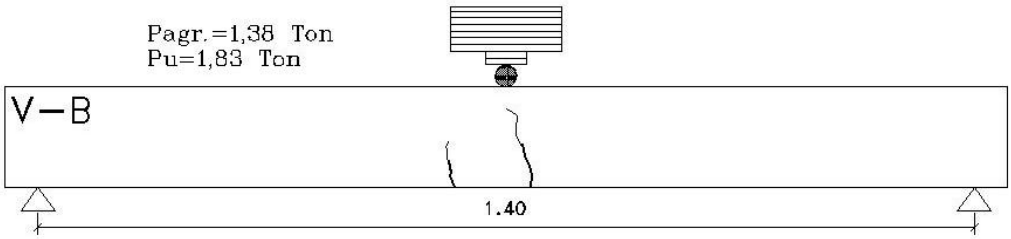


Ilustración 24 *Mapa de grietas V-B*

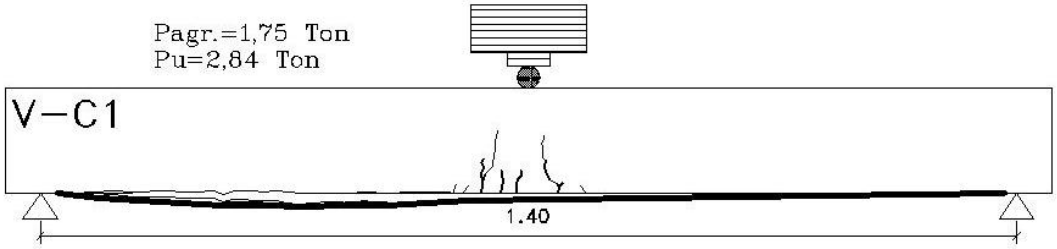


Ilustración 25 *Mapa de grietas V-C1*

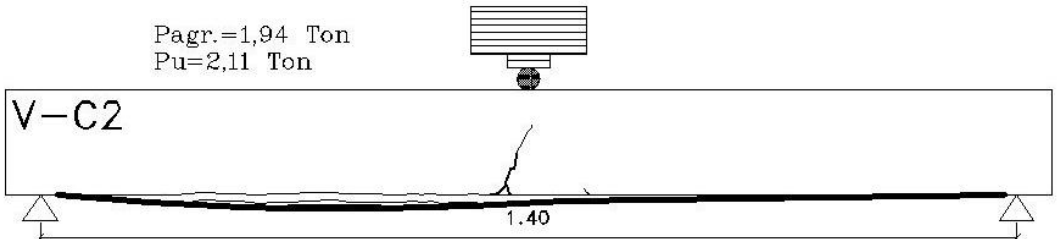


Ilustración 26 *Mapa de grietas V-C2*

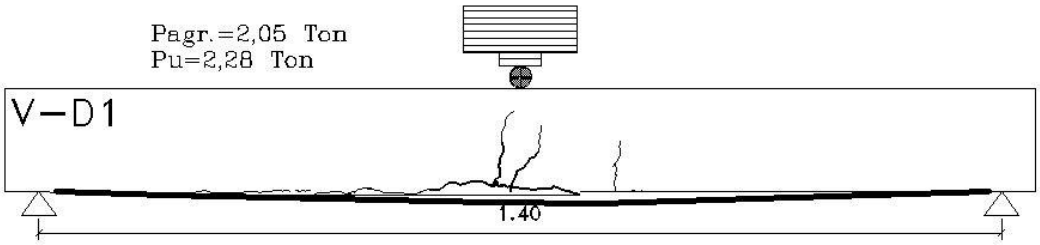


Ilustración 27 *Mapa de grietas V-D1*

