



CAPÍTULO I

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1 Introducción

A lo largo del tiempo el hormigón armado ha demostrado su excelente rendimiento, incluso ante exigencias duras y variadas, en ocasiones muy superiores a las previstas en el cálculo.

Las estructuras de hormigón armado pueden presentar insuficiencias, ya sea por construcciones deficientes, deterioro del hormigón, corrosión del acero de refuerzo, cambios en la funcionalidad de su estructura o aumento de las cargas estimadas en su diseño; en caso extremo, porque han llegado al final de su ciclo de servicio, generando un factor de riesgo al ser estructuras antiguas que requieren rehabilitación.

Por ello, es de vital importancia el análisis de la estructura a lo largo de su vida útil y en caso de ser necesario, la aplicación de elementos de refuerzo.

El reforzamiento es una acción que permite aumentar la capacidad de resistencia mecánica de una parte de la estructura o de la estructura completa. En ciertas ocasiones se determina que la estructura requiere aumentar su resistencia en función de las demandas reales. En otras ocasiones, las estructuras se someten a eventos excepcionales que provocan daños que deben ser reparados urgentemente.

Las estructuras dañadas normalmente pueden recuperarse por medio de reparaciones en otros casos puede ser necesario recurrir a la instalación de refuerzos.

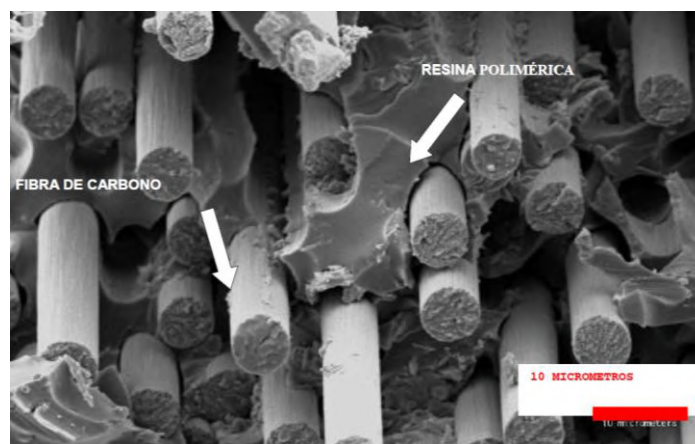
En los años recientes, han surgido innovadoras técnicas de refuerzo con materiales compuestos. Uno de los materiales compuestos más prometedores en cuanto al futuro de la construcción es la fibra de carbono. Este polímero, consistente en filamentos largos y finos de átomos de carbono unidos en una formación de cristal, los filamentos son más finos que un cabello humano, es más liviano que el acero, diez veces más resistente y el doble de rígido.

La fibra de carbono está en fase de desarrollo en el mundo de la construcción. Es cierto que se está utilizando para refuerzos estructurales, pero por sus capacidades puede llegar a ser un claro sustituto del acero. A pesar de tener actualmente un precio más elevado que los materiales habituales la tendencia es que se reduzca a lo largo de los años venideros.

1.2 Antecedentes

La industria de la fibra de carbono comenzó en 1956 cuando la empresa Unión Carbide abrió su Centro Técnico de Parma a las afueras de Cleveland. El complejo fue uno de los principales laboratorios del programa de investigación. En 1956 el físico Roger Bacon desarrolló las primeras fibras de carbono en el Centro Técnico de Parma. Bacon se encontraba trabajando con un arco de carbono a altas temperaturas y presiones tratando de determinar el punto triple (Equilibrio térmico entre el estado gaseoso, sólido y líquido de un elemento) del “grafito”. Cuando Bacon disminuyó la presión en el arco, notó que el carbono sufría un cambio de la fase de vapor a la fase sólida, formando un filamento muy delgado. Encontró que estos filamentos eran sólo una décima parte del diámetro de un cabello humano, pero se podían doblar y no eran frágiles.

Figura 1.1 Filamentos de Fibras de Carbono (Ampliación microscópica)



Fuente: Rosales, 2008

Mientras Bacon desarrollaba filamentos de fibras de carbono, en Japón, el científico Akio Shindo, del Instituto de Investigaciones Industriales del Gobierno de Osak, fabricó fibras de carbono basadas en poliacrilonitrilo (PAN) en el laboratorio con un módulo de Young de más de 140 GPa. El Dr. Shindo descubrió que el poliacrilonitrilo tiene una sorprendente estabilidad térmica, lo cual hace que el PAN pueda retener un alto porcentaje de carbono en su constitución posterior a la carbonización, lo cual genera un producto fibroso resultante más fuerte, más flexible y tiene una mejor resistencia al calor en comparación a otra forma de fibra de carbono.

Años posteriores en Inglaterra, William Watt inventó una fibra de módulo aún más alto de PAN. Las fibras británicas se pusieron rápidamente en producción comercial. Tanto en Japón como en Inglaterra, los investigadores tuvieron acceso al PAN puro, con una estructura polimérica que proporcionó un excelente rendimiento después del procesamiento. En los inicios, la fabricación de la fibra de carbono era utilizado principalmente en aplicaciones militares, debido a su gran resistencia al calor y propiedades anticorrosivas. Sin embargo, entre los años 70's y 80's, la empresa japonesa Toray transformó la fibra de carbono en un producto que tuviera aplicaciones comerciales más generales. La industria aeroespacial comercial se aprovechó de las ventajas de las fibras de carbono. El uso de fibras de carbono basadas en poliacrilonitrilo (PAN) se desarrolló en mayor escala y empezó a comercializarse en productos como chalecos antibalas, cuerdas de pescar, aros de bicicletas, neumáticos de autos, guantes de protección, etc.

Por otro lado, en la industria aeronáutica y espacial, la demanda en el uso de fibras de carbono se ha incrementado principalmente debido a la necesidad de aumentar la eficiencia en la utilización del combustible, reducción del peso de los aviones, reducción en el ruido de los motores, lo cual mejora el desempeño aerodinámico de los aviones.

En la aviación comercial la utilización de la fibra de carbono implementa importantes mejoras permitiendo aviones más ligeros y con diseños aerodinámicos que permiten

realizar vuelos más cortos y seguros. Asimismo, permite mejores diseños interiores en los aviones, ya sea en los asientos de pasajeros, cabina del piloto, pasillos más amplios, etc.

Actualmente, la industria aeronáutica utiliza hasta un 50% de fibra de carbono en el ensamblaje de sus nuevos aviones de última generación, implementando la mayor parte del material compuesto en la cabina y alas. En consecuencia, el consumo de combustible en cada vuelo desciende hasta un 20% en comparación con otros aviones y el mantenimiento es más económico.

1.3 El problema

1.3.1 Planteamiento del problema

Muchos estudios dicen que el 80 % de las viviendas del mundo están construidas, por lo que es lógico y más hablando de temas de sostenibilidad que cada vez sea más necesario realizar un mantenimiento. Entre las tipologías constructivas más usadas se encuentran las estructuras de hormigón armado, de hecho, el hormigón es el material estructural más usado en el mundo. Es muy común que las estructuras de hormigón armado requieran reparación y/o refuerzo o en su defecto mejorar las propiedades de resistencia de una estructura debido a factores como aumento de las cargas de servicio, cambio de uso de la estructura, diseño según normativa antigua, envejecimiento o deterioro de materiales por factores ambientales, errores de construcción o daño de los elementos estructurales ante situaciones extremas.

Los sistemas de reforzamiento empleados comúnmente en la actualidad son un tanto tediosos y de difícil instalación. Por ello se requiere implementar un reforzamiento práctico, de fácil instalación, y disminuya el deterioro de los elementos estructurales.

El sistema de reforzamiento con elementos fabricados con fibra de carbono, es un sistema que ha tenido gran aceptación y permite resolver todos los factores mencionados anteriormente disponiendo la fibra de carbono, según el efecto a mitigar (Sea flexión, corte, torsión o sismicidad), para prevenir o corregir.

La fibra de Carbono es un polímero 10 veces más resistente a la tracción que el acero, es un material muy flexible, altamente resistente aumentando de manera considerable la capacidad de carga de los elementos estructurales, livianos y de baja densidad en comparación al acero, no modifica la sección del elemento estructural, resistentes a altas temperaturas y baja expansión térmica, poseen un bajo costo de instalación y una rápida puesta en servicio.

Según lo anterior, por facilidad y practicidad en la instalación de la fibra de carbono y su excelente resistencia a la tensión, se optó como objetivo de análisis del presente proyecto de investigación el uso de platinas de fibra de carbono como reforzamiento de índole estructural en vigas de hormigón armado sometidas a ensayos de flexión.

1.3.2 Formulación del problema

La hipótesis que se plantea para el proyecto de investigación es:

El reforzamiento de vigas de hormigón armado como elemento estructural, es posible a través de la utilización de la fibra de carbono, logrando así devolverla a su estado inicial de trabajo o inclusive superarlo.

La variación de la resistencia a la flexión de vigas de hormigón armado reforzadas con platinas de fibras de carbono es del 30 % a 40 % en relación a las vigas de hormigón armado sin reforzar.

1.3.3 Sistematización del problema

Para el análisis del comportamiento de vigas de hormigón armado reforzadas con fibra de carbono se realizarán prácticas de laboratorio, para analizar las características de todos los materiales que intervienen en la elaboración de la viga de hormigón armado reforzadas con fibra de carbono.

Tabla 1.1 MATRIZ P.C.E.S.

1.- PROBLEMA	2.- CAUSA	3.- EFECTO	4.- SOLUCION
✓ Fisuración y deformación en el elemento estructural ✓ Deflexión inadecuada	✓ Deterioro del hormigón ✓ Corrosión del acero de refuerzo ✓ Aumento de carga por cambio de uso ✓ Fallo en el diseño o construcción ✓ Daños por impacto o accidentes ✓ Final del ciclo de servicio de la estructura ✓ Movimientos sísmicos	✓ Colapso total o parcial de la estructura ✓ Pérdida de capacidad de carga ✓ Problema de estabilidad y equilibrio ✓ Riesgo de accidentes y lesiones ✓ Daños en elementos adyacentes (paredes, techos)	✓ Encamisado de vigas ✓ Refuerzo con perfiles metálicos ✓ Uso de platinas de fibra de carbono

Fuente: Elaboración propia

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento de vigas de hormigón armado reforzadas con fibra de carbono, sometidas a flexión.

1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica y analizar las recomendaciones dadas en guías, manuales internacionales y la norma ACI 440 2R con respecto a la utilización de las láminas de fibra de carbono.
- Hacer un aporte de información, proporcionando las nociones básicas sobre el refuerzo con platinas de fibra de carbono en vigas de hormigón armado.
- Estudiar las características de las platinas de fibra de carbono para refuerzo y sus componentes para tener información al respecto.
- Realizar la caracterización de los materiales que componen la mezcla del hormigón, para conocer mejor las propiedades de cada uno.
- Establecer un proceso de trabajo el cual sirve de experiencia para futuras aplicaciones de este material.
- Mostrar ventajas y desventajas de este sistema de reforzamiento
- Calcular las nuevas solicitaciones que son generadas por las nuevas cargas
- Analizar la eficiencia del reforzamiento con fibras de carbono cuando se instalan sobre los elementos en estado no fisurado.
- Presentar un ejemplo de diseño para un caso de estudio de una viga de hormigón reforzado, de tal forma que la revisión y aplicación del proyecto sea una guía para el procedimiento de diseño.

1.5 Justificación

1.5.1 Justificación teórica

El presente proyecto de investigación pretende aportar al conocimiento existente sobre el uso de las platinas de fibra de carbono como refuerzo en vigas de hormigón armado guiándose de investigaciones realizadas anteriormente por revistas de tipo ingenieril y normas establecidas. Se utilizará como materia de investigación la metodología del reforzamiento de fibra de carbono utilizado como refuerzo estructural. Se estudiará y determinará el comportamiento y la contribución que brinda el reforzamiento de fibra de carbono en la ductilidad y resistencia a flexión de la viga, por ello se analizarán secciones de vigas de hormigón armado reforzadas con

fibras de carbono sometidas a flexión y determinar ventajas y desventajas del uso de este método de reforzamiento.

1.5.2 Justificación académica

Con el presente trabajo de investigación, se pretende aplicar todos los conocimientos adquiridos sobre el hormigón armado y sus componentes, para obtener vigas de hormigón armado que alcancen la resistencia de diseño, así también adquirir conocimientos con respecto al refuerzo de fibra de carbono en vigas de hormigón armado.

De esta manera contribuir de manera positiva al desarrollo investigativo de este sistema de reforzamiento a flexión, para dejarlo como guía a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil.

1.5.3 Justificación metodológica

Para cumplir a cabalidad con lo planteado, se realizarán vigas de hormigón armado con refuerzo de platinas de fibra de carbono y se las someterá al ensayo de flexión mediante el aumento progresivo de carga, también se efectuarán los ensayos correspondientes a los materiales que componen el hormigón (agregado grueso y agregado fino), para obtener las características que presentan estos materiales, y se analizará las características de las platinas de fibra de carbono para su cálculo correspondiente.

1.5.4 Justificación práctica

Con este trabajo se quiere conocer el comportamiento de vigas de hormigón armado reforzadas con fibra de carbono trabajando como un elemento estructural monolítico, analizar el incremento de capacidad de resistencia y observar los modos de falla que puedan producirse. Con los resultados obtenidos, se podrá comprobar y dar a conocer las ventajas sobre el uso de este material en el reforzamiento estructural en una importante estructura elaborada a base de hormigón armado sabiendo que gran parte de las construcciones a nivel nacional y en nuestra ciudad necesitan nuevas y mejores formas de reforzamiento estructural.

1.6 Alcance del estudio

El presente proyecto de investigación tiene por finalidad demostrar la factibilidad del uso de platinas de fibra de carbono como refuerzo externo para el reforzamiento de vigas de hormigón armado.

Se expone la filosofía y metodología de diseño de este sistema de refuerzo según norma ACI 440 2R y se pretende proporcionar una guía para este tipo de refuerzo, con este fin se abordan los temas necesarios y suficientes para describir el proceso para reforzar vigas sometidas a flexión.

Se exponen las características de la fibra de carbono, historia, consideraciones de diseño, requisitos de aplicación para elementos sometidos a flexión, sus ventajas y desventajas y las limitaciones para su aplicación.

Toda la información teórica recopilada se aplica a un caso de reforzamiento de una viga de hormigón armado que se diseña para una carga determinada y que mediante el reforzamiento se obtenga una mayor resistencia a flexión.

Se estudiará y determinará el comportamiento y la contribución que brinda el reforzamiento de fibra de carbono en la ductilidad y resistencia a flexión de la viga.

Se presentarán los resultados de los ensayos de vigas con la finalidad de realizar análisis comparativos y determinar cuantitativamente la efectividad del uso de este método de reforzamiento.

Al verificar este planteamiento de forma estructural a través de ensayos se podría ampliar la información y el conocimiento de este método de reforzamiento, proponiendo así a la comunidad estudiantil de la carrera de Ingeniería Civil y a la sociedad una alternativa en el mercado que brinde confianza en las construcciones.

El proyecto de investigación se desarrolló en dos partes muy diferenciadas: experimental y numérica.

✓ **Parte Numérica:**

La parte numérica está basada en la Norma ACI 440.2R- 08 para determinar la cantidad y disposición de las platinas de fibra de carbono como reforzamiento en una viga de hormigón armado.

✓ **Parte Experimental:**

Se realizó la construcción de 8 vigas de hormigón armado, todas con las mismas características de diseño.

Se tomó una viga patrón a la cual no se colocó ningún sistema de refuerzo, las 7 vigas restantes fueron reforzadas con las platinas de fibra de carbono, posteriormente se sometió al ensayo de flexión y se hizo un análisis del tipo de falla de cada viga.

1.7 Limitación de la investigación

Las delimitaciones de la presente investigación son las siguientes:

- La norma que se utiliza para esta investigación es la Norma ACI 440 2R
- Es de aclarar que lo presentado en esta investigación no considera la influencia de altas temperaturas (producto de incendios) en las platinas de fibra de carbono.
- Así mismo no se consideran fuerzas axiales y las vigas son rectangulares.
- En cuanto a factibilidad, se contó con los recursos necesarios para realizar los ensayos propuestos de la siguiente manera. La elección para realizar 8 vigas de hormigón armado a escala real, de las cuales una viga se considerará como viga patrón y las demás vigas serán reforzadas con platinas de fibra de carbono.
- Las dimensiones (base y largo) de la viga se determinaron según las dimensiones del dispositivo de flexión de la Prensa Universal.
- La elección de la carga con la que fueron diseñadas las vigas se determinó en base a la máxima carga que se podría aplicar con la Prensa universal que cuenta el laboratorio de Hormigones y Resistencia de Materiales de la U.A.J.M.S., de tal manera que se trabaje con la máxima capacidad de la

prensa y llevar a la viga a su máxima deformación con y sin refuerzo de platinas de fibra de carbono.

- En cuanto a la confiabilidad técnica y metodológica: los ensayos realizados para desarrollar el presente proyecto de investigación se realizaron con los equipos del Laboratorio de Hormigones y Resistencia de Materiales de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, donde se cuenta con equipos debidamente calibrados. Para la rotura de las vigas se hizo uso de la Prensa Universal del Laboratorio de Tecnología de la Madera de la carrera de Ingeniería Forestal. Los ensayos se realizaron siguiendo las normas ACI y ASTM.
- En cuanto a la delimitación teórica, se buscó y recopiló información de investigaciones nacionales e internacionales, referidos a temas similares a nuestros objetivos e hipótesis de la presente investigación.
- La presente investigación se realizó con un diseño de mezclas de hormigón f'_c : 210 kg/cm².
- Se realizaron 8 probetas cilíndricas de hormigón para someterlos a ensayos de compresión a edades de 7, 14 y 28 días, para tener un control de la resistencia a la compresión del hormigón que será usado para el diseño de las vigas.
- El reforzamiento con platinas de fibra de carbono se realizó sin dañar las vigas de hormigón armado previamente.

1.8 Tipo de estudio

El tipo de estudio que se hará para la realización del siguiente trabajo de investigación es:

a) Experimental

Puesto que se realizarán ensayos de flexión a vigas de hormigón armado reforzadas con platinas de fibra de carbono.

Previamente se realizarán ensayos a los materiales que componen el hormigón, tales como:

- ✓ Análisis granulométrico del agregado fino y grueso para el hormigón.

- ✓ Peso específico y absorción del agregado grueso y fino.
- ✓ Determinación del peso unitario del agregado grueso y fino.
- ✓ Dosificación, preparación de probetas cilíndricas de hormigón.
- ✓ Rotura de probetas sometidas a compresión para verificar la resistencia de diseño del hormigón.
- ✓ Elaboración de vigas de hormigón armado.
- ✓ Pegado de las platinas de fibra de carbono en las vigas.
- ✓ Rotura de las vigas de hormigón armado sometidas a flexión, con y sin refuerzo de platinas de fibra de carbono.

b) Analítico

Porque se analizará el comportamiento y resistencia de la viga de hormigón armado con refuerzo de platinas de fibra de carbono.

c) Cuantitativo

Fundamentado en datos que se obtendrán del desempeño de una viga normal sometida a cargas y de otras reforzadas con platinas de fibras de carbono igualmente sometidas a sus respectivas cargas que soporte.

1.9 Hipótesis

La hipótesis que se plantea para el proyecto de investigación es:

El reforzamiento de vigas de hormigón armado como elemento estructural, es posible a través de la utilización de la fibra de carbono, logrando así devolverla a su estado inicial de trabajo o inclusive superarlo.

Este incremento de la resistencia a la flexión de vigas de hormigón armado reforzadas con platinas de fibras de carbono es del 30 % a 40 % en relación a las vigas de hormigón armado sin reforzar.

1.10 Síntesis del proceso

1. Recolectar el material bibliográfico (libros, manuales, revistas, tesis y normas) que describa antecedentes de la utilización de platinas de fibra de carbono como reforzamiento estructural en vigas.

2. Sistematizar la información recolectada acerca del reforzamiento de vigas de hormigón armado reforzadas con platinas de fibras de carbono.
3. Ejecución de los ensayos en laboratorio:
 - a) Provisión de material grava y arena, cemento, agua, barras de fierro corrugado, platinas de fibra de carbono y resina epóxica, que se necesitaran para la ejecución de esta investigación.
 - b) Se realizaron los siguientes ensayos en laboratorio de Hormigones y Resistencia de Materiales:
 - ✓ Análisis granulométrico del agregado fino
 - ✓ Análisis granulométrico del agregado grueso
 - ✓ Peso específico y absorción del agregado fino
 - ✓ Peso específico y absorción del agregado grueso
 - ✓ Determinación del peso unitario del agregado fino
 - ✓ Determinación del peso unitario del agregado grueso
 - ✓ Elaboración y curado probetas cilíndricas de hormigón
 - ✓ Consistencia del hormigón mediante Cono de Abhrams
 - ✓ Ensayo a compresión de probetas cilíndricas de hormigón
 - ✓ Armado del esqueleto de fierro (entramado longitudinal y transversal)
 - ✓ Montaje de la armadura de fierro al encofrado de la viga.
 - ✓ Elaboración de vigas de hormigón armado
 - ✓ Desencofrado de las vigas de hormigón armado en estudio.
 - ✓ Curado de las vigas de hormigón armado
 - ✓ Preparación de las vigas (alisado con amoladora) para el pegado de platinas.
 - c) Se realizaron los siguientes ensayos en laboratorio de Tecnología de la Madera de la carrera de Ingeniería Forestal:
 - ✓ Colocado de la platina de fibra de carbono en dirección longitudinal en la parte inferior de la viga donde se produce la tracción.
 - ✓ Ensayo de flexión a las vigas de hormigón armado aplicando diferentes cargas ascendentes hasta el punto de falla.

- ✓ Análisis del comportamiento de las vigas con y sin refuerzo para verificar la hipótesis.
- d) Tabulación de los datos obtenidos en las planillas establecidas.

1.11 Descripción de variables

1.11.1 Variable independiente:

- a) Fibra de carbono

En este proyecto de investigación se emplea platinas de fibra de carbono para reforzar vigas de hormigón armado, la cual es de alta rigidez, alta resistencia a la tracción, bajo peso, alta resistencia química. Es diez veces más resistente que el acero.

1.11.2 Variable dependiente:

- Resistencia a la flexión
- Comportamiento de la viga

Consiste en aplicar una intervención para reforzar vigas, con el propósito de adaptarlo a los niveles de seguridad y resistencia exigidas, según lo señalado por la normativa vigente, este tipo de refuerzo mejora las características mecánicas del elemento estructural al incrementar la resistencia y reducir el desplazamiento.

.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Generalidades

El refuerzo de estructuras de hormigón armado aplicando materiales compuestos a base de fibras sintéticas y resinas adheridos externamente al sustrato a reforzar ha llegado a ser una realidad como una técnica de ejecución en numerosos países, tanto a esfuerzos de flexión, como a cortante y compresión. Las razones por las que los materiales compuestos se vienen usando en mayor medida como refuerzo de elementos de estructuras de hormigón armado provienen de sus elevadas resistencias mecánicas (gran capacidad de deformación antes de la rotura), su resistencia a la corrosión y a los agentes químicos, su reducido peso, lo que facilita su transporte, manejo y puesta en obra, , buen comportamiento a la fatiga, buenas propiedades dieléctricas, la posibilidad de presentarse en cualquier longitud (eliminación de juntas), estas propiedades han convertido a estos materiales en una auténtica alternativa frente a otros más convencionales como el acero.

Por todo ello, resulta interesante obtener criterios de diseño de este tipo de refuerzos de aplicación en los campos de la ingeniería y la construcción teniendo en cuenta las excelentes propiedades que presentan los materiales compuestos y su compatibilidad con las estructuras de hormigón armado.

Entre los distintos tipos de fibras (carbono, vidrio, aramida) que pueden servir para este uso, se ha optado por centrar esta investigación sobre las fibras de carbono, las más utilizadas en el campo de refuerzos en estructuras de hormigón armado debido a sus características, principalmente por tener su módulo de elasticidad más alto, compatible con la deformación del hormigón.

Es cada vez más evidente la aplicación de materiales compuestos desde la última década, ya que tiempo atrás, su aplicación era prácticamente inexistente.

Como consecuencia de este creciente interés en la aplicación de los materiales compuestos, se han desarrollado en diferentes países guías y recomendaciones de

diseño que faciliten la aplicación de esta técnica que continúan en estudio y actualización.

2.2 Conceptos básicos

- ✓ **Fibra de carbono:** La fibra de carbono es el término con el cual se hace referencia a un material compuesto de índole no metálico y de la clase de los poliméricos, cuya materia prima normalmente es el PAN (poliacrilonitrilo), compuesto principalmente por carbono. Formada por finos filamentos de 5–10 μm (micrómetros) de diámetro.
- ✓ **Reforzamiento:** Acciones necesarias para incrementar la capacidad resistente de carga de una estructura, así como su optimización de uso.
- ✓ **Reparación:** Acciones necesarias para restituir la capacidad resistente de una estructura dañada.
- ✓ **Restauración:** Acciones necesarias para conseguir que una edificación antigua sea utilizable.
- ✓ **Falla frágil:** Cuando el acero no ha llegado a su fluencia, pero el hormigón si llega a su resistencia máxima. Se recomienda evitar este tipo de falla, puesto que es peligrosa en toda estructura.
- ✓ **Falla dúctil:** Cuando el acero llega a su fluencia, pero el concreto no ha llegado a su resistencia máxima. Se recomienda el diseño con este tipo de falla.
- ✓ **Ductilidad:** La ductilidad se define como la propiedad de la estructura de soportar deformaciones una vez alcanzado su límite elástico; es decir, la capacidad de deformarse en el rango inelástico sin colapsar. Capacidad de servicio en el punto de deformación del acero en el momento de la delaminación, desprendimiento o aplastamiento del concreto.
- ✓ **Deformación unitaria:** Es la deformación que se produce por cada unidad de longitud.

- ✓ **Módulo de elasticidad:** Es también conocido como el Módulo de Young y es un parámetro característico del comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se le aplica una fuerza.
- ✓ **Resistencia:** Dentro de la ingeniería la resistencia de un elemento cualquiera se define como la capacidad para soportar esfuerzos y fuerzas aplicadas sin llegar al estado de rotura, adquiriendo deformaciones temporales o permanentes.

Sin embargo, dentro del diseño de elementos de hormigón armado podemos encontrar varias definiciones de acuerdo al tipo de carga aplicada, al tipo de ensayo realizado, tipo de diseño, etc.
- ✓ **Resistencia requerida:** La resistencia requerida es la resistencia que un elemento o sección transversal debe tener para resistir las cargas amplificadas o los momentos, fuerzas internas y combinaciones de cargas correspondientes según lo estipulado en la Normativa Vigente (Norma ACI 318).
- ✓ **Resistencia nominal:** La resistencia nominal es la resistencia de un elemento o una sección transversal calculada con las disposiciones, los límites e hipótesis del método de diseño por resistencia según lo estipulado en la Normativa Vigente (Norma ACI 318), antes de aplicar cualquier factor de reducción de resistencia.
- ✓ **Resistencia de diseño:** La resistencia de diseño es la resistencia nominal multiplicada por el factor de reducción de resistencia ϕ que corresponda, según Norma ACI 318.

El factor de reducción de resistencia (ϕ) es un factor menor que la unidad que reduce la resistencia para considerar las incertidumbres en los materiales.

2.3 Hormigón

2.3.1 El hormigón y sus componentes

El hormigón es una mezcla de cemento, agregado grueso o grava, agregado fino o arena y agua. El cemento, el agua y la arena constituyen el mortero cuya función es unir las diversas partículas de agregado grueso llenando los vacíos entre ellas. En teoría, el volumen de mortero solo debería llenar el volumen entre partículas. Para obtener un buen hormigón no solo basta contar con materiales de buena calidad mezclados en proporciones correctas. Es necesario también tener en cuenta factores como el proceso de mezclado, transporte, colocación o vaciado y curado.

2.3.1.1 Cemento

Los cementos son aglomerantes hidráulicos, un polvo finamente molido que al mezclarse con agua, forma una pasta que fragua y endurece, creando una estructura sólida. El cemento se obtiene de la pulverización del Clinker el cual es producido por la calcinación hasta la fusión incipiente de materiales calcáreos y arcillosos, a una temperatura de 1400 °C a 1500 °C.

Existen diversos tipos de cemento, los cuales están especificados en la norma ASTM-C - 150-99a. Ellos son:

- ✓ **Tipo I**, Que es de uso general y sin propiedades especiales.
- ✓ **Tipo II**, de moderado calor de hidratación y alguna resistencia al ataque de los sulfatos.
- ✓ **Tipo III**, de resistencia temprana y elevado calor de hidratación.
- ✓ **Tipo IV**, de bajo calor de hidratación.
- ✓ **Tipo V**, de alta resistencia al ataque de sulfatos.

2.3.1.2 Agua

El agua en el hormigón tiene tres capacidades vitales:

1. Participa en las reacciones de hidratación del cemento

2. Confiere al hormigón la trabajabilidad necesaria para una correcta puesta en obra. La cantidad de agua debe limitarse al mínimo necesario ya que el exceso de agua crea una serie de huecos en el hormigón que disminuye su resistencia. La falta de agua en cambio puede producir masas poco trabajables y de difícil colocación en obra.

3. El agua de curado, durante el proceso de fraguado y primer endurecimiento del hormigón tiene por objeto evitar la desecación, mejorar la hidratación del cemento.

2.3.1.3 Agregado fino o arena

Se denomina agregado fino a la arena o piedra natural finamente triturada de dimensiones reducidas que pasan el tamiz N° 4. Las arenas provienen de la desintegración natural de las rocas o trituración por medios mecánicos.

Tanto el agregado fino como el grueso, constituyen los elementos inertes del hormigón, ya que no intervienen en las reacciones químicas entre cemento y agua. El agregado fino debe ser durable, fuerte, limpio y libre de materias impuras como polvo, limo, pizarra, álcalis y materias orgánicas. No debe tener más de 5% de arcilla o limos ni más de 1.5% de materias orgánicas. Su gradación debe satisfacer los requisitos propuestos en la Norma Boliviana 598, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

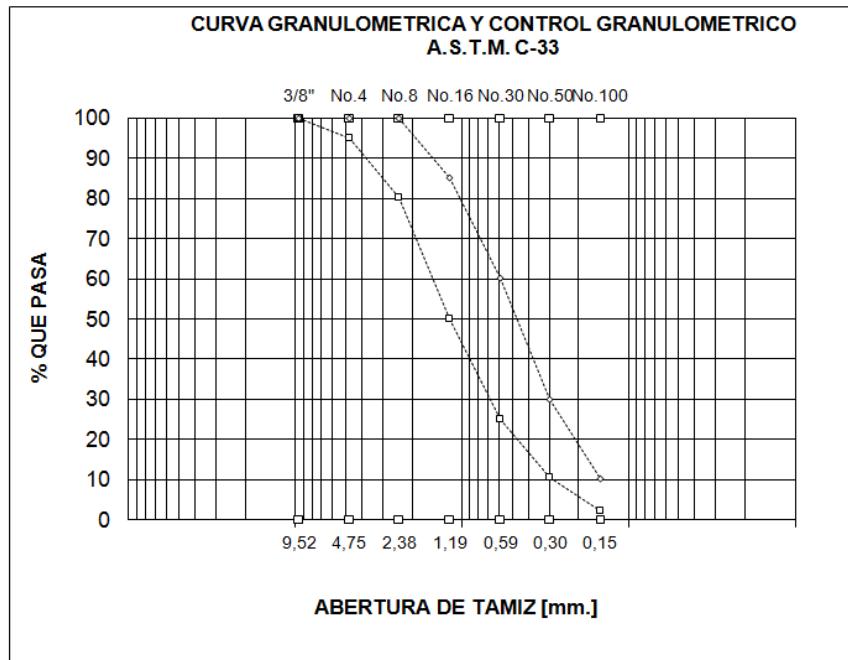
Tabla N° 2.1 Granulometría del agregado fino.

GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO FINO	
Tamiz	Porcentaje que pasa, %
9,5 mm (3/8 plg.)	100
4,75 mm (N° 4)	95 a 100
2,36 mm (N° 8)	80 a 100
1,18 mm (N° 16)	50 a 85
600 µm (N° 30)	25 a 60
300 µm (N° 50)	5 a 30
150 µm (N° 100)	0 a 10

Fuente: Norma Boliviana 598

A continuación, se muestra la representación gráfica de los límites de la gradación de la arena.

Figura 2.1 Curva granulométrica



Fuente: Norma ASTM C 33

2.3.1.4 Agregado grueso o grava

Los agregados gruesos deben cumplir ciertas reglas para darles un uso ingenieril óptimo: deben consistir en partículas limpias, resistentes y al igual que el agregado fino, no deben contener más de un 5% de arcillas.

El agregado grueso está constituido por rocas graníticas, dioríticas y sieníticas. Puede usarse piedra partida en chancadora o grava zarandeada de los lechos de los ríos o vaciamientos naturales.

Al igual que para la arena, la norma La norma ASTM-C-33 también establece una serie de condiciones para su gradación.

Tabla 2.2 Granulometría del agregado grueso

TABLA 2: REQUERIMIENTOS DE TAMIZADO EN AGREGADOS GRUESOS

Número De Tamaño	Tamaño Nominal (Tamices con abertura cuadrada)	Cantidades más finas que Cada Tamiz de Laboratorio (Abertura Cuadrada), Porcentaje Masa												
		100 mm (4 pulg)	90 mm (3½ pulg)	75 mm (3 pulg)	63 mm (2½ pulg)	50 mm (2 pulg)	37.5 mm (1½ pulg)	25 mm (1 pulg)	19 mm (¾ pulg)	12.5 mm (½ pulg)	9.5 mm (¾ pulg)	4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16)
1	90 a 37.5 mm	100	90 a 100	...	25 a 60	...	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...	...
2	63 a 37.5 mm	...	...	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...	...
3	50 a 25 mm	...	...	...	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...
357	50 a 4.75 mm	...	...	...	100	95 a 100	...	35 a 70	...	10 a 30	...	0 a 5	...	...
4	37.5 a 19 mm	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...
467	37.5 a 4.75 mm	...	...	...	...	100	95 a 100	...	35 a 70	...	10 a 30	0 a 5	...	...
5	25 a 12.5 mm	...	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	...	...	...
56	25 a 9.5 mm	...	...	...	...	...	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	...	...
57	25 a 4.75 mm	...	...	...	...	...	100	95 a 100	...	25 a 60	...	0 a 10	0 a 5	...
6	19 a 9.5 mm	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	...	...
67	19 a 4.75 mm	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	...	20 a 55	0 a 10	0 a 5	...
7	12.5 a 4.745 mm	...	...	...	...	...	...	...	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	...
8	9.5 a 2.36 mm	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 a 100	10 a 30	0 a 5	0 a 5

Fuente: Norma ASTM C-33

2.4 Hormigón armado

Se define como hormigón armado, al material resultante de la unión del hormigón simple y las armaduras o barras de acero de refuerzo, combinados de tal forma que constituyan un elemento sólido, monolítico y único desde el punto de vista de sus características físicas, para aprovechar así las cualidades individuales que presentan ambos materiales. Así el hormigón aporta su buena resistencia a la compresión, alto módulo de elasticidad, estabilidad dimensional, por su parte el acero en forma de barras longitudinales embebidas en el hormigón y colocadas en el lugar adecuado, aporta su buena resistencia a la tracción.

El hormigón armado como conjunto de dos materiales es posible gracias a la capacidad adherente que hay entre los mismos, por parte de carácter físico, como consecuencia de la retracción del hormigón que abraza al acero, y por parte de carácter químico, debido a la reacción iónica producida entre el acero - cemento y al

engranaje que aportan las corrugas transversales de las barras longitudinales del acero

2.4.1 Resistencia mínima del hormigón en función del acero

A fin de no usar aceros de resistencia muy alta con hormigones de baja resistencia, la resistencia de proyecto del hormigón f_{ck} , no será menor que la indicada en la tabla siguiente, en función del tipo de acero.

Tabla 2.3 Resistencia del hormigón en función del tipo de acero

Tipo de acero	Solicitación	Valor mínimo de la resistencia de proyecto del hormigón a los 28 días, f_{ck} , en MPa	Tipo de hormigón
AH 215 L	Estática	12,5	H 12,5
AH 400	Estática	15	H 15
	Dinámica	20	H 20
AH 500	Estática	17,5	H 17,5
	Dinámica	20	H 20
AH 600	Estática	20	H 20
	Dinámica	20	H 20

Fuente: Norma Boliviana CBH 87

2.4.2 Barras de acero para hormigón armado

Las armaduras para el hormigón serán de acero y podrán estar constituidas por:

- ✓ Barras lisas
- ✓ Barras corrugadas
- ✓ Mallas electrosoldadas

Los diámetros nominales en milímetros de las barras lisas y corrugadas que se utilizan en el proyecto y construcción de obras de hormigón armado, serán exclusivamente los siguientes, con las áreas en cm^2 que se indican:

Tabla 2.4 Diámetros y áreas de aceros

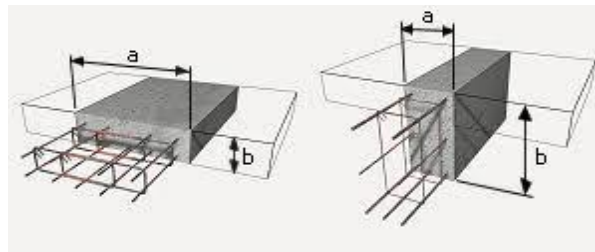
Diámetro, en mm	4	6	8	10	12	16	20
Área, en cm^2	0,126	0,283	0,503	0,785	1,131	2,011	3,142
Diámetro, en mm	25	32	40	50			
Área, en cm^2	4,909	8,042	12,566	19,635			

Fuente: Norma Boliviana CBH 87

2.5 Vigas de hormigón armado

Son elementos estructurales que se ubican en posición horizontal elaborados a base de hormigón armado, que en conjunto con las columnas otorgan mayor rigidez a los muros. Son asentadas encima de apoyos verticales para trasladar la carga hacia los muros o columnas.

