



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS**

**“REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL DE VIGAS POR FLEXIÓN DE LA  
EDIFICACIÓN EN LA INSTITUCIÓN EDUCATIVA MARIANO MELGAR DE  
HUARIACA EN BASE A CFRP (POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS  
DE CARBONO)”**

**PRESENTADO POR EL BACHILLER**

**GUTIÉRREZ ANDRADE, RAÚL**

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE**

**INGENIERO CIVIL**

**HUÁNUCO – PERÚ**

**2017**

## **DEDICATORIA**

La presente TESIS se la dedico a Dios quien es mi guía y fortaleza; a mis padres por apoyarme en todo momento. Me siento muy feliz de tenerlos a mi lado.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer en primer lugar a Dios por darme vida y salud; a mi familia por su gran apoyo incondicional; a mis amigos quienes me dieron aliento de superación y esmero para lograr mis metas.

**GRACIAS A TODOS...**

## RESUMEN

La presente investigación se refiere fundamentalmente al Reforzamiento de estructuras de la Edificación en la Institución Educativa Mariano Melgar del Distrito de Huariaca con el uso de Fibras de Carbono (CFRP), utilizadas para la reparación o reforzamiento de estructuras de concreto, principalmente vigas en este trabajo. Las Fibras de Carbono tienen la capacidad de otorgar mayor resistencia y tensión a las estructuras, puesto que éstas son más livianas, poseen una fluencia y elongación baja en comparación con las platinas metálicas.

Se presenta la clasificación de estas fibras, las principales características mecánicas que poseen, metodologías de diseño y especificaciones para una correcta instalación.

Finalmente, se presenta la aplicación del sistema de reforzamiento a través de Fibras de Carbono (CFRP) en la Edificación en la Institución Educativa Mariano Melgar del Distrito de Huariaca.

**Palabras Clave:** Reforzamiento, Estructura, Fibra De Carbono, Concreto, Hormigón, Edificación, Normatividad.

## **ABSTRACT**

The research refers primarily to the strengthening of structures in the Educational Institution Building Mariano Melgar District Huariaca with the use of Carbon Fibers (CFRP) used for the repair or reinforcement of concrete structures, mainly beams. Carbon fibers have the ability to provide greater strength and tension structures, since they are lighter, have a creep and low elongation compared with metal plates.

The classification of these fibers, the main mechanical characteristics they possess, design methodologies and specifications for correct installation is presented.

Finally, the application of the system of reinforcement is presented through Carbon Fibers (CFRP) in Construction in the Educational Institution Mariano Melgar District Huariaca.

Keywords: Reinforcement, Structure, Carbon fiber, Concrete, Concrete, Edification,

## ÍNDICE

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTOS .....	3
RESUMEN .....	4
ABSTRACT .....	5
ÍNDICE .....	6
INTRODUCCIÓN .....	8
<b>CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO .....</b>	<b>10</b>
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA .....	10
1.2 DELIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	10
1.2.1. Espacial:.....	10
1.2.2. Temporal.....	10
1.3 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMAS DE INVESTIGACIÓN.....	10
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	11
1.4.1 Objetivo General.....	11
1.4.2 Objetivos Específicos .....	11
1.5 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN .....	11
1.5.1 Hipótesis General .....	11
1.5.2 Hipótesis Específicas.....	12
1.6 VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN .....	12
1.7 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....	12
1.8 POBLACIÓN Y MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN .....	12
1.8.1. Población.....	12
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2. BASES TEÓRICAS. ....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.1. La Fibra de Carbono.....</b>	<b>17</b>
<b>2.2.2. Base de polímeros reforzados con fibra carbono .....</b>	<b>18</b>
.....	19
<b>2.2.3. Reforzamiento Estructural.....</b>	<b>26</b>
<b>2.2.4. Aplicaciones de los sistemas FRP .....</b>	<b>29</b>
<b>2.2.5. Aplicaciones en Vigas.....</b>	<b>30</b>
<b>2.2.6. Aplicaciones en Columnas .....</b>	<b>30</b>

2.2.7. Aplicaciones en Losas .....	31
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS. ....	31
<b>CAPÍTULO III: RESENTACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	<b>33</b>
3.1. CONFIABILIDAD Y VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO.....	33
3.1.1. Tecnología de los Materiales o de la Construcción.....	33
3.1.1.1 Fallas Estructurales y No Estructurales De Elementos De Concreto	33
3.1.1.2 Refuerzo por Flexión .....	52
3.1.2 Instalación del Sistema de Refuerzo .....	79
3.1.2.1 Preparación previa a la Instalación de refuerzo.....	79
3.2. PRUEBAS DE NORMATIVIDAD.....	88
<b>CAPÍTULO IV: PROCESO DE CONTRASTE DE HIPÓTESIS</b> .....	<b>90</b>
4.1. PRUEBA DE HIPÓTESIS GENERAL .....	90
4.1.1. Hipótesis básicas para el análisis a Flexión .....	90
4.1.1.2. Planteamiento de solución.....	94
4.1.1.3. Ingeniería del Proyecto.....	94
4.1.1.4. Estudios Básicos .....	95
4.1.1.5. De los Análisis de Suelos .....	96
4.1.1.6. Estudios de pruebas destructivas (diamantina) .....	104
4.1.1.7. Estudios de Evaluación de Estructuras .....	104
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>122</b>
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>122</b>
<b>FUENTES DE INFORMACIÓN</b> .....	<b>124</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>125</b>

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad la Institución Educativa Mariano Melgar del Distrito de Huariaca Provincia y Región de Pasco, cuenta con una infraestructura cuya edificación presenta fisuras y grietas en las vigas principales siendo una edificación recién construido y pese a ello ya se pueden notar, a simple inspección ocular, la presencia de fisuras y grietas por lo que para su culminación de la construcción se planteó usar el sistema de reforzamiento con fibra de carbono.

Frente a los efectos negativos que genera el medio ambiente sobre la infraestructura educativa, ya sea en lozas, columnas y en general en las estructuras de concreto con fierro, y sobre todo cuando ha existido una deficiente mezcla de materiales, se hace necesario reemplazar o reforzar estas estructuras con material que cumpla con las especificaciones adecuadas que tengan un periodo de vida acorde a los estándares establecidos para este tipo de estructuras. Afortunadamente, en la actualidad la tecnología, de la mano con la ciencia, ha encontrado alternativas mucho más accesibles y de mejor calidad como los Polímeros Reforzados con Fibras de Carbono (CFRP) lo que a lo largo del tiempo hacen que este material resulte en una relación costo-beneficio muy favorable.