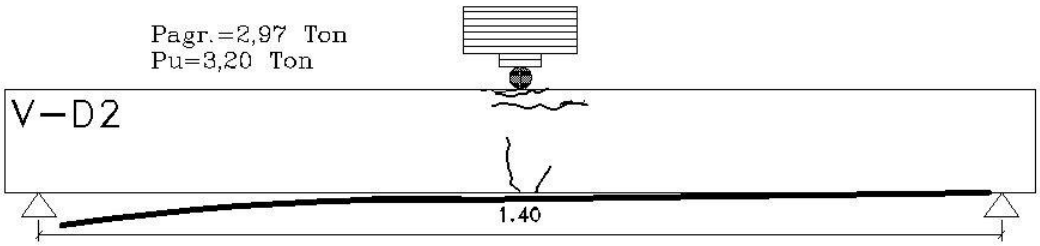


Ilustración 28 *Mapa de grietas V-D2*

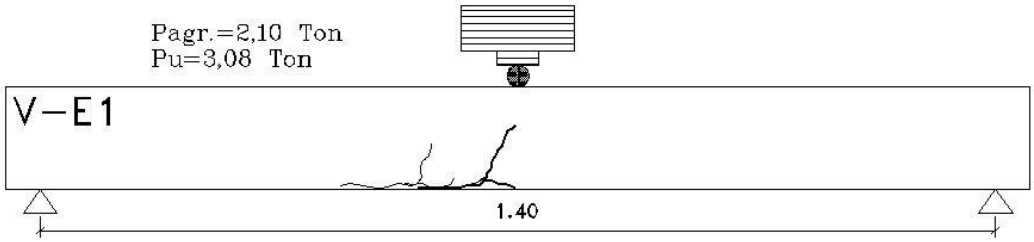


Ilustración 29 *Mapa de grietas V-E1*

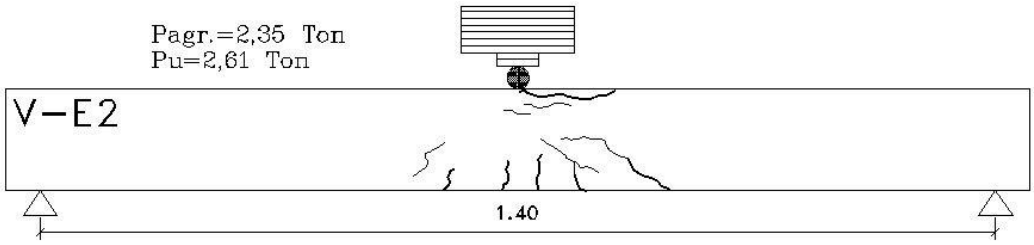


Ilustración 30 *Mapa de grietas V-E2*

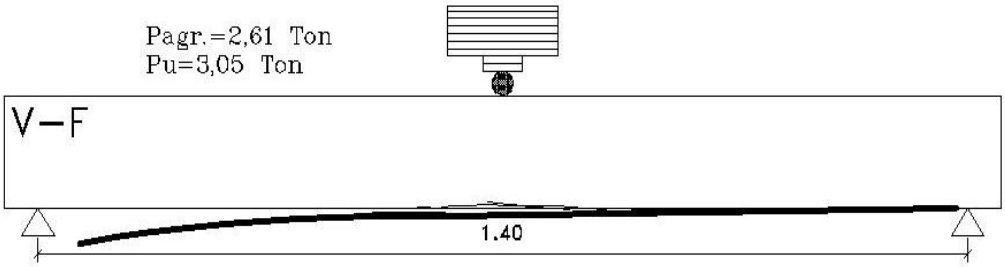
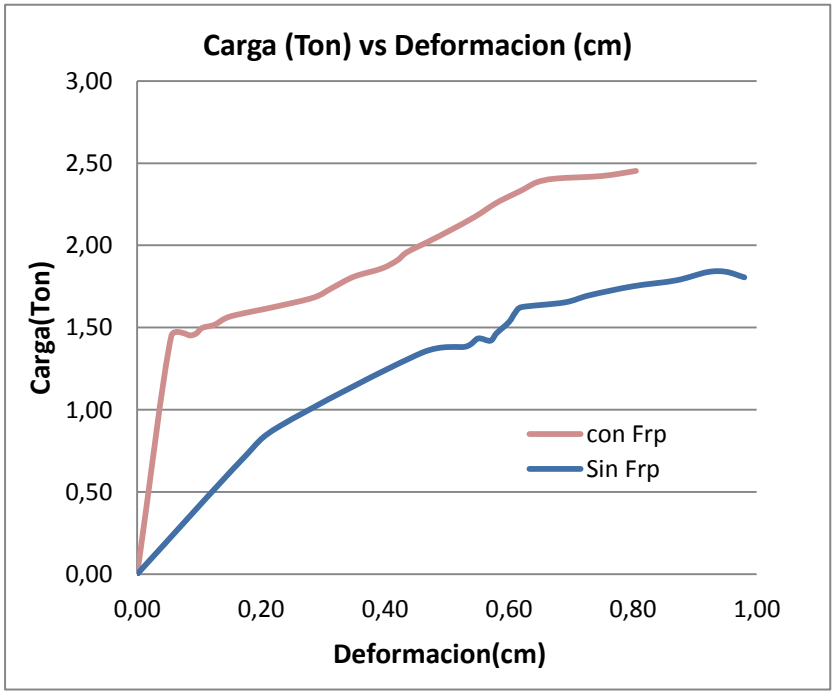