Figura 2.2 Vigas de hormigón armado



Fuente: Vaca, 2010

2.5.1 Tipos de vigas

Las vigas se clasifican en base a su función y espesor, siendo las siguientes:

b) Vigas Chatas

Se consideran vigas de amarre porque sirven de articulación entre los muros, otorgando rigidez a las losas y confinando los muros, su altura es igual al espesor de la losa aligerada. Precisan un recubrimiento de 2 cm.

c) Vigas Soleras

De igual manera presentan una altura semejante a la losa aligerada, se colocan entre las columnas y sobre los muros permitiendo la repartición de la carga en los muros portantes, requieren de un recubrimiento de 3 cm. Son muy comunes en las viviendas.

d) Vigas Peraltadas

Su altura es mayor que la losa aligerada, podemos encontrar vigas peraltadas invertidas que sobresalen por encima de la losa aligerada; mientras que las vigas peraltadas colgantes sobresalen por debajo de la misma. Las vigas peraltadas están hechas de hormigón armado y debido a su altura, hacen necesaria la construcción previa del encofrado. En muchos casos, este tipo de vigas no tienen un muro debajo

de ellas. Otro aspecto que las diferencias de las vigas anteriores es el recubrimiento, ya que este deberá de ser de 4 cm.

2.5.2 Comportamiento de elementos estructurales a flexión (Vigas)

Cuando los elementos de una estructura están sometidos a cualquier tipo de carga (Muertas, Vivas, Ambientales y de Sismo), estos tienden a deflectarse y a fisurarse por la acción de dichas cargas. El cálculo estructural se fundamenta en diseñar los diferentes elementos estructurales para que resistan hasta una condición crítica y su desgaste sea a largo plazo.

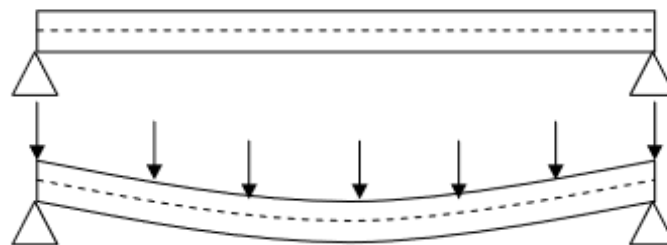
El tema central de nuestro estudio es el comportamiento de vigas armadas y reforzadas con fibras de carbono, por ello consideramos importante definir el comportamiento a flexión.

La flexión se refiere al tipo de deformación que presenta un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal. Un claro ejemplo son las vigas, las cuales están diseñadas para trabajar, principalmente, por flexión.

Lo más destacado de un objeto sometido a flexión es que presenta una superficie de puntos llamado eje neutro tal que la distancia a lo largo de cualquier curva contenida en este no varía con respecto al valor antes de la deformación.

Una de las características más importantes es el comportamiento en las fibras perpendiculares a la carga, ya que sufren esfuerzos a tensión y a compresión de acuerdo a la dirección de la carga, como lo muestra la siguiente figura:

Figura 2.3 Deflexión de vigas de hormigón armado



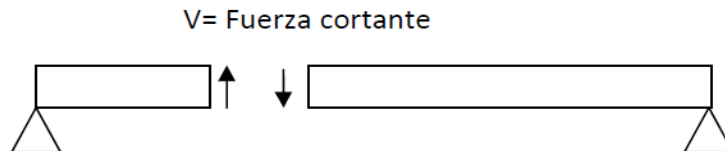
Fuente: Rafael Contreras

En vigas de hormigón armado la flexión se manifiesta con una fisura en la fibra sometida a tensión. Es importante entender que el término falla, es la condición en la cual la viga ya ha perdido sus características de resistencia, se producen grietas, el acero ya ha fallado, y la sección de la viga ha perdido su geometría inicial.

2.5.3 Comportamiento a fuerza cortante

Cuando una viga de hormigón es sometida a cargas, se producen un par de tensiones diagonales paralelas a la sección transversal de la viga como lo muestra la siguiente figura:

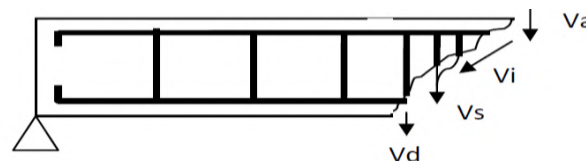
Figura 2.4 Comportamiento de la fuerza cortante en una viga



Fuente: Rafael Contreras

En vigas de hormigón armado a corte, el comportamiento se fundamenta en controlar 3 cortantes producidas por la misma propiedad del material (Resistencia a corte del hormigón) y del elemento, así como aprovechar la resistencia por el refuerzo transversal (estribos), como lo muestra la siguiente figura:

Figura 2.5 Comportamiento de corte en una viga de hormigón armado



Fuente: Rafael Contreras

V_d = Contribución del acero longitudinal

V_i = Contribución por la fricción a lo largo de la grieta

V_a = Contribución por el bloque de compresiones

V_s = Aporte del refuerzo por corte

2.5.4 Diseño de vigas de hormigón armado (Norma CBH – 87)

2.5.4.1 Cálculo a flexión simple

Se debe mayorar el momento por las hipótesis de carga

Se deberá calcular una dimensión mínima con la siguiente ecuación:

$$d_{min} = 177 * \sqrt{\frac{M_d}{b_w * f_{cd}}}$$

Se determina el momento reducido de cálculo con la siguiente ecuación:

$$\mu_d = \frac{M_d}{b_w * d^2 * f_{cd}}$$

Dónde:

M_d =Momento de diseño.

μ_d =Momento reducido de cálculo.

b_w =Ancho de la viga

d =Distancia del borde más comprimido hasta el centro de gravedad de la armadura más traccionada (canto útil).

f_{cd} =Resistencia de cálculo del hormigón

Se obtendrá el valor de w de la tabla 16.1 Jiménez Montoya donde si $\mu_{lim} > \mu_d$ no necesita armadura de compresión.

Tabla 2.5 Valor de w

ξ	μ	ω	
0,0816	0,03	0,0308	
0,0953	0,04	0,0414	
0,1078	0,05	0,052	D
0,1194	0,06	0,0627	O
0,1306	0,07	0,0735	M
0,1413	0,08	0,0844	I
0,1518	0,09	0,0953	N
0,1623	0,1	0,1064	I
0,1729	0,11	0,1177	O
0,1836	0,12	0,1291	
0,1944	0,13	0,1407	
0,2054	0,14	0,1524	2
0,2165	0,15	0,1643	
0,2277	0,16	0,1762	
0,2391	0,17	0,1884	
0,2507	0,18	0,2008	
0,2592	0,1872	0,2098	
0,2636	0,19	0,2134	
0,2796	0,2	0,2263	
0,2958	0,21	0,2395	
0,3123	0,22	0,2529	
0,3292	0,23	0,2665	D
0,3464	0,24	0,2804	O
0,3639	0,25	0,2946	M
0,3818	0,26	0,3091	I
0,4001	0,27	0,3239	N
0,4189	0,28	0,3391	I
0,4381	0,29	0,3546	O
0,45	0,2961	0,3643	
0,4577	0,3	0,3706	3
0,478	0,31	0,3869	
0,4988	0,32	0,4038	
0,5202	0,33	0,4211	
0,5423	0,34	0,439	
0,5652	0,35	0,4576	
0,589	0,36	0,4768	
0,6137	0,37	0,4968	
0,6168	0,3712	0,4993	

Fuente: Jiménez Montoya “Hormigón Armado”

Se realiza el cálculo de la cuantía mecánica con la siguiente ecuación:

$$U = w * b_w * d * f_{cd}$$

Se obtendrá el número de barras a utilizar la cuantía mecánica calculada en la tabla 8.13 y 8.14 del libro del Jiménez Montoya 15ava edición.

Tabla 2.6 Capacidad Mecánica

CAPACIDAD MECÁNICA EN kN

$$U = A \cdot f_{yd} \quad U' = A' \cdot f_{yd}$$

$$f_{yk} \text{ (N/mm}^2\text{)} = 400 \quad \gamma_s = 1,15$$

$$f_{yd} \text{ (N/mm}^2\text{)} = 347,82$$

Diámetro (mm)	Número de barras									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	9,8	19,7	29,5	39,3	49,2	59,0	68,8	78,7	88,5	98,3
8	17,5	35,0	52,5	69,9	87,4	104,9	122,4	139,9	157,4	174,8
10	27,3	54,6	82,0	109,3	136,6	163,9	191,2	218,5	245,9	273,2
12	39,3	78,7	118,0	157,4	196,7	236,0	275,4	314,7	354,0	393,4
14	53,5	107,1	160,6	214,2	267,7	321,3	374,8	428,3	481,9	535,4
16	69,9	139,9	209,8	279,7	349,7	419,6	489,5	559,5	629,4	699,3
20	109,3	218,5	327,8	437,1	546,4	655,6	764,9	874,2	983,5	1.092,7
25	170,7	341,5	512,2	683,0	853,7	1.024,4	1.195,2	1.365,9	1.536,6	1.707,4
32	279,7	559,5	839,2	1.119,0	1.398,7	1.678,4	1.958,2	2.237,9	2.517,6	2.797,4
40	437,1	874,2	1.311,3	1.748,4	2.185,5	2.622,5	3.059,6	3.496,7	3.933,8	4.370,9

Fuente: Jiménez Montoya “Hormigón Armado” 15ava edición

Tabla 2.7 Cuantía geométrica mínimas referidas a la sección del hormigón

CUANTÍAS GEOMÉTRICAS MÍNIMAS
EN TANTO POR MIL, REFERIDAS A LA SECCIÓN
TOTAL DE HORMIGÓN

Tipo de elemento estructural		Clase de acero	
		$f_{yk} = 400 \text{ N/mm}^2$	$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$
Pilares		0,004	0,004
Losas ⁽¹⁾		0,002	0,0018
Vigas ⁽²⁾		0,0033	0,0028
Muros ⁽³⁾	Armadura horizontal	0,004	0,0032
	Armadura vertical	0,0012	0,0009

Fuente: Jiménez Montoya “Hormigón Armado” 15ava edición

Tabla 2.8 Área de acero según diámetro

SECCIONES EN cm² Y MASAS EN kg/m

CUALQUIER TIPO DE ACERO

Diámetro (mm)	Masa (kg/m)	Número de barras								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	0,22	0,28	0,56	0,85	1,13	1,41	1,70	1,98	2,26	2,54
8	0,40	0,50	1,00	1,51	2,01	2,51	3,01	3,52	4,02	4,52
10	0,62	0,79	1,57	2,36	3,14	3,93	4,71	5,50	6,28	7,07
12	0,89	1,13	2,26	3,39	4,52	5,65	6,79	7,91	9,05	10,18
14	1,21	1,54	3,08	4,62	6,16	7,70	9,24	10,77	12,32	13,86
16	1,58	2,01	4,02	6,03	8,04	10,05	12,06	14,07	16,08	18,09
20	2,47	3,14	6,28	9,42	12,57	15,71	18,84	21,99	25,14	28,28
25	3,85	4,91	9,82	14,73	19,63	24,54	29,45	34,36	39,27	44,18
32	6,31	8,04	16,08	24,13	32,17	40,21	48,26	56,30	64,34	72,38
40	9,87	12,56	25,13	37,70	50,26	62,83	75,40	87,96	100,50	113,10

Fuente: Jiménez Montoya “Hormigón Armado” 15ava edición

2.5.4.2 Esfuerzo cortante

El esfuerzo cortante (o de cizallamiento), a diferencia del axial, es producido por fuerzas que actúan paralelamente al plano que las resiste, mientras que los de tensión o compresión lo son por fuerzas normales al plano sobre el que actúan. Por esta razón, los esfuerzos de tensión y de compresión se llaman también esfuerzos normales, mientras que el esfuerzo cortante puede denominarse esfuerzo tangencial.

Cálculo del Esfuerzo Cortante actuante

Por tratarse de una viga simplemente apoyada con carga puntual y peso propio se tiene la ecuación de la cortante:

$$V_A = \frac{P}{2} + \frac{q * l}{2}$$

Cálculo de Esfuerzo cortante absorbido por el hormigón

$$V_{CU} = F_{vd} * bw * d$$

$$F_{vd} = 0,5 * \sqrt{F_{cd}}$$

Cálculo de la armadura mínima

$$A_{s_{min}} = \frac{0,02 * f_{cd} * bw * s}{f_{yd}}$$

Esfuerzo cortante máximo de agotamiento por compresión del alma

$$V_{su} = V_d - V_{cu}$$

$$V_{ou} = 0,3 * f_{cd} * bw * d$$

$$V_{cu} < V_d < V_{ou}$$

Cálculo de la armadura transversal

$$A_s = \frac{V_{su} * s}{0,9 * d * f_{yd}}$$

2.5.4.3 Tensión-deformación

Según la naturaleza de los constituyentes y la velocidad de deformación, la abscisa correspondiente a la máxima ordenada está comprendida entre 2 por mil y 2,5 por mil, el acortamiento último ϵ_{cu} , oscila alrededor de 3,5 por mil y la tensión última σ_{cu} , está comprendida entre 0,75 f_c y 0,85 f_c .

2.5.4.4 Acciones permanentes

El cálculo de los valores característicos de las acciones permanentes se efectuará a partir de las dimensiones y masas específicas que correspondan.

Para los elementos de hormigón se adoptarán las siguientes masas específicas:

Hormigón sin armadura..... 23 kN/m³

Hormigón armado con cuantías normales 25 kN/m³

2.6 Reforzamiento estructural

El reforzamiento de una estructura existente consiste en incrementar la capacidad de desempeño estructural. El reforzamiento de una estructura surge como una necesidad para hacer frente a una carencia resistente debido a cambio en el tipo de uso

ocupacional, nuevas solicitudes como errores en el diseño o defectuosa mano de obra durante el proceso constructivo, etc.

Los métodos de reforzamiento pueden causar cambios en la rigidez, ductilidad, y amortiguamiento de los edificios. Es por ello que estas propiedades deben ser tomadas en consideración cuando se modifica la capacidad de carga de la estructura.

2.6.1 Causas para efectuar reforzamiento en estructuras de hormigón armado

- a) Incrementos de carga
 - ✓ Aumento de la carga viva (bodegas, depósitos, supermercados, etc.)
 - ✓ Incremento de cargas por aumento de tráfico vehicular y/o peatonal (puentes)
 - ✓ Instalación de maquinarias pesadas en edificaciones industriales
 - ✓ Cambio de uso de la estructura
 - ✓ Estructuras con vibración
- b) Daño de elementos estructurales
 - ✓ Envejecimiento de materiales de construcción/daño causado por el fuego
 - ✓ Corrosión del acero de refuerzo
 - ✓ Impacto de vehículos
 - ✓ Daños estructurales por sismos
- c) Modificación del sistema estructural
 - ✓ Eliminación de columnas y muros
 - ✓ Aberturas en lozas (nuevas escaleras, ductos, etc.)
- d) Errores de diseño o construcción
 - ✓ Dimensiones de diseño insuficientes
 - ✓ Sección de acero de refuerzo insuficiente
- e) Mejoramiento de la capacidad de servicio
 - ✓ Limitación de las deformaciones
 - ✓ Reducción del esfuerzo en el acero de refuerzo
 - ✓ Reducción del ancho de las fisuras
 - ✓ Actualización a nuevos reglamentos

2.6.2 Tipos de reforzamiento estructural en vigas

Según la evaluación estructural de un edificio, regularmente evidencian deficiencias en flexión y compresión, en los diferentes elementos estructurales considerando el motivo de la evaluación, las cuales a los elementos estructurales que presentan deficiencias, se han aplicado métodos de reforzamiento convencionales y no convencionales.

Enfocado hacia los elementos estructurales en vigas, se han aplicado métodos de reforzamiento como:

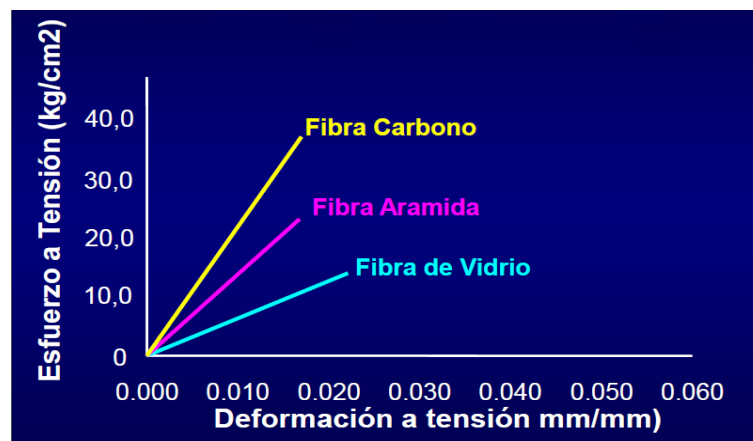
- ✓ Reforzamiento con encamisado de hormigón
- ✓ Reforzamiento con encamisado y zunchado metálico
- ✓ Reforzamiento con adición de perfiles metálicos
- ✓ Reforzamiento con fibras de carbono, aramida y vidrio.

2.6.3 Reforzamiento con fibra de carbono, fibra de aramida y fibra de vidrio

En la Norma ACI 440 2R hace referencia a tres fibras de refuerzo como sistema FRP, Fibra de Carbono, fibra de aramida y fibra de vidrio.

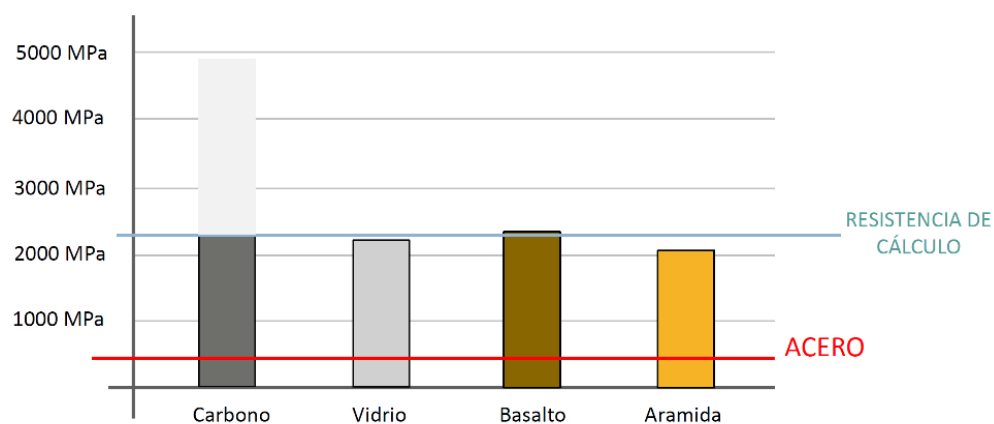
En la siguiente figura se observa el comportamiento Esfuerzo – Deformación de las fibras más usadas y se observa que la fibra de carbono sobresale entre las fibras de aramida y fibras de vidrio.

Figura 2.6 Esfuerzo vs Deformación de los tres tipos de refuerzos



Fuente: Convención Internacional “Experiencia Peruana en el Diseño y Aplicación de Reforzamiento Estructural con Fibra de Carbono” ACI - Perú 2010

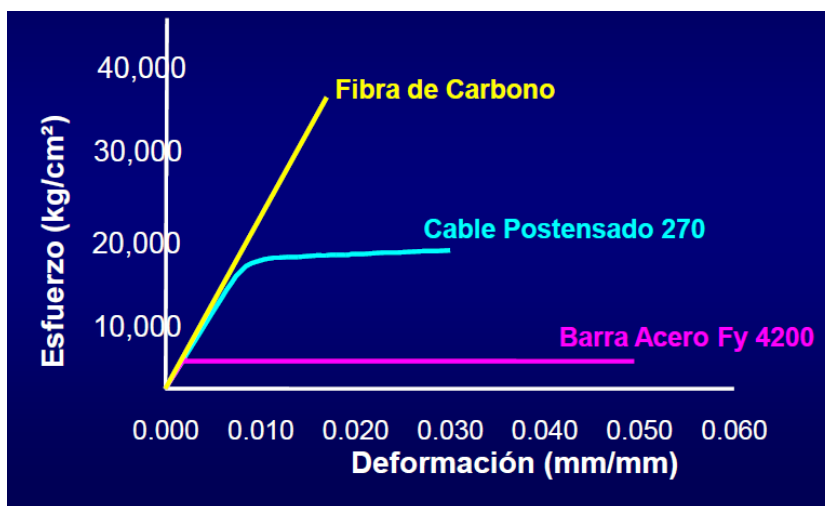
Figura 2.7 Resistencia del FRP - Comparativa entre distintas fibras



Fuente: Refuerzo de estructuras de concreto mediante FRP (SikaWrap y Sika Carbodur, Ing. Nestor Alegria, Sika – Perú. 2016

Haciendo una comparación de fibra de carbono con cable postensado 270 y acero 420, la fibra de carbono puede resistir mayor esfuerzo con menor deformación, como refuerzo en elementos estructurales

Figura 2.8 Comportamiento de la fibra de carbono



Fuente: Convención Internacional “Experiencia Peruana en el Diseño y Aplicación de Reforzamiento Estructural con Fibra de Carbono” ACI - Perú 2010

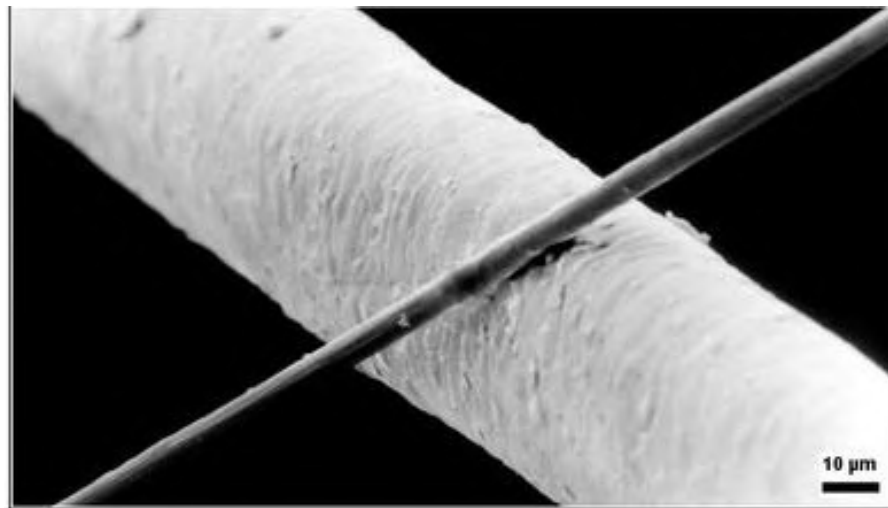
2.7 Polímero Reforzado con Fibra de Carbono - CFRP

La fibra de carbono se incluye en el grupo de los materiales compuestos, es decir, aquellos que están hechos a partir de la unión de dos o más componentes, que dan lugar a uno nuevo con propiedades y cualidades superiores, que no son alcanzables por cada uno de los componentes de manera independiente.

El tejido de fibras de carbono procede de una mezcla de polímeros, el más utilizado es el PAN (poliacrilonitrilo) que por ser la materia prima se llama precursor y que normalmente se combina con otros polímeros: metil acrilato, metil metacrilato, vinilacetato y cloruro de vinilo, todos derivados del petróleo, que es carbono concentrado, proveniente de restos de materia orgánica (fósiles).

Mediante el proceso de recalentamiento bajo la temperatura de hasta 1500 y 2000 °C da lugar a la formación de unas cintas perfectamente alineadas de casi carbono puro en su forma de grafito, los átomos de carbono se quedan en perfecta alineación, esta alineación es la que produce la elevada resistencia de la fibra de carbono.

Figura 2.9 Filamento de carbono de 6 μm (micrómetros) de diámetro (más chico), comparado con un cabello humano (más grande)



Fuente: SIKA Manual “Técnicas de Refuerzo y Reparación con Materiales Compuestos

2.7.1 Composición y estructura de la fibra de carbono

La Fibra de Carbono está compuesta por muchos hilos de carbono en formas de hebra largas y delgadas de 0.0002-0.0004 pulgadas (0.005-0.010 mm) de diámetro y compuesto principalmente de átomos de carbono. Los átomos de carbón se enlazan en cristales microscópicos que están más o menos alineados paralelamente al eje largo de la fibra.

La alineación del cristal hace a la fibra increíblemente fuerte para su tamaño. Varios miles de fibras de carbón son retorcidas juntas para formar un hilo, que puede ser usado por sí solo o como tejido de una tela. El hilo o tejido es combinado con un epóxico y se adhiere o moldea para dar forma a varios tipos de materiales compuestos.

Las fibras de carbón son diez veces más fuertes que el acero y ocho veces más que el aluminio, sin mencionar que la fibra de carbón es mucho más ligera que ambas, 5 y 1.5 veces respectivamente. Adicionalmente, sus propiedades de fatiga son superiores a todas las estructuras metálicas y son uno de los materiales más resistentes a la corrosión disponibles, cuando se combinan con las resinas adecuadas.

2.7.2 Propiedades del material

Las fibras son los elementos con capacidad de carga y la matriz epóxica sirve para unir entre sí las fibras, permite la transferencia de carga entre las fibras y las protege del medio ambiente, de allí la importancia que tiene el material, además de ser necesaria la verificación de sus correspondientes propiedades Físicas, Químicas y Mecánicas.

2.7.2.1 Propiedades físicas

Las primordiales características físicas de este tipo de material, es un material de bajo peso y poco espesor, tomando en cuenta de que a pesar de estas condiciones es un material muy resistente, por ende, lo hace idóneo para su uso en las estructuras.

Alta resistencia y rigidez, medida por la tensión y el módulo elástico respectivamente. A diferencia de los materiales isótropos como el acero y el aluminio, la Fibra de

Carbono tiene propiedades de resistencia direccionales. Las propiedades de este material dependen de los diseños de la fibra de carbono y la proporción de las fibras de carbono en relación con el polímero.

Para el uso comercial se debe aclarar que este tipo de material viene en rollos de 50cm de ancho x 50m, 100m o 200m de longitud.

2.7.2.2 Propiedades químicas

La Fibra de Carbono al ser un material con excelentes características físicas, se lo ha complementado en sus características químicas con una alta resistencia a la corrosión, fuego, inercia química y conductividad eléctrica, de allí que el tipo de material que al ser proveniente del carbono correlaciona de manera óptima sus características físicas y químicas.

Se debe tomar también en cuenta que este tipo de material ante exposiciones ambientales de temperaturas es muy resistente y conserva su forma y características iniciales, siempre y cuando se coloque correctamente su revestimiento con la respectiva matriz epóxica. Por ello se puede decir que este material tiene una gran capacidad de aislamiento térmico. Complementariamente este tipo de fibra tiene la capacidad de soportar exposiciones químicas moderadas tales como: Inmersión en agua salina y la Inmersión en álcalis hasta un pH 9.5 – 23°C.

A continuación, se muestran las normas especificadas para las exposiciones químicas.

Figura 2.10 Propiedades Químicas del material (Fibra de Carbono)

Nombre del Ensayo	Norma que lo Regula	Detalle
Inmersión en agua salina	ASTM D 1141 – 03	Práctica para la preparación de un sustituto de agua de mar
Inmersión en álcalis hasta un pH 9.5 - 23 °C	ASTM C 581 – 03	Práctica para determinar la resistencia química de las resinas usadas en fibra de vidrio, para refuerzo de estructuras.

Fuente: Sika.com

2.7.2.3 Propiedades mecánicas

En cuanto a referencia sobre la resistencia mecánica de la Fibra de Carbono, se puede decir que este material tiene una muy elevada resistencia mecánica con un módulo de elasticidad elevado, respectivamente este material tiene una baja densidad con relación a materiales como el acero, lo que lo hace idóneo para su fácil manejo y uso en obra.

Como ya lo habíamos mencionado anteriormente, la resistencia de este tipo de material radica en la dirección longitudinal de la fibra la cual aporta de gran manera con respecto a resistencia haciendo excepcional su comportamiento hacia la fatiga incluso mejor que el acero y con la ventaja de tener un menor peso que este al poseer una densidad baja.

Las características primordiales que hacen resaltar las propiedades mecánicas del material son su resistencia a la tensión, módulo elástico y su deformación máxima, estas son las características que la hacen excepcional en el campo de la estructura.

En el siguiente cuadro se puede observar las propiedades que presenta la fibra de carbono respecto a las propiedades del acero.

Tabla 2.10 Comparación entre las propiedades del acero y FRP

Propiedades	Material	Valores
Módulo de Elasticidad (MPa)	CFRP	165000 - 240000
	Acero	200000 - 210000
Esfuerzo a la Rotura (MPa)	CFRP	2800 - 4200
	Acero	440 - 550
Deformación Unitaria de Falla (mm/mm)	CFRP	0.015 - 0.017
	Acero	0.14 - 0-12

Fuente: Sika.com

2.7.3 Formas en que se encuentra el Polímero Reforzado con Fibra de Carbono

2.7.3.1 Platinas formadas con CFRP

Son láminas de polímeros reforzadas con fibras de carbono, diseñadas para refuerzo de estructuras de hormigón, madera, albañilería y acero.

Las placas se adhieren sobre la estructura, como refuerzo externo, usando adhesivo epóxico.

Figura 2.11 Pletina de fibra de carbono



Fuente: SIKA Manual “Técnicas de Refuerzo y Reparación con Materiales Compuestos

Las pletinas formadas por CFRP son usados para mejorar, incrementar o rehabilitar el comportamiento y resistencia de estructuras por:

- a) Incremento de la capacidad de carga:
 - ✓ Aumento de capacidad de losas, vigas y secciones de puentes.
 - ✓ Aumento de capacidad de puentes, según carga por eje.
 - ✓ Instalación de maquinaria pesada.
 - ✓ Cambio de uso del edificio.
- b) Daño de elementos estructurales debido a
 - ✓ Deterioro de los materiales de construcción originales.
 - ✓ Corrosión del acero de refuerzo.
 - ✓ Eventualidades (impacto de vehículos, sismos, etc.).
- c) Mejoramiento del servicio y durabilidad
 - ✓ Reducción de la deflexión y del ancho de fisuras.

- ✓ Reducción del esfuerzo en el acero de refuerzo.
- ✓ Mejoramiento de la resistencia a fatiga.

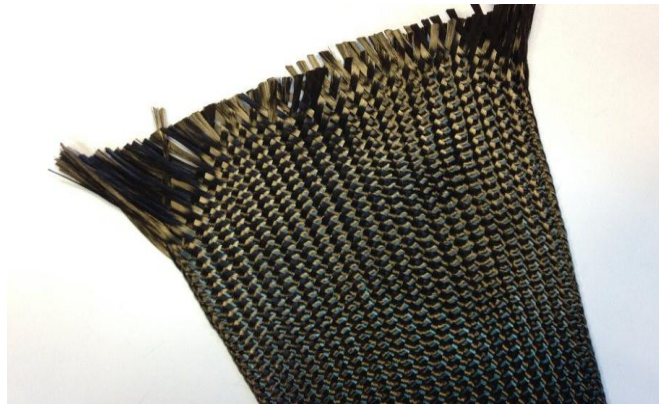
d) Cambio en el sistema estructural

- ✓ Remoción de muros o columnas.
- ✓ Remoción de secciones de losas y muros para pasadas.
- ✓ Mejoramiento de resistencia a sismos, impacto, explosión, etc.
- ✓ Insuficiente / inadecuado acero de refuerzo.
- ✓ Insuficiente / inadecuado espesor de la estructura.

2.7.3.2 Tejidos de fibra de carbono

Los tejidos de fibra de carbono, diseñados para refuerzo estructural, son unidireccionales, con resistencia de rango medio, diseñados para su instalación usando el proceso de aplicación en húmedo.

Figura 2.12 Tejido de fibras de carbono



Fuente: Manual Sika S.A.

El uso más habitual es en estructuras o elementos de hormigón armado, albañilería y madera, para incrementar la capacidad de corte para:

- ✓ Mejorar el comportamiento sísmico de muros de albañilería.
- ✓ Sustituir armadura existente.
- ✓ Incrementar la resistencia y ductilidad de columnas.
- ✓ Incrementar capacidad de carga de elementos estructurales.
- ✓ Permitir cambios en uso/alteraciones y rehabilitaciones.

- ✓ Corregir el diseño de estructuras y/o defectos de construcción.
- ✓ Aumentar la resistencia sísmica.
- ✓ Incrementar la vida de servicio y durabilidad.
- ✓ Mejorar la condición estructural para cumplir las normas vigentes.

Es flexible y acomodable en diferentes planos de superficie y geometría (vigas, columnas, chimeneas, pilas, muros, silos, etc.); posee una baja densidad con mínimo peso adicional y bajo costo efectivo comparado con técnicas tradicionales de refuerzo.

2.7.3.3 Barras de fibra de carbono

La barra de fibra de carbono es un polímero no metálico entre tres y cinco veces más ligero que el acero y unas seis veces más resistente a la fatiga que éste. Su durabilidad y alta resistencia lo ubican como una de las mejores opciones para la integridad de la estructura.

Se instala en ranuras y cortes en las superficies del hormigón o mortero y se embute en la ranura utilizando los morteros epóxicos; también puede ser usada en construcción nueva, principalmente en fundaciones o puentes, en donde los tratamientos para proteger las barras de acero de los agentes corrosivos, requiere de altos costos de inversión y mantenimiento posterior.

Beneficios:

- ✓ Alta resistencia y rigidez.
- ✓ Ligera, 1/5 del peso del acero.
- ✓ Gran durabilidad, no se corroe.
- ✓ Instalación en corto tiempo.
- ✓ Se puede anclar en huecos perforados en cimentaciones, losas, etc.
- ✓ Al instalarla en juntas de elementos de mortero en albañilería se oculta fácilmente.

Usos:

- ✓ Aumentar la capacidad de carga de estructuras de hormigón y mampostería.
- ✓ Aumento de la capacidad a flexión de vigas y losas de hormigón.
- ✓ Aumento de la resistencia a flexión y corte de muros de hormigón y mampostería.
- ✓ Restaurar la capacidad estructural de estructuras deterioradas.
- ✓ Reemplazo de barras de acero corroídas.
- ✓ Corregir errores de diseño/construcción.
- ✓ Sustituir barras de refuerzo faltantes.

Figura 2.13. Barras lisas de fibras de carbono



Fuente: Manual Sika S.A.

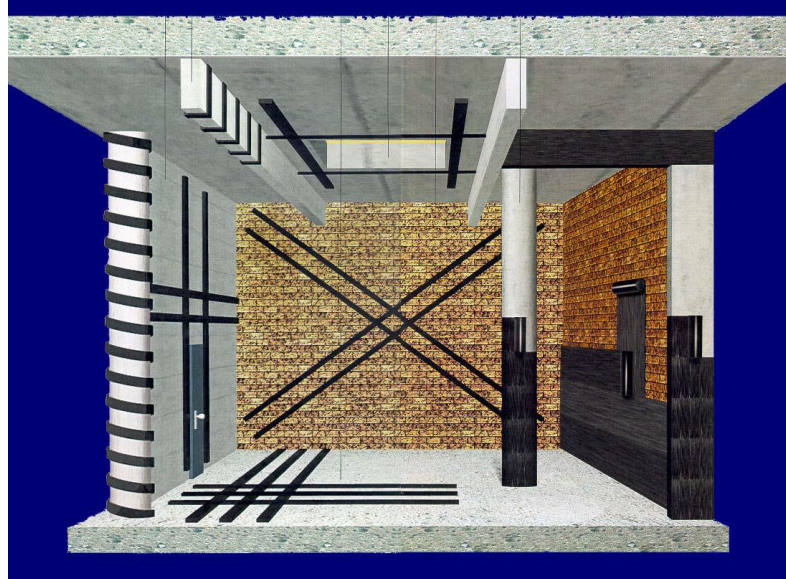
Figura 2.14 Barras con resaltes de fibras de carbono



Fuente: Manual Sika S.A.

2.7.4 Campo de aplicación de los CFRP

Figura 2.15 Fibra de carbono utilizada en elementos estructurales



Fuente: “Refuerzo de Estructuras con Sistemas FRP - XXII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural” 2017

Los sistemas de refuerzo de fibra de carbono permiten entre otras cosas:

➤ **Refuerzo a flexión**

Para el refuerzo a flexión de vigas y otros elementos de hormigón armado se utiliza comúnmente el método de pegado de pletinas y barras de fibras de carbono embebidas en el hormigón. El refuerzo actuará como armadura de tracción. El adhesivo servirá para transmitir el esfuerzo cortante entre el refuerzo y el hormigón.