La facilidad en la instalación por la baja densidad del material, la ilimitada longitud, la inmunidad a la corrosión, la resistencia, entre otros factores convierten a los CFRP en un producto ventajoso en la industria de la construcción.

Los principios para la pega de Polímeros Reforzados con Fibra de Carbono (CFRP) a las estructuras de concreto son muy similares a los principios utilizados en la aplicación de platinas de acero adheridas. En general, la resistencia a flexión, a corte o axial del elemento es incrementada por las aplicaciones externas del material que trabaja a tensión.

En este trabajo se pretende entregar una guía para el diseño con las Fibras de Carbono (CFRP) que sirva para reforzar estructuras de concreto,

principalmente vigas, además de resaltar las ventajas y desventajas de este sistema. Las fibras de carbono tienen la característica de poseer una gran resistencia a la tracción, esto permite su uso en diferentes formas, como telas flexibles o láminas rígidas para reforzar o reparar diferentes elementos estructurales, principalmente sometidos a flexión.

La versatilidad de las telas de fibra de carbono, permite incrementar la resistencia al corte y la ductilidad de vigas y en algunos casos, el sistema ha sido diseñado para aumentar la rigidez y limitar las deformaciones. Esto se puede realizar con las estructuras en servicio y también donde el espacio de trabajo es muy reducido.

Se presenta un estudio para la aplicación en la edificación de la Institución Educativa Mariano Melgar del distrito de Huariaca provincia y región de Pasco.

# CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

## 1.1 DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

En la zona del proyecto se viene construyendo las edificaciones de la Institución Educativa Mariano Melgar del distrito de Huariaca Región de Pasco, que consta de dos Módulos educativos por la modalidad de contrato a zuma alzada desde el 02 de mayo del 2014, el cual fue abandonado el mismo año y resuelto el contrato a lo que el Gobierno Regional de Pasco reinicia las construcciones el 26 de Octubre del 2016, en donde para dar inicio a las actividades de construcción, se hizo la inspección ocular por los técnicos responsables en la que encontraron anomalías en el concreto de losas y vigas notándose fisuraciones y grietas en donde recomendaron realizar los estudios necesarios para continuar con su construcción o su demolición. Por esta razón se realizaron los estudios de suelos, pruebas de destructivas como diamantinas, resistencia de cargas, etc.

## 1.2 DELIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.2.1. Espacial:

La I.E. N° 35003 Mariano Melgar de Huariaca ubicado en la Región de Pasco, Provincia de Cerro de Pasco.

### 1.2.2. Temporal

6 meses calendarios

## 1.3 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMAS DE INVESTIGACIÓN

### 1.3.1 Problema General

- Escases de nuevas tecnologías en el sistema de reforzamiento estructural al menor costo.

### 1.3.2 Problemas Específicos

- Falta de resistencia a la estructura (vigas) de la Edificación en la Institución Mariano Melgar de Huariaca para reparar y/o reforzar en forma rápida y simple los problemas.

- Ausencia de un sistema de reforzamiento con fibra de carbono para otorgar mayor resistencia y tensión a las vigas principales por flexión las cuales presentan fallas como son las fisuras y otras patologías que se puedan encontrar en las estructuras de concreto.

#### 1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

##### 1.4.1 Objetivo General

- Aplicar nuevas tecnologías en el sistema de reforzamiento estructural al menor costo y satisfacer los principios de resistencia de estructuras con el uso de polímeros reforzados de fibra de carbono CFRP.

##### 1.4.2 Objetivos Específicos

- Otorgar mayor capacidad de resistencia a la estructura (vigas) de la Edificación en la Institución Mariano Melgar de Huariaca para reparar y/o reforzar en forma rápida y simple los problemas originados en estructuras de concreto, por deficiente construcción, corrosión, fallas estructurales, etc., para incrementar su capacidad estructural, en base a esta tecnología.
- Identificar y aplicar el sistema de reforzamiento con fibra de carbono para otorgar mayor resistencia y tensión a las vigas principales por flexión las cuales presentan fallas como son las fisuras y otras patologías que se puedan encontrar en las estructuras de concreto.
- Determinar los procedimientos de reparación o reforzamiento de vigas con más de 20 años de antigüedad.

#### 1.5 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

##### 1.5.1 Hipótesis General

- Aplicando nuevas tecnologías en el sistema de reforzamiento estructural se reduce el costo para satisfacer los principios de resistencia de estructuras con el uso de polímeros reforzados de fibra de carbono CFRP.

### 1.5.2 Hipótesis Específicas

- Al incrementar su capacidad estructural, en base a esta tecnología, se refuerza en forma rápida y simple los problemas originados en estructuras de concreto, por deficiente construcción, corrosión, fallas estructurales, etc

## 1.6 VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1. Variables dependientes reforzamiento estructural de vigas por flexión de la edificación en base CFRP polímeros reforzados con fibras de carbono

1.6.2. Variable independiente la Institucion Educativa Mariano Melgar de Huariaca

## 1.7 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

1.7.1. Tipo de Investigación      método científico

1.7.2. Nivel de Investigación      enfoque cuantitativo

1.7.3 Métodos de Investigación La memoria de este proyecto es de edificación, análisis y reforzamiento estructural debido a problemas por la aparición de fisuras y grietas en las Vigas principales los cuales pueden presentar posibles riesgos futuros para quienes ocupen esta estructura de Edificación, con sistemas de reforzamiento estructural de polímeros reforzados de fibra de carbono.

1.7.4 Diseño de investigación diseño experimental.

## 1.8 POBLACIÓN Y MUESTRA DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.8.1. Población

El distrito de Huariaca cuenta con una población total, proyectada al año 2016, de 9,055 habitantes.

#### Proyección de la Población

La proyección de la población en el área del proyecto se ha calculado sobre la base de una tasa de crecimiento intercensal (1993 – 2007), la

misma que ha sido determinada de acuerdo a los patrones de crecimiento del distrito de Huariaca determinados por el Instituto de Estadística e Informática – INEI. La tasa de crecimiento es de 1.44% anual. Los cuales se muestran en el cuadro siguiente.