Ilustración 31 *Mapa de grietas V-F*

4.3 DEFORMACIONES

La Grafica 2 muestra las deformaciones experimentadas por una viga patrón sin refuerzo frp y otra reforzada con fibras, evidentemente el uso de las fibras proporcionó un aumento de la carga ultima de falla, pero no se pudo establecer el grado de deformación que podrían alcanzar, ya que las fallas se dieron por desprendimiento de las fibras, dejándola expuestas a los esfuerzos inducidos súbitamente llevándola a una falla inmediata.



Grafica 2
Deformaciones para viga reforzada y sin reforzar con frp.

4.4 ANÁLISIS DE COSTOS

- **Reforzamiento con fibras de carbono**

ARNOLDO BERROCAL INGENIRIA S.A.S				
reforzamiento estructural a todo costo				
Descripción	unidad	Cant.	valor unitario	subtotal
Preparación de superficie base	ml x b=10cm	17,1	$ 15.600,00	$ 266.760,00
Regularización de superficie base	ml x b=10cm	17,1	$ 10.400,00	$ 177.840,00
Suministro e instalación de Sika Wrap Hex 103 C	ml x b=10cm	17,1	$ 45.700,00	$ 781.470,00
			costo directo	**$ 1.226.070,00**
			A.U.I(20%)	**$ 245.214,00**
			Gran Total	**$ 1.471.284,00**

Tabla 4:2 *Análisis de costos con fibras de Carbono*

- **Reforzamiento con encamisado en concreto reforzado.**

Miguel García Mulford & Cia Ltda.				
Descripción	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Subtotal
Demolición parcial de concretos en vigas y losas	dm3	46,2	$ 3.024,00	$ 139.618,08
Anclaje de acero de refuerzo (con mortero epoxico)	un	6	$ 19.610,00	$ 117.660,00
Acero de refuerzo nuevo (con inhibidor EpoCem)	kg	17,9	$ 6.617,00	$ 118.391,36
Concreto de reparación predosificado en vigas y losas	dm3	114,6	$ 6.016,00	$ 689.253,12
		costo directo		**$ 1.064.922,56**
		Administración (17,0%)		**$ 181.036,84**
		Imprevistos (4,0%)		**$ 42.596,90**
		Utilidades (5,0%)		**$ 53.246,13**
		Gran Total		**$ 1.341.802,43**

Tabla 4:3 *Análisis de costos con encamisado en concreto reforzado.*

- **Tiempos en horas del proceso de rehabilitación.**

Alternativa	Limpieza	Uso de equipo ligero (taladro, martillos,	Uso de equipo pesado (mezcladora, equipo de izaje, montacargas)	Reparación	Fraguado	Total
Reforzamiento con fibras de carbono	2	2	-	2	7	13
Reforzamiento con encamisado en concreto reforzado	2	3	3	3	48	59