➤ **Refuerzo de confinamiento**

Para elementos sometidos a compresión simple o compuesta se puede hacer un refuerzo de confinamiento. Este tipo de refuerzo se hace principalmente en elementos sometidos a carga axial o para zonas en las que se espera incursión no lineal. El sistema utilizado es el de tejidos, debido a su fácil adaptabilidad a cualquier forma del soporte.

Con los tejidos se envuelve la pieza a reforzar completamente, de abajo a arriba. Se pueden poner tantas capas de tejido como se desee. Esta envoltura provoca un confinamiento pasivo de la pieza que mejora su comportamiento frente a las solicitaciones.

➤ **Refuerzo a cortante**

Para el refuerzo de piezas a cortante, lo que se hace es colocar las fibras de carbono a modo de estribos externos, adheridos con resina epóxica.

➤ **Refuerzo de muros**

Otro tipo de refuerzo, quizás menos usual, es el de muros, tanto de albañilería como de hormigón. Estos muros están sometidos a cargas laterales (sismo) y verticales (cargas gravitacionales).

2.7.5 Ejemplos de Aplicación de CFRP

2.7.5.1 Aplicaciones en vigas

Al aplicarse en vigas, el sistema FRP incrementa la capacidad de resistencia a la flexión. Al aplicar este sistema en la cara inferior de la viga, en su longitud, incrementa su resistencia a la flexión, controlando mejor la deflexión.

Figura 2.16 Refuerzo estructural por flexión con pletinas de CFRP en vigas



Fuente: “Refuerzo de Estructuras con Sistemas FRP - XXII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural” 2017

2.7.5.2 Aplicaciones en muros de hormigón o albañilería

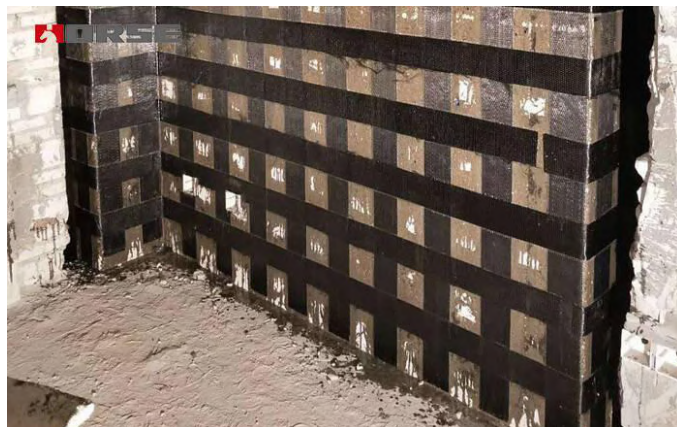
El uso de este sistema en muros de hormigón o de albañilería ayuda a incrementar la resistencia nominal de estos elementos, frente a las cargas de compresión o laterales (flexión) que se puedan presentar. Se puede usar en placas, muros de sostenimiento, paredes cilíndricas de los reservorios, cajas de ascensor, estructuras industriales sujetas a posibles presiones de explosiones, entre otras.

Figura 2.17 Refuerzo estructural de corte con tejidos de CFRP en muros



Fuente: “Refuerzo de Estructuras con Sistemas FRP - XXII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural” 2017

Figura 2.18 Refuerzo estructural de corte con tejidos de CFRP en muros



Fuente: “Refuerzo de Estructuras con Sistemas FRP - XXII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural” 2017

2.7.5.3 Aplicaciones en columnas

Una de sus aplicaciones más usuales consiste en incrementar la resistencia a la flexión y dotar de mayor confinamiento. Este es un sistema de bajo costo en comparación a aumentar la sección de la columna, con la consiguiente pérdida de la apariencia arquitectónica original. Una vez reforzada y recubierta la columna, el cambio en la apariencia es nulo, pero muy significativo en resistencia.

Figura 2.19 Refuerzo estructural de corte con tejidos de CFRP en vigas y de confinamiento en las columnas



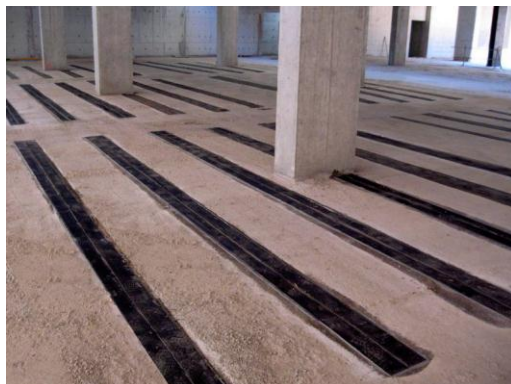
Fuente: Manual Sika S.A

2.7.5.4 Aplicaciones en losas

Al aplicar este sistema de reforzamiento en losas aligeradas o macizas armadas en una o dos direcciones, las cargas de servicio pueden ser sustancialmente incrementadas, manteniendo un control de su deflexión. Otras estructuras que pueden ser reforzadas son tableros de puentes, losas de piso de hormigón, losas de estacionamiento, losas industriales, etc.

Las aplicaciones de este sistema son tantas como las necesidades de reforzamiento de una estructura, pero es necesario realizar un análisis completo de la estructura a reforzar y hacer los cálculos adecuados. Esto, lo debe efectuar un experto o persona calificada en el tema.

Figura 2.20 Refuerzo estructural por flexión con pletinas de CFRP en losas



Fuente: Manual Sika S.A

Figura 2.21 Refuerzo estructural por flexión con pletinas de CFRP en losas



Fuente: Convención Internacional ACI, Perú. 2010

Figura 2.22 Refuerzo estructural por flexión con pletinas de CFRP en losas



Fuente: XXII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural”2017

2.8 Sistemas CFRP Polímeros Reforzados con fibras de Carbono en Bolivia - Platinas de fibra de carbono Sika Carbodur S512

En el mundo hay diversos fabricantes de compuestos CFRP y de diversas aplicaciones. Ciertos fabricantes se dedican a producir CFRP para el reforzamiento. Estos fabricantes han reportado las principales propiedades “nominales” de sus productos para el diseño de reforzamiento externo con CFRP, ajustándose a los métodos de ensayo establecidos por el Comité ACI 440.3R (ACI, 2004).

En nuestro país se comercializan y se utilizan principalmente la marca de fábrica SIKA, cuyos productos han sido utilizados en importantes proyectos de reforzamiento estructural.

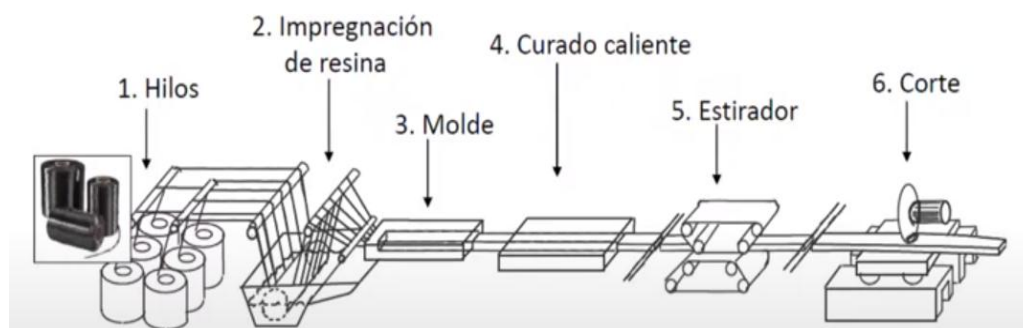
2.8.1 Platinas de fibra de carbono

En el presente proyecto de investigación se trabajará con el producto que tenemos en nuestro medio, Platinas de Fibra de Carbono Sika CarboDur S512.

El Sistema de materiales compuestos, laminados Sika CarboDur, es un Sistema de Refuerzo de alta tecnología que comprende laminados de FRP y Resina epoxi como adhesivo estructural. Son aplicados directamente en la obra.

2.8.1.1 Fabricación de las láminas de fibra de carbono SIKA CARBODUR

Figura 2.23 Sistema de fabricación Lamina Sika CarboDur



Fuente: SIKA Webinar “Introducción al refuerzo estructural con fibras de carbono”

Muy amplio es el estudio del reforzamiento con fibras de carbono, por ello, este proyecto investigativo se concentra en el aporte de la fibra de carbono como reforzamiento a flexión.

Figura 2.24 Reforzamiento de vigas con láminas (platina) CFRP para contrarrestar esfuerzos a flexión.



Fuente: *Sika Colombia S.A. 2017*

2.8.1.2 Platinas de fibra de carbono aplicadas en vigas

La fibra debe colocarse en la parte inferior del elemento, en sentido longitudinal y en la zona donde esté presente los mayores esfuerzos producidos por flexión.

- Aumenta la resistencia a Flexión y corte
- Mejora el Confinamiento

Figura 2.25 Platinas encoladas en vigas



Fuente: *Sika Colombia S.A. 2017*

2.8.1.3 Características y propiedades de las platinas o láminas de fibra de carbono

2.8.1.3.1 Características de los materiales:

- ✓ Muy alta resistencia a la tracción.
- ✓ Peso ligero
- ✓ No corrosivo
- ✓ Fácil de instalar

Tabla 2.11 Propiedades de la platina de fibra de carbono SIKA CARBODUR S512

Contenido de Fibra en Volumen > 68 %

RESISTENCIA A TRACCIÓN DEL LAMINADO	
Valor medio	3100 N/mm ²
Valor Fractil 5%	2900 N/mm ²
Valores en la dirección longitudinal de las fibras	

MODULO DE ELASTICIDAD A TRACCIÓN DEL LAMINADO	
Valor medio	170000 N/mm ²
Valor Fractil 5%	165000 N/mm ²
Valores en la dirección longitudinal de las fibras	

ALARGAMIENTO A ROTURA DEL LAMINADO	
Valor medio	1,80%

Fuente: Manual SIKA “Técnicas de refuerzo y reparación con materiales compuestos”

2.8.1.4 Ventajas del uso de platinas de fibra de carbono

- ✓ Peso propio muy bajo.
- ✓ Se puede aplicar en cualquier longitud, no se requieren juntas.
- ✓ Espesor muy bajo, por tanto, no aumenta el volumen
- ✓ Fácil de transportar (en rollos).
- ✓ No se requiere una preparación complicada de la lámina Sika Carbodur.
- ✓ Las intersecciones de la lámina son sencillas.
- ✓ Bajo costo de aplicación, no se requiere equipo pesado de manejo e instalación.
- ✓ No ocupa espacio para almacenar
- ✓ Resistencia a la tracción muy alta.
- ✓ Puede ser pintada o cubierta sin preparación.
- ✓ Resistente al ser sometido a cargas cíclicas, en comparación a los metales que pierden su resistencia debido a la fatiga
- ✓ Resistente a ataques agresivos y a la corrosión
- ✓ El sistema Sika CarboDur puede ser colocado después de la preparación de la superficie de hormigón o madera, sin ningún tipo de instalación adicional. Por lo tanto, este sistema de refuerzo adherido es mucho más económico que los sistemas de reforzamiento tradicionales.

2.8.1.5 Desventajas del uso de platinas de fibra de carbono

- ✓ El costo beneficio siempre es trascendental a la hora de elegir una alternativa, cuando se opta por usar el sistema FRP, los materiales pueden llegar a ser muy costosos
- ✓ No se puede aplicar en elementos que presenten grietas, asentamientos y otros
- ✓ Las platinas de fibra de carbono no deben ser doblados, esto no permite su correcto funcionamiento, para eso se debe usar tejidos de fibra
- ✓ Los FRP son susceptibles al fuego, a temperaturas mayores a 80°C el material empieza a desprenderse del hormigón

2.8.1.6 Sostenibilidad del uso de platinas de fibra de carbono

- ✓ El impacto ambiental de los sistemas de resinas (Sika Carbodur) y adhesivos (Sikadur 30) está menos estudiado, pero se tiene conocimiento que el volumen usado también es pequeño en comparación con los materiales de construcción convencionales
- ✓ En la distribución y el transporte, el menor peso de los compuestos FRP conduce a un menor impacto del transporte y a un manejo más sencillo del material.
- ✓ Los compuestos FRP se caracterizan por tener un menor mantenimiento que los materiales convencionales
- ✓ Las opciones de fin de vida para los compuestos de FRP son más complejas, aunque menos del 1 % de los compuestos de FRP se reciclan actualmente, los compuestos se pueden reciclar de muchas maneras como por ejemplo la molienda mecánica, la incineración.

2.8.1.7 Usos del refuerzo con platinas de fibra de carbono

El reforzamiento estructural con fibra de carbono de una obra puede servir para varios propósitos:

- ✓ Defectos en el procedimiento constructivo o diseño
- ✓ Envejecimiento de materiales de construcción.
- ✓ Corrosión de los refuerzos de acero.
- ✓ Cambios de uso en edificaciones.
- ✓ Daños a partes estructurales
- ✓ Mejora de la capacidad de servicio
- ✓ Disminución de la deformación.
- ✓ Altura insuficiente de los elementos.
- ✓ Insuficiente refuerzo.
- ✓ Nueva zonificación sísmica
- ✓ Incremento de carga
- ✓ Incremento de cargas vivas en almacenes.

- ✓ Incremento de volumen de tráficos en puentes.
- ✓ Instalación de maquinaria pesada en edificios industriales.
- ✓ Estructuras sometidas a vibración.
- ✓ Impactos de vehículos.
- ✓ Incendios.
- ✓ Reducción de la fatiga en los refuerzos de acero.
- ✓ Reducción del ancho de las fisuras.
- ✓ Eliminación de paredes o columnas
- ✓ Eliminación de una sección de losa
- ✓ Usado donde la estética es una preocupación.

2.8.2 Adhesivo Sikadur 30

El Sikadur es un adhesivo epoxi de alta calidad con propiedades físicas y químicas sobresalientes. Tiene una elevada resistencia mecánica y su punto de transición vítrea evita el deslizamiento y garantiza un pegado duradero entre las partes unidas.

2.8.2.1 Usos del adhesivo

- ✓ Como adhesivo para pegar refuerzos Sika Carbodur (CFRP) sobre hormigón y madera.
- ✓ Como adhesivo para pegar refuerzos metálicos sobre hormigón, madera y piedra.
- ✓ Unión de elementos de hormigón, fibrocemento, acero, piedra, madera, epóxicos.
- ✓ Corrección de pequeñas imperfecciones dimensionales en elementos de hormigón

2.8.2.2 Ventajas del adhesivo

- ✓ Pot Life extenso
- ✓ Altas resistencias mecánicas a la abrasión y al impacto
- ✓ Puede ser aplicado sobre superficies ligeramente húmedas
- ✓ Aplicable en superficies verticales y sobrecabeza

- ✓ No contiene componentes volátiles
- ✓ Elevadas resistencias mecánicas
- ✓ No sufre retracciones
- ✓ Fácil de mezclar y aplicar

2.8.3 Preparación de las superficies para recibir el sistema CFRP

La Norma ACI 440-2R exige que se establezca un sistema bastante eficiente de pegado para la transferencia adecuada de esfuerzos entre los medios adheridos, caracterizando la clasificación de condición crítica de pegado.

Pegado Crítico

La preparación de la superficie del hormigón para atender a la condición crítica de pegado debe considerar por lo menos las siguientes operaciones fundamentales:

- Cualquier “hueco” o imperfección superficial deberá ser completamente expuesta en esta operación para permitir su posterior corrección.

2.8.4 Pasos para instalar la Platina de Fibra de Carbono

Al momento de instalar las láminas de fibra de carbono , hay que seguir los siguientes pasos:

1. Colocación de las láminas de fibra de carbono en la cara traccionada del elemento a reforzar (habitualmente la cara inferior).
2. El refuerzo se coloca siempre buscando la simetría de la sección.
3. El refuerzo debe ser continuo en toda su longitud.
4. Preparar bien la superficie donde va a ser instalada la pletina, dejarla limpia y libre de suciedad y agentes contaminantes.
5. Preparación del adhesivo (SikaDur30).
 - ✓ Homogeneizar los Componentes A y B por separado.
 - ✓ Mezclar los dos componentes durante al menos 3 minutos con batidora eléctrica de bajas revoluciones.
6. Aplicar una capa de adhesivo en el soporte (hormigón).

7. Aplicar una capa de adhesivo sobre el laminado, con ayuda de la herramienta específica.
8. Pasar el rodillo de goma dura aprendando el laminado sobre el soporte, para asegurarnos el pleno contacto con el soporte.

2.9 Desarrollo y análisis de la normativa ACI 440.2R-17

ACI -440-2R-17 “*Guide for the Design and Construction of externally Bonded FRP systems for Strengthening Concrete Structures*” (ACI, 2017)

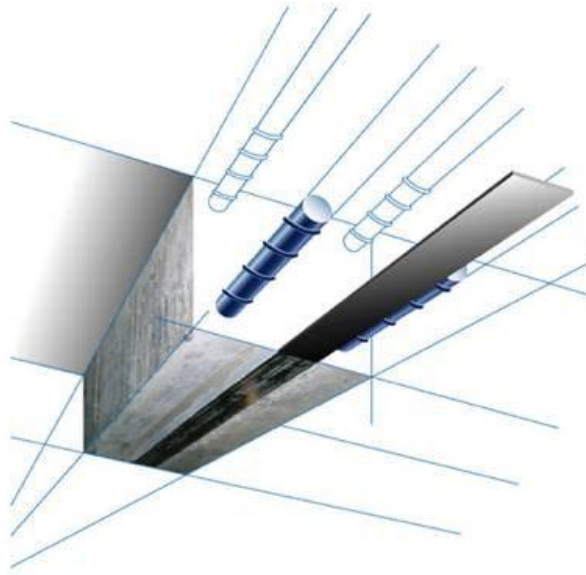
En esta investigación se analizarán y describirán los conceptos, consideraciones y metodologías establecidas por la norma para el diseño, cálculo y construcción del reforzamiento de vigas de hormigón armado de sección rectangular externamente reforzadas con FRP, también se analizará la instalación y los detalles adecuados de los sistemas de FRP para evitar muchos tipos de modos de fallas por desprendimiento. Los pasos relacionados con la preparación de la superficie y la terminación adecuada del sistema del FRP para lograr los niveles de resistencia previstos.

Se debe tener cuidado con las aplicaciones que impliquen el refuerzo de elementos de hormigón muy grandes o ligeros o miembros tales como viga de gran altura, ménsulas y vigas empalmadas.

Esta guía se aplica solo a los sistemas de refuerzo de FRP utilizados como refuerzo adicional a la tracción. Estos sistemas no deben utilizarse como refuerzo a compresión. Si bien los materiales de FRP pueden soportar esfuerzos de compresión, existen numerosos problemas relacionados con el uso del FRP para la compresión.

2.9.1 Filosofía de diseño de vigas reforzadas externamente con pletinas o bandas de fibra de carbono.

Figura 2.26 Sistema de Refuerzo con pletinas de Fibra de Carbono



Fuente: SIKA Manual “Técnicas de Refuerzo y Reparación con Materiales Compuestos

2.9.1.1 Consideraciones básicas para diseño y análisis de vigas de hormigón armado

El diseño y análisis de vigas de hormigón armado se basa en las siguientes suposiciones básicas:

- 1- Las secciones perpendiculares al eje de flexión son planas y permanecen planas después de la flexión.
- 2- La deformación en el acero de refuerzo es igual a la deformación del concreto que lo envuelve.
- 3- Los esfuerzos tanto en el concreto como en el acero de refuerzo pueden calcularse a partir de las deformaciones usando las curvas de esfuerzo-deformación para cada material.

La primera suposición es la hipótesis de Navier-Bernouilli desarrollada en la teoría de flexión de vigas. La segunda suposición es necesaria, debido a que el concreto y el refuerzo deben actuar en conjunto para soportar cargas, implicando una perfecta adherencia entre el concreto y el acero. La tercera suposición fue demostrada por otros investigadores al desarrollar las relaciones momento curvatura del material compuesto.

2.9.1.2 Suposiciones necesarias para cálculo simplificado

Además de las consideraciones básicas antes mencionadas, se tienen las siguientes suposiciones que son necesarias para realizar un cálculo simplificado y confiable de la resistencia a flexión de una viga de concreto armado externamente reforzada con FRP:

- La rotura del hormigón armado se produce cuando la deformación unitaria en compresión del concreto ϵ_c alcanza la capacidad límite de deformación del concreto ϵ_{cu} .
- La resistencia a tracción del concreto es ignorada.
- La fluencia del acero representa el final del comportamiento elástico de este material, y se alcanza cuando la deformación en el acero a tracción es igual a la deformación de fluencia f_y .
- Una vez que el acero alcanzó su límite de fluencia, el esfuerzo se mantiene constante en el valor de f_y y las deformaciones pueden aumentar.

2.9.1.3 Consideraciones acerca del material compuesto

Las consideraciones particulares acerca del material compuesto son descritas en ACI 440-2R, y basadas en el conocimiento del comportamiento mecánico específico del refuerzo FRP:

1. No existe deslizamiento entre la banda (pletina) FRP de refuerzo externo y el sustrato de hormigón adyacente.

Esta consideración no refleja el verdadero comportamiento del refuerzo externo adherido de FRP, pues en realidad existe una deformación relativa por

corte en la interface entre el concreto y el refuerzo externo, sin embargo, el nivel de error que esta consideración puede introducir es mínimo y no afecta el cálculo de la resistencia nominal de la sección

2. La relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria de las pletinas FRP es lineal y elástica hasta llegar a la falla.
3. El material compuesto (FRP + resina) trabaja como un solo material y se supone que no existen discontinuidades entre la fibra y la resina.
4. Las fibras están distribuidas de forma regular, es decir sus propiedades son uniformes en toda su extensión.
5. Se considera que el compuesto FRP es un material estable y sus propiedades se mantienen inalterables en el tiempo.

Diferentes investigaciones han sido llevadas a cabo, ya sea por exposición a ambientes ácidos, periodos de hielo - deshielo y cargas de largas duración, durante largos periodos de exposición sostenida, y han demostrado que en general no hay pérdida significativa de sus propiedades mecánicas y que estas pérdidas tienen un comportamiento asintótico en el tiempo, en el cual para un periodo dado, el compuesto mantiene prácticamente sus propiedades casi intactas en el resto de su vida útil, por lo que se le considera un material muy estable. Estas pérdidas son consideradas por la guía para el diseño y construcción con materiales compuestos ACI-440.2R, mediante un coeficiente de reducción por degradación o exposición al medio ambiente, llamado CE.

Cabe indicar que la inexactitud de este segundo grupo de consideraciones no afecta en gran medida el cálculo de la resistencia nominal a flexión de una viga de concreto armado externamente reforzada. Adicionalmente se considera un coeficiente de reducción Φ con el fin de compensar cualquier inexactitud de forma conservadora.

2.9.1.4 Límites del reforzamiento

Debe tenerse una consideración cuidadosa para determinar límites de reforzamiento razonables. Estos límites son impuestos para evitar el colapso de la estructura, en caso

que ocurriera una falla de adherencia, u otra, del sistema FRP debido al fuego, vandalismo u otras causas. Algunos diseñadores y fabricantes de sistemas FRP han recomendado que el elemento de la estructura sin reforzar, sin refuerzo FRP, debe tener suficiente capacidad para resistir hasta cierto nivel de carga. Utilizando esta filosofía, en la eventualidad que el sistema FRP sea dañado, la estructura debe ser aún capaz de resistir un nivel razonable de carga sin colapsar.

Toda estructura que necesite ser reforzada con el sistema de fibra de carbono (FRP) debe tener una resistencia mínima, de manera que en caso de vandalismo, incendio y las fibras se quiten de la estructura, esta no debe colapsar. Como lo describe la siguiente ecuación:

$$(\phi R_n)_{exist} \geq (1,1 * S_{DL} + 0,75 * S_{LL})_{nuevo}$$

Donde

ϕ = Factor de reducción de resistencia.

R_n = Resistencia nominal de una sección de hormigón.

S_{DL} = Solicitación de peso propio.

S_{LL} = Solicitación de sobrecarga.

2.9.1.5 Consideraciones ambientales

La Norma ACI 440 2R nos facilita un coeficiente denominado con la sigla CE, para que el sistema FRP no sea afectado por las condiciones medio ambientales a las que podrían ser expuestas, como a la alcalinidad, agua salada, productos químicos, luz ultravioleta, altas temperaturas, ciclos de congelación y descongelación, etc. Este coeficiente será menor a mayor exposición.

En la siguiente tabla se observa valores para cada fibra según las condiciones de exposición.

Tabla 2.12 Factor de reducción ambiental para varios sistemas de FRP y condiciones de exposición

CONDICIONES DE EXPOSICION	TIPO DE FIBRA	CE
Exposición interior	Carbono	0,95
	Vidrio	0,75
	Aramida	0,85
Exposición al exterior (Puentes, áreas de parking descubiertas, etc.)	Carbono	0,85
	Vidrio	0,65
	Aramida	0,75
Ambiente Agresivo (plantas químicas, plantas de tratamiento de agua, etc.)	Carbono	0,85
	Vidrio	0,5
	Aramida	0,7

Fuente: NORMA ACI 440.2R

2.9.1.6 Propiedades del material de diseño

Debido a la incertidumbre de las condiciones ambientales y la exposición a largo plazo en los diferentes entornos puede reducir las propiedades a tracción y rotura por fluencia y la resistencia a la fatiga de las láminas FRP, por lo cual la resistencia de diseño final a tracción se debe determinar usando el factor de reducción ambiental dado en la Tabla N y empleando la siguiente formula:

En la siguiente ecuación se muestra la propiedad de tracción afectada por el factor ambiental la cual será utilizada en todas las ecuaciones de diseño. El factor CE se elegirá según la condición de exposición

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$$

Dónde:

C_E = Factor de reducción ambiental

f_{fu}^* = Resistencia a la tracción del material FRP, dad por el fabricante, (MPa)

f_{fu} = Resistencia de diseño máxima a la tracción del material FRP (MPa)

Del mismo modo, la deformación de ruptura también debe ser reducida para las condiciones de exposición ambiental.

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^*$$

Dónde:

C_E = Factor de reducción ambiental

ε_{fu}^* = Tensión de ruptura última del refuerzo de FRP, (mm/mm)

ε_{fu} = Deformación unitaria de rotura por tensión de refuerzo de FRP, (mm/mm)

Para el módulo de elasticidad se utiliza la ley de Hooke, dicha ecuación se presenta a continuación, este módulo no es afectado por las condiciones ambientales, además que este módulo será el mismo proporcionado por el fabricante del material.

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}}$$

Dónde:

E_f = Modulo de elasticidad a tracción de FRP, dad por el fabricante, (MPa)

ε_{fu} = Deformación de ruptura de diseño d refuerzo de FRP, (mm/mm)

f_{fu} = Diseño de máxima resistencia a la tracción de FRP, dad por el fabricante (MPa)

2.9.1.7 Propiedades del material de diseño

Aplicar el sistema de refuerzo de FRP a la cara de tensión de un elemento de concreto reforzado a flexión con fibras orientadas a lo largo de la longitud del miembro proporcionará un aumento en la fuerza a flexión.

Incrementos en la resistencia general del 10 al 160% ha sido documentado cuando se toman en cuenta los límites de reforzamiento, la ductilidad y los límites de capacidad de servicio. Sin embargo, el ACI-440.2-R17 recomienda un aumento de la resistencia no mayor del 40 %.

2.9.1.8 Momento nominal sin refuerzos

Se debe tomar en cuenta que la flexión se debe considerar el momento nominal que debe ser mayor al momento último

La resistencia de diseño a la flexión ΦM_n se refiere a la resistencia nominal del elemento multiplicado por un factor de reducción de la resistencia y el momento factorizado M_u se refiere al momento calculado a partir de cargas

$$\Phi M_n \geq M_u$$

Donde

M_n = Momento nominal del elemento

M_u = Momento calculado con las cargas mayoradas

Φ = Factor de reducción de resistencia

2.9.1.9 Nivel de deformación en el refuerzo de PRF

El nivel de la deformación máxima que se puede lograr en el refuerzo de FRP será gobernado por el nivel de tensión desarrollado en el FRP en el punto en el que el concreto se aplasta, el punto de ruptura de FRP, o el punto en el que FRP se separa de la superficie. El nivel de deformación efectivo en el refuerzo de FRP en el límite máximo se puede encontrar en la siguiente ecuación.

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 * \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd}$$

ε_{fe} = Nivel de deformación efectivo en refuerzo de FRP alcanzado en la ruptura, (mm/mm)

2.9.1.10 Nivel de esfuerzo en el refuerzo de FRP.

El nivel de esfuerzo efectivo en el refuerzo de FRP es el nivel máximo que se puede desarrollar en el refuerzo de FRP antes de la falla por flexión de la sección. El nivel efectivo de este esfuerzo se puede encontrar a partir del nivel de tensión en el FRP, asumiendo que el comportamiento es perfectamente elástico, y está dado por la ecuación:

$$f_{fe} = E_f * \varepsilon_{fe}$$

f_{fe} = Esfuerzo efectivo en el FRP, nivel de esfuerzo alcanzado en la sección de falla, (MPa)

2.9.1.11 Fuerza última de sección rectangular reforzado individualmente

El nivel de esfuerzo efectivo en el refuerzo de FRP puede ser encontrado a partir del nivel de tensión en el FRP, asumiendo perfectamente comportamiento elástico. Basado en el nivel de tensión en el refuerzo de FRP, el nivel de deformación en el refuerzo de acero no comprimido puede ser encontrado a partir de la siguiente ecuación usando compatibilidad de deformación:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) * \left(\frac{d - c}{d_f - c} \right)$$

ε_s = Nivel de deformación en refuerzo del acero (mm / mm)

ε_{bi} = Nivel de deformación del recubrimiento en el momento de instalación de FRP (la tensión es positiva), (mm / mm)

c = Distancia de la fibra de compresión extrema al eje neutro, (mm)

d = Distancia de la fibra de compresión extrema a centroide del refuerzo de tensión (mm)

d_f = profundidad efectiva del refuerzo de flexión FRP (mm)

La tensión en el acero se determina a partir del nivel de deformación en el acero utilizando su curva de tensión-deformación.

$$f_s = E_s * \varepsilon_s$$

Donde

f_s = Esfuerzo en el refuerzo de acero no comprimido (MPa)

Con la tensión y el nivel de esfuerzo en el FRP y el refuerzo de acero determinado para la profundidad del eje neutro supuesto, el equilibrio de la fuerza interna se puede verificar utilizando la siguiente ecuación

$$c = \frac{A_s * f_s + A_f * f_{fe}}{\alpha_1 * f'_c * \beta_1 * b}$$

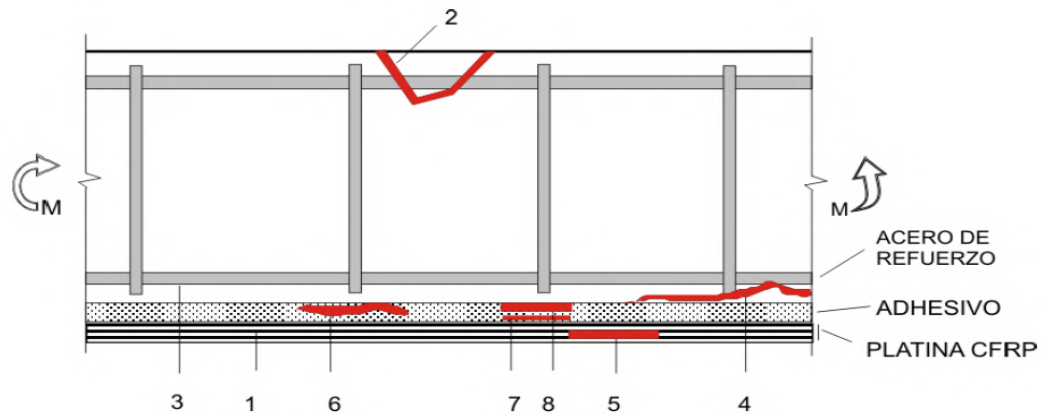
La resistencia nominal a la flexión de la sección con refuerzo externo de FRP se usa un factor de reducción adicional para FRP, ψ_f , se aplica al aporte de resistencia a la flexión del refuerzo FRP. El valor recomendado de ψ_f es 0.85. Este factor de reducción para la contribución de la fuerza de refuerzo de FRP se basa en el análisis de confiabilidad estadística calibrado experimentalmente.

$$\phi M_{nf} = A_f * f_{fe} * (d_f - \frac{\beta_1 * c}{2})$$

2.10 Modos de falla por flexión en vigas de concreto armado externamente reforzadas con bandas de Fibra de Carbono

Un elemento reforzado con CFRP puede tener varios tipos de falla, ya sea que se presenten por exceder la capacidad de servicio del elemento u otros tipos de fallas súbitas. A continuación, se presenta un esquema de las posibles fallas que se pueden generar en un elemento reforzado con CFRP.

Figura 2.27 Comportamiento de un miembro a flexión con un refuerzo adherido



Fuente: Sika Colombia S.A. 2017

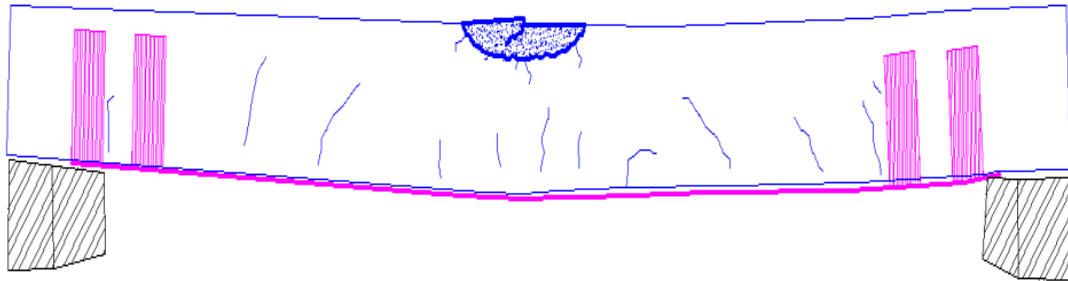
1. Falla a tensión de la platina.
2. Aplastamiento del concreto en la zona a compresión.
3. Fluencia del acero o rotura del acero.
4. Desprendimiento del concreto en la zona de tracción.
5. Rotura interlaminar
6. Falla de cohesión en la capa de adhesivo.
7. Falla de adhesión (Superficie de lámina CFRP)
8. Falla de adhesión (Superficie del concreto)

Definiciones:

- a) Rotura del hormigón en compresión antes de alcanzar la fluencia del acero interior de refuerzo.**

Este tipo de falla es indeseable por su naturaleza frágil, además la capacidad de deformación del acero no se aprovecha adecuadamente. Se puede deber a falta de ancho del bloque de compresión, baja resistencia del concreto, cuantía excesiva de acero y FRP de refuerzo frente a la capacidad del concreto.

Figura 2.28 Rotura del concreto en compresión antes de la fluencia del acero interior de refuerzo.

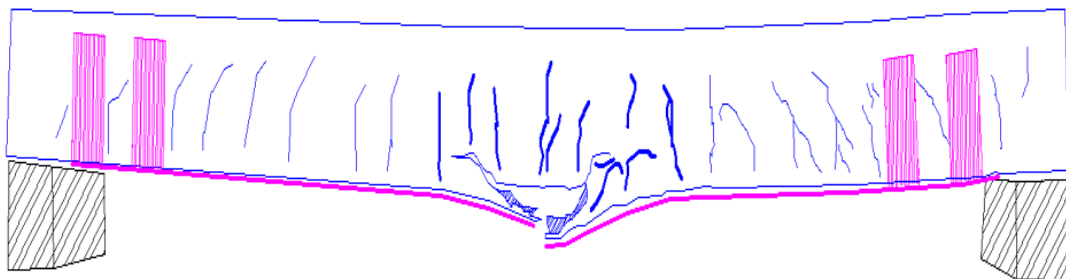


Fuente: Bazán, 2015

b) Fluencia del acero en tracción seguida de la ruptura de la pletina FRP.

Como se apreciará posteriormente este tipo de falla es deseable en una zona de riesgo sísmico, pues presenta una mayor capacidad de deformación y por ende de liberación de energía.

Figura 2.29 Fluencia del acero en tracción seguido de la ruptura de la platina FRP.

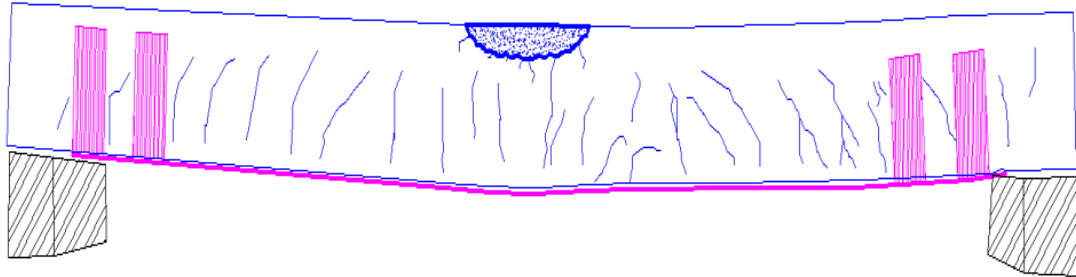


Fuente: Bazán, 2015

c) Fluencia del acero en tensión seguida de la rotura del concreto en compresión

Este tipo de falla se debe analizar en detalle, pues dependiendo de las proporciones entre la cuantía de acero y la cuantía del FRP, Puede originar capacidades de deformación desde relativamente aceptables hasta frágiles e inadecuadas.