*Tabla 1 Población proyectada*

DISTRITO/ AREA DEL PROYECTO	POBLACION (Hab.)										tasa de crecimiento	
	1993	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015		2016
	6,518	7,962	8,077	8,193	8,311	8,431	8,552	8,675	8,800	8,927	9,055	1.44%

Fuente: INEI – Censo de Población y Vivienda 1993 y 2007

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES**

- A. Título:** “Análisis del comportamiento de una viga de concreto armado, ensayada a flexión, reforzada con barras de fibra de carbono”.

**Autor:** Luis Rodolfo Rosales Guzman (2008)

**Resumen:**

Las barras de fibra de carbono son un elemento de refuerzo estructural, para vigas y para muros de carga, en ambos casos el impacto estético es muy bajo, y el procedimiento de aplicación es muy sencillo; por lo que es una alternativa muy eficiente para elementos estructurales en funcionamiento.

En este trabajo se elaboraron vigas de concreto armado, de las cuales la mitad se reforzó con barras de fibra de carbono, para demostrar los incrementos significativos en cuanto a módulo de ruptura y carga máxima permisible; basados en un ensayo de flexión, con una carga puntual aplicada y la viga simplemente apoyada en sus extremos.

Se describe el proceso de aplicación de la fibra de carbono, demostrando su facilidad de aplicación y los requerimientos mínimos de preparación de un elemento de concreto para hacer funcionar el refuerzo.

Según lo investigado, el refuerzo de barras de fibra de carbono ofrece una solución efectiva a problemas comunes; que van desde: incremento de cargas a una estructura, fatiga y envejecimiento del concreto y acero, hasta malos diseños estructurales.

Se exponen a su vez experiencias nacionales e internacionales, en las cuales el refuerzo estructural con fibra de carbono, ha sido la solución a diferentes circunstancias, tanto en el campo de la construcción como en

diversas industrias. Ejemplificando casos reales detallando el problema y la solución encontrada en la fibra de carbono.

Aunque esta investigación se limita a un refuerzo estructural a flexión, en vigas de concreto, existen productos de fibra de carbono, que pueden utilizarse en refuerzos de columnas a compresión y confinamiento, refuerzos en zonas de corte en vigas y nudos de estructuras, así como muros de carga y pisos o pavimentos que requieran altas resistencias a la abrasión.

- B. Título:** “Diseño del reforzamiento para la reparación o aumento de capacidad de carga de vigas para puentes de concreto reforzado utilizando fibra de carbono”

**Autor:** Carlos Helamán Ibañez López (2013)

**Resumen:**

El presente documento expone la filosofía y metodología de diseño del refuerzo de elementos a flexión con material FRP de fibra de carbono. Se exponen los criterios básicos para diseñar e instalar este tipo de refuerzo en estructuras de concreto reforzado según el código ACI 440.2R-08. Se hace una exposición corta de los elementos de un puente, las cargas que lo afectan y el método líneas de influencia para el análisis del comportamiento de la superestructura. También se exponen los principales métodos de diagnóstico y evaluación de estructuras de concreto, métodos tradicionales de reparación y refuerzo de los elementos a flexión para vigas de puentes. Se exponen las características de la fibra de carbono, historia, códigos existentes, 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 concreto reforzado que se diseña para una carga HS-15 y que se desea reforzar para una carga HS-20 después de ser dañada por un golpe. Para esto se diseñan las dos vigas

y con estos datos se procede a calcular la cantidad de refuerzo FRP de fibra de carbono para reforzarla explicando de forma clara el proceso de reparación y diseño. Al final del documento se presenta un caso real de reparación y refuerzo de las vigas de un puente de la ciudad de Guatemala en 2011, se puede observar la gravedad del daño, los pasos del método de reparación de las vigas y paso a paso la colocación del refuerzo de fibra de carbono.

**C. Título:** “Uso de fibras de carbono como reforzamiento a corte en vigas de concreto reforzado”.

**Autor:** José Rafael Contreras Rincón (2011)

**Resumen:**

Este trabajo comprende la investigación experimental realizada sobre vigas en concreto reforzadas con fibras de carbono. A lo largo del este informe se muestra la logística, procedimientos y ejecución de esta investigación. Los ensayos consisten en construir 3 modelos de vigas en concreto reforzado a ESCALA REAL. El resultado del ensayo muestra el incremento de la resistencia a corte fue notable en la viga con reforzamiento correctivo ya que se presentó un incremento del 6.0 Ton con respecto a la carga de falla sin reforzamiento sin presentar ningún tipo de grieta considerable, lo cual nos lleva a concluir que pudiera resistir más de las 10 Ton estimadas.

**D. Título:** “Uso de fibras de carbono como reforzamiento a flexión en vigas de concreto reforzado”

**Autor:** Andres Arturo Beltran Riveros (2011)

**Resumen:**

Las estructuras de concreto armado presentan con frecuencia ciertas patologías estructurales causadas por errores de diseño, fallas constructivas, mala calidad de los materiales, cambio de uso de la estructura, falta de mantenimiento, entre otras; que pueden originar un aumento en la carga última de la estructura. En la mayoría de los casos se hace necesario realizar intervenciones de refuerzo y reparación; por ello uno de los posibles métodos es el refuerzo exterior mediante el uso de fibras de carbono, que consiste en cubrir el elemento dependiendo la condición de falla que se presenta, sea flexión o corte. Se ha demostrado en investigaciones realizadas, que el método de refuerzo empleando materiales compuestos por fibras de carbono aumenta de manera considerable la capacidad de carga de los elementos estructurales, además que es una forma sencilla y práctica de reforzamiento estructural. Los polímeros FRP son los elementos más usados como método de reforzamiento en la rehabilitación y reparación de los diferentes elementos estructurales; ya que una de sus principales propiedades es su elevada resistencia a la tracción y su ligereza. Por ello, esta investigación tiene como objetivo usar materiales compuestos por fibras de carbono que permitan aumentar la capacidad a flexión, mediante el estudio y análisis de vigas dispuestas en esta condición de falla. Al concluir el estudio Se observa un notable incremento de la carga última de falla y resistencia a flexión en vigas que presentan fisuras apenas notables o en elementos que se encuentran bastante deteriorados, al realizar un reforzamiento preventivo en el primer caso o un reforzamiento correctivo en el segundo caso con tela SikaWrap 103C adheridas con epóxico Sikadur – 301.