Tabla 4:4 *Tiempos en horas del proceso de los proceso de rehabilitación.*

Si bien es claro, que el precio unitario de los materiales CFRP es elevado comparado con los materiles convencionales, el costo de la ejecucion de un refrozamiento estructural con fibras de carbono, para este caso particular solo presenta una diferencia de un 8,9 % mayor, al reforzamiento convencional. Sin embargo puede considerarse que este sistema de reforzamiento es muy competitivo si se tienen en cuenta los tiempos de ejecucion (ver tabla 4.4), su facil manipulacion en obra sin la necesidad de equipos de izaje y montacargas, versatilidad para ser aplicado a todo tipo de geometrias de elementos estructurales, los incrementos despreciables en peso evita que la cimentacion de la estructura requiera modificaciones,la alta resistencia a la corrosion ,el bajo impacto estetico y la habilitacion de la estructura para ejecutar los acabados y su ocupacion ,una vez finalizado el reforzamiento, hacen parte de sus mas importantes ventajas,que de forma directa o indirecta afectan positivamente el costo de la intervencion.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Mediante el análisis de los resultados obtenidos en las pruebas de carga, realizadas a las vigas utilizando fibras de carbono (Sika Wrap Hex103C) y adheridas en una matriz epóxica (Sikadur 301) y reforzamiento de encamisado en concreto reforzado y del análisis de costos en la implementación de estos sistemas aplicados a un caso particular, se puede concluir lo siguiente:

- Se pudo establecer un grado aceptable de veracidad de la base teórica que reproduce dos sistemas de reforzamiento (encamisado en concreto reforzado vs Fibras de Carbono) como alternativas aplicables a un caso particular, ya que los valores de resistencia de carga última de estas, presentaron una diferencia del 3,69% en el promedio de sus valores. Esto garantizo, que el análisis de costos tuviera la misma exactitud al momento de cuantificar las cantidades de obra en las actividades de las dos alternativas que se aplicarían a un mismo caso de una estructura que demanda un reforzamiento debido a nuevas solicitaciones de carga.

- Además de realizarse la comparación teórica y experimental del comportamiento de los dos sistemas de reforzamiento ante una carga vertical aplicada en centro de la luz, se estableció que la resistencia de la viga V-A, aumentó su capacidad en un 65,45 % al ser instaladas las fibras, ya que paso de Mu=0,524 Ton.m a Mu= 0.867 Ton.m(promedio de las vigas V-C1 y V-C2).De igual forma la viga V-B aumento en un 44,73 % al pasar con un Mu=0,644 Ton.m a un Mu= 0.961 Ton.m (promedio de las vigas V-D1 y V-D2).Estos resultados son muy similares a los obtenidos por P. Alagusundaramoorthy; I. E. Harik, M.ASCE; and C. C. Choo a presentar un mejoramiento del 40,0% ,y a nivel nacional ,Beltrán, A. (“Uso de fibras de carbono como reforzamiento a flexión en vigas de concreto reforzado”. Universidad de la

Salle, 2011) que fueron de 33,16% para vigas con reforzamiento preventivo y 66,05% para vigas con reforzamiento correctivo.

- Referente al modo de falla de las vigas, todos ocurrieron según lo esperado (agrietamientos en la zona de tracción, seguida por fluencia del acero y final mente rompimiento del concreto en la zona de compresión), a excepción de la vigas reforzadas con fibras de carbono ya que estas fallaron por desprendimiento del extremo final del refuerzo y desprendimiento del recubrimiento de hormigón. Esto dejo en evidencia la instalación no realizada por un personal calificado a pesar que se siguieron todas las recomendaciones descritas por el fabricante.

- A pesar de la falla por del desprendimiento del extremo final del refuerzo y desprendimiento del recubrimiento de hormigón para las vigas reforzadas con fibras de carbono (Sika Wrap Hex103C) y adheridas en una matriz epóxica (Sikadur 301), su capacidad de carga fue aún mayor que la esperada en un 27,25 % para las vigas V-C1 y V-C2 y en un 17,3 % para las vigas V-D1 y V-D2.

- Evidentemente el uso de las fibras proporcionó un aumento de la carga ultima de falla, pero no se pudo establecer el grado de deformación que podrían alcanzar, ya que las fallas se dieron por desprendimiento de las fibras, dejándola expuestas a los esfuerzos inducidos súbitamente.