Figura 2.30 Fluencia del acero en tensión seguida de la rotura del concreto en compresión, sin falla del refuerzo externo FRP.



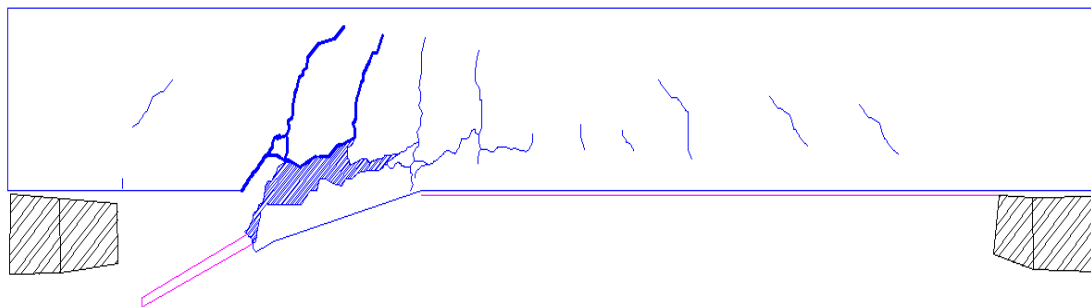
Fuente: Bazán, 2015

Los modos de falla adicionales que pueden producirse por mal detallado de viga de concreto armado o por razones constructivas inefficientes (mala calidad del sustrato de concreto, baja calidad del adhesivo, etc.) son:

d) Despegue prematuro de la fibra de FRP del sustrato del concreto.

Este tipo de falla se produce si se utilizan adhesivos inadecuados, de baja resistencia, o se aplican en sustratos de concreto inadecuados (agrietados, carbonatados, de mala nivelación, contaminados o sucios, etc.).

Figura 2.31 Delaminación del concreto producido en un extremo, que se extiende hacia el centro.



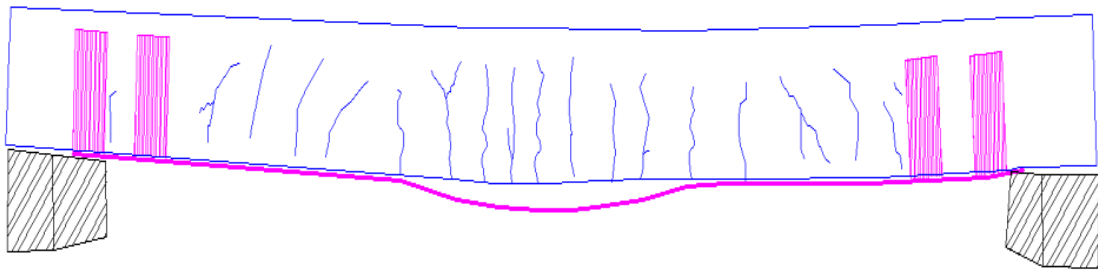
Fuente: Bazán, 2015

e) 5. Delaminación extrema o descamación prematura en el extremo de la banda de FRP.

En los extremos de la banda de refuerzo es común que se concentren fuerzas de cortante en la interfase de los materiales, la cual actúa directamente en el material adhesivo y en el sustrato de concreto.

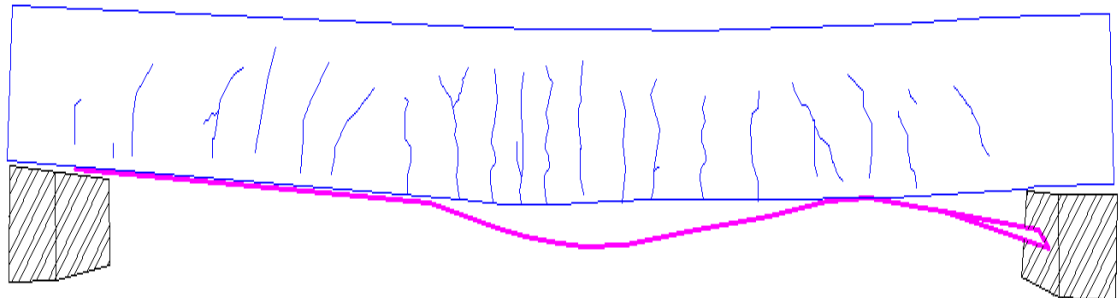
Es práctica común en vigas utilizar bandas en U en los extremos como los mostrados en la Fig. 2.1, que evitan la delaminación prematura de la banda de refuerzo. Estas bandas tienen un efecto confinante en el concreto evitando la falla del sustrato de concreto, ya sea por corte o tracción.

Figura 2.32 Despegue de la platina de refuerzo en el centro de la luz.



Fuente: Bazán, 2015

Figura 2.33 Debonding o despegue de la platina de refuerzo en el centro de la luz y/o en un extremo.



Fuente: Bazán, 2015

CAPÍTULO III



CAPÍTULO III

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Resumen de la Investigación

En este capítulo se describe los procedimientos experimentales llevados a cabo para cumplir con los objetivos planteados en el proyecto de investigación, se describe de forma clara y concreta los ensayos realizados, desde la obtención de los agregados hasta el empleo de los mismos.

De acuerdo al alcance y objetivos se procedió a la búsqueda de los materiales comprometidos para el proyecto, comenzando por la compra de los agregados (árido grueso y fino) y el cemento.

Para el cálculo del diseño de la mezcla se consideró la resistencia del hormigón de 210 kg/cm^2 y se realizó el diseño de mezclas bajo la norma ACI-211.

El diseño de la viga de hormigón armado se realizó bajo la Norma EHE y como límites del tamaño de la viga se consideró el equipo donde se ensayarán las vigas, en nuestro caso las dimensiones de los apoyos y del dispositivo con el que se aplicará la carga perteneciente al equipo Prensa Universal.

Se procedió a la compra del fierro corrugado de $\varnothing 12 \text{ mm}$ para la armadura longitudinal y $\varnothing 6 \text{ mm}$ para los estribos.

Para el cálculo de la disposición de las platinas de fibra de carbono se realizó con la Norma ACI 440.2R-17

Para la obtención de las Platinas de fibra de carbono se contactó con la distribuidora de SIKA BOLIVIA que se encuentra en Santa Cruz, quienes muy amablemente me colaboraron con la mitad del producto.

La calidad de los materiales a utilizar para la dosificación influye en la calidad del hormigón. Se deberán realizar ensayos previos, de los materiales a emplear, para determinar si la composición es la más idónea.

El reforzamiento de vigas con platinas de Fibra de carbono también debe aplicarse según lo establecido en la norma correspondiente.

3.2 Normativa de los ensayos

A continuación, se detalla una lista de los ensayos realizados con su norma correspondiente.

Tabla 3. 1 Ensayos realizados y Normas

ENSAYOS REALIZADOS	NORMA
Método para cuarteo de muestras	ASTM C 702
Análisis granulométrico del agregado grueso	ASTM C 136
Análisis granulométrico del agregado fino	ASTM C 136
Peso específico y absorción de agua del agregado grueso	ASTM C 127
Peso específico y absorción de agua del agregado fino	ASTM C 128
Peso unitario del agregado grueso	ASTM C 29
Peso unitario del agregado fino	ASTM C 29
Diseño de mezcla de concreto	ACI 211
Elaboración y curado el laboratorio de muestras de hormigón	ASTM C 192
Método para determinar la docilidad mediante el cono de Abrams	ASTM C 143
Método de ensayo a Compresión de probetas cilíndricas	ASTM C 39
Diseño de vigas de hormigón armado	EHE
Diseño y construcción de sistemas FRP adheridos externamente para el refuerzo de vigas	ACI 440. 2R

Fuente: Elaboración propia

3.3 Preparación de los áridos

La naturaleza de los áridos y su preparación serán tales que permitan garantizar la adecuada resistencia y durabilidad del hormigón.

3.3.1 Árido grueso

Ensayos existentes indican que la piedra chancada o partida da concretos ligeramente más resistentes que los hechos con piedra redonda por lo tanto se optó por la grava chancada.

Como primer paso fue la selección y compra del árido grueso, se obtuvo grava chancada del río Santa Ana y se canceló la suma 170 Bs. el cubo de grava.

Se llevó el material a ambientes del laboratorio de Hormigón y Resistencia de Materiales de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Se procedió a lavar el árido grueso para quitar impurezas, de esta manera garantizar que el agregado esté en condiciones adecuadas para uso en dosificación. Por último, se hizo secar en horno a temperatura constante de 105°C .

Figura 3.1 Lavado del árido grueso (grava)



Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Árido fino

Se realizó la compra del árido fino de la chancadora del río Santa Ana y se canceló la suma de 160 Bs. el cubo de arena.

Se trasladó la arena a ambientes del laboratorio de Hormigón y Resistencia de Materiales de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Considerando que un buen agregado fino deberá estar siempre libre de impurezas orgánicas, arcilla, cualquier material dañino o relleno excesivo de tamaños más pequeños que el tamiz del número 100, se optó por lavar el árido fino para garantizar que el agregado esté en condiciones adecuadas para uso en dosificación. Por último se hizo secar en horno a temperatura constante de 105°C .

Figura 3.2 Lavado del agregado fino (arena)



Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Cuarteo de muestras (ASTM C 702)

Los diferentes tipos y tamaños de áridos requieren que la muestra sea representativa para los diferentes ensayos a los que será sometida. El material debe ser reducido en cantidad de acuerdo al ensayo que se realizará.

Se hizo uso del cuarteador metálico de tamaño adecuado.

Figura 3.3 Cuarteo de árido grueso



Fuente: Elaboración propia

3.3.4 Cemento

Para la elaboración de hormigones se debe hacer uso solo de cementos que cumplan las exigencias de las normas bolivianas referentes al Cemento Pórtland.

Para la dosificación se utilizó cemento portland Tipo I Convencional, se optó por comprar cemento El Puente IP-30 al precio de 50 Bs y se trasladó el cemento al lugar del vaciado en ambientes del laboratorio de Hormigones y Resistencia de Materiales de la carrera de Ingeniería civil.

Figura 3.4 Cemento El Puente



Fuente: Elaboración propia

3.3.5 Agua

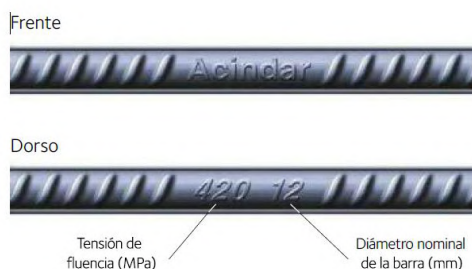
El agua utilizada en la mezcla fue agua potable perteneciente de la red pública. La temperatura del agua para la preparación del hormigón debe ser superior a los 5 °C.

3.3.6 Barras de Fierro corrugado de 12 mm y 6mm

Se optó por usar las barras de acero de la empresa ArcelorMittal Acindar.

Son barras de acero de dureza natural, fabricadas según norma IRAM- IAS U500-528 designación ADN 420, obtienen una calidad superior en toda la producción, superando las exigencias impuestas por las normas y satisfaciendo los requerimientos de la industria de la construcción. ArcelorMittal Acindar posee certificación ISO 9001 en la producción de acero

Figura 3.5 Identificación de las barras



Fuente: ArcelorMittal “Catálogo-Productos para construcción civil”

Tabla 3.2 Diámetro nominal – Peso nominal – Secciones nominales

Diám. nominal	Perim. nominal	Peso nominal	Peso por barra 12m	Secciones nominales / número de barras									
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
mm	cm	kg/m	kg					cm ²					
6	1,88	0,222	2,66	0,28	0,56	0,85	1,13	1,41	1,70	1,98	2,26	2,54	2,83
8	2,51	0,395	4,74	0,50	1,00	1,51	2,01	2,51	3,01	3,52	4,02	4,52	5,03
10	3,14	0,617	7,40	0,79	1,57	2,36	3,14	3,93	4,71	5,50	6,28	7,07	7,85
12	3,77	0,888	10,7	1,13	2,26	3,39	4,52	5,65	6,79	7,92	9,05	10,18	11,31
16	5,03	1,580	18,9	2,01	4,02	6,03	8,04	10,05	12,06	14,07	16,08	18,10	20,11
20	6,28	2,470	29,6	3,14	6,28	9,42	12,57	15,71	18,84	21,99	25,14	28,27	31,42
25	7,85	3,850	46,2	4,91	9,82	14,73	19,64	24,55	29,46	34,37	39,28	44,19	49,10
32	10,10	6,310	75,7	8,04	16,08	24,13	32,17	40,21	48,26	56,30	64,34	72,38	80,42
40	12,60	9,860	118,3	12,57	25,13	37,70	50,26	62,83	75,40	87,96	100,53	113,12	125,66

Fuente: ArcelorMittal “Catálogo-Productos para construcción civil”

Se adquirió barras de diámetro $\varnothing$ 12 mm para la armadura longitudinal y $\varnothing$ 6 mm para los estribos y por motivos constructivos se colocó armadura longitudinal de $\varnothing$ 10 mm en la zona de compresión.

3.3.7 Platinas de Fibra de Carbono Sika-CarboDur S 512

En nuestro medio el distribuidor de platinas de Fibra de Carbono es la empresa de productos de construcción SIKA BOLIVIA. El costo del metro lineal de este material es de 470 Bs.

Se hizo la compra de 10 metros de longitud de Platina de Fibra de Carbono, esta platina es de 5 cm de ancho y 0.12 cm de espesor.

Figura 3.6 Platinas de fibra de carbono Sika CarboDur S512



Fuente: Elaboración propia

3.3.8 Epoxi SikaDur - 30

Este producto es el adhesivo estructural apto para pegar las platinas de fibra de carbono a las vigas, consta de 2 componentes A y B. Un juego sirve para abastecer el pegado de 10 ml de platina.

Figura 3.7 Adhesivo Epoxi SikaDur - 30



Fuente: Elaboración propia

3.4 Caracterización de los agregados

3.4.1 Análisis granulométrico del árido grueso (Norma ASTM C 136)

Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar la granulometría de los áridos. Es aplicable a los áridos que se emplean en la elaboración de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezclas asfálticas.

Se determina los tamaños de las partículas de agregado grueso empleando tamices de aberturas cuadradas. Las mallas normalizadas utilizadas para el agregado grueso son 3", 2 ½", 2", 1 ½", 1", ¾", ½", 3/8", N°4

Material y equipo utilizado.-

- Balanza sensible al 0.5 gramos
- Juego de tamices 2", 1 ½", 1", ¾", ½", 3/8", N°4
- Horno de temperatura constante (105 °C)
- Tamizador eléctrico

- Fuentes o recipientes para secado o para pesaje
- Brocha y cepillo metálico para limpiar los tamices

Preparación de la muestra.-

- Se debe realizar cuarteo de todo el material a utilizar, luego obtener una muestra representativa.
- El peso de la muestra del agregado grueso necesario para el ensayo deberá estar de acuerdo con el siguiente cuadro:

Tabla 3.3 Pesos de las muestras según TM del agregado

Tamaño máximo de partículas (pulg)	Peso mínimo de la muestra (gramos)
3/8	1000
1/2	2500
3/4	5000
1	10000
1 ½	15000
2	20000
2 ½	25000
3	30000
3,5	35000

*Fuente: Guía de laboratorio de Hormigones y Resistencia de Materiales
U.A.J.M.S.*

Procedimiento

- Se selecciona el juego de tamices, se los ordena de manera descendente y se coloca su tapa y base. Verificar que todos los tamices estén limpios y secos.

Figura 3.8 Juego de tamices debidamente ordenados



Fuente: Elaboración propia

- Verificar que la muestra de grava este seca y pesar 10000 gr de material.
- Introducir el árido grueso en el juego de tamices.

Figura 3.9 Vaciado de grava en el juego de tamices



Fuente: Elaboración propia

- Colocar el juego de tamices en el tamizador eléctrico y esperar que se tamice un tiempo determinado de 7 a 10 minutos.

- Se realiza un tamizado final que debe ser manual, verificando que en cada tamiz no haya material acumulado sin tamizar.

Figura 3.10 Gradación del árido en los tamices



Fuente: Elaboración propia

- Pesar el material que retuvo en cada tamiz y anotar el dato en una planilla de granulometría.

Figura 3.11 Pesaje de la muestra



Fuente: Elaboración propia

Cálculo

Peso retenido acumulado

$$Peso\ Ret.\ acum = \sum Peso\ ret. (2\frac{1}{2} + 2'' + 1\frac{1}{2}'' + 1 + 3/4'' + 1/2'' + 3/8'' + N^{\circ} 4)$$

Porcentajes retenidos acumulados

$$\% \text{ Ret. acum.} = \left(\frac{\text{Peso Ret. acum}}{\text{Total muestra}} \right) * 100$$

Luego los porcentajes que pasan cada malla con la siguiente formula:

$$\% \text{ pasa} = 100 - \% \text{ Ret. acum}$$

Determinación del Módulo de Finura

$$MF = \left(\sum \% \text{Ret. acum.} (2 \frac{1}{2} + 2'' + 1 \frac{1}{2}'' + 1 + 3/4'' + 1/2'' + 3/8'' + N^{\circ} 4) \right) / 100$$

3.4.2 Análisis granulométrico del árido fino (Norma ASTM C 136)

Se determina los tamaños de las partículas de agregado fino empleando tamices de aberturas cuadradas. Las mallas normalizadas utilizadas para el agregado fino son 3/8'', N°4, N°8, N°16, N°30, N°50 y N°100

Material y equipo utilizado.-

- Balanza sensible al 0.1 gramos
- Juego de tamices 3/8'', N°4, N°8, N°16, N°30, N°50 y N°100
- Horno de temperatura constante (105⁰C)
- Tamizador eléctrico
- Brocha para limpiar los tamices
- Fuentes o recipientes para secado o para pesaje
- Cepillo metálico para limpiar los tamices

Preparación de la muestra.-

- Se debe secar la muestra en horno a una temperatura de 105° C, hasta obtener el peso constante.
- El peso de la muestra del agregado fino necesario para el ensayo deberá ser de 1000 gr

Procedimiento

- Se selecciona el juego de tamices y se los ordena de manera descendente y se coloca su tapa y base. Verificar que todos los tamices estén limpios y secos.

Figura 3.12 Juego de tamices debidamente ordenados



Fuente: Elaboración propia

- Verificar que la muestra de arena este seca y pesar 1000 gr de material.
- Introducir la arena en el juego de tamices debidamente ordenados.
- Colocar el juego de tamices en el tamizador eléctrico y esperar que se tamice un tiempo determinado de 7 a 10 minutos.

Figura 3.13 Vaciado de grava en el juego de tamices



Fuente: Elaboración propia

- Se realiza un tamizado final que debe ser manual, verificando que en cada tamiz no haya material acumulado sin tamizar.

Figura 3.14 Gradación del árido fino en su respectivo tamiz



Fuente: Elaboración propia

- Pesar el material que retuvo en cada tamiz y anotar el dato en una planilla de granulometría.

Figura 3.15 Pesaje de la muestra



Fuente: Elaboración propia

Cálculo

Peso retenido acumulado

$$Peso\ Ret.\ acum = \sum Peso\ ret. (N^{\circ}4 + N^{\circ}8 + N^{\circ}16 + N^{\circ}30 + N^{\circ}50 + N^{\circ}100)$$

Porcentajes retenidos acumulados

$$\% Ret. acum. = \left(\frac{Peso Ret. acum}{Total muestra} \right) * 100$$

Luego los porcentajes que pasan cada malla con la siguiente formula:

$$\% pasa = 100 - \% Ret. acum$$

Determinación del Módulo de Finura

$$MF = \left(\sum \%Ret. acum. (N^{\circ}4 + N^{\circ}8 + N^{\circ}16 + N^{\circ}30 + N^{\circ}50 + N^{\circ}100) \right) / 100$$

3.4.3 Determinación del Peso Unitario del árido grueso (Norma ASTM C 29)

Este ensayo tiene como objeto describir cómo se puede obtener el peso unitario de los agregados y de las mezclas de agregados a la temperatura ambiente.

Material y equipo utilizado.-

- Balanza sensible al 0.5%
- Una varilla de 5/8" de diámetro y 60cm de largo
- Fuentes y cucharón
- Moldes cilíndricos

Para agregados cuyas partículas tengan un diámetro máximo de 1/2" o menor se usa un molde de 1/10 de pie cubico.

Para agregados cuyas partículas tengan un diámetro máximo entre 1/2" y 1 1/2" se usa en molde de 1/2 pie cubico.

Para agregados cuyas partículas tengan un diámetro máximo mayor de 1 1/2" se usa un molde de 1 pie cubico.

Tabla 3.4 Dimensiones de los moldes según TMN del agregado

Tamaño Máximo Nominal de áridos (mm)	Capacidad Volumétrica		Diámetro Interior (mm)	Altura Interior (mm)	Espesor mínimo del metal	
	m ³	l			Base (mm)	Pared (mm)
16	0,003	3	155 ± 2	160 ± 2	5	2,5
25	0,010	10	205 ± 2	305 ± 2	5	2,5
50	0,015	15	255 ± 2	295 ± 2	5	3,0
100	0,030	30	355 ± 2	305 ± 2	5	3,0

Fuente: Norma ASTM C 29

PROCEDIMIENTO

- En este caso se usará el molde de 0.01 m³
- Como primer paso se debe realizar la calibración del molde, llenar el molde con agua a 16,7 °C y registrar el peso. El volumen del molde se determina dividiendo el peso del agua requerido para llenar el respectivo molde por el peso unitario del agua a la misma temperatura.
- Se realiza el cuarteo del material y se obtiene una muestra representativa del agregado a humedad ambiente

Peso Unitario Compactado:

- Se llena el molde hasta una tercera parte de su capacidad, nivelándose la grava con las manos. Verificar que la zona de ensayo sea una base firme.

Figura 3.16 Vaciado de la grava en caída libre



Fuente: Elaboración propia

- Luego por medio de la varilla se apisona uniformemente cada capa 25 veces. Se deja caer la varilla desde una altura aproximada de 5 cm. No se debe golpear el fondo del molde.

Figura 3.17 Apisonamiento con varilla de 5/8" de diámetro y 60 cm de largo



Fuente: Elaboración propia

- Se repite el procedimiento anterior dos veces hasta llenar el molde.
- Se debe enrasar con la varilla sin presionar, teniendo como guía el borde del molde para eliminar el exceso de árido grueso.

Figura 3.18 Enrasado para deshacerse de la grava que excede



Fuente: Elaboración propia

- Registrar el peso del molde con la grava compactada.

Peso Unitario suelto:

- En este caso se realiza el llenado del molde por simple vaciado.
- Llenar el molde con ayuda de un cucharón o pala, dejando caer el árido desde una altura aproximada de 5 cm sobre el borde superior del molde.
- Nivelar la grava con el borde del molde y eliminar el exceso de grava usando la varilla pisón como regla de enrase, tener en cuenta de no presionar.
- Registrar el peso del molde con el árido grueso suelto.

CALCULO

Peso Unitario Suelto

$$PUs = \frac{Ws}{Vol}$$

Peso Unitario Compactado

$$PUc = \frac{Wc}{Vol}$$

Donde

PU: Peso unitario suelto

Ws: Peso de la muestra suelta

Vol: Volumen del molde

PUc: Peso unitario compactado

Wc: Peso de la muestra compactada

3.4.4 Determinación del Peso Unitario del árido fino

Este ensayo tiene como objeto describir cómo se puede obtener el peso unitario del agregado fino y de las mezclas de agregados a la temperatura ambiente.

Equipo

- Balanza digital sensible al 0.5 %
- Una varilla de 5/8" de diámetro y 60 cm de largo
- Fuentes o recipientes y cucharón
- Moldes cilíndricos.

Para agregados cuyas partículas tengan un diámetro máximo de 1/2" o menor se usa un molde de 1/10 de pie cubico.

Para agregados cuyas partículas tengan un diámetro máximo entre 1/2" y 1 1/2" se usa en molde de 1/2 pie cubico.

Para agregados cuyas partículas tengan un diámetro máximo mayor de 1 1/2" se usa un molde de 1 pie cubico.

Procedimiento

- En este caso se usará el molde de 0.003 m³

- Como primer paso se debe realizar la calibración del molde, llenar el molde con agua a $16,7^{\circ}\text{C}$ y registrar el peso. El volumen del molde se determina dividiendo el peso del agua requerido para llenar el respectivo molde por el peso unitario del agua a la misma temperatura.
- Se realiza el cuarteo del material y se obtiene una muestra representativa del agregado a humedad ambiente

Peso Unitario Compactado:

- Se llena el molde hasta una tercera parte de su capacidad, nivelándose la arena con las manos. Verificar que la zona de ensayo sea una base firme.

Figura 3.19 Llenado de arena hasta la tercera parte



Fuente: Elaboración propia

- Luego por medio de la varilla se apisona uniformemente cada capa 25 veces. Se deja caer la varilla desde una altura aproximada de 5 cm. No se debe golpear el fondo del molde.

Figura 3.20 Apisonamiento con varilla de 5/8" de diámetro y 60 cm de largo



Fuente: Elaboración propia

- Se repite el procedimiento anterior dos veces hasta llenar el molde.

Figura 3.21 Apisonamiento de la última capa



Fuente: Elaboración propia

- Se debe enrasar con la varilla sin presionar, teniendo como guía el borde del molde para eliminar el exceso de árido fina.

Figura 3.22 Enrasado para deshacerse de la arena que excede



Fuente: Elaboración propia

- Registrar el peso del molde con la arena compactada mediante el uso de la balanza de capacidad de 60 Kg.

Figura 3.23 Pesaje del material más molde



Fuente: Elaboración propia

Peso Unitario suelto:

- En este caso se realiza el llenado del molde por simple vaciado.

- Llenar el molde con ayuda de un cucharón, dejando caer el árido fino desde una altura aproximada de 5 cm sobre el borde superior del molde.

Figura 3.24 Caída libre del árido



Fuente: Elaboración propia

- Nivelar la arena con el borde del molde y eliminar el exceso de arena usando la varilla pisón como regla de enrase, se debe tener en cuenta de no presionar.

Figura 3.25 Enrasado para eliminar el exceso de arena



Fuente: Elaboración propia

- Registrar el peso del molde con el árido fino suelto.

Figura 3.26 Pesaje del material más molde



Fuente: Elaboración propia

Cálculo

El peso neto del agregado o de la mezcla dentro del molde se obtiene restando del peso del molde más la muestra compactada el peso del molde. El peso por unidad de volumen de la muestra se obtiene multiplicando su peso neto por el inverso del volumen del molde.

Peso Específico Suelto = PUS

$$PUS = \frac{mc}{V}$$

Donde

PUS = Peso Unitario Suelto

mc = Masa del árido suelto que llena el molde

V= Capacidad volumétrica del molde

Peso Específico Compactado PUC

$$PUC = \frac{mc}{V}$$

Donde:

PUS = Peso Unitario Suelto

mc = Masa del árido compactado que llena el molde

V= Capacidad volumétrica del molde

3.4.5 Determinación del peso específico y absorción del árido grueso

Basada en la Norma ASTM C 127

El ensayo que a continuación se describe tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua expresada como porcentaje que absorbe el agregado grueso cuando se sumerge en agua por periodo de 24 horas.

Equipo

- Balanza que tenga 6 Kg. de capacidad o más y sensibilidad de 0.5 gr.
- Cesto cilíndrico de tela metálica (la cesta deberá ser hecha de malla metálica No 4)
- Un recipiente en el que se pueda sumergir la cesta de alambre y un aparato para suspender la cesta cuando se sumerge, con el fin de obtener el peso de la muestra sumergida.
- Horno de temperatura constante (105°C)
- Brocha para limpiar los tamices
- Fuentes o recipientes para secado o para pesaje

Procedimiento

Tabla 3.5 Cantidad mínima de muestra según TMN del agregado

Tamaño máximo nominal (mm)	Cantidad mínima de muestra (g)
12,5 ($\frac{1}{2}$)	2.000
19 ($\frac{3}{4}$)	3.000
25,0 (1")	4.000
37,5 ($1\frac{1}{2}$ ")	5.000
50 (2")	8.000

Fuente: Norma ASTM C 127

Se saca del cuarteo una muestra de aproximadamente 15 kg de agregado grueso.

- Se lava el agregado grueso a fin de remover impureza como limo arcilla o materia orgánica que cubra la superficie de las partículas

- Se sumerge la grava con agua por un periodo de 24 horas hasta obtener la saturación completa de las partículas.
- Se saca la muestra del agua y se secan las partículas con una toalla hasta que la película de agua haya desaparecido de la superficie.

Figura 3.27 Secado superficial de la grava



Fuente: Elaboración propia

- Se deberá evitar la evaporación durante esta operación.
- Se obtiene 5 kg de la muestra con sus partículas saturadas.

Figura 3.28 Pesaje de grava aprox. 5 kg



Fuente: Elaboración propia

- Colocar de manera rápida la muestra en el canastillo porta muestra.

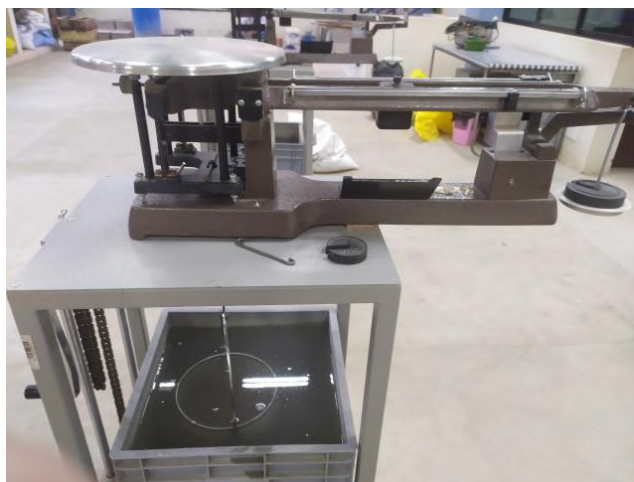
Figura 3.29 Peso de grava sumergida aprox.



Fuente: Elaboración propia

- La muestra se vuelve a sumergir después de ser pesada y se determina el peso de la muestra sumergida.

Figura 3.30 Peso de material sumergido



Fuente: Elaboración propia

- Retirar la muestra del canastillo y vaciar completamente a la fuente o recipiente, cuidando de no dejar partículas atrapadas en el canastillo y llevar al horno.

Figura 3.31 Balanza mecánica.



Fuente: Elaboración propia

- Se seca la muestra en un horno a temperatura constante (105°C) posteriormente se deja enfriar y se pesa en la balanza.

Figura 3.32 Secado del material en horno.



Fuente: Elaboración propia

- Registrar el peso de la muestra (grava) seca.

Figura 3.33 Pesaje de material



Fuente: Elaboración propia

Cálculos

$$\text{Peso Específico a granel} = \frac{A}{B - C}$$

Donde:

A= Peso de la muestra secada en horno, en gr.

B= Peso de la muestra saturada pero con superficie seca, en gr.

C= Peso de la muestra saturada dentro del agua, en gr.

$$\text{Peso Específico en condición saturado y superficie seca} = \frac{B}{B - C}$$

(-C) = Este término es la pérdida de peso de la muestra sumergida y significa por lo tanto el volumen de agua desplazado o sea el volumen de la muestra.

$$\text{Peso Específico Aparente} = \frac{A}{A - C}$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{B - A}{A} * 100$$

3.4.6 Determinación del peso específico y absorción del árido fino

Basada en la Norma ASTM C 128 y AASHTO T84

El ensayo que se describe a continuación tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua

que absorbe el agregado fino cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso.

Equipo

- Balanza digital con capacidad de 6 Kg y sensibilidad de 0,1 gr.
- Matraz de 500 ml de capacidad
- Molde cónico
- Varilla o pisón
- Secadoras
- Embudo
- Termómetro
- Pipeta
- Brocha y espátula

Procedimiento

- Se selecciona una muestra de 2 Kg aproximadamente, obtenida mediante cuarteo.

Se coloca la muestra dentro de un recipiente y se deja allí la arena sumergida en agua por un periodo de 24 horas. Luego que la arena queda totalmente saturada se debe escurrir el agua

Figura 3.34 Arena saturada y escurrimiento del agua



Fuente: Elaboración propia

- Se saca la muestra del recipiente, secar la arena con la ayuda de secadoras y revolver con una espátula de manera frecuente con el fin de obtener un secado superficial y uniforme.

Figura 3.35 Secado superficial de la arena



Fuente: Elaboración propia

- Se debe secar hasta obtener la arena en condición suelta, para reconocer el estado ideal se coloca el molde cónico en una superficie totalmente plana y lisa, se sujeta el molde y se llena con el árido en capas dando 25 golpes con el pisón en caída libre. Enrasar en la última capa.
- Remover el resto del material sobrante en la superficie y levantar el cono verticalmente.
- Si la muestra queda en forma del cónico significa que aún tiene humedad superficial y se deberá secar mas

Figura 3.36 Ensayo de prueba para ver si está seco superficialmente



Fuente: Elaboración propia

- Cuando el árido caiga suavemente sobre su talud natural, significará que el árido a alcanzado su condición saturada superficialmente seca.

Figura 3.37 Ensayo de prueba con arena seca superficialmente



Fuente: Elaboración propia

- Registrar el peso de los 3 matraz que serán usados

Figura 3.38 Pesaje de matraz de 500 ml



Fuente: Elaboración propia

- Se colocan 500 gr. de la muestra de arena en el matraz y luego se llena este con agua hasta el tope.

Figura 3.39 Llenado de arena en el matraz



Fuente: Elaboración propia

- Con el fin de eliminar burbujas de aire presentes en el matraz, se rueda el matraz sobre sí mismo
- Llenar de agua el matraz hasta los 500 ml y registrar el peso de matraz más material

Figura 3.40 Pesaje de material más matraz



Fuente: Elaboración propia

- Vaciar el contenido del matraz en un recipiente y secar en el horno de temperatura constante (105⁰C)

Registrar el peso de la muestra (arena) seca.

Cálculos

$$\text{Peso Específico a granel} = \frac{A}{V - W}$$

Siendo:

A= Peso en el aire de la muestra secada en horno, en gr.

V= Volumen del frasco, en ml.

W= Peso en gramos o volumen en ml del agua agregado al frasco, en gr.

$$\text{Peso Específico en condición saturado y superficie seca} = \frac{500}{V - W}$$

$$\text{Peso Específico} = \frac{A}{(V - W) - (500 - A)}$$

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{500 - A}{A} * 100$$

3.5 Diseño de mezcla – Dosificación de hormigón H-21 (Método ACI 211)

3.5.1 Procedimiento para el diseño de mezcla de hormigón

1. Para la dosificación se eligió H-21 para lo cual necesitaremos los ensayos de caracterización de los áridos:
 - ✓ Granulometría
 - ✓ Peso específico y absorción
 - ✓ Peso unitario
2. Mediante tabla 1 se determina la Resistencia característica la cual se calcula en función a la resistencia de diseño f_{ck}'

3. Según tabla 2 se selecciona el asentamiento S, el cual se determina según el tipo de construcción, sistema de colocación y tipo de compactación.
4. Mediante tabla 3 se determina la relación agua / cemento la cual se está en función a la resistencia de diseño f_{ck}'
5. En función al módulo de finura de la arena y el tamaño máximo del agregado grueso se selecciona el volumen del agregado grueso / volumen unitario del concreto, haciendo uso de la tabla 4
6. Mediante la tabla 5 se determina la cantidad de agua requerida en Kg/m^3

Posterior a obtener los anteriores datos de tabla se prosigue a realizar el cálculo correspondiente:

- ✓ Peso del agregado grueso (Kg/m^3)

$$P_g = \left(\frac{b}{b_0} \right) * PUC$$

- ✓ Peso del cemento (Kg/m^3)

$$P_c = \frac{A}{a/c}$$

- ✓ Volumen del agregado grueso (lt/m^3)

$$V_{ag} = \frac{P_g}{\gamma_g}$$

- ✓ Volumen del cemento (lt/m^3)

$$V_c = \frac{P_c}{\gamma_c}$$

- ✓ Volumen de la arena (lt/m^3)

$$V_a = 1000 - V_c - V_{ag} - A$$

- ✓ Peso del agregado fino (Kg/m^3)

$$P_{af} = V_a - \gamma_f$$

Corrección por materiales húmedos:

- ✓ Peso húmedo de la arena (Kg/m^3)

$$Pah = Paf * (1 + Ha)$$

- ✓ Peso húmedo de la grava (Kg/m^3)

$$Pag = Pg * (1 + Hg)$$

- ✓ Agua corregida de la grava (lt/m^3)

$$Acg = Pag * (Ag - Hg)$$

- ✓ Agua corregida de la arena (lt/m^3)

$$Acf = Paf * (Aa - Ha)$$

- ✓ Total agua corregida (lt/m^3)

$$Ac = Acg + Acf$$

3.5.2 Elaboración de Probetas cilíndricas

Se realizaron probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura para someterlas a ensayo de compresión y verificar que cumpla con la resistencia de diseño

Equipo

- Máquina mezcladora
- Balanza de capacidad de 60 Kg
- Cono de Abrams
- Base metálica del cono
- Varilla del cono
- 8 moldes para probetas
- Flexómetro
- Martillo de goma
- Jarra de 1lt
- Balde de 5 lt

- llaves N°17

Procedimiento

- Se debe pesar el material agregado grueso y fino para un determinado número de probetas. En nuestro caso se trabajó con material seco debido a que se tuvo que lavar el material y se dejó secar en su totalidad en el horno.