## **2.2. BASES TEÓRICAS.**

### **2.2.1. La Fibra de Carbono**

Su concepto según los autores Theodore, Brown, Eugene, Bruce y Bursten (citado por Fernández, 2012), sostiene lo siguiente:

Las propiedades del grafito son anisotrópicas, es decir, difieren en distintas direcciones a través del sólido. A lo largo de los planos de carbono, el grafito posee gran resistencia a causa del número y la fortaleza de los enlaces carbono-carbono en esta dirección. En cambio, hemos visto que los enlaces entre los planos son relativamente débiles, lo que hace que el grafito sea débil en esa dirección.

Se pueden preparar fibras de grafito en las cuales los planos de carbono están alineados paralelos al eje de la fibra en diversos grados. Estas fibras también son ligeras [...] y muy poco reactivas químicamente [...]. El proceso de “estiramiento” y “orientación” de dichas fibras a determinada temperatura, obtiene como producto carbono amorfo, comúnmente conocido como fibras de carbono.  
(p. 6)

### **2.2.2. Base de polímeros reforzados con fibra carbono**

Comprende aquel “sistema de refuerzo para concreto armado o estructuras de acero y metal. Este sistema está compuesto por láminas de refuerzo resistentes a la corrosión, reforzadas con fibra de carbono (CFRP)” (Sika Perú, 2014, p. 1)

En base a ello, los autores Theodore, Brown, Eugene, Bruce y Bursten (citado por Fernández, 2012), sostienen lo siguiente:

Se usan extensamente materiales compuestos (“composites”) que aprovechan la resistencia, estabilidad y baja densidad de las fibras de carbono. Los materiales compuestos son combinaciones de dos o más materiales que están presentes en fases separadas y se combinan para formar estructuras que aprovechan ciertas propiedades deseables de cada componente. En los materiales compuestos de carbono, las fibras de grafito se tejen para formar

una tela que se incrusta en una matriz que aglutina las fibras para formar una estructura sólida. El material compuesto terminado es más resistente que cualquiera de sus componentes. (p. 7)

De acuerdo a Castillo (2010), las fibras de carbono (CFRP), comprenden a aquellas que son más conocidas y empleadas por lo que presentan excelentes propiedades mecánicas que los demás tipos de fibra. Este tipo de fibras, “son fabricadas con polímeros tipo PITCH o PAN. Las fibras a base de polímeros PITCH se fabrican de petróleo refinado o brea, ofrecen materiales de uso general y poseen una alta resistencia y un alto módulo de elasticidad”. (Castillo (2010, p. 2). Asimismo, las fibras PAN están elaboradas con poliacrilonitrilo y originan un material de alta resistencia y alto módulo de elasticidad.

T

Material	Módulo de elasticidad (GPa)	Resistencia a la tensión (MPa)	Deformación última a la tensión (%)
<b>Carbono</b>			
Alta resistencia	215-235	3500-4800	1,4-2,0
Ultra alta resistencia	215-235	3500-6000	1,5-2,3
Alto módulo	350-500	2500-3100	0,5-0,9
Ultra alto módulo	500-700	2100-2400	0,2-0,4
<b>Vidrio</b>			
E	70	1900-3000	3,0-4,5
S	85-90	3500-4800	4,5-5,5
<b>Aramida</b>			
Bajo módulo	70-80	3500-4100	4,3-5,0
Alto módulo	115-130	3500-4000	2,5-3,5

idades de las fibras de carbono.

*Castillo, R. (2010, Octubre). Uso de polímeros reforzados con fibras (FRP) como refuerzo externo de elementos de concreto de puentes en Costa Rica. PITRA, 1 (6).*

El carbono tiene también mayor resistencia a elevada temperatura y a ambientes corrosivos, pero tiene un precio más alto y sólo es empleado como fibra corta. Estas fibras de carbono son fuertes y congruentemente rígidas, originando reforzamiento con baja densidad, por lo que mantienen un precio alto. Cabe indicar, que las fibras de carbono mantienen tres variantes, como son la alta resistencia, intermedio y alto módulo, por lo que son de gran utilidad para las aplicaciones donde los factores críticos son la rigidez, resistencia y bajo peso, por lo que el precio representa un factor secundario. (Callister, 2007).

De acuerdo a los autores Theodore, Brown, Eugene, Bruce y Bursten (citado por Fernández, 2012), detallan el uso de Los CFRP según su presentación y disposición sobre la estructura a reforzar, pudiendo utilizarse para el reforzamiento estructural de lo siguiente:

- Vigas y losas de hormigón armado a flexión.
- Vigas de madera a flexión.
- Vigas y pilares de hormigón armado a cortante.
- Vigas de hormigón armado a momento torsor.
- Reforzamiento de columnas a compresión, flexión y cortante.
- Incremento de ductilidad en columnas de hormigón armado.
- Muros de mampostería (no armados) a flexión y cortante.
- Placas de hormigón armado. (p. 8)

El sistema Sika CarboDurse utiliza para refuerzos de estructuras de concreto, madera y metal, en los siguientes casos:

**Incremento de carga**

- Incremento de cargas vivas en almacenes.
- Incremento de volumen de tráfico en puentes.

- Instalación de maquinaria pesada en edificios industriales.
- Estructuras sometidas a vibración.
- Cambios de uso en edificaciones

#### **Daños a partes estructurales**

- Envejecimiento de materiales de construcción.
- Corrosión de los refuerzos de acero
- Impacto de vehículos
- Incendios

#### **Mejora de la capacidad de servicio**

- Disminución de la deformación.
- Reducción de la fatiga en los refuerzos de acero.
- Reducción del ancho de las fisuras.