- El análisis de costos proporciona un nuevo enfoque de ver el reforzamiento con materiales compuesto como una alternativa viable ,ya que su precio es muy competitivo considerando que estas brindan múltiples beneficios como reducción en los tiempos de ejecución debido a la fácil instalación y ausencia de equipos de izaje y montacargas, no impactan negativamente la estética de los elementos estructurales, no

generan cargas considerables sobre la cimentación, son resistente a la corrosión entre otras.

- Este estudio abre las puertas a los técnicos y profesionales en el área de la construcción, a tener en consideración la implementación de materiales de nuevas tecnologías en los distintos sistemas de reforzamiento; y a su vez, ir mitigando los paradigmas que se han fijado respecto a estos materiales.

- Para futuras investigaciones como reforzamiento a corte, confinamiento de nudos o reforzamiento en muros de mampostería , se recomienda que la instalación de la fibras sea realizada por un personal certificado, con el objetivo de garantizar la adherencia de las mismas para su efectivo funcionamiento. También se recomienda que el concreto que se utilice, sea suministrado por una concretera, con el ánimo de conservar las especificaciones del elemento definidas previamente en el diseño.

6. ANEXOS

6.1 MEMORIAS DE CÁLCULO

6.1.1 Granulometría del agregado grueso

- **Normas**

Las normas en las que se basa el presente ensayo y por ende el laboratorio son:

- NORMA ICONTEC 176. Método para determinar la densidad y la absorción de agregados gruesos.
- ASTM C-127. Specific Gravity and Absorption of coarse Aggregate.

Masa en gramos de la muestra seca (M)	**2222,0 g**
Masa en gramos de la muestra Saturada y superficialmente seca (M_s)	**2244,4 g**
Masa en gramos de la muestra sumergida en agua (M_i)	**1361,8 g**

Tabla 6:1 *Datos obtenidos en el laboratorio*

- **Análisis de datos**

Teniendo en cuenta los datos anteriormente relacionados (Tabla 23), y utilizando Las fórmulas de densidad y absorción se obtienen los siguientes resultados:

- Densidad Nominal:

$$D_n = \frac{M}{M - M_i} = \frac{2222{,}0g}{(2244{,}4 - 1361{,}8)g} \times 1\frac{g}{cm^3} = 2.52\, g/cm^3$$

D_n = 2.62 g/cm^3.

- Densidad Aparente:

$$D_{aparente} = \frac{M}{M_s - M_i} = \frac{2222{,}0g}{(2222{,}0 - 1361.8)g} \times 1\frac{g}{cm^3} = 2.58\, g/cm^3$$

D_a = 2.60 g/cm^3

- Absorción:

$$\%absorcion = \frac{M_s - M}{M} * 100\% = \frac{(2244{,}4 - 2222{,}0)g}{2222{,}0g} \times 100\% = 1.00\%$$

% Absorción = 1.00%

Los anteriores resultados se resumen en la Tabla N 24

Masa en gramos de la muestra seca (M)	**2222,0 g**
Masa en gramos de la muestra Saturada y superficialmente seca (M_s)	**2655.84 g**
Masa en gramos de la muestra sumergida en agua (M_i)	**1637.81 g**
Densidad Aparente	**2.58 g/cm^3**
Densidad Nominal	**2.52 g/cm^3**
% Absorción.	**1.00%**

Tabla 6:2 *Método para determinar la densidad y la absorción de agregados gruesos.*

6.1.2 Granulometría del agregado fino

- **Normas**

Las normas en las que se basa el presente ensayo y por ende el laboratorio son:

– NORMA ICONTEC 237. Método para determinar la densidad y la absorción de agregados finos.

Masa en gramos de la muestra seca (A)	**488 g**
Masa picnómetro lleno con agua(B)	**694 g**
Masa picnómetro + Agua + Material (C)	**1004.7 g**
Masa en gramos de la muestra Saturada y superficialmente seca (S)	**500 g**

Tabla 6:3 *Datos obtenidos en el laboratorio*

- **Análisis de datos**

Teniendo en cuenta los datos anteriormente relacionados, y utilizando Las fórmulas de densidad y absorción se obtienen los siguientes resultados:

- Densidad Nominal:

$$D_n = \frac{A}{B+A-C} = \frac{488g}{(698+488-1004.7)g} = 2.69\, g/cm^3$$

D_n = 2.62 g/cm^3.