Figura 3.41 Material debidamente pesado y separado



Fuente: Elaboración propia

- Antes del vaciado con la ayuda de una brocha se debe colocar una capa fina de aceite a los moldes de acero

Figura 3.42 Preparación de los moldes



Fuente: Elaboración propia

- Se debe vaciar los componentes a la mezcladora, primeramente, el agua posteriormente los áridos y por último el cemento, evitar en lo posible la pérdida de material.

Figura 3.43 Vaciado de los componentes a la mezcladora



Fuente: Elaboración propia

- Mezclar todo hasta obtener una masa homogénea

Figura 3.44 Pasta homogénea



Fuente: Elaboración propia

- Seguidamente de manera rápida se debe realizar el ensayo Cono de Abrams, el cual consiste en vaciar el hormigón dentro del cono en 3 capas, cada capa se debe apisonar 25 golpes con la varilla.

Figura3.45 Ensayo de Asentamiento con cono de Abrams



Fuente: Elaboración propia

- Mediante este ensayo verificamos la altura de asentamiento en esta investigación tenemos un asentamiento teórico de 3'' en el ensayo se obtuvo un asentamiento de 6 cm, por tanto, se cumplió con el asentamiento deseado

Figura 3.46 Medición del asentamiento



Fuente: Elaboración propia

- Luego de adquirir el asentamiento deseado se procede al vaciado de las probetas que fueron armadas y aceitadas previamente al vaciado, se coloca la mezcla a un tercio de su altura y se apisona con varilla 25 golpes, posteriormente se realizan golpes con el martillo de goma, todo esto para eliminar en lo posible los vacíos. Repetir de la misma manera en las 3 capas.
- Por último con ayuda de una plancha enrazar y nivelar las probetas hasta que quedar totalmente lisas en su cara superior, porque será importante la uniformidad al momento de someterlas a compresión.

Figura 3.47 Probetas terminadas



Fuente: Elaboración propia

3.5.3 Curado de Probetas de hormigón

- Desmoldar después de 24 horas de vaciado y sumergir las probetas dentro de la piscina para su etapa de curado, hasta la realización del ensayo de compresión a los 7, 14 y 28 días.

Figura 3.48 Probetas en etapa de curado



Fuente: Elaboración propia

3.5.4 Resistencia a la compresión

El ensayo a compresión se llevó a cabo de acuerdo a la norma ASTM C39

Después de estar en la etapa de curado se debe sacar el espécimen 12 horas antes del ensayo a compresión. Para este ensayo se hizo uso de la Prensa hidráulica, la cual tiene una capacidad de 2000 KN

Figura 3.49 Prensa hidráulica



Fuente: Elaboración propia

- Previo a la ruptura de probetas, se debe obtener los datos de diámetro, altura y peso de la probeta para introducirlos en el equipo.

Figura 3.50 Medición y pesaje de la probeta



Fuente: Elaboración propia

- Muy importante contar con los dispositivos de compresión como los retenedores los cuales sirven para mayor fijación de las probetas al momento de la ruptura.

Figura 3.51 Retenedores Dispositivo para rotura a Compresión



Fuente: Elaboración propia

- Introducir los datos de peso, altura, diámetro y edad del espécimen. Para probetas de hormigón la Sens. varía de 10 a 30 KN y a una velocidad 0,25 MPa/s. En nuestra investigación colocamos una Sens= 20 KN

Figura 3.52 Introducción de datos en la Prensa Hidráulica



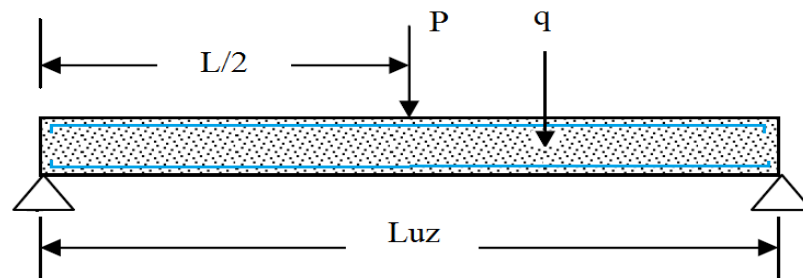
- Para fuerzas por unidad de superficie: $\text{kN/m}^2 \cong 100 \text{ kp/m}^2$
- Para fuerzas por unidad de volumen: $\text{kN/m}^3 \cong 100 \text{ kp/m}^3$
- Para momentos: $\text{kNm} \cong 100 \text{ kpm}$
- Para masa específica (densidad): kg/m^3

3.6.2 Cálculo Diseño a Flexión de Viga Rectangular de Hormigón Armado

❖ Modelo de carga

De acuerdo a los equipos y su dispositivo de flexión el esquema de carga más sencillo para realizar el ensayo se decidió colocar la viga simplemente apoyada con una carga vertical ubicada en el centro de la luz, como se ve en la siguiente figura.

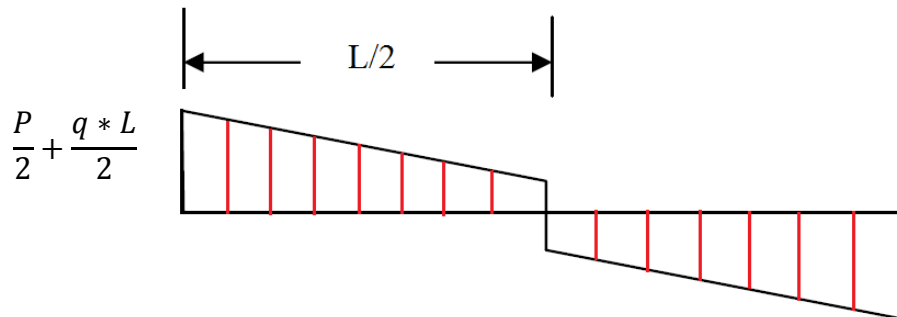
Figura 3.54 Modelo para realizar el ensayo



Fuente: Elaboración propia

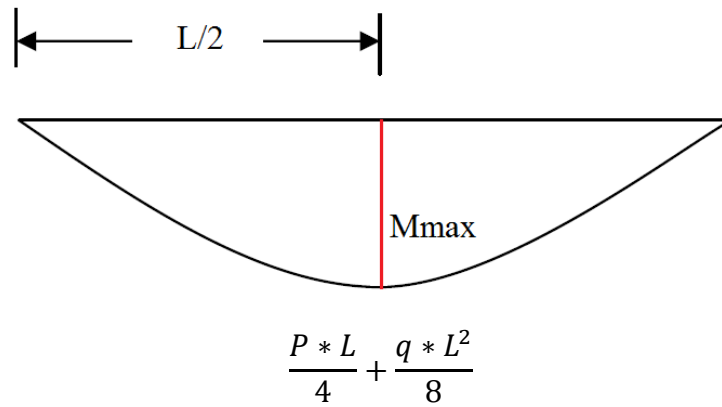
Según el esquema de carga mostrado, estaremos esperando un diagrama de fuerza cortante y momento flector de la siguiente forma:

Figura 3.55 Diagrama de corte para una viga simplemente apoyada



Fuente: Elaboración propia

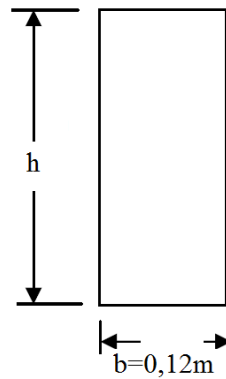
Figura 3.56 Diagrama de momento flector para una viga simplemente



❖ Geometría de viga

La viga es de 12 cm de ancho debido a que el dispositivo de la Prensa Universal es de solo 12 cm de ancho.

Figura 3.57 Sección inicial de la viga modelo para el ensayo



Fuente: Elaboración propia

❖ Datos de los materiales

Resistencia del hormigón $f'_c = 210 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 20593,965 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$

Fluencia del acero $f_y = 4200 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$

Módulo elástico del acero $E_s = 2000000 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$

Módulo elástico del concreto $E_o = 21000 * \sqrt{f_{ck}}$

❖ Cálculo de cargas

✓ Carga aplicada $P = 30 \text{ Ton} = 294,1995 \text{ KN}$

✓ Peso propio $q = ?$

Tentativa de altura de viga $h = 0,25 \text{ m}$

Peso específico del hormigón $\gamma_H = 25 \text{ KN/m}^3$

Ancho de la viga $b = 0,12 \text{ m}$

$$q = \gamma_H * b * h = 25 * 0,12 * 0,25$$

$$q = 0,75 \text{ KN/m}^3$$

❖ Cálculo de Momento máximo

$$M_{\max} = \frac{P * l}{4} + \frac{q * l^2}{8}$$

$$M_{\max} = \frac{294,2 * 1}{4} + \frac{0,75 * 1^2}{8}$$

$$M_{\max} = 73,644 \text{ KN.m}$$

❖ **Cálculo de la altura real de la viga**

✓ Esfuerzo flector $\sigma = \frac{M}{I} * y$

$$\sigma = \frac{\frac{M * \frac{h}{2}}{\frac{b * h^3}{12}}}{12} = \frac{12 * M * h}{2 * b * h^3} = \frac{6 * M}{b * h^2} = 210$$

✓ Despejando h tenemos

$$h = \sqrt{\frac{6 * M}{b * \sigma}} = \sqrt{\frac{6 * 73,64}{0,12 * 20593,965}} = 0,423 \text{ m}$$

Por tanto asumo una altura de viga

$$h = 0,45 \text{ m}$$

❖ **Cálculo del nuevo Momento máximo**

✓ Carga aplicada $P = 30 \text{ Ton} = 294,1995 \text{ KN}$

✓ Peso propio $q = ?$

Tentativa de altura de viga $h = 0,45 \text{ m}$

Peso específico del hormigón $\gamma_H = 25 \text{ KN/m}^3$

Ancho de la viga $b = 0,12 \text{ m}$

$$q = \gamma_H * b * h = 25 * 0,12 * 0,45$$

$$q = 1,35 \text{ KN/m}$$

✓ Momento máximo

$$M_{\max} = \frac{P * l}{4} + \frac{q * l^2}{8} =$$

$$M_{\max} = \frac{294,2 * 1}{4} + \frac{1,35 * 1^2}{8}$$

$$M_{\max} = 73,719 \text{ KN.m}$$

❖ **Cálculo de la armadura longitudinal**

- ✓ Resistencia límite de fluencia del acero corrugado

$$f_{yk} = 4200 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 411879,3 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

- ✓ Resistencia a compresión del hormigón

$$f_{yk} = 210 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 20593,965 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

❖ **Mediante métodos simplificados usamos las ecuaciones del Dominio III**

- ✓ Canto mínimo

$$d_{min} = 1,77 \sqrt{\frac{M_{max}}{b * f_{ck}}} = 0,3057 \text{ m}$$

- ✓ Esfuerzo reducido de cálculo

$$\mu_d = \frac{Md}{bw * d^2 * f_{ck}}$$

$$\mu_d = \frac{73,719}{0,12 * 0,3933^2 * 20593,965}$$

$$\mu_d = 0,193$$

- ✓ Esfuerzo reducido de cálculo

Conociendo μ_d usamos las tablas universales (Tabla 2.5) para hallar la cuantía mecánica.

Para $\mu = 0,19$ tenemos $\square = 0,2134$

Para $\mu = 0,2$ tenemos $\square = 0,2263$

Interpolando obtenemos la cuantía mecánica

$$W = 0,2173$$

- ✓ Cálculo del área de acero longitudinal

$$A_{s1} = w * bw * d * \frac{f_{ck}}{f_{yk}}$$

$$A_{s1} = 0,2173 * 12 * 39,33 * \frac{210}{4200}$$

$$A_{s1} = 5,1288 \text{ cm}^2$$

✓ Cálculo del área mínima

Según tabla para acero AE – 42

$$W_{smin} = 0,0033$$

$$W_{smin} = W_{smin} * bw * d$$

$$W_{smin} = 0,0033 * 12 * 39,33$$

$$W_{smin} = 1,5444$$

✓ Cálculo del número de barras

Con barras de acero de Ø 12 mm Se tiene $A'_1 = 1,13 \text{ cm}^2$

Nº de barras de acero:

$$\frac{A_1}{A'_1} = \frac{5,12}{1,13} = 3,94 \approx 4 \text{ barras}$$

Las vigas estarán diseñadas con 4 barras de acero de diámetro Ø = 12 mm

❖ Cálculo del Módulo de Elasticidad del concreto

$$E_o = 21000 * \sqrt{f_{ck}}$$

$$E_o = 21000 * \sqrt{210}$$

$$E_o = 29843490,55 \text{ KN/m}^2$$

❖ Cálculo de la deformación

✓ Para carga puntual

$$F1 = \frac{P * L^3}{48 * E * I}$$

$$F1 = 0,02254 \text{ cm}$$

- ✓ Para carga distribuida

$$F1 = \frac{5}{384} * \frac{q * L^4}{E * I}$$

$$F1 = 0,000064637 \text{ cm}$$

- ✓ Deflexión Total

$$F_T = 0,0226025 \text{ cm}$$

3.6.3 Cálculo Diseño a Cortante de Viga Rectangular de Hormigón Armado

❖ Datos de los Materiales

- ✓ Resistencia de acero corrugado

$$f_{yk} = 4200 \text{ Kg/cm}^2 = 411879,30 \text{ KN/m}^2$$

- ✓ Resistencia del concreto

$$f_{ck} = 210 \text{ Kg/cm}^2 = 20593,965 \text{ KN/m}^2$$

❖ Cálculo de cargas

- ✓ Carga Aplicada

$$P = 30 \text{ Ton} = 294,1995 \text{ KN}$$

- ✓ Peso propio

$$\gamma_H = 25 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

$$b = 0,12 \text{ m}$$

$$h = 0,45 \text{ m}$$

$$q = \gamma_H * b * h = 25 * 0,12 * 0,45 = 1,35 \frac{\text{KN}}{\text{m}}$$

$$q = 1,378 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}}$$

❖ Cálculo del Esfuerzo Cortante actuante

$$V_A = V_B$$

$$V_A = \frac{P}{2} + \frac{q * l}{2} =$$

$$V_A = \frac{30000}{2} + \frac{1,377 * 100}{2} =$$

$$V_A = 15068,850 \text{ Kg} = V_d$$

$$V_A = 147,825 \text{ KN}$$

❖ **Cálculo de Esfuerzo cortante absorbido por el hormigón**

$$V_{CU} = F_{vd} * bw * d$$

$$F_{vd} = 0,5 * \sqrt{F_{cd}}$$

$$F_{vd} = 0,5 * \sqrt{210} F_{vd} = 7,246 \text{ Kg/cm}^2 = 710,590 \text{ KN/m}^2$$

$$V_{CU} = 7,246 * 12 * 39,33 = 3419,675 \text{ Kg} = 33,547 \text{ KN}$$

$$V_{CU} < V_d \quad \text{Por tanto necesita armadura transversal}$$

❖ **Cálculo de la armadura mínima**

$$A_{Smin} = \frac{0,02 * f_{cd} * bw * s}{f_{yd}}$$

$$A_{Smin} = \frac{0,02 * 210 * 12 * 100}{4200} = 1,2 \text{ cm}^2$$

$$V_{su} = V_d - V_{cu}$$

❖ **Esfuerzo cortante máximo de agotamiento por compresión del alma**

$$V_{su} = 15068,85 - 3419,675 = 11649,175 \text{ Kg} = 114,278 \text{ KN}$$

$$V_{ou} = 0,3 * f_{cd} * bw * d$$

$$V_{ou} = 0,3 * 210 * 12 * 39,33 = 29733,480 \text{ Kg} = 291,685 \text{ KN}$$

$$V_{cu} < V_d < V_{ou}$$

❖ **Cálculo de la armadura transversal**

$$A_s = \frac{V_{su} * s}{0,9 * d * f_{yd}}$$

$$A_s = \frac{11649,175 * 100}{0,9 * 39,33 * 4200} = 7,836 \text{ cm}^2$$

$$A_{s_{p1}} = \frac{A_s}{2} = \frac{7,836}{2} = 3,918 \text{ cm}^2$$

Acero de $\varnothing = 6 \text{ mm}$ se tiene $A'_1 = 0,283 \text{ cm}^2$

$$\eta = \frac{A_{s_{p1}}}{A'_1}$$

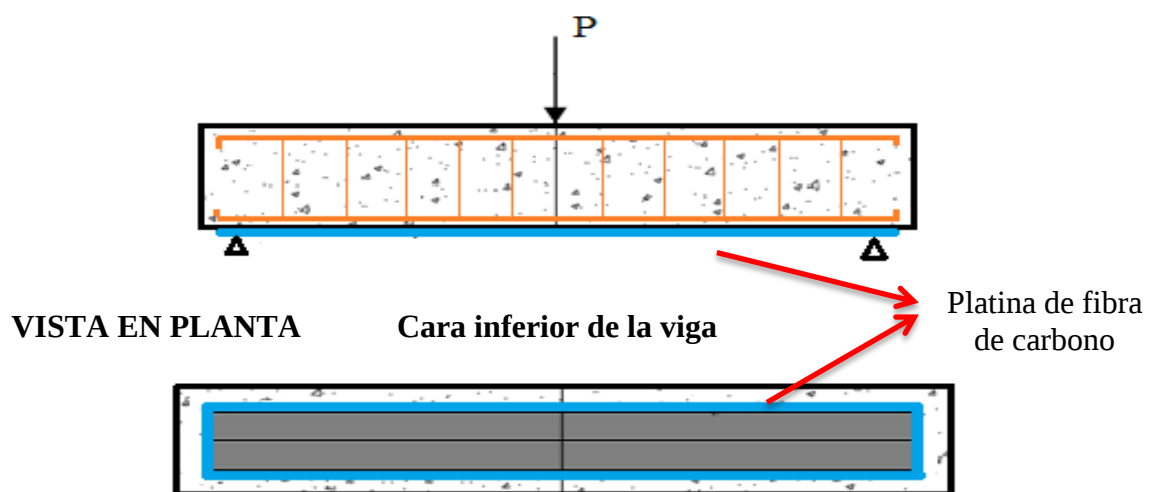
$$\eta = \frac{3,918}{0,283} = 13,84$$

$$\eta \approx 14 \text{ barras}$$

3.7 Diseño de Vigas de Hormigón Armado reforzadas con Fibra de Carbono (NORMA ACI 440. 2R-17)

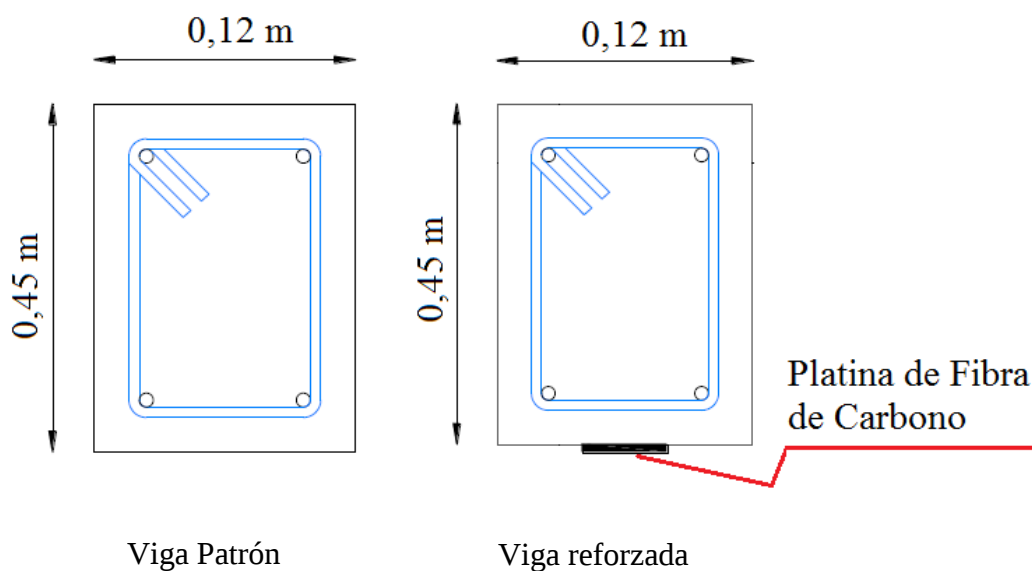
Figura 3.58 Viga vista perfil y vista en planta

VISTA PERFIL



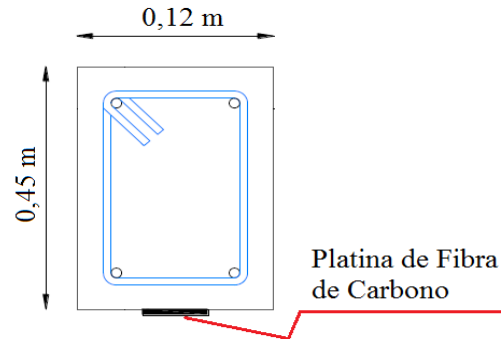
Fuente: Elaboración propia

Figura 3.59 Sección transversal de la viga con y sin refuerzo



❖ Características de los materiales

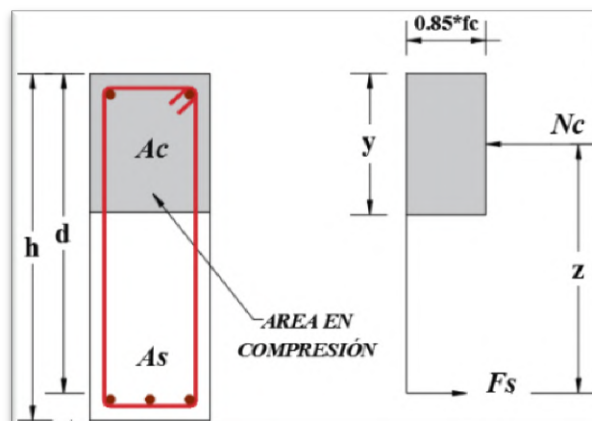
- ✓ Geometría de la viga: sección transversal



- ✓ Datos de los Materiales

- Resistencia característica del concreto $f_{ck} = 21 \text{ MPa}$
 - Límite elástico del acero $f_{yk} = 420 \text{ MPa}$
 - Módulo de elasticidad del acero $E_s = 200 \text{ GPa}$
 - Momento Ultimo sin reforzar $M_U = 73,719 \text{ KN-m}$
 - Área de Acero longitudinal de la viga $A_s = 4 \cdot 1,13 = 4,52 \text{ cm}^2$
- $$A_s = 0,000452 \text{ m}^2$$

❖ Verificación de la armadura para resistir a la flexión



$$F_s = A_s \cdot F_y =$$

$$F_s = 4,52 \cdot 420 = 0,018984 \text{ MN} = 189,84 \text{ KN}$$

$$y = \frac{F_s}{0,85 * f'_c * b}$$

$$y = \frac{0,18984}{0,85 * 21 * 0,12} = 0,0886 \text{ m}$$

✓ Resistencia nominal

$$M_n = \phi * F_s * h - r - d_{st} - \frac{d_b}{2} - \frac{y}{2}$$

$$M_n = 0,9 * 189,84 * (0,45 - 0,025 - 0,006 - 0,012 - \frac{0,088627}{2})$$

$$M_n = 61,967 \text{ KN-m}$$

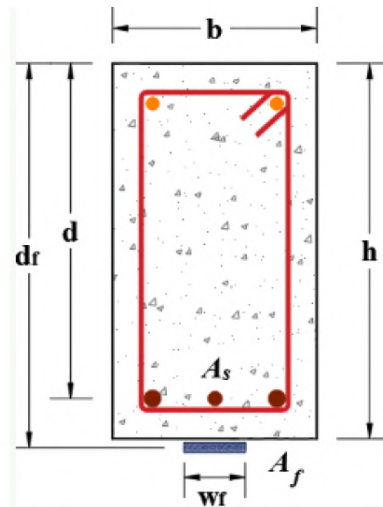
✓ Se verifica que se cumpla la siguiente condición

$$M_n \geq M_U$$

$$61,97 \geq 73,719 \quad \text{No cumple}$$

Al no cumplir la condición se deberá colocar un refuerzo adicional

❖ Resistencia FRP



✓ Características del refuerzo FRP

Tipo de Fibra= Carbono

Nº de capas = $n_f = 1$

Espesor = $t_f = 1,2$

Ancho de refuerzo $w_f = 50 \text{ mm}$

Deformación última de rotura $\varepsilon'_{fu} = 0,0166$

Tensión última de tracción $f'_{fu} = 2900 \text{ MPa}$

Factor reducción de resistencia $\Psi_f = 0,85$

Módulo de elasticidad de la fibra de carbono $E_f = 165 \text{ GPa}$

❖ Condiciones de exposición

El factor de reducción medio ambiental es obtenido de la Norma ACI 440. 2R el cual considera el tipo de fibra utilizada en el refuerzo y la condición de exposición del mismo

Exposure conditions	Fiber type	Environmental reduction factor C_E
Interior exposure	Carbon	0.95
	Glass	0.75
	Aramid	0.85
Exterior exposure (bridges, piers, and unenclosed parking garages)	Carbon	0.85
	Glass	0.65
	Aramid	0.75
Aggressive environment (chemical plants and wastewater treatment plants)	Carbon	0.85
	Glass	0.50
	Aramid	0.70

Condiciones de exposición = Exposición Interna

Factor de reducción medio ambiental $C_c = 0,95$

❖ Cálculo de las propiedades del material de diseño FRP

✓ Deformación última de rotura del refuerzo FRP

$$\varepsilon_{fu} = C_e * \varepsilon'_{fu} = 0,95 * 0,0166 = 0,01577$$

Para nuestro caso se considerará $C_e = 1$ debido a que es tipo experimental y no se hará afectar por factores de reducción.

$$\varepsilon_{fu} = C_e * \varepsilon'_{fu} = 1 * 0,0166 = 0,0166$$

✓ **Tensión última de tracción del refuerzo FRP**

$$f_{fu} = C_e * f'_{fu} =$$

$$f_{fu} = 0,95 * 2900 = 2755 \text{ MPa}$$

Para nuestro caso experimental $f_{fu} = 1 * 2900 = 2900 \text{ MPa}$

❖ **Cálculos preliminares**

✓ **Módulo de elasticidad del concreto**

$$E_c = 4700 * \sqrt{f'_c}$$

$$E_c = 4700 * \sqrt{21} = 21538,1058 \text{ MPa}$$

$$E_c = 21538105,77 \text{ KN/m}^2$$

✓ **Área del Refuerzo FRP**

$$A_f = n_f * t_f * w_f$$

$$A_f = 1 * 1,2 * 50 = 60 \text{ mm}^2$$

✓ **Relación entre el módulo de elasticidad del acero y concreto**

$$n = \frac{E_s}{E_c}$$

$$n = \frac{200000}{21538,106} = 9,2859$$

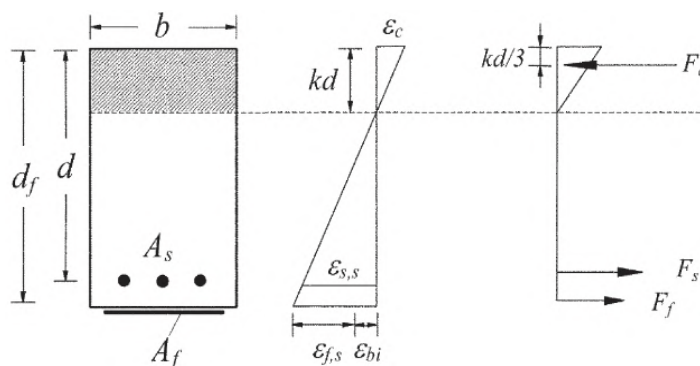
✓ **Altura útil del refuerzo de FRP**

$$d_f = h = 45 \text{ cm}$$

❖ Deformación específica inicial

La deformación específica inicial previo a la colocación del FRP se analiza considerando la acción de cargas muertas y considerando a la viga fisurada

$$\varepsilon_{fd} = \frac{M_D * (d_f - k * d)}{E_c * I_{cr}}$$



- ✓ Para el cálculo de la deformación en la cara inferior se deberá resolver la ecuación de segundo grado

$$\frac{b * kd^2}{2} + n * A_s * kd - n * A_s * d$$

Reemplazando $c=kd$ y despejando el valor de "c" tenemos

$$\frac{b * c^2}{2} + n * A_s * c - n * A_s * d$$

Despejando c

$$c = \frac{-n * A_s \pm \sqrt{(n * A_s)^2 + 2 * n * A_s * b * d}}{2 * b}$$

$$c = \frac{-9,2859 * 4,52 \pm \sqrt{(9,2859 * 4,52)^2 + 2 * 9,2859 * 4,52 * 12 * 40}}{2 * 12}$$

$$c1 = 7,246490417 \text{ cm} = 0,0724649 \text{ m}$$

$$c2 = -11,0645429 \text{ cm} = 0,11064543 \text{ m}$$

Consideramos para los cálculos el valor positivo de "c".

- ✓ **Momento de inercia crítico de la sección transformada y fisurada de hormigón**

$$I_{cr} = \frac{b * c_1^3}{3} + n * A_s * (d - c_1)^2$$

$$I_{cr} = \frac{12 * 7,2465^3}{3} + 9,2859 * 4,52 * (42 - 7,2465)^2$$

$$I_{cr} = 56859,69639 \text{ cm}^4$$

$$I_{cr} = 0,000568597 \text{ m}^4$$

- ✓ **El valor de la deformación de la fibra de hormigón al momento de instalación del refuerzo es de:**

$$\varepsilon_{bi} = \frac{MD * (d - c_1)}{E_c * I_{cr}}$$

$$\varepsilon_{bi} = \frac{0,09375 * (0,42 - 0,072465)}{21538105,77 * 0,000568597}$$

$$\varepsilon_{bi} = \frac{0,03258}{12246,5023} = 0,0000026824$$

$$\varepsilon_{bi} = 0,00026824 \text{ cm}$$

❖ **Determinación de la deformación del sistema FRP**

- ✓ **Deformación del refuerzo externo de FRP calculado de acuerdo a ensayos de flexión:**

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 * \sqrt{\frac{f'_c}{n_f * E_f * t_f}} =$$

$$\varepsilon_{fd} = 0,41 * \sqrt{\frac{21 \text{ N/mm}^2}{1 * 165000 \text{ N/mm}^2 * 1,2 \text{ mm}}}$$

$$\varepsilon_{fd} = 0,0042224$$

Para prevenir fisuración previa al modo de fallo de despegue, la deformación efectiva en el refuerzo FRP debe limitarse al nivel de deformación a la que esta puede ocurrir, tal como se define en ACI 440.2R

$$\varepsilon_{fd} \leq 0,9 * \varepsilon_{fu}$$

$$0,0042224 \leq 0,9 * 0.0158$$

Se cumple la condición mencionada

$$0,004222 \leq 0,014193 \quad \text{Cumple}$$

❖ Determinación de la deformación efectiva del refuerzo FRP

✓ **Deformación efectiva del refuerzo de FRP bajo condiciones de falla se obtiene con:**

$$\varepsilon_{fe} \leq \varepsilon_{fd}$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 * \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd}$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 * \left(\frac{450 - 150}{150} \right) - \varepsilon_{bi}$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 * \left(\frac{450 - 150}{150} \right) - 0,0000026824$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 * \left(\frac{450 - 150}{150} \right) - 0,0000026824$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,00599732 \leq \varepsilon_{fd}$$

$$0,005997318 \leq 0,0042224 \quad \text{No se cumple la condición}$$

Al no cumplirse la condición se aplicará:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fd} = 0,0042224$$

Para la profundidad del eje neutro elegida, como la segunda expresión controla el cálculo, la falla se encuentra en el FRP y no en el hormigón, por lo cual la deformación del hormigón tendrá que ser menor a 0.003 y se calcula con:

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) * \left(\frac{c}{d_f - c} \right)$$

$$\varepsilon_c = (0,0042224 + 0,00026824) * \left(\frac{150}{450 - 150} \right)$$

$$\varepsilon_c = 0,0022453$$

❖ Cálculo de la deformación en el acero de refuerzo existente

✓ Tensión del acero según su comportamiento elasto-plástico

$$f_s = E_s * \varepsilon_s$$

$$f_s = 200000 * 0,004041585$$

$$f_s = 808,318 \text{ MPa}$$

✓ Tensión del refuerzo FRP según su comportamiento elasto-plástico

$$f_{fe} = E_f * \varepsilon_{fe}$$

$$f_{fe} = 165000 * 0,0042224$$

$$f_{fe} = 696,696 \text{ MPa}$$

❖ Cálculo de las fuerzas internas resultantes y comprobación del equilibrio

✓ Máxima deformación del hormigón sin refuerzo correspondiente a la resistencia del hormigón f'_c .

$$\varepsilon'_c = \frac{1,7 * f'_c}{E_c}$$

$$\varepsilon'_c = \frac{1,7 * 21}{21538,106}$$

$$\varepsilon'_c = 0,00165753$$

- ✓ Con la tensión y deformación del acero y el FRP, se puede recalculer la profundidad del eje neutro “c” y verificar la estimación inicial con las siguientes ecuaciones:

$$\beta_1 = \frac{4 * \varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6 * \varepsilon'_c - 2 * \varepsilon_c}$$

$$\beta_1 = \frac{4 * 0,001658 - 0,0022453}{6 * 0,001658 - 2 * 0,0022453}$$

$$\beta_1 = 0,80380767$$

$$\alpha_1 = \frac{3 * \varepsilon'_c * \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{3 * \beta_1 * \varepsilon_c'^2} =$$

$$\alpha_1 = \frac{3 * 0,001658 * 0,0022453 - 0,0022453^2}{3 * 0,8038077 * 0,001658^2}$$

$$\alpha_1 = 0,92424628$$

$$c = \frac{A_s * f_s + A_f * f_{fe}}{\alpha_1 * f'_c * \beta_1 * b}$$

$$c = \frac{493,4 * 808,317 + 60 * 696,96}{0,92425 * 21 * 0,80381 * 120}$$

$$c = 235,367 \text{ mm}$$

$$c = 23,537 \text{ cm}$$

❖ **Recalculer la deformación efectiva del refuerzo FRP**

- ✓ Deformación efectiva del refuerzo de FRP bajo condiciones de falla se obtiene con:

$$\varepsilon_{fe} \leq \varepsilon_{fd}$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 * \left(\frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi}$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 * \left(\frac{450 - 235,367}{235,367} \right) - 0,0000026824$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,002733041$$

$$0,002733041 \leq 0,0042224 \quad \text{Cumple la condición}$$

❖ Cálculo del diseño a flexión de la sección

- ✓ La resistencia de diseño a la flexión se calcula utilizando

$$\phi M_n = \phi * [M_{ns} + \Psi_f * M_{nf}]$$

- ✓ Se aplica un factor de reducción $\psi_f=0.85$ adicional a la contribución del sistema FRP.

$$\phi M_{nf} = A_f * f_{fe} * \left(d_f - \frac{\beta_1 * c}{2} \right)$$

$$\phi M_{nf} = 60 * 696,96 * \left(450 - \frac{0,804 * 150}{2} \right)$$

$$\phi M_{nf} = 16296946 \text{ N.mm}$$

$$\phi M_{nf} = 16,297 \text{ KN.m}$$

❖ El momento resistente final es:

$$\phi M_n = \phi * M_{ns} + \phi * \Psi_f * M_{nf}$$

$$\phi M_n = 61,967 + 0,9 * 0,85 * 16,297$$

$$\phi M_n = 74,4342 \text{ KN.m}$$

❖ 3.13 El momento resistente final sin factores de reducción es:

$$\phi M_n = M_{ns} + M_{nf}$$

$$\phi M_n = 68,852 + 16,297$$

$$\phi M_n = 85,149 \text{ KN.m}$$

3.8 Elaboración de las vigas de hormigón armado

- Entramado de fierro, se colocaron 4 barras de fierro de 12 mm de diámetro, estribos de $\varnothing 6$ mm cada 7,5 cm y en la zona de compresión se colocaron 2 barras longitudinales de $\varnothing 10$ mm.

Figura 3.60 Entramado de la armadura pasiva



Fuente: Elaboración propia

- Se debe colocar la armadura dentro de los moldes o encofrado de madera previamente aceitado.

Figura 3.60 Armadura y encofrado de madera



Fuente: Elaboración propia

- Vaciado de las vigas, una vez que se haya vertido y colocado el hormigón en el encofrado se procede a la simulación de vibrado del hormigón con la ayuda de martillos de goma dando golpes alrededor del encofrado.

- Se colocan los dados de concreto los cuales tienen la función que el acero no quede expuesto y se mantenga la distancia correcta entre el acero y la superficie del hormigón, evitando problemas de corrosión.

Figura 3.60 Colocado de dados de concreto



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.60 Vaciado de vigas



Fuente: Elaboración propia

- Desencofrado de Vigas, después de un tiempo considerable se debe realizar el desencofrado y continuar con el curado de vigas. En nuestro caso de desencofró 3 días después del vaciado

Figura 3.60 Desencofrado de vigas



Fuente: Elaboración propia

- Por último se realiza el curado de las vigas que consiste en mantener húmedas el mayor tiempo posible, en nuestro caso se las regó por 3 semanas

Figura 3.60 Vigas en etapa de curación



Fuente: Elaboración propia

3.9 Aplicación del refuerzo a flexión PLATINAS DE FIBRA DE CARBONO

3.9.1 Preparación del Soporte

Con soporte nos referimos a la cara de viga donde se pegará la platina de fibra de carbono.

Con el fin de asegurar una buena adhesión entre el hormigón y el adhesivo tenemos que conseguir una superficie limpia y seca.