#### **Cambios en sistemas estructurales**

- Eliminación de paredes o columnas.
- Eliminación de una sección de losa

#### **Defectos en el procedimiento constructivo o diseño**

- Insuficiente acero de refuerzo.
- Insuficiente recubrimiento

Cabe indicar que entre las principales características y ventajas de las fibras de carbono destacan las siguientes:

- Poco peso. Disponibilidad en cualquier longitud sin necesidad de traslapes.
- Poco espesor.
- Fácil de transportar (en rollos).
- Las láminas no requieren previo tratamiento.
- Simplicidad en las intersecciones de las láminas (emparrillados).
- Aplicación de bajo costo. No requiere manipulación compleja ni equipo de instalación.
- Gran resistencia a la tracción.
- Disponibilidad en varios módulos de elasticidad.
- Excelente resistencia a la fatiga.

- Permite ser pintado sin preparación previa.
- Resistente a los álcalis. (Sika Perú, 2014, p. 1-2).

Agregado a ello, los mismos autores Theodore, Brown, Eugene, Bruce y Bursten (citado por Fernández, 2012), sostienen lo siguiente:

Los polímeros reforzados con fibras de carbono consisten en fibras de carbono ubicadas sobre una matriz epóxica. Los materiales epóxicos constituyen matrices útiles a causa de su excelente adherencia. Estos polímeros reforzados con fibras, tanto de carbono como de vidrio o aramida (que no son objeto del presente trabajo) son un material hoy de uso cotidiano en nuestra industria. Al inicio de la investigación y puesta en práctica de los refuerzos con dichos polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP por sus siglas en inglés), se contaba con el material en dos presentaciones, según su forma de trabajo y aplicación: Platinas de fibras de carbono, rectas o en forma de "L". Tejidos de fibra de carbono. (p. 7)

De acuerdo a Oller (citado por Olmo, 2011), las fibras de carbono constituyen lo siguiente:

(...) un material idóneo para el refuerzo de estructuras de hormigón armado, por la inalterabilidad de las características mecánicas de las fibras ante la humedad, disolventes, ácidos o bases y otros agentes atmosféricos, lo que permite un contacto directo con el hormigón durante periodos de tiempo prolongados (p. 12)

Agregado a ello, cabe indicar que las fibras de carbono, presentan "elevadas resistencias a largo plazo en relación a los valores obtenidos a corto, incluso bajo carga sostenida, una resistencia a tracción y compresión elevadas, un módulo de rigidez similar al acero y

un comportamiento a fatiga excelente”, indica Meier (citado por Olmo, 2011).

Como lo indica, Flores (2000), “este polímero se obtiene de calentar sucesivamente a altas temperaturas (hasta 1500 °C) otro polímero llamado poliacrilonitrilo”. (p. 1)

Es así, que este proceso de recalentamiento forma cintas perfectamente alineadas de casi carbono puro en su forma de grafito, por ello, se denomina fibras de carbono. A pesar, que en la construcción la aplicación de las fibras de carbono la aplicación es reciente, el uso de esta fibra no es novedad a nivel mundial, es así, que hace más de 30 años se viene empleando en la industria, con mayor resistencia a la tensión y anti-corrosivos, presentando diversas ventajas en el campo de la construcción. Flores, 2000, p. 1)

Las fibras de carbono están totalmente disponibles en el mercado peruano de 0.50 m de espesor por longitud variable, en base al requerimiento del diseño. En la lámina su presentación está alineada en una sola dirección, en la cual se suministra la resistencia adicional. (Flores, 2000, p. 3). El mismo autor señala como ejemplo, el caso del refuerzo de una losa aligerada cuya resistencia se planifica acrecentar, por lo que se colocan tiras de fibras por debajo de las viguetas, en el número de capas que se requiere, asimismo. Por lo que en una losa armada en dos sentidos, se pueden colocar franjas en dos direcciones.

Es así, que después de la eficiente preparación de la superficie del concreto, el proceso de aplicación de un sistema FRP se explica en las siguientes fases:

- Ya preparada la superficie de concreto, se aplica una capa de imprimante epóxico usando un rodillo especial. Usualmente, este primer producto epóxico tiene una baja viscosidad

permitiendo su penetración en el concreto. La función de esta primera capa es proveer a la superficie del concreto una adecuada adherencia.

- Acto seguido, se aplica una masilla o pasta epóxica para rellenar cualquier defecto en la superficie que pueda quedar mayor de ¼" de profundidad (Cualquier cangrejera o hueco profundo debe ser rellenado con mortero durante la preparación de la superficie de concreto, no en esta etapa).
- Luego, se cubre la superficie con un saturante epóxico para impregnar las fibras secas. Este saturante mantiene las fibras en su adecuada dirección y posición. El objetivo de esta capa de saturante es rápidamente empapar las fibras y mantenerlas en su ubicación mientras se inicia el proceso de curado del sistema de reforzamiento. Debido a su alta viscosidad, permite el fácil manejo de la fibra y su correcta aplicación. Este saturante también distribuye los esfuerzos en las fibras y ayuda a protegerlas de las condiciones ambientales y la abrasión.
- Se cortan y preparan a medida las láminas de fibras de carbono de acuerdo al diseño del proyecto y se colocan en su lugar, permitiendo que comience a absorber el saturante.
- Luego de un tiempo de espera determinado que permite que la lámina absorba la primera capa de saturante, se aplica una segunda capa de saturante para cubrirla.
- Finalmente, se aplica una capa de acabado que cubre totalmente el sistema FRP, logrando una apariencia similar a un concreto común. Esta capa también protege a la fibra de los rayos ultravioletas, ataques químicos, abrasión, severas condiciones climáticas, etc. (Flores, 2000, p. 4).

Cabe resaltar, que la efectividad de este sistema está supeditado a la habilidad y experiencia con la que debe contar el técnico aplicador para obtener una adecuada adherencia concreto - fibra, encontrándose

siempre supervisado por un ingeniero capacitado en este proceso. Es así, que “el manejo apropiado de los tiempos de espera entre una y otra capa, los espesores exactos de las capas, y la presión de aplicación son factores determinantes en la resistencia final del sistema, por lo que no se recomienda su aplicación en manos inexpertas”. (Flores, 2000, p. 4)

Agregado a ello, las fibras de carbono para materiales compuestos proceden fundamentalmente del poliacrilonitrilo (PAN), el cual es comprendido como aquel polímero de tipo acrílico. Por lo que, las fibras de carbono de alta resistencia y alto módulo de elasticidad mantienen un diámetro de 5 a 8  $\mu\text{m}$  y están constituidas de pequeños cristalitas de grafito. Es así, que en un monocristal de grafito los átomos de carbono se encuentran ordenados en redes hexagonales. (Groover, 1997, p. 234).