- Densidad Aparente:

$$D_{apar} = \frac{A}{S+B-C} = \frac{488g}{(500+698-1004.7)g} = 2.52g/cm^3$$

D_a = 2.60 g/cm^3

- Densidad Aparente SSS:

$$D_{apar-SSS} = \frac{S}{S+B} = \frac{500g}{(500+698)g} = 2.58g/cm^3$$

D_a = 2.60 g/cm^3

- Absorción:

$$\%absorcion = \frac{S-A}{A} * 100\% = \frac{(500-488)g}{488g} \times 100\% = 2.46\%$$

% Absorción = 2.46%

6.2 ANEXOS FOTOGRÁFICOS

6.2.1 Formaletería y figurado del refuerzo

Fotografía 8 *Formaleta múltiple y refuerzo de las vigas*

6.2.2 Aplicación de las fibras de carbono

Fotografía 9 *Componentes A y B-Sikadur 301*

Fotografía 10 *Medición y corte del tejido*

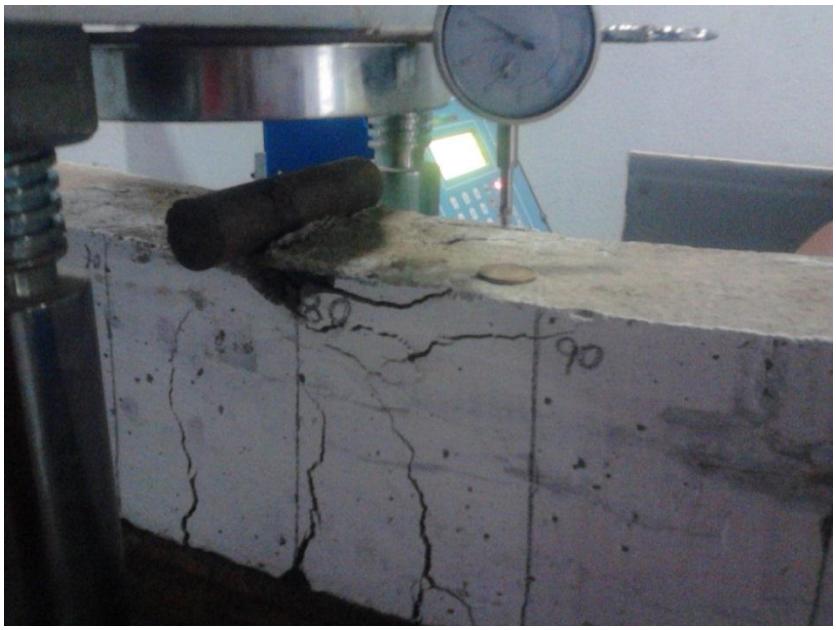
Fotografía 11 *Instalación del tejido*

Fotografía 12 *Aplicación Sikadur 301*

Fotografía 13 *Impregnación del tejido*

6.2.3 Aspecto de vigas

Fotografía 14 *Montaje de V-A*



Fotografía 15 *V-A agrietada*

Fotografía 16 *Vigas V-A y V-B después de la prueba de carga.*

Fotografía 17 *Desprendimiento de la Fibra en la viga V-F*

Fotografía 18 *Aspecto general de las vigas después de la prueba de carga*

Fotografía 19 *Falla por desprendimiento de la fibra.*

6.2.4 Ensayo cilindros de concreto

Fotografía 20 *Ensayo a compresión*

Fotografía 21 *Rotura de los cilindros*

6.2.5 Montaje para la prueba de carga

Fotografía 22 *Perfil de reacción y apoyos metálicos*

Fotografía 23 *Montaje de la viga V-A*

7. COSTOS

Item	Descrpción	Dedicación	Cantidad	Vr Unitario	Vr Parcial
1	**PERSONAL**				
		Mes		**$/Mes**	**$**
1.1	Director	0,20	1	5.700.000	1.140.000
1.2	Investigador	4	2	700.000	5.600.000
1.3	Auxiliar de Laboratorio	0,1	1	556.000	55.600
Sub Total Personal					**$ 6.795.600**
	MATERIALES Y EQUIPOS				
		UNIDAD	**CANTIDAD**	**Vr.UNITARIO**	**Vr. PARCIAL**
2	**Papelería Y Comunicaciones**				
2.1	Papelería	Resma	1	$ 10.000	$ 10.000
2.2	Tinta	Cartuchos	3	$ 45.000	$ 135.000
2.3	Fotocopias	Hoja	50	$ 100	$ 5.000
2.4	Internet	Hora	75	$ 1.000	$ 75.000
2.5	Anillados y Empaste	Unidad	4	$ 13.500	$ 54.000
	Sub Total Papelería y Otros				**$ 279.000**
3	**Materiales**				
3.1	Concreto(Materiales+ Mano de Obra)	M3	0,27	$ 500.350	$ 135.095
3.2	Acero	Kg	24,70824	$ 3.350	$ 82.773
3.3	Formaleta	Global	-	-	$ 40.000
3.4	Fibras_Sikawrap Hex 103 C	Rollo	-	-	$ 0
3.5	Sikadur 301 Componentes A Y B	Gal.	-	-	$ 0
	Sub Total Materiales				**$ 257.867**

4	**Transporte**				
4.1	Reunión con Director	Día	20	$ 4.600	$ 92.000