Mediante medios mecánicos con ayuda de una amoladora con disco de diamante, se realizó el pulido para eliminar las partes debilitadas de las vigas, posteriormente para mejorar el alisado se usó lija y por último brocha para el retiro de polvo

Figura 3.60 Uso de amoladora y lija para pulir



Fuente: Elaboración propia

3.9.2 Preparación de los Laminados Sika CarboDur.

Se procedió a cortar las platinas con una amoladora y disco de corte a una longitud de 85 cm. Se debe considerar cubrirse los brazos manos y rostro porque al cortar las láminas, estas desprenden finísimas partículas y al tener contacto con la piel provoca dolor.

- ✓ Se limpiaron las bandas de fibra de carbono con un trapo limpio para retirar el polvo y tenga la unión correcta con el adhesivo.
- ✓ Las platinas de cortaron con amoladora, de esta manera se logró un corte prolijo y con las medidas requeridas.

Figura 3.61 Uso de amoladora



Fuente: Elaboración propia

- ✓ Se trasladaron las vigas desde el laboratorio de Hormigones y Resistencia de Materiales al laboratorio de Tecnología de la Madera.

Figura 3.62 Uso de amoladora y lija para pulir



Fuente: Elaboración propia

3.9.3 Preparación del adhesivo

- ✓ Este material está constituido por dos componentes, el componente A tiene un peso de 4,5 kg y el componente B pesa 1,5 Kg

Figura 3.63 Uso de amoladora y lija para pulir



Fuente: Elaboración propia

- ✓ Siguiendo las especificaciones técnicas de este pegamento, se debe mezclar los dos componentes A y B en proporciones 1:3

Para cada viga se realizó la mezcla del pegamento por separado.

Entonces para para pegar 1 ml de lámina se necesita 450 gr del componente A y 150 gr del componente B. En un frasco o recipiente se pesa ambos componentes y se mezcla.

Figura3.64 Pesaje de los Componentes A y B



Op

Fuente: Elaboración propia

- ✓ Se debe mezclar los dos componentes durante al menos 3 minutos hasta obtener una pasta homogénea.

Figura3.65 Mezclado de los componentes A y B



Fuente: Elaboración propia

5. Aplicación del sistema de refuerzo platinas de fibra de carbono.

- ✓ Se aplicó una capa de adhesivo sobre la cara del hormigón con la ayuda de una espátula, hasta conseguir una película uniforme en toda la superficie.

Figura 3.66 Colocado del pegamento



Fuente: Elaboración propia

- ✓ Se aplicó una capa de adhesivo sobre el laminado, con ayuda de una espátula, hasta conseguir una película uniforme en toda la superficie.

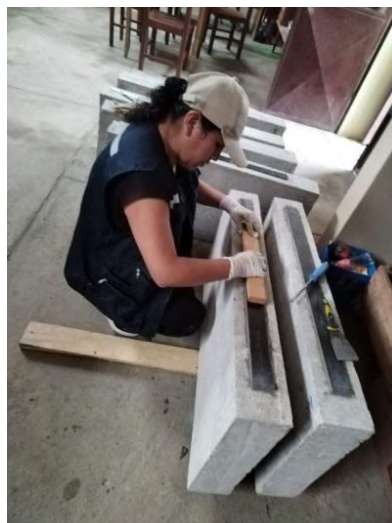
Figura 3.67 Colocado del pegamento en la lámina



Fuente: Elaboración propia

- ✓ Un encolado de buena calidad requiere una buena homogeneidad y un espesor uniforme de la película de adhesivo. Eso se consiguió ejerciendo una presión uniforme, que permitió evacuar el material sobrante, llevándose las burbujas de aire.

Figura 3.68 ejercer presión en la lámina pegada



Fuente: Elaboración propia

Las vigas fueron 1 viga patrón (sin refuerzo con platina de fibra de carbono), y 7 vigas con refuerzo de platinas de fibra de carbono de 5 cm de ancho y 0.12 cm de espesor.

Figura 3.69 Pegado de la fibra en todas las vigas



Fuente: Elaboración propia

3.10 Ensayo a flexión de Vigas de Hormigón Armado Sin y Con Refuerzo de Láminas de Fibra de Carbono

Para la presente investigación se va trabajar con la norma ASTM C293 “Determinar la Resistencia a la Flexión del concreto (Usando una viga con carga en el centro de la luz)”

Aparato para aplicar la carga: PRENSA UNIVERSAL

Para el ensayo de las vigas, se utilizó una máquina universal que está compuesta de un rodillo para aplicación de carga, y como apoyo se usó el dispositivo de flexión el cual cuenta con dos rodillos de acero de alta resistencia.

Figura 3.70 Prensa Universal



Fuente: Elaboración propia

- Se instala el dispositivo de flexión en el cual se ajusta los rodillos de apoyo previamente al inicio de los ensayos.

Figura 3.71 Instalación de rodillo de apoyo



Fuente: Elaboración propia

- Para colocarlas en su posición de ensayo definitiva se deben situar las vigas con la cara inferior apoyadas en los puntos de apoyo del dispositivo de flexión.

Figura 3.72 Colocado de vigas en la prensa universal



Fuente: Elaboración propia

El ensayo se realiza con carga monotónica, es decir la carga aumenta desde cero hasta la rotura sin producirse descargas, la carga debe actuar perpendicularmente a la cara de la probeta sin ninguna excentricidad.

Figura 3.73 Viga debidamente centrada en el dispositivo de flexión



Fuente: Elaboración propia

- Los ensayos fueron desarrollados con control de deformación mediante el uso de medidor dial. Este medidor de deformación tiene una precisión de 0,01 mm

Figura 3.74 Medidor dial



Fuente: Elaboración propia

- Primero se realizó el ensayo de rotura de la Viga N° 1 o Viga Patrón, esta viga no cuenta con refuerzo de platinas de fibra de carbono

Figura 3.75 Viga Patrón



Fuente: Elaboración propia

- Se realiza la lectura de la carga en intervalos de 5 KN y se registra la respectiva deformación

Figura 3.76 Lectura de Carga y Deformación



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.77 Indicador de carga en KN



Fuente: Elaboración propia

- Con el uso de un medidor dial se obtiene la deformación para cada carga ascendente.

Figura 3.78 Lectura de deformación



Fuente: Elaboración propia

- De la misma manera se realiza el ensayo de rotura de todas las vigas que tienen el refuerzo de fibra de carbono

Figura 3.79 Vigas ensayadas



Fuente: Elaboración propia

3.11 Aplicación del Software de Sika para Reforzamiento de Vigas de Hormigón Armado

El software de Sika CarboDur, es una herramienta de diseño que ayuda a dimensionar las secciones de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) necesarias para reforzar estructuras de concreto.

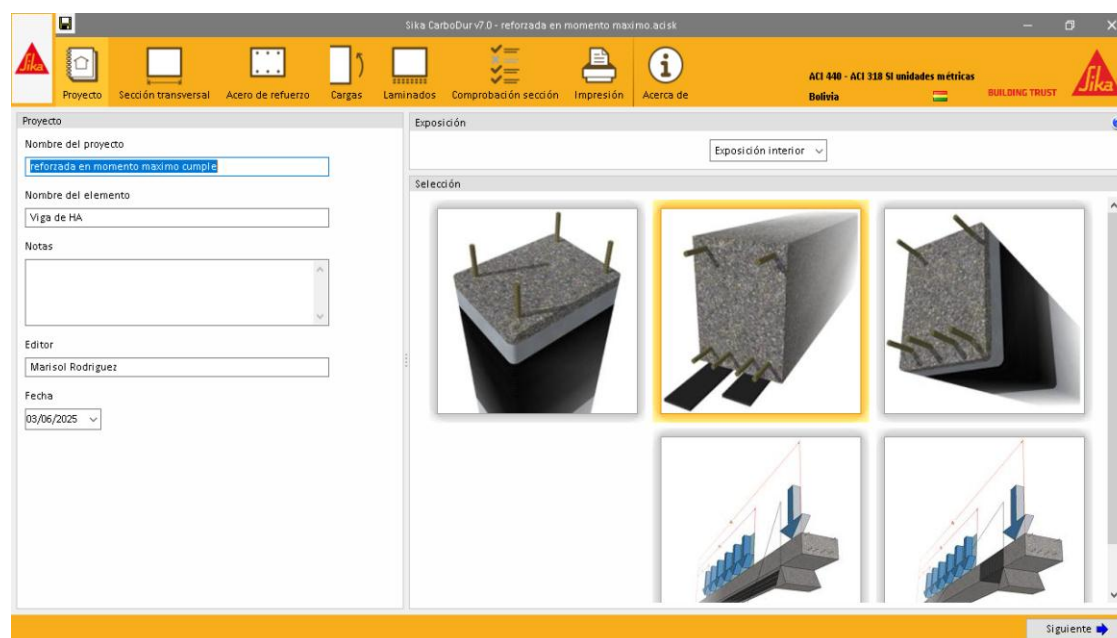
Los procedimientos de cálculo empleados en este programa están basados en la norma ACI.440-2R

Con este software realizaremos el diseño de refuerzo a flexión en vigas hormigón armado.

El cálculo incluye el dimensionado del FRP necesario, basado en los momentos actuantes en la sección crítica de una viga de concreto reforzado

Procedimiento

En la pantalla principal se debe introducir la información general que define al proyecto:



➤ Primera sección

✓ Paso 1 - Exposición exterior o exposición interior

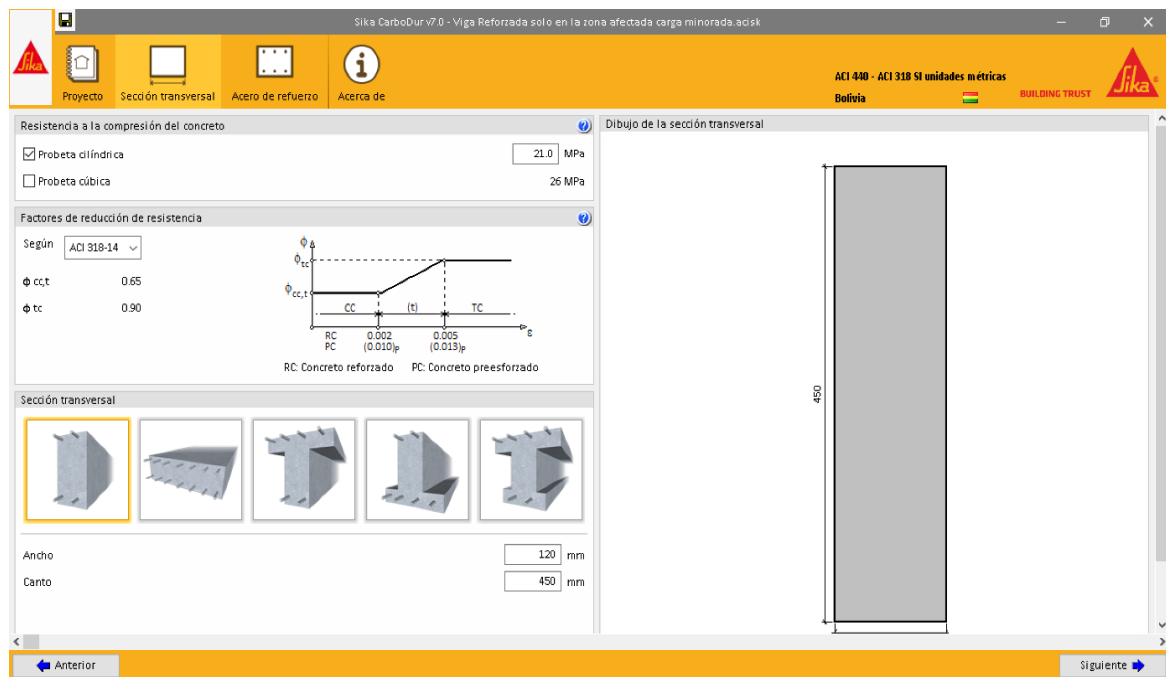
Optamos por elegir exposición interior debido a que nuestras vigas no serán afectadas por agentes medioambientales.

✓ Paso 2 – Elección del tipo de refuerzo

EL software de Sika nos da 5 opciones de refuerzo entre ellas flexión y cortante en vigas y confinamiento de pilares.

Para nuestro caso elegimos la opción de “refuerzo a flexión en vigas”

➤ Segunda sección



✓ Paso 3- Resistencia a Compresión del Concreto

Para esta investigación se realizaron probetas cilíndricas con resistencia a Compresión de 21 MPa

✓ Paso 4 - Factores de reducción de resistencia

El software trabaja con la norma ACI – 318 por ende nos proporciona factores de reducción de resistencia tales:

Para secciones controladas a compresión $\Phi = 0,65$

Para secciones controladas a tracción $\Phi = 0,90$

✓ Paso 5 - Selección de sección transversal

Se debe seleccionar una de las siguientes secciones básicas para el elemento:

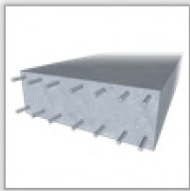
Rectangular

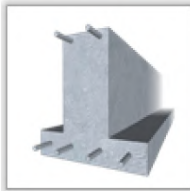
- Losa
- Viga en T
- Viga en T invertida
- Viga en doble-T

Elegimos la opción de sección rectangular

Luego se introduce el ancho y canto de la viga.

Sección transversal




Ancho

120 mm

Canto

450 mm

➤ Tercera sección

Acero de refuerzo superior

D1 (mm)	Acero	fy (MPa)	Definida	Núm. barras	Diámetro (mm)	Área (mm²)
1. 10	B400	400.00	Por barras	2	10	--

Acero de refuerzo inferior

D1 (mm)	Acero	fy (MPa)	Definida	Núm. barras	Diámetro (mm)	Área (mm²)
1. 12	B400	400.00	Por barras	4	12	--

Acero preesforzado

D1 (mm)	Acero	fpu (MPa)	fpy (MPa)	Definida	Núm. barras	Diámetro (mm)	Área (mm²)	fse (MPa)
---------	-------	-----------	-----------	----------	-------------	---------------	------------	-----------

Dibujo de la sección transversal

Diagrama de la sección transversal: Rectángulo con altura 450 mm y ancho 120 mm. Se muestran 2 barras de refuerzo superior y 4 barras de refuerzo inferior.

✓ Paso 6 - Acero de refuerzo superior e inferior

Nos da la opción de colocar el acero longitudinal superior e inferior.

En nuestro caso como acero de refuerzo superior se tiene 2 barras de Diámetro D1= 10 mm y en acero de refuerzo inferior se tiene 4 barras de Diámetro D1 = 12 mm.

Acero de refuerzo superior

D1 (mm)	Acero	fy (MPa)	Definida	Núm. barras	Diámetro (mm)	Área (mm²)
1. 10	B400	400.00	Por barras	2	10	--

Acero de refuerzo inferior

D1 (mm)	Acero	fy (MPa)	Definida	Núm. barras	Diámetro (mm)	Área (mm²)
1. 12	B400	400.00	Por barras	4	12	--

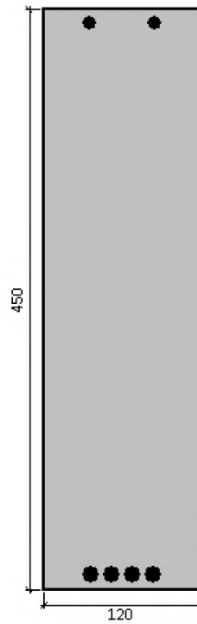
Acero preesforzado

D1 (mm)	Acero	fpu (MPa)	fpy (MPa)	Definida	Núm. barras	Diámetro (mm)	Área (mm²)	fse (MPa)
---------	-------	-----------	-----------	----------	-------------	---------------	------------	-----------

✓ Paso 7 - Acero preesforzado

También nos da la opción de colocar acero pretensado, pero en nuestro caso no contamos con acero pretensado

Posteriormente nos muestra la sección transversal de la viga con la disposición de la armadura.



➤ Cuarta sección

Sika CarboDur v7.0 - Viga Reforzada solo en la zona afectada carga minorada.adsk

Proyecto Sección transversal Acero de refuerzo Cargas Laminados Comprobación sección Impresión Acerca de

ACI 440 - ACI 318 SI unidades métricas
Bolivia BUILDING TRUST Sika

Cargas

Tipo de estructura: Isostática

Tipo de flexión: Positiva

Acciones iniciales: 64.00 kN-m

Cargas previstas: 0.17 kN-m

Cargas vivas: 75.50 kN-m

Combinaciones

Combinaciones de usuario

☒ Considerar límites del refuerzo

☐ La carga viva se considera constante

S_u (Límites del refuerzo) = $1.1 \cdot S_{uL} + 0.75 \cdot S_{uL}$

S_u (Cargas previstas) = $1.00 \cdot S_{uL} + 1.00 \cdot S_{uL}$

S_u (Estados límite de servicio) = $1.00 \cdot S_{uL} + 1.00 \cdot S_{uL}$

S_u (Caso de incendio) = $1.00 \cdot S_{uL} + 1.00 \cdot S_{uL}$

Resultados

Acciones iniciales ϕM_u (Sin refuerzo) $\geq M_u$ (Cargas iniciales); 67.71 kN-m $\geq$ 64.00 kN-m

Combinación mínima de cargas que debe resistir el elemento sin reforzar (ACI408.2R-17, Sección 5.2) ϕM_u (Sin refuerzo) $\geq M_u$ (Límites del refuerzo); 67.71 kN-m $\geq$ 56.81

Las cargas previstas deben exceder la capacidad resistente del elemento sin refuerzo ϕM_u (Sin refuerzo) $< M_u$ (Cargas previstas); 67.71 kN-m $<$ 75.67 kN-m

Alertas:

Cargas: No cumple estado de incendio

Laminados: No cumple - Estado Límite de Servicio.

Anterior Siiguiente

✓ **Paso 8 - Cargas**

- **Tipo de estructura**

Se debe indicar si el elemento es Isostático o Hiperestático. Se eligió la opción de Estructura Isostática

- **Tipo de flexión**

Nos da la opción de acciones positivas o negativas, en nuestro caso el refuerzo será en la zona del momento positivo

- **Cargas iniciales**

Se introduce el valor calculado de Momento ultimo o momento de diseño

- **Cargas previstas**

Se introduce el valor de cargas muertas y cargas vivas previstas, estas cargas vivas serán en nuestro caso la variación ascendente de cargas aplicado con la Prensa universal.

Cargas	
Tipo de estructura	Isostática
Tipo de flexión	Positiva
Acciones iniciales	64.00 kN·m
Cargas previstas	
Cargas muertas	0.17 kN·m
Cargas vivas	75.50 kN·m

✓ Paso 9 - Combinaciones

Combinaciones

Combinaciones de usuario

☒ Considerar límites del refuerzo

☐ La carga viva se considera constante

$S_u(\text{Límites del refuerzo}) = 1.1 \cdot S_{DL} + 0.75 \cdot S_{LL}$
 $S_u(\text{Cargas previstas}) = 1.00 \cdot S_{DL} + 1.00 \cdot S_{LL}$
 $S_u(\text{Estados límite de servicio}) = 1.00 \cdot S_{DL} + 1.00 \cdot S_{LL}$
 $S_u(\text{Caso de incendio}) = 1.00 \cdot S_{DL} + 1.00 \cdot S_{LL}$

✓ Paso 10 - Resultados de combinaciones

• Primera comprobación - Acciones Iniciales

Muestra las comprobaciones preliminares relativas a la actuación de la viga no reforzada en comparación con las cargas iniciales.

La primera verificación comprende las cargas iniciales durante la instalación del refuerzo. El software comprueba que estas fuerzas no exceden la resistencia inicial del elemento sin reforzar. Esta condición debe cumplirse para continuar con el cálculo.

Acciones iniciales

$$\phi M_n(\text{sin refuerzo}) \geq M_u (\text{cargas iniciales}); 67.71 \text{ KN.m} \geq 64.00 \text{ KN.m}$$



- **Segunda Comprobación - Combinación mínima de cargas que debe resistir la viga sin el refuerzo FRP**

La segunda verificación comprueba si el elemento existente es capaz de soportar una combinación mínima de las cargas en caso de que el FRP pierda eficacia. Se muestra el nivel de carga admisible con respecto a la carga prevista. Esta condición debe cumplirse para continuar con el cálculo

Combinación mínima de cargas que debe resistir el elemento sin reforzar (ACI 440.2R-17)

$$\phi Mn(\sin \text{refuerzo}) \geq Mu \text{ (límite del refuerzo)}; 67.71 \text{ KN.m} \geq 56,81 \text{ KN.m}$$



- **Tercera Comprobación – Las cargas previstas deben exceder la capacidad resistente de la viga sin refuerzo FRP**

El tercer esquema comprueba que las cargas solicitadas exceden la capacidad del elemento existente, no reforzado. Esta condición debe ser obviamente verificada para continuar con el cálculo.

Las cargas previstas deben exceder la capacidad resistente del elemento sin refuerzo

$$\phi Mn(\sin \text{refuerzo}) < Mu \text{ (cargas previstas)}; 67.71 \text{ KN.m} < 75,67 \text{ KN.m}$$



- **Cuarta Comprobación – Resistente de la viga sin refuerzo FRP en caso de incendio**

La última imagen muestra el caso en el que el esfuerzo en caso de incendio puede ser resistido inicialmente por la viga no reforzada con FRP (considerando que el FRP desprotegido esta dañado debido a las altas temperaturas). En este caso no cumple con esta combinación a pesar de ello el software permite realizar el cálculo, pero el documento de impresión resalta la necesidad de protección para el FRP.

Resistencia del elemento sin refuerzo en caso de incendio

$$\phi Mn(\sin \text{refuerzo}) \geq Mu (\text{caso de incendio}); 75,24 \text{ KN.m} \leq 75,67 \text{ KN.m}$$



➤ Quinta sección

Sika CarboDur v7.0 - Viga Reforzada solo en la zona afectada carga minorada adsk

Proyecto Sección transversal Acero de refuerzo Cargas Laminados Comprobación sección Impresión Acerca de

ACI 440 - ACI 318 SI unidades métricas
Bolivia BUILDING TRUST Sika

Materiales

☒ Refuerzo FRP principal

Disposición: Pegado

Sika CarboDur® S Sika® CarboDur® SS12

Ancho: 50.0 mm; Espesor: 1.200 mm; Modulo elástico: 165.00 GPa; Alargamiento: 16.60 %

☐ Refuerzo FRP lateral

Refuerzos

☒ Considerar límites de tensión en servicio para el dimensionamiento

Principal: 1 + 0 + 0

Superficie inferior: 1 + 0 + 0

Dibujo de la sección transversal

Cargas: No cumple estado de incendio

Laminados: No cumple - Estado Límite de Servicio.

Anterior Sigiente

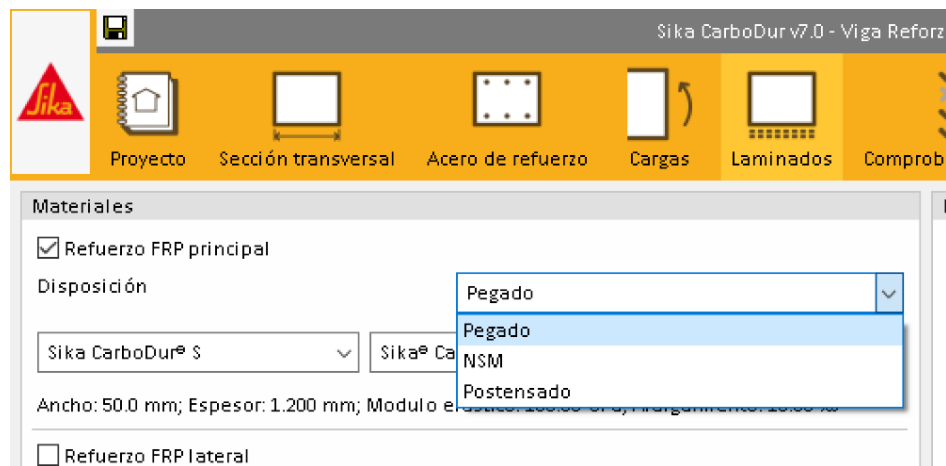
✓ Paso 11 - Materiales

- Refuerzo FRP Disposición

Nos da 3 opciones para el tipo de aplicación

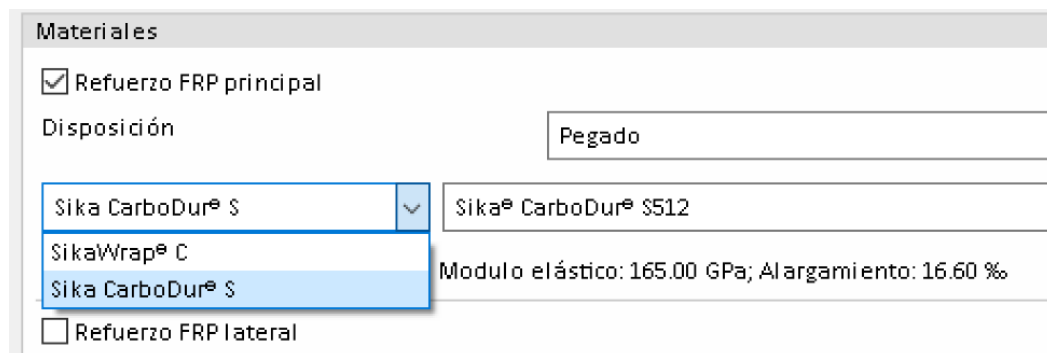
- Simplemente adherido.
- Aplicación NSM (Near Surface Mounted).
- CFRP postesado (SikaR CarboStress) para Vigas isostáticas.

En nuestro caso se debe elegir aplicación por Pegado



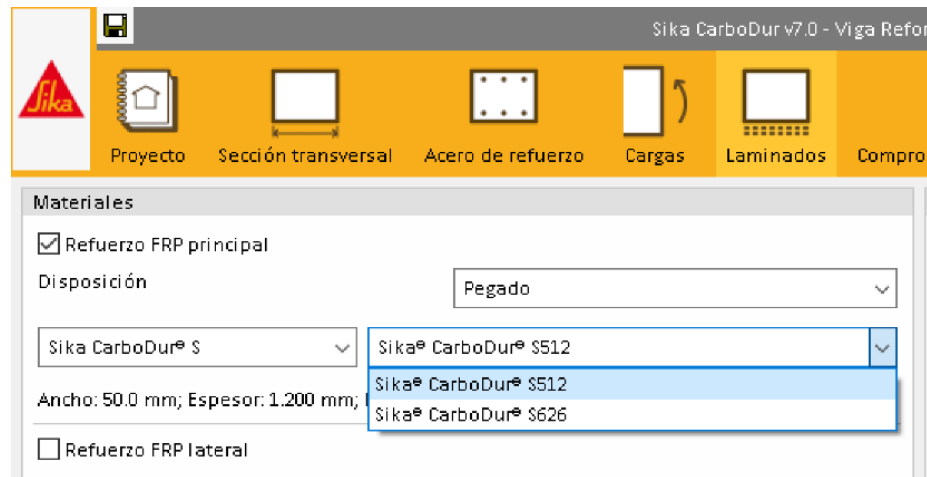
- **Tipo de FRP**

Se debe seleccionar el tipo de FRP se tiene la opción de SikaWrap, Sika CarboDur. Elegimos Sika CarboDur S

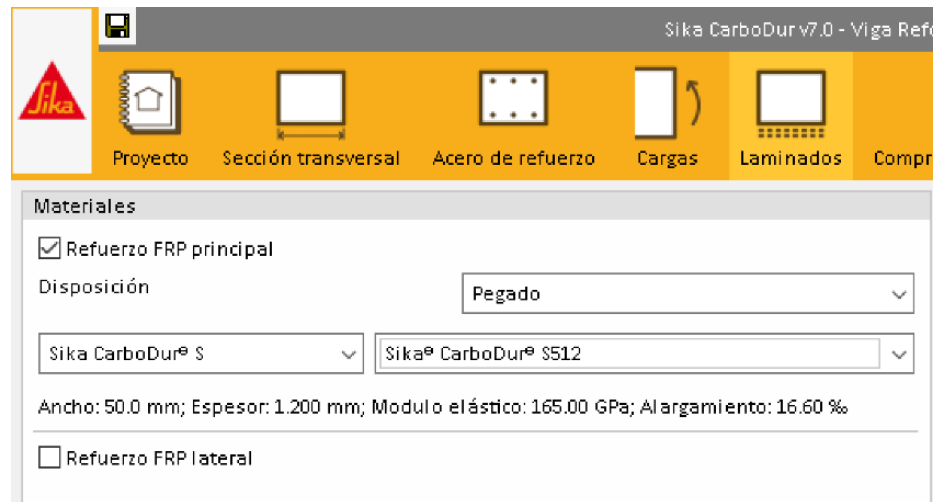


- **Tipo de Sika Carbodur**

Nos muestra 2 opciones, Sika Carbodur S512 y Sika Carbodur S626. En nuestro caso se usó platinas Sika Carbodur S512 (ancho = 5 mm; espesor = 1,2 mm)



Posteriormente nos muestra de forma automática las características del FRP elegido



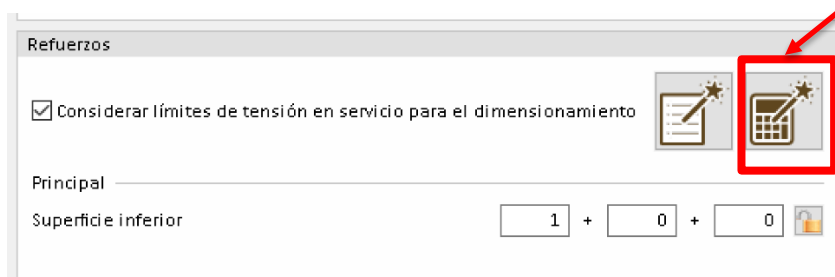
- **Refuerzo lateral**

Nos da la opción de colocar refuerzo lateral, comprende la opción de disponer laminados FRP adicionales en ubicaciones alternativas (por ejemplo, ambos lados de la viga, perímetro de la viga, etc.). en esta investigación no se usó refuerzo lateral.

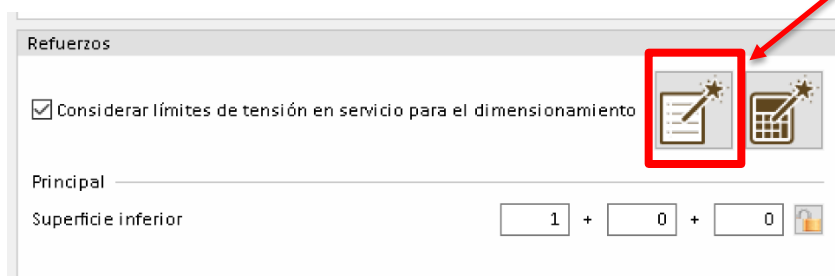
✓ Paso 2 - Refuerzos

Se puede proceder al dimensionamiento de FRP de 3 maneras diferentes

1.- Cálculo automático, haciendo clic en el icono de la calculadora. El software definirá automáticamente el número de laminados FRP necesarios, mediante las secciones seleccionadas previamente por el usuario. El software determinará el número necesario de laminados como "refuerzo principal". Si el refuerzo principal no es suficiente para conseguir la resistencia necesaria, el software mostrará automáticamente laminados FRP adicionales como refuerzo lateral.

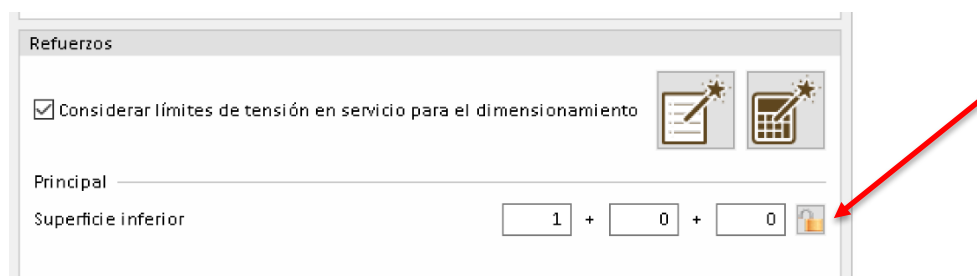


2.- Cálculo semi-automático. Al hacer clic en el icono "lista de papel", el software mostrará las diferentes combinaciones de FRP que se mostraran como "refuerzo principal" que cumplen con la resistencia solicitada. Estas secciones corresponden a la gama de productos Sika seleccionada por el usuario en la sección "refuerzo principal".



3-Disposición FRP definida por el usuario: el usuario puede definir manualmente el número y el tipo de laminados FRP a mostrar. Los candados que se muestran junto a los cuadros se utilizan para bloquear el valor para el cálculo automático. Si se

bloquea, esa variable se mantendrá inalterable si se utiliza el "Calculo automático", y el software proporcionará una solución valida teniendo en cuenta



➤ Sexta sección

Por último, nos muestra la disposición FRP necesaria según el resultado del cálculo.

Acciones de diseño previstas

$$\Phi M_n (\text{con refuerzo FRP}) = 79,14 \text{ KN.m}$$



➤ **Conclusiones de resultados del Software de Sika:**

En el software no se pudo colocar las cargas reales que se aplicó a la viga debido a que al colocarse dicha carga, en el programa no se cumple las comprobaciones de la Cuarta sección, por ende no realiza el cálculo correspondiente.

Pese a que no se pudo trabajar con las cargas previstas reales, se pudo realizar el cálculo con la carga inicial logrando que el software realice el cálculo con una banda de Fibra de Carbono.

El resultado que se obtuvo con el software es similar al resultado que se obtuvo mediante fórmulas en planillas de Excel bajo la Norma ACI 440.2R-17

Se puede observar con estos resultados, que los valores adquiridos son muy conservadores ya que aumenta la resistencia a flexión en un 25 % al colocar Fibra de carbono como refuerzo. Cumpliendo con las recomendaciones del ACI 440.2R-17 la cual nos indica que a pesar de que se han documentado aumentos en la resistencia a la flexión del 10 al 160 % , sin embargo cuando se tiene en cuenta los límites de refuerzo y los límites de ductilidad y servicio, los aumentos de resistencia de hasta 40 % son más razonables y confiables.

CAPÍTULO IV



CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se interpretarán los resultados obtenidos de los ensayos realizados.

4.1 Ensayos de los agregados

4.1.1 Análisis Granulométrico del agregado fino

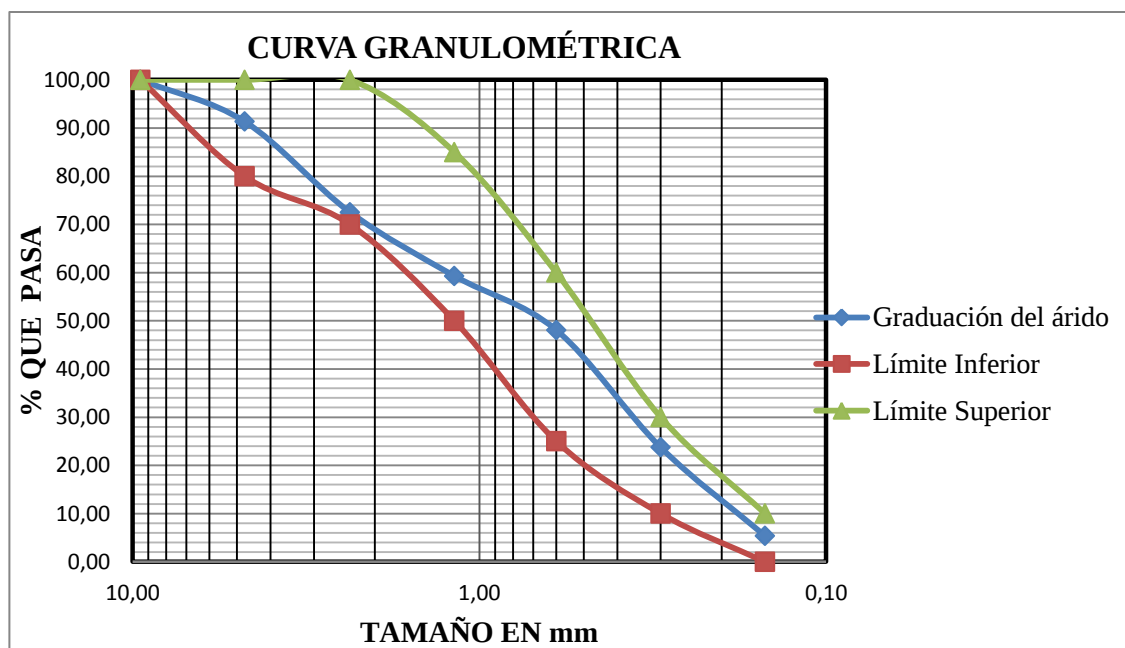
Tabla 4.1 Análisis Granulométrico del agregado fino

Peso Total (gr)			1000,00				
Tamices	tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% q. pasa del total	Especificación ASTM C-33	
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
Nº4	4,75	86,45	86,45	8,65	91,36	80	100
Nº8	2,36	188,30	274,75	27,48	72,53	70	100
Nº16	1,18	132,15	406,90	40,69	59,31	50	85
Nº30	0,60	112,25	519,15	51,92	48,09	25	60
Nº50	0,30	243,50	762,65	76,27	23,74	10	30
Nº100	0,15	183,55	946,20	94,62	5,38	2	10
BASE		47,30	993,50	99,35	0,65		
	SUMA	993,50					
	PÉRDIDAS	6,50					
	MF =	3,00					

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo como resultado del módulo de finura igual a 3,00 el cual está dentro del rango según especificaciones técnicas en el cual indica que no debe ser menor a 2,2 ni mayor a 3,2.