De modo que, el módulo de elasticidad de las fibras de carbono está supeditado del nivel de perfección de la orientación, el cual se modifica de manera considerable con las condiciones y proceso de fabricación. Es así, que las imperfecciones en orientación tienen como resultado, los huecos de forma complicada, alargados y de manera paralelos al eje de la fibra. Por lo que estos actúan como puntos de concentración de tensiones y puntos débiles que conllevan a la disminución de las propiedades de las fibras de carbono. (Groover, 1997, p. 234).

Es así, que las fibras están sometidas a un procedimiento de tres etapas para producir fibras con las capas gráficas encaminadas al eje de la fibra, destacando las siguientes:

- **Orientación del polímero precursor PAN por estiramiento:** siendo el primer paso estirar el polímero de manera que quede paralelo a lo será el eje de la fibra. Luego de ello, se oxida a 200-300 °C en aire, proceso en el que se le agrega oxígeno a

la molécula PAN y se forma una estructura hexagonal, produciéndose un cambio de color del polímero de blanco a negro.

- **Carbonización de las fibras:** Para lograr una fibra de gran resistencia se acude al tratamiento térmico de carbonización, el PAN llega a una calentura de 2000 a 2500 °C, donde se logran alinear las cadenas del polímero hasta llegar a formar hojas de grafeno, cintas muy delgadas y de doble dimensión, llegándose a eliminar todos los átomos que no son de carbono, lográndose una alta resistencia a la tracción.
- **Grafitización:** Este proceso es desarrollado por encima de los 2500 °C, aplicándose cuando se desee lograr un incremento del módulo de elasticidad a expensas de la alta resistencia a tracción.

Las fibras de carbono que mantienen un alto nivel de resistencia se denominan como tipo HT, y las que poseen un alto módulo de elasticidad se denominan HM. (Groover, 1997, p. 234).

### 2.2.3. Reforzamiento Estructural

Cabe indicar, que de todos los sistemas de reforzamiento existentes en el medio, el que mayor acogimiento ha tenido por diversas ventajas es el de láminas de fibras de carbono. Flores (2000), agrega lo siguiente:

(...) que una o varias capas de láminas son colocadas alrededor o debajo de las secciones de concreto a reforzar, y junto a un sistema adhesivo epóxico especial, se logra una total adherencia a la antigua superficie de concreto: el resultado es una capa externa de reforzamiento que ayuda a soportar las cargas del elemento y previene deflexiones excesivas. (p. 2)

Los sistemas FRP están incrementado su uso en el Perú por diversos factores, entre los que destacan que tienen un costo muy competitivo ante los sistemas convencionales de refuerzo y un comportamiento estructural óptimo. Sin embargo, en el Perú las empresas especializadas en su diseño y aplicación son muy pocas. (Flores, 2000, p. 2)

Al ser normadas por el American Concrete Institute (ACI) y por los fabricantes de la fibra, este sistema ha logrado convencer a todos los componentes del entorno constructivo, teniendo como base la aceptación de los propietarios, por la versatilidad que brinda el sistema y su capacidad para poder modificar el uso de estructuras, con su rápida aplicación y adecuación a las estructuras. (Flores, 2000, p. 2)

Es así, que a este comportamiento se le añade la rápida aplicación y bajo costo, logrando un sistema único asentado en materiales de alta resistencia, con una alta relación rigidez/peso elevada y muy resistentes a ataques químicos. (Flores, 2000, p. 2)

Como lo indica, Flores (2000), este sistema de FRP tiene un buen funcionamiento cuando se mantiene una buena adherencia a la cara de concreto, contando con condiciones ambientales severas, la superficie del concreto puede representar un contacto muy débil en el proceso de reforzamiento y se tiene que contar con un especial cuidado en esto. Existen factores relevantes dentro del proceso de reforzamiento, siendo la mano de obra especializada en su uso y aplicación y en control de calidad de la superficie a reparar. (p. 2). Entre otros factores importantes destacan los siguientes:

- Resistencia a la tracción de la superficie del concreto.
- Uniformidad y espesor de la capa de adhesivo.
- Resistencia y perfecta reacción química del sistema epóxico de adhesión.

- Geometría del elemento a reforzar.
  - Condiciones ambientales en el momento de la aplicación.
- (Flores, 2000, p. 2).

Antes de instalar el sistema FRP, se tiene que preparar la superficie a reforzar tratando grietas o cangrejas, imperfecciones y limpiando o arenando las barras de refuerzo si estas presentan óxido. Es relevante mencionar, que el sistema FRP no está creado para poder resistir grandes fuerzas expansivas creadas por la corrosión del refuerzo. (Flores, 2000, p. 2).

Este tipo de reforzamiento estructural utilizando fibra de carbono es comprendido como aquella aplicación que permite el mejoramiento del comportamiento ante cargas, aumentando o restituyendo la capacidad de las estructuras de concreto. (Flores, 2000, p. 2).

El reforzamiento con fibra de carbono se empleó por primera vez en la NASA, específicamente para las naves espaciales; después de ello, se aplicó en la industria automotriz y hace 25 años tiene gran utilidad en el reforzamiento de estructuras, para empezar en puentes y ahora en edificios enteros y distintas estructuras. (Flores, 2000, p. 2).

Se destaca que, entre las fundamentales ventajas del proceso de reforzamiento con fibra de carbono en comparación a otras técnicas de reforzamiento es que es menos traumática y no invasiva para la estructura, por lo que tiene su aplicación de manera externa sin requerimiento de demoler ni picar alguna estructura, es suficiente con retirar el tarrajeo y desbastar de manera ligera la superficie del sustrato de concreto. (Flores, 2000, p. 2).

Otra ventaja para destacar es la rapidez de distribución y puesta en servicio de la estructura reforzada. Es así, que el tejido de fibra de carbono tiene su distribución es diversos rollos, manteniendo de 0.33

mm de grosor, de modo que puede ser cortado y adaptado en la medida que se necesite. (Groover, 1997)

Por ello, es fundamental elaborar el proyecto estructural con la finalidad de especificar la cantidad exacta de fibra y su lugar en los distintos elementos estructurales que necesitan de reforzamiento, sean las vigas, losas, columnas o muros. (Groover, 1997).