4.2	Transporte Personal (3)	Día	14	$ 4.600	$ 64.400
4.3	Transporte de Materiales	Viaje	3	$ 5.000	$ 15.000
4.4	Transporte Vigas y Riel	Viaje	2	$ 35.000	$ 70.000
	Sub Total Transporte				**$ 241.400**

5	**Montaje Prueba De Carga**				
5.1	Riel + Corte	Unidad	1,0	$ 108.000	$ 108.000
5.2	Platinas Metálicas De Reacción	Unidad	2	$ 5.000	$ 10.000
5.3	Auxiliar	Día	1	$ 50.000	$ 50.000
5.4	**Sub Total Equipos**				**$ 268.000**
SUB TOTAL MATERIALES Y SUMINISTROS					$ 7.841.867
IMPREVISTOS (5%)					$ 392.093
COSTO TOTAL DEL ESTUDIO					**$ 8.233.960**

Tabla 7:1 *Costos del trabajo de grado.*

8. B I B L I O G R A F Í A

- HELENE, Paulo, PEREIRA Fernanda, *"Manual de rehabilitación de Estructuras de hormigón: Reparación, Refuerzo y Protección"*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México. 1997.

- ACI 440.2R-02, *"Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures"* s.f

- Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR - 10.

- SIKA INFORMACIONES TÉCNICAS *"Reforzamiento de estructuras de concreto: Técnicas y Materiales"* ISSN-0122-0594, Segunda Edición, División Construcción, Colombia, 2007.

- GÓMEZ, María Dolores, SOBRINO Juan A. *"Criterios de diseño para el refuerzo de estructuras con materiales compuestos con fibra de carbono",* Casos prácticos/ Almunia /revista de Ingeniería /Universidad de los Andes.

- S. Echazu Lamas, A. S. "*Vigas de hormigon armado reforzadas y/o reparadas con materiales compuestos.*", 2010.

- CINPAR *"Refuerzo y rehabilitación de estructuras: Vigas de hormigón armado reforzadas y /o reparadas con materiales compuestos"* Argentina, 2010.

- G. J. Xiong; J. Z. Yang, "*Behavior of Reinforced Concrete Beams Streng the ned with Externally Bonded Hybrid Carbon Fiber–Glass Fiber Sheets*", (2004)

- BELTRAN Andres, "*Uso de fibras de carbono como reforzamiento a flexion en vigas de concreto reforzado*", Universidad de la Salle, Bogotá D.C, 2011

- Norma Tecnica Colombiana ICONTEC. "*Especificaciones de los agregados para concreto. NTC-174"*. 2006.

- SIKAWRAP 103C, "*Tejido de fibra de carbono para reforzamiento estructural"*, Hoja Técnica; versión 01/2012

- TANTALEÁN, Luis Flores, "Reforzando edificaciones con fibras de carbono" Constructora RF SA, S.F

- SIKADUR 301," Resina de impregnación de alto módulo y alta resistencia", Hoja Técnica; versión 01/2012.