Figura 4.1 Curva Granulométrica del agregado fino (arena)



Fuente: Elaboración propia

Analizando la curva granulométrica se determina que el material fino obtenido del río Santa Ana es apto para hormigón H-21 ya que se observa una gradación adecuada y se encuentra dentro de los límites establecidos en especificaciones técnicas.

4.1.2 Análisis Granulométrico del agregado grava

Tabla 4.2 Análisis Granulométrico del agregado grueso (grava)

Peso Total (gr.) = 10000							
Tamiz	Tamaño (mm)	Peso Retenido	Retenido Acumulado		% q. pasa del total	Especificaciones ASTM C33	
			(gr)	(%)			
2 1/2"	63	0,00	0,00	0,00	100,0	100	100
2"	50,8	0,00	0,00	0,00	100,0	100	100
1 1/2"	38,10	0,00	0,00	0,00	100,0	95	100
1"	25,40	0,00	0,00	0,00	100,0		

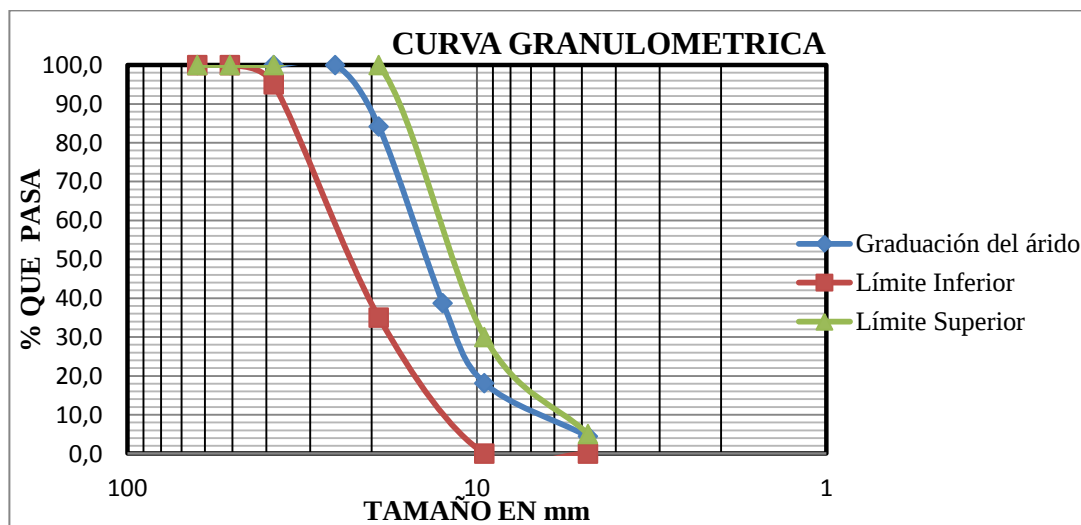
3/4"	19,05	1587,68	1587,68	15,88	84,1	10	30
1/2"	12,50	4540,16	6127,84	61,28	38,7	0	5
3/8"	9,50	2059,04	8186,88	81,87	18,1		
Nº4	4,80	1371,20	9558,08	95,58	4,4	0	5
BASE	0	437,44	9995,52	99,96	0,0		
SUMA =		9995,52					
PÉRDIDAS =		4,48					
MF =		6,93					

TAMAÑO MAXIMO	1"
----------------------	----

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo como resultado del módulo de finura igual a 6,93 el cual está dentro del rango según especificaciones técnicas en el cual indica que no debe ser menor a 6,6 ni mayor a 7,3.

Figura 4.2 Curva Granulométrica del agregado grueso (grava)



4.2 Diseño de mezclas (Método-ACI 211)

Sus resultados nos indican que, por cada unidad de cemento, se va a utilizar, 1,88 unidades de agregado fino, y 2,96 unidades de agregado grueso para obtener una resistencia $f_c' 210 \text{ kg/cm}^2$, determinando así una adecuada mezcla para las vigas en estudio.

Tabla 4.3 Proporciones de mezcla

PROPORCIONES DE MEZCLA

Cemento	Arena	Gravilla
1,0	1,88	2,96

Fuente: Elaboración propia

4.3 Ensayo a Compresión de probetas cilíndricas (Método ASTM C 39)

Tabla 4.4 Resistencia adquirida a los 7 y 14 días

Nº	Identificación	F. de Vaciado	F. de Rotura	Edad (días)	Área (cm ²)	Lectura (KN)	Carga (Kg)	Resist. (Kg/cm ²)	Proyección 28d (Kg/cm ²)
1	Probeta 1	05/08/2022	12/08/2022	7	176,72	298,50	30.447,00	172,29	239,17
2	Probeta 2	05/08/2022	12/08/2022	7	176,72	301,00	30.702,00	173,74	241,18
3	Probeta 3	05/08/2022	19/08/2022	14	176,72	341,00	34.782,00	196,83	231,56
4	Probeta 4	05/08/2022	19/08/2022	14	176,72	342,00	34.884,00	197,40	232,24

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.5 Resistencia adquirida a los 28 días

Nº	Identificación	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad (días)	Área (cm ²)	Lectura (KN)	Carga (Kg)	Resist. (Kg/cm ²)
1	Probeta 5	05/08/2022	02/09/2022	28	176,72	437,40	44.614,80	252,47
2	Probeta 6	05/08/2022	02/09/2022	28	176,72	428,00	43.656,00	247,04

3	Probeta 7	05/08/2022	02/09/2022	28	176,72	440,50	44.931,00	254,26
4	Probeta 8	05/08/2022	02/09/2022	28	176,72	438,60	44.737,20	253,16

Fuente: Elaboración propia

Se observa que las probetas alcanzaron su resistencia para las que fueron diseñadas $f_c=210 \text{ kg/cm}^2$

4.4 Análisis de los resultados de carga y deformación

VIGA 1 “Viga Patrón”

Tabla 4.6 Viga 1-Datos obtenidos de la Prensa Universal y cálculo de momento

Nº	Carga Aplicada	Deformación	Momento
	KN	mm	KN-m
1	0	0	0,00
2	1	0,21	0,25
3	2	0,3	0,50
4	3	0,4	0,75
5	4	0,55	1,00
6	5	0,62	1,25
7	6	0,67	1,50
8	7	0,71	1,75
9	8	0,74	2,00
10	9	0,77	2,25
11	10	0,81	2,50
12	11	0,85	2,75
13	12	0,88	3,00
14	13	0,9	3,25
15	14	0,93	3,50
16	15	0,97	3,75
17	16	1	4,00
18	17	1,03	4,25
19	18	1,06	4,50
20	19	1,09	4,75
21	20	1,11	5,00
22	21	1,13	5,25

23	22	1,17	5,50
24	23	1,19	5,75
25	24	1,22	6,00
26	25	1,24	6,25
27	26	1,27	6,50
28	27	1,29	6,75
29	28	1,31	7,00
30	29	1,34	7,25
31	30	1,36	7,50
32	31	1,38	7,75
33	32	1,4	8,00
34	33	1,42	8,25
35	34	1,45	8,50
36	35	1,47	8,75
37	36	1,49	9,00
38	37	1,5	9,25
39	38	1,52	9,50
40	39	1,54	9,75
41	40	1,55	10,00
42	41	1,59	10,25
43	42	1,6	10,50
44	43	1,62	10,75
45	44	1,63	11,00
46	45	1,65	11,25
47	46	1,67	11,50
48	47	1,69	11,75
49	48	1,71	12,00
50	49	1,73	12,25
51	50	1,75	12,50
52	51	1,77	12,75
53	52	1,79	13,00
54	53	1,81	13,25
55	54	1,83	13,50
56	55	1,85	13,75
57	56	1,87	14,00
58	57	1,9	14,25
59	58	1,91	14,50
60	59	1,91	14,75
61	60	1,92	15,00
62	60,5	4	15,13

63	61	3,85	15,25
64	70	-	17,50
65	80	-	20,00
77	230	-	57,50

Primera fisura		Falla final	
Carga (KN)	Deformación (mm)	Carga última (KN)	Deformación última (mm)
60,5	4	230	-

Fuente: Elaboración propia

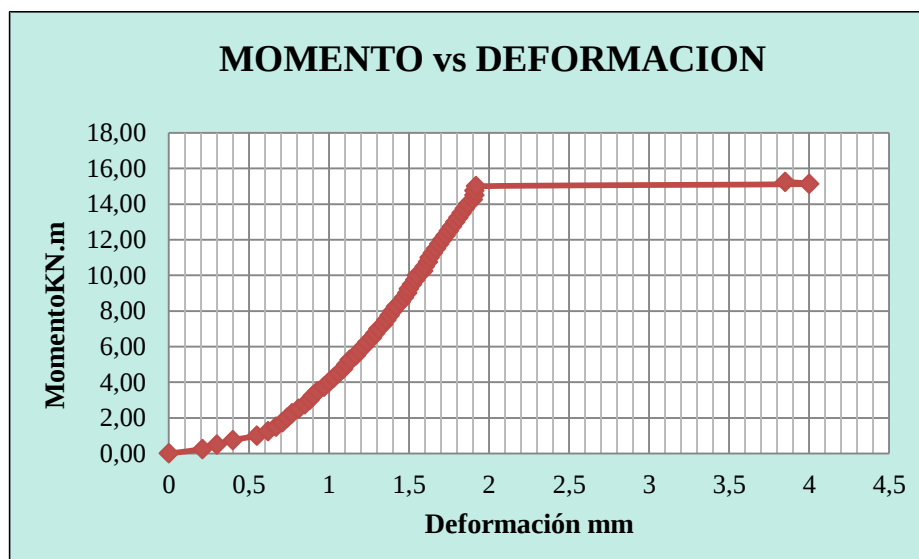
Figura 4.3 Curva Carga vs Deformación - Viga 1



Fuente: Elaboración propia

Se observa las primeras fisuras en la viga tan delgadas aun mas que el grosor de un cabello, al marcar una carga aplicada de 60 KN

Figura 4.4 Curva Momento vs Deformación – Viga 1



Fuente: Elaboración propia

Esta viga no cuenta con platinas de fibra de carbono, se presenta la primera fisura a una carga de 60 KN y una deformación máxima de 4 mm. Se pudo anotar como carga máxima 230 KN.

VIGA 2 “Viga Reforzada con Lámina De Fibra De Carbono”

Tabla 4.7 Viga 2-Datos obtenidos de la Prensa Universal y cálculo de momento

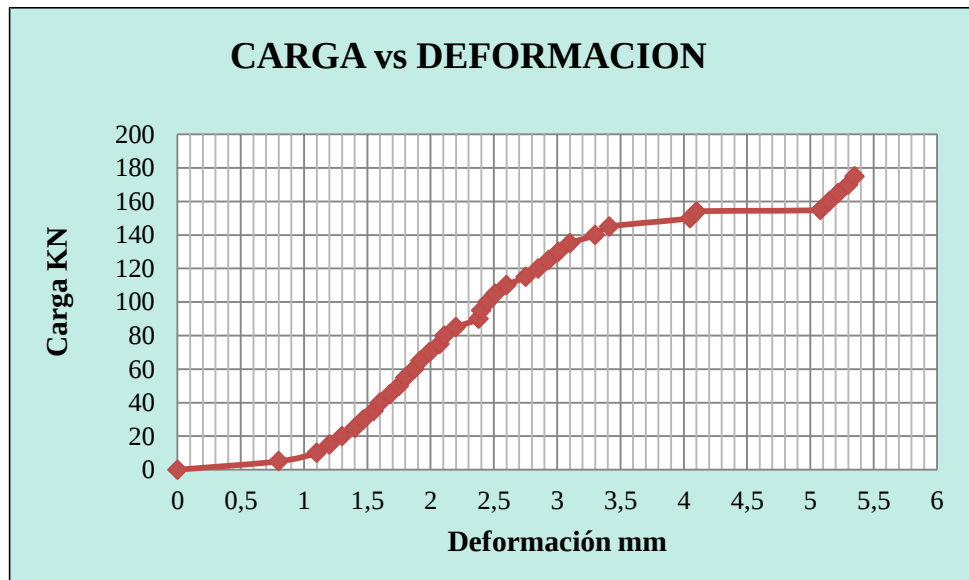
Nº	Carga Aplicada	Deformación	Momento
	KN	mm	KN-m
1	0	0	0,00
2	5	0,8	1,25
3	10	1,1	2,50
4	15	1,2	3,75
5	20	1,3	5,00
6	25	1,4	6,25
7	30	1,47	7,50
8	35	1,55	8,75
9	40	1,6	10,00

10	45	1,68	11,25
11	50	1,75	12,50
12	55	1,8	13,75
13	60	1,87	15,00
14	65	1,92	16,25
15	70	1,99	17,50
16	75	2,07	18,75
17	80	2,11	20,00
18	85	2,2	21,25
19	90	2,38	22,50
20	95	2,4	23,75
21	100	2,45	25,00
22	105	2,51	26,25
23	110	2,6	27,50
24	115	2,75	28,75
25	120	2,85	30,00
26	125	2,93	31,25
27	130	3,01	32,50
28	135	3,1	33,75
29	140	3,3	35,00
30	145	3,41	36,25
31	150	4,05	37,50
32	154	4,1	38,50
33	155	5,08	38,75
34	160	5,15	40,00
35	165	5,22	41,25
36	170	5,3	42,50
37	175	5,35	43,75
38	375		93,75

Primera fisura		Falla final	
Carga (KN)	Deformación (mm)	Carga última (KN)	Deformación ultima (mm)
154	4,1	375	.

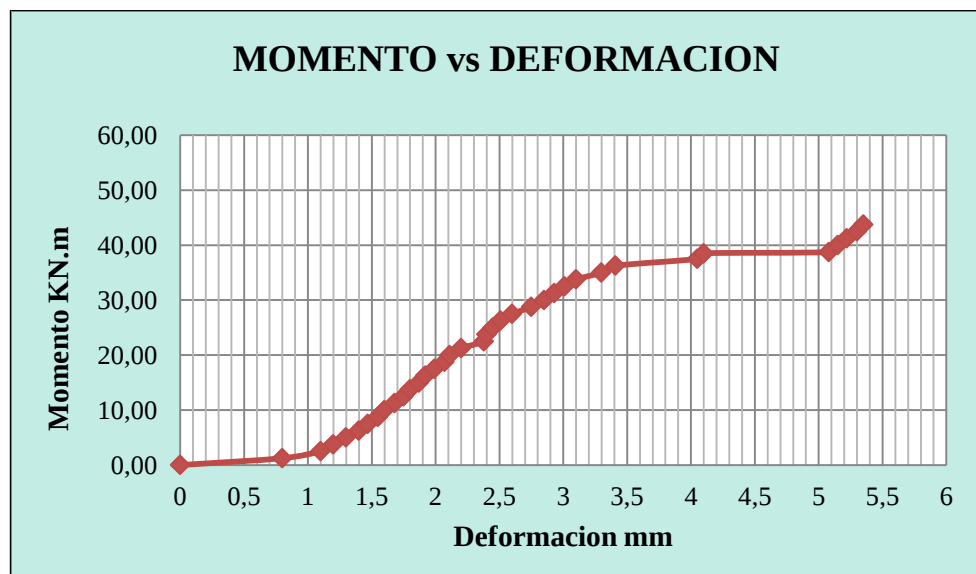
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.5 Curva Carga vs Deformación - Viga 2



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.6 Curva Momento vs Deformación – Viga 2



Fuente: Elaboración propia

Esta viga tiene refuerzo platinas de fibra de carbono. Surgió la primera fisura cuando estaba a una carga de 154 KN y se produjo una deformación máxima de 4,1 mm. Se logró aplicar hasta la carga de 375 KN.

Se observa que se presenta menor deformación en comparación con la viga Patrón.

A continuación, se muestra la eficiencia de Carga en relación con la viga Patrón

ETAPA DE PRIMERA FISURA				
Eficiencia de la Viga 2 en comparación con la Viga Patrón				
Espécimen	Deformación (mm)	Carga (KN)	Momento (KN.m)	Eficiencia %
Viga 1	4	60,5	15,13	154,55
Viga 2	4,1	154	38,5	

ETAPA DE FALLA ULTIMA				
Eficiencia de la Viga 2 en comparación con la Viga Patrón				
Espécimen	Deformación (mm)	Carga (KN)	Momento (KN.m)	Eficiencia %
Viga 1	-	160	40	134,38
Viga 2	-	375	93,75	

VIGA 3 “Viga Reforzada con Lámina De Fibra De Carbono”

Tabla 4.8 Viga 3-Datos obtenidos de la Prensa Universal y cálculo de momento

Nº	Carga Aplicada	Deformación	Momento
	KN	mm	KN-m
1	0	0	0,00
2	5	0,24	1,25
3	10	0,76	2,50
4	15	1,04	3,75
5	20	1,3	5,00
6	25	1,45	6,25
7	30	1,56	7,50

8	35	1,69	8,75
9	40	1,76	10,00
10	45	1,84	11,25
11	50	1,93	12,50
12	55	1,98	13,75
13	60	2,09	15,00
14	65	2,16	16,25
15	70	2,23	17,50
16	75	2,29	18,75
17	80	2,38	20,00
18	85	2,46	21,25
19	90	2,55	22,50
20	95	2,62	23,75
21	100	2,7	25,00
22	105	2,79	26,25
23	110	2,89	27,50
24	115	2,99	28,75
25	120	3,09	30,00
26	125	3,16	31,25
27	130	3,27	32,50
28	135	3,36	33,75
29	140	3,46	35,00
30	145	3,55	36,25
31	150	3,66	37,50
32	155	3,74	38,75
33	160	3,81	40,00
34	165	3,94	41,25
35	170	4,04	42,50
36	175	4,12	43,75
37	180	4,24	45,00
38	185	4,34	46,25
39	190	4,42	47,50
40	195	4,54	48,75
41	200	4,66	50,00
42	205	4,74	51,25
43	210	4,99	52,50
44	215	5,12	53,75
45	220	5,22	55,00
46	225	5,29	56,25
47	230	5,42	57,50

48	235	5,54	58,75
49	240	5,66	60,00
50	245	5,86	61,25
51	250	6,04	62,50
52	255	6,18	63,75
53	260	6,36	65,00
54	265	6,5	66,25
55	270	6,79	67,50
56	275	7,24	68,75
57	280	7,64	70,00
58	285	7,99	71,25
59	290	8,44	72,50
60	295	8,72	73,75
61	300	8,99	75,00
62	305	9,24	76,25
63	370		92,50

Primera fisura		Falla final	
Carga (KN)	Deformación (mm)	Carga última (KN)	Deformación última (mm)
210	4,99	370	.

Fuente: Elaboración propia

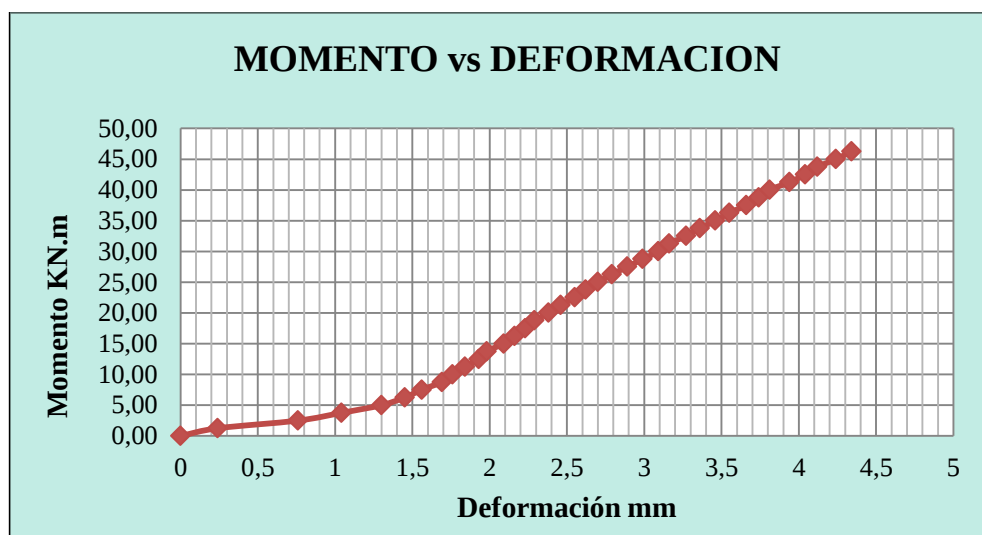
Esta viga tiene refuerzo platinas de fibra de carbono. Surgió la primera fisura cuando estaba a una carga de 210 KN y una deformación máxima de 5,35 mm. Se logró aplicar hasta la carga de 370 KN.

Figura 4.7 Curva Carga vs Deformación – Viga 3



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.8 Curva Momento vs Deformación - Viga 3



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra incremento de Carga en relación con la viga Patrón

ETAPA DE PRIMERA FISURA				
Eficiencia de la Viga 3 en comparación con la Viga Patrón				
Espécimen	Deformación (mm)	Carga (KN)	Momento (KN.m)	Eficiencia %
Viga 1	4	60,5	15,13	247,11
Viga 3	4,99	210	52,5	

ETAPA DE FALLA ULTIMA				
Eficiencia de la Viga 3 en comparación con la Viga Patrón				
Espécimen	Deformación (mm)	Carga (KN)	Momento (KN.m)	Eficiencia %
Viga 1	-	160	40	131,25
Viga 3	-	370	92,5	

VIGA 4 “Viga Reforzada con Lámina De Fibra De Carbono”

Tabla 4.9 Viga 4-Datos obtenidos de la Prensa Universal y cálculo de momento

Nº	Carga Aplicada	Deformación	Momento
	KN	mm	KN-m
1	0	0	0,00
2	5	0,48	1,25
3	10	0,7	2,50
4	15	0,8	3,75
5	20	0,93	5,00
6	25	1,07	6,25
7	30	1,29	7,50

8	35	1,48	8,75
9	40	1,73	10,00
10	45	1,93	11,25
11	50	2,03	12,50
12	55	2,16	13,75
13	60	2,3	15,00
14	65	2,38	16,25
15	70	2,48	17,50
16	75	2,6	18,75
17	80	2,68	20,00
18	85	2,78	21,25
19	90	2,88	22,50
20	95	2,96	23,75
21	100	3,06	25,00
22	105	3,16	26,25
23	110	3,24	27,50
24	115	3,32	28,75
25	120	3,4	30,00
26	125	3,49	31,25
27	130	3,6	32,50
28	135	3,83	33,75
29	140	3,84	35,00
30	145	3,92	36,25
31	150	4,02	37,50
32	155	7,38	38,75
33	156	9,38	39,00
34	160		40,00
35	165		41,25
36	170		42,50
37	365		91,25

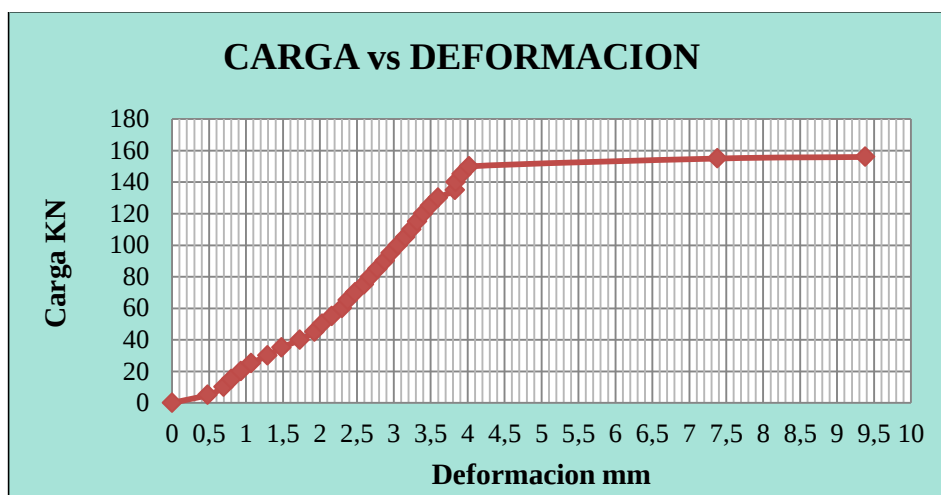
Primera fisura		Falla final	
Carga (KN)	Deformación (mm)	Carga última (KN)	Deformación última (mm)
156	9,38	365	.

Fuente: Elaboración propia

Esta viga tiene refuerzo platinas de fibra de carbono. Surgió la primera fisura cuando estaba a una carga de 156 KN y una deformación máxima de 9,38 mm. Se logró aplicar hasta la carga de 365 KN.

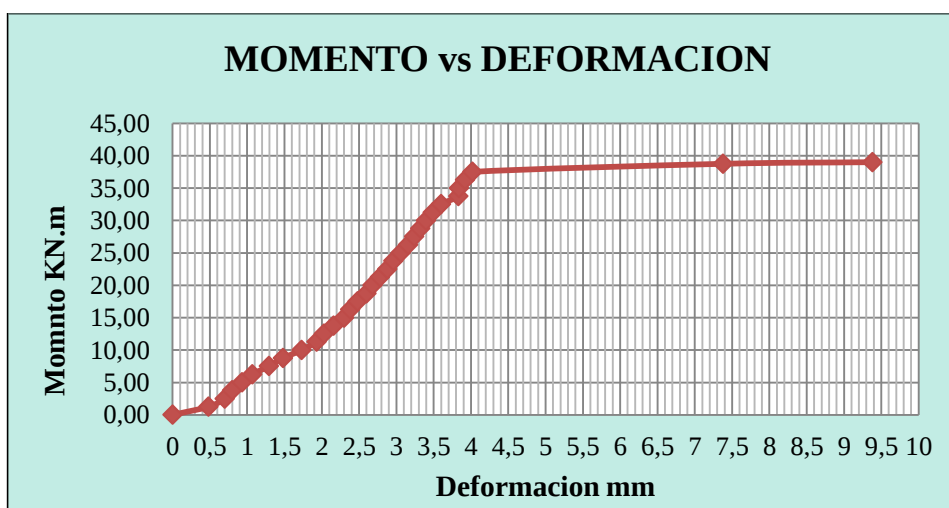
Esta viga no mostraba deformación entre el rango de 156 KN a 365 KN y tampoco había aumento de carga, posteriormente dio un resalto de carga hasta 365KN

Figura 4.9 Curva Carga vs Deformación – Viga 4



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.10 Curva Momento vs Deformación – Viga 4



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra la eficiencia de Carga en relación con la viga Patrón

ETAPA DE PRIMERA FISURA				
Eficiencia de la Viga 4 en comparación con la Viga Patrón				
Espécimen	Deformación (mm)	Carga (KN)	Momento (KN.m)	Eficiencia %
Viga 1	4	60,5	15,13	157,85
Viga 4	9,38	156	39	

ETAPA DE FALLA ULTIMA				
Eficiencia de la Viga 4 en comparación con la Viga Patrón				
Espécimen	Deformación (mm)	Carga (KN)	Momento (KN.m)	Eficiencia %
Viga 1	-	160	40	128,13
Viga 4	-	365	91,25	

VIGA 5 “Viga Reforzada con Lámina De Fibra De Carbono”

Tabla 4.10 Viga 5-Datos obtenidos de la Prensa Universal y cálculo de momento

Nº	Carga Aplicada	Deformación	Momento
	KN	mm	KN-m
1	0	0	0,00
2	5	0,38	1,25
3	10	1,03	2,50
4	15	1,28	3,75
5	20	1,6	5,00

6	25	1,8	6,25
7	30	2,02	7,50
8	35	2,28	8,75
9	40	2,48	10,00
10	45	2,73	11,25
11	50	2,93	12,50
12	55	3,18	13,75
13	60	3,28	15,00
14	65	3,49	16,25
15	70	3,69	17,50
16	75	3,93	18,75
17	80	4,03	20,00
18	85	4,23	21,25
19	90	4,48	22,50
20	95	4,59	23,75
21	100	4,83	25,00
22	105	4,98	26,25
23	110	5,09	27,50
24	115	5,22	28,75
25	120	5,34	30,00
26	125	5,49	31,25
27	130	5,53	32,50
28	135	5,64	33,75
29	140	5,76	35,00
30	145	5,83	36,25
31	186	7,73	46,50
32	215	8,39	53,75
33	240		60,00

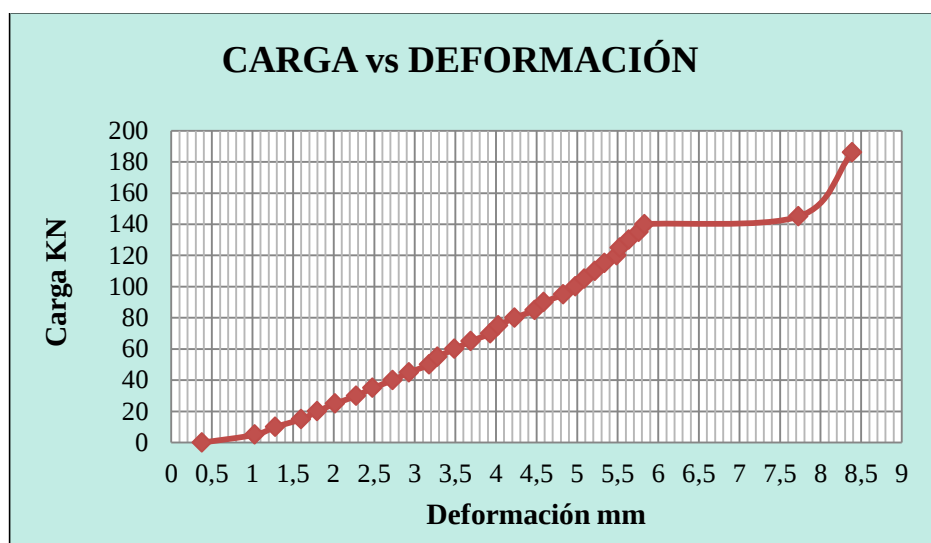
Primera fisura		Falla final	
Carga (KN)	Deformación (mm)	Carga última (KN)	Deformación última (mm)
120	5,34	240	.

Fuente: Elaboración propia

Esta viga tiene refuerzo platinas de fibra de carbono. Surgió la primera fisura cuando estaba a una carga de 120 KN y una deformación máxima de 5,34 mm. Se logró aplicar hasta la carga de 240 KN.

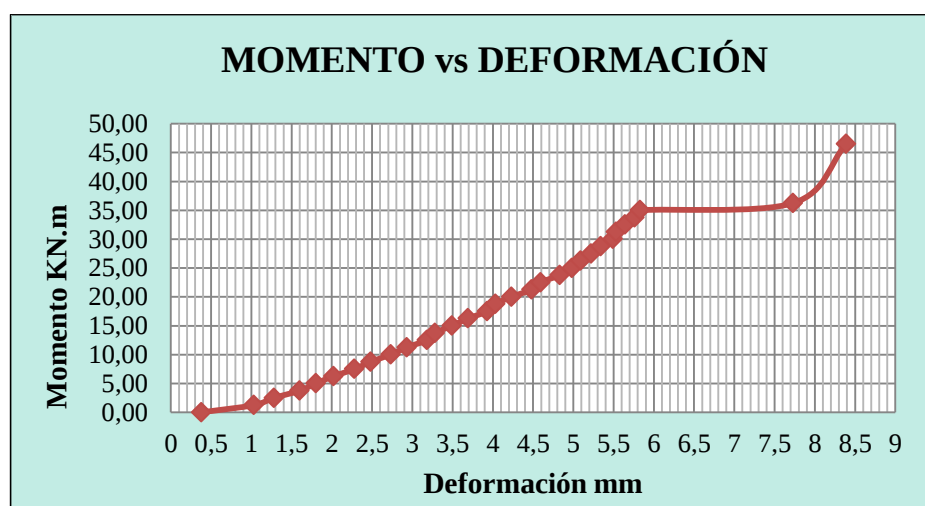
Esta viga no mostraba deformación entre el rango de 215 KN a 240 KN y tampoco había aumento de carga, posteriormente dio un resalto de carga hasta 240 KN

Figura 4.11 Curva Carga vs Deformación - Viga 5



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.12 Curva Momento vs Deformación – Viga 5



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra la eficiencia de Carga en relación con la viga Patrón

ETAPA DE PRIMERA FISURA				
Eficiencia de la Viga 5 en comparación con la Viga Patrón				
Espécimen	Deformación (mm)	Carga (KN)	Momento (KN.m)	Eficiencia %
Viga 1	4	60,5	15,13	98,35
Viga 5	5,34	120	30	

ETAPA DE FALLA ULTIMA				
Eficiencia de la Viga 5 en comparación con la Viga Patrón				
Espécimen	Deformación (mm)	Carga (KN)	Momento (KN.m)	Eficiencia %
Viga 1	-	160	40	50,00
Viga 5	-	240	60	

Esta viga tenía el refuerzo de platina solo en la zona de momento máximo, y no así hasta los puntos de apoyo.

VIGA 6 “Viga Reforzada con Lámina De Fibra De Carbono”

Tabla 4.11 Viga 6-Datos obtenidos de la Prensa Universal y cálculo de momento

Nº	CARGA APLICADA (KN)	DEFORMACION	DEFLEXION		MOMENTO
			Parcial	Acumulado	
		mm	mm	mm	KN-m
1	0	0	0	0	0,00
2	5	0,38	0,04	0,04	1,25
3	10	0,58	0,05	0,09	2,50

4	15	0,7	0,05	0,14	3,75
5	20	0,83	0,05	0,19	5,00
6	25	0,93	0,05	0,24	6,25
7	30	1,03	0,05	0,29	7,50
8	35	1,22	0,05	0,34	8,75
9	40	1,23	0,04	0,38	10,00
10	45	1,3	0,05	0,43	11,25
11	50	1,34	0,045	0,475	12,50
12	55	1,42	0,04	0,515	13,75
13	60	1,5	0,05	0,565	15,00
14	65	1,53	0,05	0,615	16,25
15	70	1,61	0,05	0,665	17,50
16	75	1,66	0,04	0,705	18,75
17	80	1,74	0,06	0,765	20,00
18	85	1,84	0,08	0,845	21,25
19	90	1,88	0,05	0,895	22,50
20	95	1,97	0,07	0,965	23,75
21	100	2,02	0,04	1,005	25,00
22	105	2,1	0,06	1,065	26,25
23	110	2,2	0,075	1,14	27,50
24	115	2,26	0,045	1,185	28,75
25	120	2,34	0,07	1,255	30,00
26	125	2,42	0,06	1,315	31,25
27	130	2,52	0,09	1,405	32,50
28	135	2,62	0,08	1,485	33,75
29	140	2,7	0,11	1,595	35,00
30	145	2,78	0,08	1,675	36,25
31	150	2,88	0,09	1,765	37,50
32	155	3,03	0,09	1,855	38,75
33	160	4,83		1,855	40,00
34	165	3,48	1,9	3,755	41,25
35	170	3,58		3,755	42,50
36	175	3,66		3,755	43,75
37	180	3,78		3,755	45,00
38	185	3,88		3,755	46,25
39	190	3,96		3,755	47,50
40	195	4,68	0,05	3,805	48,75
41	200	4,2		3,805	50,00
42	205	6,58	0,35	4,155	51,25
43	210	6,68		4,155	52,50

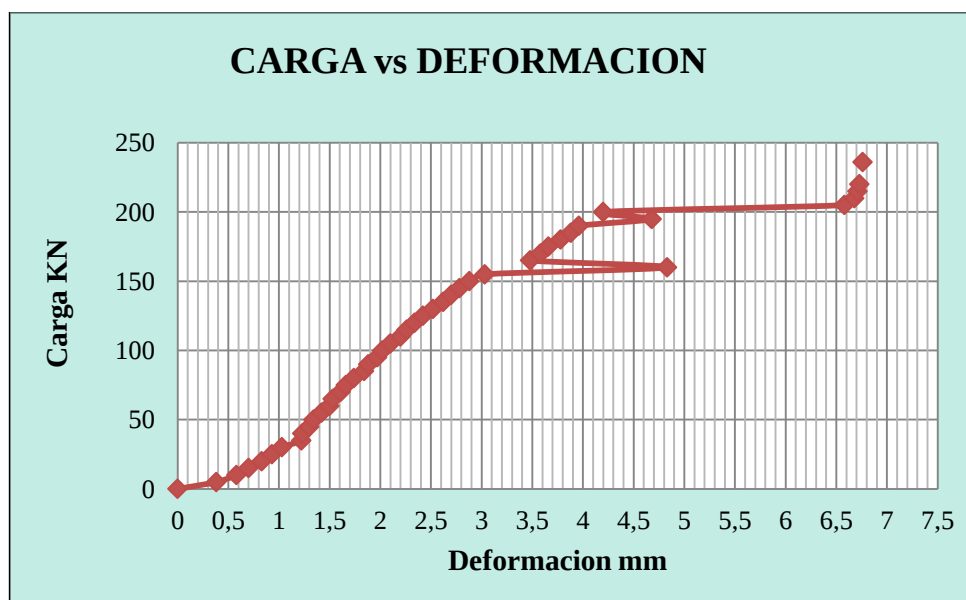
44	215	6,71		4,155	53,75
45	220	6,73		4,155	55,00
46	225			4,155	56,25
47	230			4,155	57,50
48	235			4,155	58,75
49	236	6,76	1	5,155	59,00
50	340				85,00

Primera fisura		Falla final	
Carga (KN)	Deformación (mm)	Carga última (KN)	Deformación última (mm)
160	4,83	340	.