El reforzamiento es fundamental para aumentar la capacidad de carga o ampliaciones de edificios, puentes y distintas estructuras. Asimismo, es aplicada cuando se necesita aumentar la resistencia de una estructura o el reparo de componentes dañados a causa de las condiciones agresivas de su entorno, entre los que destacan el fuego, impacto de vehículos, envejecimiento, corrosión, entre otros. (Groover, 1997).

Para poder instalar el sistema, se tiene que proceder a retirar el tarrajeo, la pintura y otros elementos que están cubriendo la base de concreto, luego de ello, se desbasta la superficie ligeramente y se aplica un imprimante epóxico, luego de ello, una masilla niveladora y para finalizar un saturante epóxico, en base al cual se instala la fibra creando de esta manera la matriz polimérica que es la que tiene mayor resistencia a los esfuerzos transmitidos por la estructura. (Groover, 1997).

#### **2.2.4. Aplicaciones de los sistemas FRP**

De acuerdo a los beneficios de este sistema de reforzamiento, su extensa aplicación en diversas construcciones se explica en lo siguiente:

- Tiene peso muy liviano (mínima carga muerta adicional).
- Mantiene alta durabilidad, anticorrosivo y bajo mantenimiento.
- Sostiene rápida instalación, con el consiguiente ahorro de dinero y tiempo de espera.

- Tiene mínimo incremento de espesor en la geometría del elemento.
- Es muy flexible, adaptable a todas las formas de los elementos. (Flores, 2000, p. 4).

Asimismo, cabe indicar que sus aplicaciones más usuales vienen determinadas por:

- Cambios en el uso o cargas en las edificaciones.
- Defectos en el diseño o construcción.
- Cambios en las normas de diseño.
- Daños sísmicos.
- Deflexiones excesivas, etc. (Flores, 2000, p. 4).

#### **2.2.5. Aplicaciones en Vigas**

En cuanto a la aplicación de vigas se refiere, el sistema FRP aumenta sensitivamente la capacidad de resistencia a la flexión y al corte en estos elementos. Agregado a ello Flores (2000), sostiene lo siguiente:

La resistencia adicional es tal, que una viga agrietada por las cargas a las que ha sido sometida, reforzada de extremo a extremo posteriormente con este sistema, puede llegar a superar su capacidad de carga adicional. Al aplicar este sistema en la cara del fondo de la viga, en su longitud, incrementamos su resistencia a la flexión, controlando mejor su deflexión, mientras que si se aplica en las caras laterales, incrementamos su resistencia al corte. (p. 4)

#### **2.2.6. Aplicaciones en Columnas**

Entre las aplicaciones más empleadas se trata en aumentar la resistencia a la flexión y ceder mayor confinamiento a las columnas. Por lo que este es un sistema de bajo costo en paralelo a tener que ampliar

la sección de las columnas, teniendo como resultado la pérdida del aspecto arquitectónica original. Es así, que ya estando reforzada y recubierta la columna, el cambio en la apariencia es abolido, pero teniendo mucha significancia en su resistencia. (Flores, 2000, p. 4).

### **2.2.7. Aplicaciones en Losas**

En cuanto a la aplicación del sistema de reforzamiento, Flores (2000), señala lo siguiente:

(...) 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 concreto, losas de estacionamiento, losas industriales, etc. (p. 6)

En definitiva, las aplicaciones de este sistema son muchas, así como las necesidades de reforzamiento de una estructura. Es así, que el campo del reforzamiento estructural, y sobre todo encontrándose en un país sísmico y que contiene diversas edificaciones que han sido construidas en su gran mayoría por mano de obra sin experiencia, careciendo de dirección técnica y no respetando las normas o reglamentos, por lo que es recomendable, que los profesionales presten mucha atención al uso de estas nuevas tecnologías que facilitan la vida con una buena relación beneficio-costos en comparación a los métodos tradicionales. (Flores, 2000, p. 6)

### **2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.**

**Concreto:** Es comprendido como aquel material compuesto, utilizado en la construcción, creado fundamentalmente por un aglomerante al que se le agrega partículas o fragmentos de un agregado, agua y aditivos específicos. Este conglomerado está formado mayormente por cemento combinado con una proporción apropiada de agua para que se ocasione

una reacción de hidratación. Asimismo, existen concretos que se originan con otros conglomerantes distintos al cemento, como el concreto asfáltico que emplea betún para ejecutar la mezcla.

**Concreto armado:** El concreto al ser reforzado con acero en manera de varillas o mallas, se crea el denominado concreto armado o reforzado; siendo empleado para denominar a sistemas estructurales como: vigas o trabes, losas, cimientos, columnas, muros de retención, ménsulas, etc.

**Barras de Fibra de Carbono:** Es comprendido como aquella barra de sección rectangular elaborada de fibra de carbono de grado aeroespacial y matriz polimérica, para refuerzo de estructuras de concreto y mampostería.

**Inyección Epóxica:** Se refiere a aquel proceso de adhesión al concreto, por medio de una resina epóxica de muy baja viscosidad, la que es incrustada a presión o por gravedad, con la finalidad de articular las dos partes de concreto endurecido.

**Polímero:** Se refiere a aquel material macromolecular creado por la mezcla química de monómeros, los cuales mantienen la misma o distinta composición química.

**Refuerzo estructural:** Se refiero al incremento de la capacidad estructural de un componente que se mantiene en buenas condiciones, con la finalidad de poderlo adaptar a un cambio de la carga.

**Reforzamiento estructural de edificaciones:** Comprende aquellas técnicas y empleo de los distintos materiales con la finalidad de fortificar un inmueble con el objetivo de prevenir los posibles efectos originados por un desastre o emergencia.

**Sistema de Refuerzo Fibra de Carbono y Concreto:** Representa la unión de una barra de fibra de carbono y una resina epóxica, adjunta al concreto para aumentar su resistencia.

**Nivelación de la superficie:** Estas resinas epóxicas están fundamentalmente delineadas para relleno de cavidades, agujeros e

irregularidades superficiales menores de 0,5 cm. Tiene una distinguida adhesión al concreto, adecuada resistencia a compresión, un tiempo de vida en recipiente (pot-life) y tiempo abierto de uso apropiados para la aplicación que se va a ejecutar con ella.