Fuente: Elaboración propia

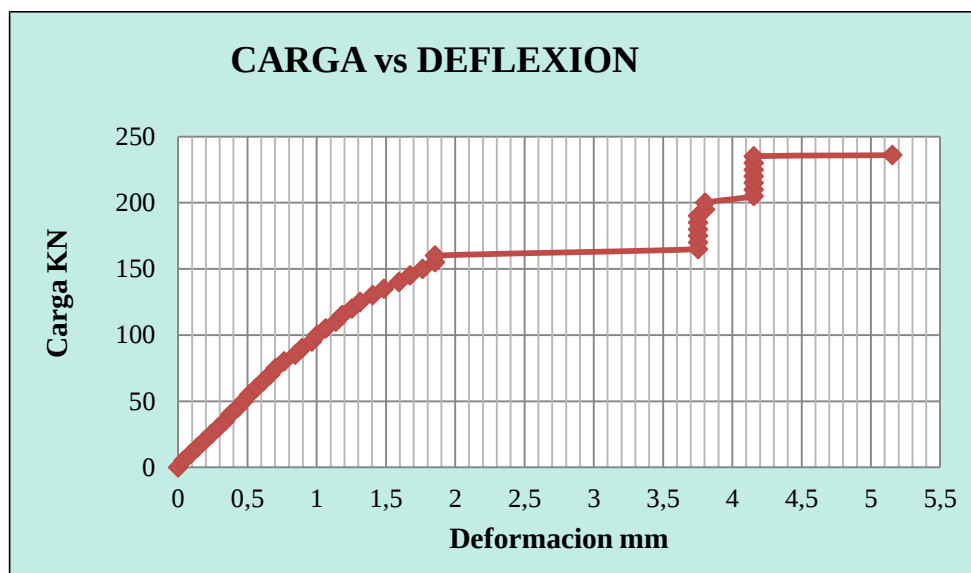
Esta viga tiene refuerzo platinas de fibra de carbono. Surgió la primera fisura cuando estaba a una carga de 160 KN y una deformación máxima de 4,83 mm. Se logró aplicar hasta la carga de 340 KN.

Figura 4.13 Curva Carga vs Deformación – Viga 6



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.14 Curva Carga vs Deflexión – Viga 6



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra el incremento de Carga en relación con la viga Patrón

ETAPA DE PRIMERA FISURA				
Eficiencia de la Viga 6 en comparacion con la Viga Patron				
Espécimen	Deformación (mm)	Carga (KN)	Momento (KN.m)	Eficiencia %
Viga 1	4	60,5	15,13	164,46
Viga 6	4,83	160	40	

ETAPA DE FALLA ULTIMA				
Eficiencia de la Viga 6 en comparacion con la Viga Patron				
Espécimen	Deformación (mm)	Carga (KN)	Momento (KN.m)	Eficiencia %
Viga 1	-	160	40	112,50
Viga 6	-	340	85	

VIGA 7 “Viga Reforzada con Lámina De Fibra De Carbono”

Tabla 4.12 Viga 7-Datos obtenidos de la Prensa Universal y cálculo de momento

N°	Carga Aplicada	Deformacion	Deflexion mm		Momento
	KN	mm	Parcial	Acumulado	KN-m
1	0	0	0	0	0,00
2	5	0,27	0,03	0,03	1,25
3	10	0,49	0,02	0,05	2,50
4	15	0,67	0,03	0,08	3,75
5	20	0,71	0,03	0,11	5,00
6	25	0,8	0,03	0,14	6,25
7	30	0,9	0,02	0,16	7,50
8	35	1	0,025	0,185	8,75
9	40	1,07	0,025	0,21	10,00
10	45	1,17	0,03	0,24	11,25
11	50	1,23	0,02	0,26	12,50
12	55	1,3	0,025	0,285	13,75
13	60	1,4	0,025	0,31	15,00
14	65	1,47	0,02	0,33	16,25
15	70	1,55	0,02	0,35	17,50
16	75	1,62	0,02	0,37	18,75
17	80	1,7	0,03	0,4	20,00
18	85	1,8	0,03	0,43	21,25
19	90	1,85	0,03	0,46	22,50
20	95	1,95	0,04	0,5	23,75
21	100	2	0,03	0,53	25,00
22	105	2,1	0,04	0,57	26,25
23	110	2,17	0,04	0,61	27,50
24	115	2,25	0,03	0,64	28,75
25	120	2,33	0,05	0,69	30,00
26	125	2,45	0,08	0,77	31,25
27	130	2,57	0,06	0,83	32,50
28	135	2,68	0,05	0,88	33,75
29	140	2,8	0,06	0,94	35,00
30	145	2,87	0,06	1	36,25
31	150	2,97	0,06	1,06	37,50
32	155	3,1	0,06	1,12	38,75
33	160	3,25	0,09	1,21	40,00

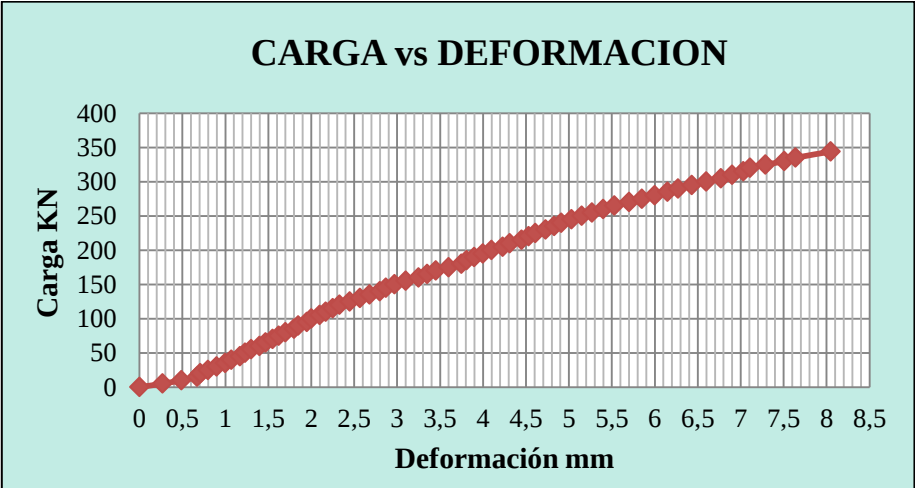
34	165	3,35	0,06	1,27	41,25
35	170	3,45	0,05	1,32	42,50
36	175	3,6	0,08	1,4	43,75
37	180	3,75	0,05	1,45	45,00
38	185	3,81	0,06	1,51	46,25
39	190	3,9	0,06	1,57	47,50
40	195	4	0,04	1,61	48,75
41	200	4,1	0,05	1,66	50,00
42	205	4,23	0,07	1,73	51,25
43	210	4,31	0,08	1,81	52,50
44	215	4,45	0,09	1,9	53,75
45	220	4,53	0,07	1,97	55,00
46	225	4,61	0,06	2,03	56,25
47	230	4,73	0,08	2,11	57,50
48	235	4,83	0,07	2,18	58,75
49	240	4,91	0,08	2,26	60,00
50	245	5,03	0,09	2,35	61,25
51	250	5,15	0,05	2,4	62,50
52	255	5,27	0,08	2,48	63,75
53	260	5,4	0,1	2,58	65,00
54	265	5,53	0,07	2,65	66,25
55	270	5,7	0,13	2,78	67,50
56	275	5,85	0,1	2,88	68,75
57	280	6	0,11	2,99	70,00
58	285	6,15	0,8	3,79	71,25
59	290	6,27	0,8	4,59	72,50
60	295	6,43	0,1	4,69	73,75
61	300	6,6	0,1	4,79	75,00
62	305	6,77	0,8	5,59	76,25
63	310	6,9	0,5	6,09	77,50
64	315	7,03	0,06	6,15	78,75
65	320	7,11	0,07	6,22	80,00
66	325	7,29	0,1	6,32	81,25
67	330	7,51	0,1	6,42	82,50
68	335	7,64	0,33	6,75	83,75
69	344	8,05	0,2	6,62	86,00
70	380				95,00

Primera fisura			Falla final	
Carga (KN)	Deformación (mm)	Deflexión (mm)	Carga última (KN)	Deformación ultima (mm)
140	2,8	0,94	380	.

Fuente: Elaboración propia

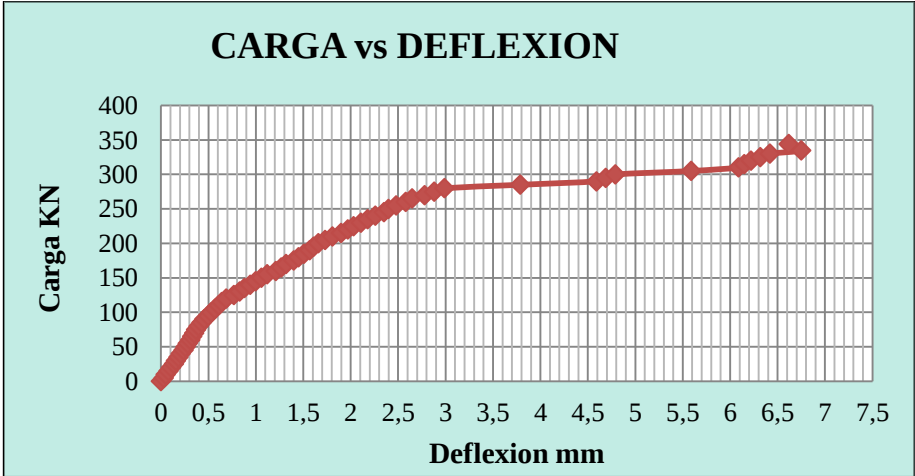
Esta viga tiene refuerzo platinas de fibra de carbono. Surgió la primera fisura cuando estaba a una carga de 140 KN y una deformación de 2,8 mm. Se logró aplicar hasta la carga de 380 KN.

Figura 4.15 Curva Carga vs Deformación – Viga 7



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.16 Curva Carga vs Deflexión – Viga 7



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra la eficiencia de Carga en relación con la viga Patrón

ETAPA DE PRIMERA FISURA				
Eficiencia de la Viga 7 en comparación con la Viga Patrón				
Espécimen	Deformación (mm)	Carga (KN)	Momento (KN.m)	Eficiencia %
Viga 1	4	60,5	15,13	131,40
Viga 7	2.8	140	35	

ETAPA DE FALLA ULTIMA				
Eficiencia de la Viga 7 en comparación con la Viga Patrón				
Espécimen	Deformación (mm)	Carga (KN)	Momento (KN.m)	Eficiencia %
Viga 1	-	160	40	137,50
Viga 7	-	380	95	

VIGA 8 “Viga Reforzada con Lámina De Fibra De Carbono”

Tabla 4.13 Viga 8-Datos obtenidos de la Prensa Universal y cálculo de momento

N°	CARGA APLICADA	DEFORMACION	DEFLEXION		Momento
			Parcial	acumulado	KN-m
	KN	mm	mm	mm	
1	0	0	0	0	0,00
2	5	0,52	0,03	0,03	1,25
3	10	0,82	0,03	0,06	2,50
4	15	1,05	0,03	0,09	3,75
5	20	1,38	0,04	0,13	5,00
6	25	1,65	0,04	0,17	6,25
7	30	1,85	0,04	0,21	7,50

8	35	2,02	0,04	0,25	8,75
9	40	2,15	0,04	0,29	10,00
10	45	2,29	0,03	0,32	11,25
11	50	2,41	0,03	0,35	12,50
12	55	2,58	0,04	0,39	13,75
13	60	2,72	0,04	0,43	15,00
14	65	2,88	0,04	0,47	16,25
15	70	2,98	0,04	0,51	17,50
16	75	3,1	0,05	0,56	18,75
17	80	3,25	0,08	0,64	20,00
18	85	3,34	0,07	0,71	21,25
19	90	3,44	0,065	0,775	22,50
20	95	3,56	0,06	0,835	23,75
21	100	3,64	0,05	0,885	25,00
22	105	3,74	0,05	0,935	26,25
23	110	3,84	0,07	1,005	27,50
24	115	3,92	0,05	1,055	28,75
25	120	4,02	0,06	1,115	30,00
26	125	4,12	0,06	1,175	31,25
27	130	4,22	0,8	1,975	32,50
28	135	4,35	0,11	2,085	33,75
29	140	4,48	0,12	2,205	35,00
30	145	4,62	0,08	2,285	36,25
31	150	4,74	0,22	2,505	37,50
32	155	4,83	0,1	2,605	38,75
33	160	5,02	0,11	2,715	40,00
34	165	5,08	0,06	2,775	41,25
35	170	5,2	0,1	2,875	42,50
36	175	5,3	-	2,875	43,75
37	180	5,42	-	2,875	45,00
38	185	5,52	-	2,875	46,25
39	190	5,65	0,2	3,075	47,50
40	195	5,75	-	3,075	48,75
41	200	5,82	0,12	3,195	50,00
42	205	6,05	0,8	3,995	51,25
43	210	6,22	0,2	4,195	52,50
44	215	6,41		4,195	53,75
45	220	6,55		4,195	55,00
46	225	6,78	0,22	4,415	56,25
47	230	7,02	0,2	4,615	57,50

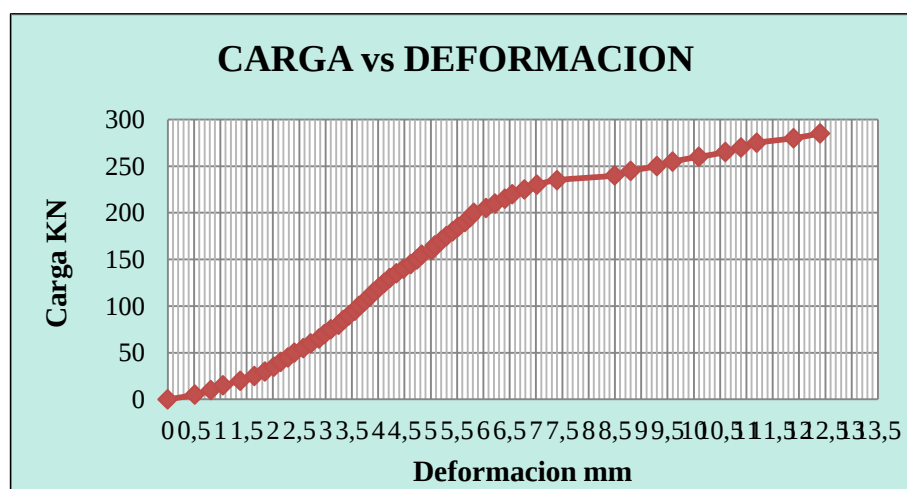
48	235	7,4	0,75	5,365	58,75
49	240	8,5	1,5	6,865	60,00
50	245	8,8	0,5	7,365	61,25
51	250	9,3	0,5	7,865	62,50
52	255	9,6			63,75
53	260	10,1			65,00
54	265	10,6			66,25
55	270	10,9			67,50
56	275	11,2			68,75
57	280	11,9			70,00
58	285	12,4			71,25
59	370				92,50

Primera fisura		Falla final	
Carga (KN)	Deformación (mm)	Carga última (KN)	Deformación última (mm)
160	5,02	370	.

Fuente: Elaboración propia

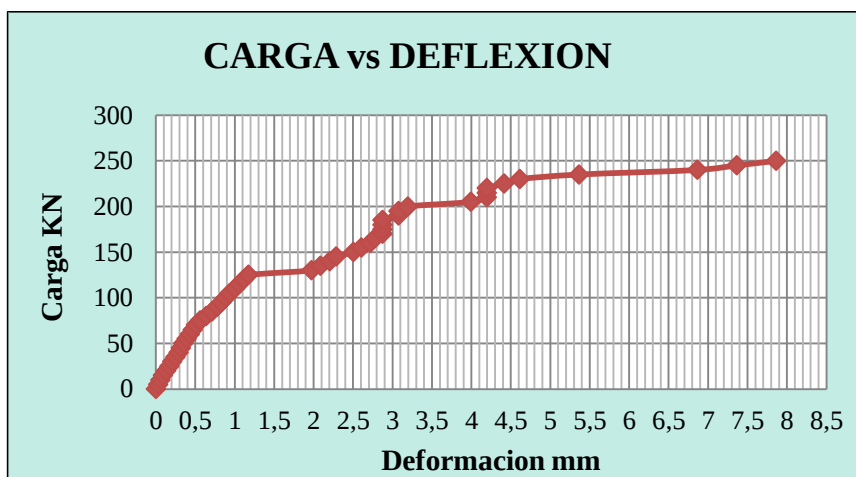
Esta viga tiene refuerzo platinas de fibra de carbono. Surgió la primera fisura cuando estaba a una carga de 160 KN y una deformación de 5,02 mm. Se logró aplicar hasta la carga de 370 KN.

Figura 4.17 Curva Carga vs Deformación – Viga 8



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.18 Curva Carga vs Deflexión – Viga 8



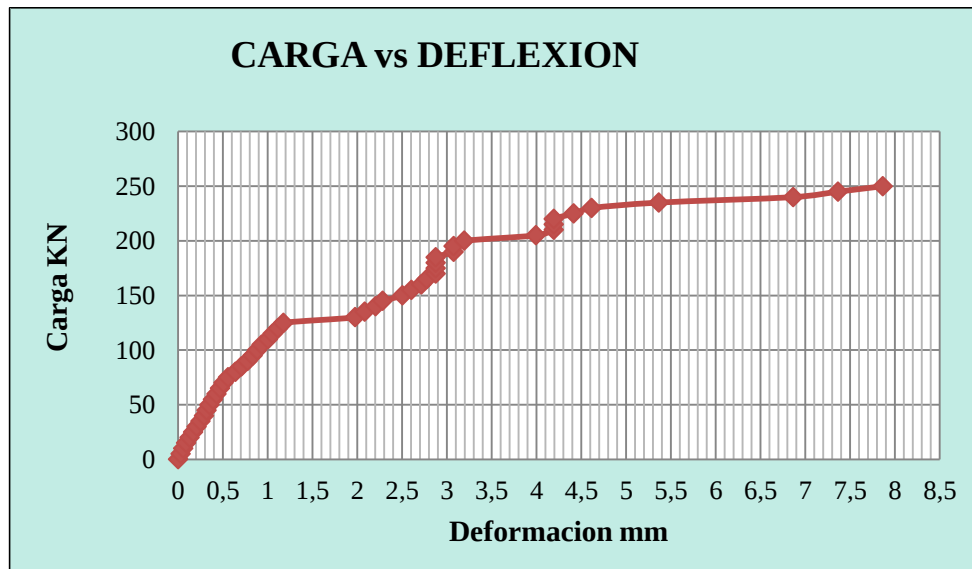
Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra la eficiencia de Carga en relación con la viga Patrón

ETAPA DE PRIMERA FISURA				
Eficiencia de la Viga 8 en comparación con la Viga Patrón				
Espécimen	Deformación (mm)	Carga (KN)	Momento (KN.m)	Eficiencia %
Viga 1	4	60,5	15,13	164,46
Viga 8	5,02	160	40	

ETAPA DE FALLA ULTIMA				
Eficiencia de la Viga 8 en comparación con la Viga Patrón				
Espécimen	Deformación (mm)	Carga (KN)	Momento (KN.m)	Eficiencia %
Viga 1	-	160	40	131,25
Viga 8	-	370	92,5	

Análisis general del comportamiento de las vigas



Las vigas pasaron por las 3 primeras etapas

Zona 1, es la etapa inicial, esta es la zona elástica donde no se presenta fisuras, la viga muestra que la deformación es proporcional a la carga aplicada y la tensión de compresión es menor a la resistencia de tracción del concreto es decir a un 10 % de la resistencia máxima de compresión $\sigma_c < f_{ct}$

Zona 2, es la etapa intermedia donde la relación de carga – deformación deja de ser lineal, en esta etapa se observó las primeras fisuras en la viga. Al fisurarse el hormigón significa que el acero será el único encargado de resistir la tensión

Zona 3, considerada como etapa plástica en la cual podemos observar deformaciones relativamente grandes en el mismo incremento de carga

4.5 Modos de falla en las vigas de hormigón armado reforzadas con fibra de carbono

VIGA 1 “Viga Patrón”

Aplastamiento del hormigón en la zona de compresión

Se produjo cuando el hormigón alcanzó su máxima deformación a flexo-compresión, no habiéndose agotado las resistencias de la armadura pasiva.

Fallo a cortante

Se produjo las fisuras desde el punto de aplicación de la carga (cara superior de la viga) hasta llegar a la cara inferior de la viga donde estaba el refuerzo.

Figura 4.19 Fisuras por fallo a cortante



Fuente: Elaboración propia

VIGA 2 “Viga Reforzada con Lámina De Fibra De Carbono”

Aplastamiento del hormigón en la zona de compresión

Se produjo cuando el hormigón alcanzó su máxima deformación a flexo-compresión, no habiéndose agotado las resistencias de la armadura pasiva ni el refuerzo de platinas de fibra de carbono.

Este aplastamiento se produjo en el punto de aplicación de carga

Figura 4.19 Fallo a compresión en cabeza superior de la viga



Aplastamiento del
hormigón en el
punto de
aplicación de

Fuente: Elaboración propia

Despegue extremo en la interface (unión de platinas FRP y el hormigón)

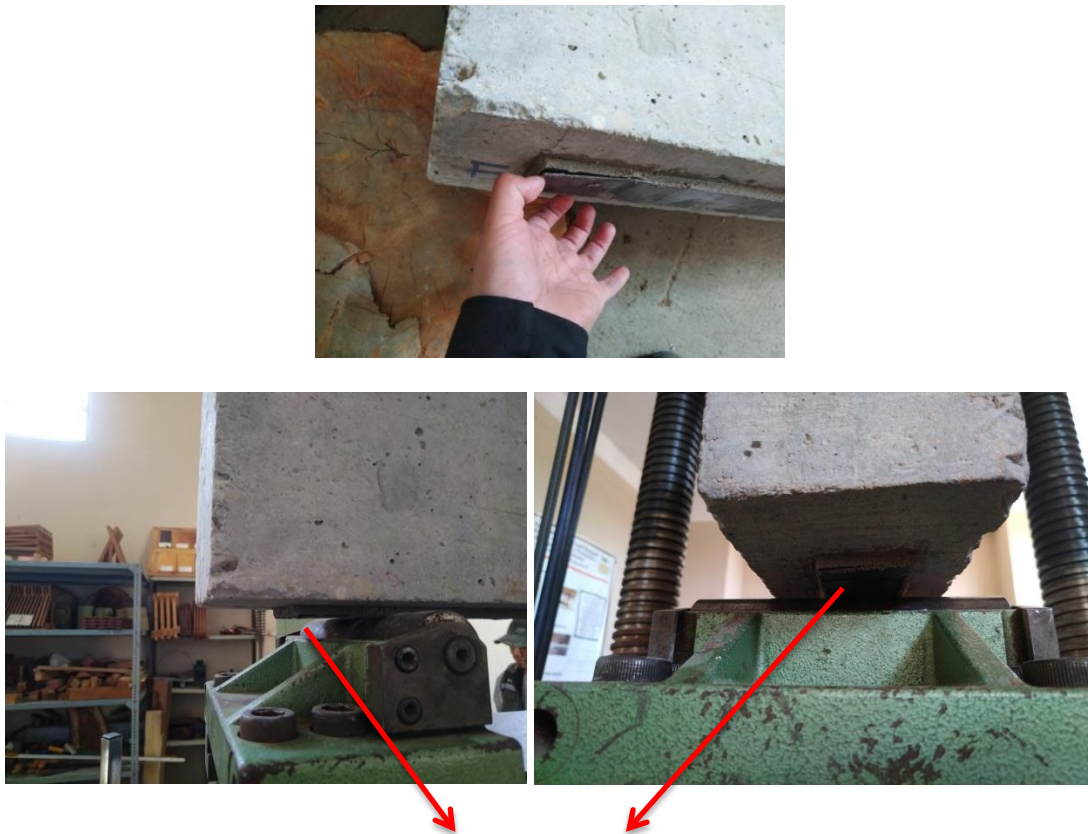
Se trata de un fallo en el extremo de la platina de fibra de carbono por despegue entre adhesivo y platina. Debido a la concentración de tensiones de corte y normales cerca del refuerzo

Este fallo se produjo en el extremo del refuerzo debido a que esta zona estaba sometida a tracción, se despegó la parte de la lámina que quedaba fuera de los apoyos.

En la zona central entre apoyos, la platina seguía intacta sin sufrir despegue.

El plano de fallo se localiza en el hormigón, con una capa delgada del mismo permaneciendo unida al laminado

Figura 4.20 Fallo por delaminación debido a despegue entre láminas y epoxi



Despegue en el
extremo del
laminado

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.21 Platina de fibra de carbono intacta dentro de los apoyos



Fuente: Elaboración propia

Fallo a cortante

Se produjo las fisuras desde el punto de aplicación de la carga (cara superior de la viga) hasta llegar a la cara inferior de la viga donde estaba el refuerzo.

A pesar de que el hormigón presentó fisuras en la zona central entre los dos apoyos, las Platinas de fibra de Carbono siguieron intactas sin sufrir despegue ni rupturas.

Figura 4.22 Fisuras por fallo a cortante



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.23 Fisuras por fallo a cortante



Fuente: Elaboración propia

VIGA 3 “Viga Reforzada con Lámina De Fibra De Carbono”

Aplastamiento del hormigón en la zona de compresión

Se produjo cuando el hormigón alcanzó su máxima deformación a flexo-compresión, no habiéndose agotado las resistencias de la armadura pasiva ni el refuerzo de platinas de fibra de carbono.

Este aplastamiento se produjo en el punto de aplicación de carga

Figura 4.24 Fallo a compresión en cabeza superior de la viga



Aplastamiento del
hormigón en el
punto de
aplicación de

Fuente: Elaboración propia

Fallo a cortante

Se produjo en las zonas de anclaje de las láminas de refuerzo longitudinal en las zonas de mayor esfuerzo cortante. El hormigón presentó fisuras pero las Platinas de fibra de Carbono seguían intactas sin sufrir despegue

Figura 4.25 Fallo por cortante



Fallo a cortantea

Fuente: Elaboración propia

VIGA 4 “Viga Reforzada con Lámina De Fibra De Carbono”

Aplastamiento del hormigón en la zona de compresión

Se produjo cuando el hormigón alcanzó su máxima deformación a flexo-compresión, no habiéndose agotado las resistencias de la armadura pasiva ni el refuerzo de platinas de fibra de carbono.

Este aplastamiento se produjo en el punto de aplicación de carga

Figura 4.26 Fallo a compresión en cabeza superior de la viga



Aplastamiento del
hormigón en el
punto de
aplicación de

Fuente: Elaboración propia

Fallo a cortante

Se produjo las fisuras desde el punto de aplicación de la carga (cara superior de la viga) hasta llegar a la cara inferior de la viga donde estaba el refuerzo.

A pesar de que el hormigón presentó fisuras en la zona central entre los dos apoyos, las Platinas de fibra de Carbono siguieron intactas sin sufrir despegue ni rupturas.

Figura 4.12 Fisuras por fallo a cortante



Fuente: Elaboración propia

Fallo por delaminación debido a despegue entre láminas y epoxi

Este fallo se produjo en el extremo del refuerzo debido a que esta zona estaba sometida a tracción, se despegó hasta el punto de apoyo, es decir las partes de las láminas que quedaban fuera de los apoyos se despegaron y en algunos casos produjeron ruptura del refuerzo a lo largo de su eje longitudinal.

Figura 4.27 Despegue entre láminas de fibra de carbono y el epoxi



4.5.1 Análisis general del tipo de fallas en las vigas con refuerzo de fibra de carbono

En todas las vigas se observó que las primeras fallas fueron por aplastamiento del hormigón, es decir en las vigas lo primero que se alcanzó fue la deformación última del concreto $\varepsilon_u = 0.003$. Posteriormente se observa que las fisuras comienzan desde el centro de aplicación de carga hacia los puntos de apoyo, formándose así, las fisuras por fallo a cortante.

Debido a las fisuras por cortante se observó 2 tipos de falla en la unión de las platinas y el concreto.

1. Se produjo despegue entre la platina de fibra de carbono y el epoxi, este despegue se producía fuera del límite del apoyo.

2. Se produjo desprendimiento del concreto de recubrimiento y por ende se despegaba las platinas de fibra de carbono.

En ninguno de los casos surgió la falla por flexión, dando a entender que el refuerzo de fibra de carbono trabajó perfectamente.

Es necesario indicar que este tipo de fallas ocurren en el ELU, y es un indicativo de alerta cuando en una viga real se tiene esta situación límite.

La imagen que se muestra a continuación es una de las vigas que presentó diversas fisuras, en la cara comprimida en el punto de aplicación de la carga y fisuras de falla por cortante, pero no se ven fisuras por flexión.

Figura 4.28 Viga sometida a ensayo de flexión



Fuente: Elaboración propia

4.6 Cálculo del Incremento en %

Se puede observar el incremento significativo entre las vigas con refuerzo sobre la viga sin refuerzo

Tabla 4.14 Incremento de la resistencia mecánica en % Viga patrón vs Vigas con Fibra de carbono

ENSAYO	Carga Puntual KN	Momento Flector KN.m	Eficiencia o Incremento %
VIGA 1 Viga Patrón	60	15	
VIGA 2 con platina FRP	154	38,5	156,67
VIGA 3 con platina	210	52,5	250,00
VIGA 4 con platina FRP	156	39	160,00
VIGA 5 con platina FRP	120	30	100,00
VIGA 6 con platina FRP	160	40	166,67
VIGA 7 con platina FRP	140	35	133,33
VIGA 8 con platina FRP	160	40	166,67

Fuente: Elaboración propia

4.7 Contrastación de hipótesis

El uso de láminas de fibra de carbono como reforzamiento en elementos estructurales como vigas de hormigón armado aumenta significativamente su resistencia a la flexión y tracción.

- En la norma ACI 440.2R-17 nos indica que a pesar de que se han documentado aumentos en la resistencia a la flexión del 10 al 160 % , sin embargo cuando se tiene en cuenta los límites de refuerzo y los límites de ductilidad y servicio, los aumentos de resistencia de hasta 40 % son más razonables y confiables.

En esta investigación bajo procedimientos experimentales en laboratorio se obtuvo un incremento en la resistencia mecánica desde un 100 % hasta 250 %. Pero se despreciará 2 datos que están fuera del límite y obtenemos un incremento promedio de 157.8 %

A continuación, se muestra el incremento de resistencia entre las vigas reforzadas con respecto a la viga sin refuerzo de platinas de fibra de carbono.

ENSAYO	Carga Puntual KN	Momento Flector KN.m	Eficiencia o Incremento %
VIGA 1 Viga Patrón	60	15	
VIGA 2 con platina FRP	154	38,5	156,67
VIGA 3 con platina	210	52,5	250,00
VIGA 4 con platina FRP	156	39	160,00
VIGA 5 con platina FRP	120	30	100,00
VIGA 6 con platina FRP	160	40	166,67
VIGA 7 con platina FRP	140	35	133,33
VIGA 8 con platina FRP	160	40	166,67

Fuente: Elaboración propia

- Haciendo un análisis sobre los resultados teóricos calculados bajo la Norma ACI 440.2R-17, se obtuvo un incremento de 23,7 %

Resistencia a flexión debido a la fibra de carbono

$$\phi M_{nf} = 16,297 \text{ KN-m}$$

Resistencia a flexión total (acero más fibra de carbono)

$$\phi M_n = M_{ns} + M_{nf}$$

$$\phi M_n = 68,852 + 16,297$$

$$\phi M_n = 85,149 \text{ KN.m}$$

Se puede observar con estos resultados, que los valores adquiridos son muy conservadores ya que con el refuerzo de fibra de carbono aumenta la resistencia a flexión en un 23,7 %. Esto se debe a que mediante las ecuaciones del ACI 440.2R-17 se tiene en cuenta los límites de refuerzo, los límites de ductilidad y servicio.

Con estos resultados teóricos calculados, se está cumpliendo con lo recomendado en la norma. Este procedimiento de cálculo, se podría aplicar en una viga real como elemento de una edificación. Para que nuestra estructura trabaje en el estado límite de Servicio.

CAPÍTULO V



CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Se determinó que el reforzamiento externo mediante platinas de fibra de carbono, suma la resistencia de las vigas de hormigón armado, cuando son sometidas a pruebas de flexión.
- En cuanto al objetivo general, se logró comprobar que utilizar la fibra de carbono influye de forma positiva en el reforzamiento estructural en vigas de hormigón armado, lo que quiere decir que esta aplicación incremento su capacidad resistente hasta 250 %.
- De la misma manera la deformación es significativamente menor en las vigas reforzadas en comparación con la viga patrón sin platinas
- Se obtuvo resultados que demostraron que es óptimo diseñar vigas reforzadas con fibras de carbono, la resistencia a la flexión alcanzada fue superior a la muestra convencional.
- Comparado con materiales similares, la fibra de carbono es relativamente más cara, pero aporta mejores propiedades físicas.
- Se determinó el diseño de mezcla de un concreto $f'c$ 210 kg/cm². concluyendo en una proporción de 1 : 1,88 : 2,96
- Incrementa la resistencia en las vigas con platinas, sin embargo, la falla final será de tipo frágil.
- También se pudo comprobar la simplicidad del trabajo de intervención con ventajas tales como la comodidad y seguridad en la manipulación de elementos muy livianos de fácil aplicación en obra.
- Se llega a la conclusión de que las principales propiedades de los polímeros reforzados con fibra de carbono son resistencia mecánica, facilidad y rapidez de aplicación, elementos livianos en comparación con el acero

- El momento de agotamiento de una viga sin refuerzo es de 15 KNm, frente a un momento de agotamiento de viga reforzada de 52,72 KNm.
- Uno de los tipos de fallas más frecuentes en las vigas fue el desprendimiento en la unión del sistema FRP al sustrato (viga). Es por eso que en la Norma ACI 440.2R hace referencia que aún sigue siendo el foco de una gran cantidad de investigación con respecto al vínculo del sustrato con el sistema FRP tanto en elementos sometidos a flexión como a cizallamiento.
- Los resultados obtenidos mediante la planilla de cálculo bajo la norma ACI 440.2R-17, para reforzamiento de viga de hormigón nos muestra un incremento en la resistencia a flexión de 23,7 %, este no supera lo estipulado en la ACI 440.2R17 (40 % como máximo razonable). Cumpliendo con las recomendaciones de esta norma la cual nos indica que se han documentado aumentos en la resistencia a la flexión del 10 al 160 % , sin embargo, cuando se tiene en cuenta los límites de refuerzo y los límites de ductilidad y servicio, los aumentos de resistencia de hasta 40 % son más razonables y confiables.
- Según norma, previo a cualquier tipo de refuerzo con FRP recomienda que el hormigón original debe tener una resistencia característica mínima de 17 ó 20 MPa

5.2 RECOMENDACIONES

- Para mejorar las propiedades mecánicas de elementos de hormigón armado, se recomienda utilizar las platinas de fibra de carbono pues aporta una mayor capacidad a los esfuerzos de flexotracción.
- En próximas investigaciones con respecto a este tipo de refuerzos se recomienda realizar una investigación sobre influencia de anclajes de fibra de carbono en la resistencia al despegue de refuerzo adheridos en estructuras de hormigón.
- Se recomienda realizar refuerzo mediante el uso de fibra de carbono en vigas muros y losas, para tener mayor conocimiento de cómo actúa este tipo de refuerzo en otros elementos estructurales

- Se recomienda colocar nudos de anclaje en caso de vigas de mayor longitud
- No es recomendable el uso de estas bandas de fibra de carbono para refuerzo a compresión
- Se recomienda próximas investigaciones en aplicaciones donde el sistema FRP está sometido simultáneamente a condiciones ambientales y condiciones de estrés
- Se recomienda investigaciones de diferentes tipos de aplicación de anclajes. Los métodos de anclaje de estos sistemas son altamente problemáticos debido a la naturaleza frágil y anisotrópica de este material compuesto. Cualquier método de anclaje propuesto debe ser objeto de un escrutinio exhaustivo.
- Se recomienda como próximas investigaciones, realizar el refuerzo a flexión y cortante simultáneamente en un elemento estructural (viga, Columna losa, etc.)
- Se recomienda realizar una propuesta de investigación donde el elemento estructural se encuentre deteriorado o fisurado en la zona de soporte donde se coloque el refuerzo de fibra de carbono, para previamente reparar o sellar las fisuras y posteriormente reforzarlas, con el objetivo de analizar el comportamiento de dicho elemento.
- Se recomienda el análisis del comportamiento estructural de elementos pretensados que contengan varillas de fibra de carbono (viguetas) es decir que se de uso a la fibra de carbono ya no como reforzamiento sino como material de construcción.
- Se recomienda nuevos planteamientos para mejorar sus métodos de instalación a este tipo de refuerzo. Debido a que solo se puede instalar por medio de resina. La fibra no se puede clavar ni rasgar ya que perdería parte de su integridad. La resina, aunque cumple la función, es un material que no soporta altas temperaturas
- Se recomienda que se realice una guía o norma a nivel nacional sobre este tipo de refuerzo. Una guía realizada por expertos de nuestro país, la cual sea referente técnico solvente. Ya que la norma existente ACI 440.2R -17 ni siquiera fue traducida al español.