## **CAPÍTULO III: RESENTACIÓN DE RESULTADOS**

### **3.1. CONFIABILIDAD Y VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO**

#### **3.1.1. Tecnología De Los Materiales o De La Construcción**

##### **3.1.1.1 Fallas Estructurales y No Estructurales De Elementos De Concreto**

###### **¿Por qué se agrieta el concreto?**

Básicamente, el concreto se agrieta porque las tensiones internas o externas, han sobrepasado la resistencia de este. Para ilustrar lo anteriormente señalado, se tiene una barra de concreto de una longitud arbitraria, que no está sometida a ninguna tensión, y que contiene una cantidad de humedad dada, a una temperatura dada. Si a la barra se la seca o se la enfría, sin ningún tipo de restricción, ella simplemente se contraerá, sin que se haya desarrollado tensión alguna. Si, por el contrario, los extremos se restringen para mantener la longitud original, mientras se seca o se enfría, la barra desarrolla tensiones de tracción. Es como si se le hubiera permitido contraerse libremente, y luego se le hubiera tirado hacia atrás, a su longitud original. Mientras pasa el tiempo, la tensión gradualmente se alivia hasta algún punto debido al fenómeno de fluencia lenta, que es un cambio gradual entre tensión y deformación. A cualquier edad, ya sea en concreto fresco o endurecido, si la tensión de tracción neta, que es menor a la tensión elástica debido a la fluencia, alcanza la resistencia a la tracción a esa edad, el concreto se agrietará. Si la tensión de tracción no alcanza a la resistencia a la tracción, lo que usualmente ocurre, el concreto no se agrietará.

## ¿Qué causa el agrietamiento?

En la siguiente tabla se muestran las causas del agrietamiento del concreto:

*Tabla 2 Causas en el agrietamiento del concreto*

CAUSA	ACCION
<p><b>Antes del endurecimiento:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Movimientos en obra</li> <li>• Asentamiento plástico</li> <li>• Retracción de fraguado</li> </ul> <p><b>Después del endurecimiento:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Químicas</li> <li>• Físicas</li> <li>• Térmicas</li> <li>• Concentración de tensiones</li> <li>• Diseño estructural</li> <li>• Accidentes</li> </ul>	<p>Sub-base, encofrados, etc.</p> <p>Alrededor del acero, obstrucciones, agregados</p> <p>Plástico, de edad temprana</p> <p>Componentes del cemento, carbonatación,</p> <p>áridos reactivos, oxidación, materias extrañas</p> <p>Retracción por secado, variación de humedad</p> <p>Tensiones térmicas debido a las diferencias internas de calor de hidratación, variaciones externas de temperatura, acción de heladas</p> <p>Refuerzos, fluencia lenta, etc.</p> <p>Cargas, asentamiento de fundaciones</p> <p>Sobrecargas, vibración, fatiga, sismos, fuego</p>

Esta clasificación sistemática de las causas del agrietamiento del concreto, fue dada por L. Boyd Mercer, de Australia.

## CLASIFICACIÓN DE LAS FALLAS EN EL CONCRETO

Según su origen, las fallas se clasifican en:

- no estructurales y,
- estructurales.

En la siguiente tabla se muestra la clasificación general de las fallas en el concreto:

*Tabla 3 fallas No estructurales y estructurales*

<b>FALLAS NO ESTRUCTURALES</b>	<b>FALLAS ESTRUCTURALES</b>
<p><b>Antes del endurecimiento:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Exudación</li> <li>• Asentamiento plástico</li> <li>• Movimientos durante la ejecución</li> <li>• Cambios volumétricos</li> </ul>	<p><b>Originadas en la etapa de proyecto:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Errores en la concepción</li> <li>• Errores en los documentos del proyecto</li> <li>• Modificaciones de proyecto</li> <li>• Errores de cálculo</li> </ul>
<p><b>Después del endurecimiento:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Retracción por secado</li> <li>• Retracción autógena</li> <li>• Retracción por carbonatación</li> <li>• Variaciones térmicas</li> <li>• Variaciones de humedad</li> <li>• Erosión superficial</li> <li>• Ataque biológico</li> </ul>	<p><b>Originadas en la construcción:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Por razones no estrictamente técnicas</li> <li>• Fallas en la obra</li> </ul> <p><b>Originadas en la conservación.</b></p>

## **Fallas no Estructurales**

Las fallas no estructurales, son las no derivadas de acciones mecánicas, sino de acciones químicas, acciones físicas, acciones térmicas, movimientos durante la ejecución, etc.

### **Antes del Endurecimiento**

#### **a) Exudación**

Consiste en el ascenso de parte del agua de amasado hacia la superficie de la pieza hormigonada, una vez que se ha terminado la compactación. Es inevitable, pues se origina por la natural sedimentación de los componentes gruesos del concreto, debido a su mayor peso específico. En la superficie del concreto se deposita una capa de agua con sedimentos finos que es débil, porosa y, permeable, produciendo superficies poco resistentes al desgaste. Parte del agua en ascenso puede quedar atrapada debajo de las armaduras o de las partículas mayores del árido, generando una reducción de adherencia.

Sólo puede reducirse mediante:

- Empleo de áridos de granulometría adecuada y proporciones favorables entre grava y arena.
- Más cantidad de cemento.
- Reducción de la relación agua/cemento.
- Empleo de cantidades adecuadas de finos.
- Tomar cuidados especiales si se usan retardadores.
- Uso de aditivos incorporadores de aire.
- Colocación del concreto en capas delgadas.

#### **b) Asentamiento Plástico**

Se produce en las primeras tres horas, como efecto de la exudación y su magnitud depende de esta. Los daños se producirán, dependiendo de

las restricciones existentes y son más comunes en piezas de altura importante. Si hay restricciones como barras de refuerzo o concreto ya colocado, pueden producirse vacíos y fisuras amplias y poco profundas, adyacentes al elemento restrictor, de escasa trascendencia estructural. La fisuración puede aumentar con vibrado deficiente o con el uso de encofrados que pierdan agua o muy flexibles.

Se previene con:

- Uso de moldes apropiados.
- Adecuado vibrado.
- Bajo cono y aumento en el recubrimiento de las armaduras.
- Al realizar con concreto un elemento vertical, dejar transcurrir unos 45 a 60 minutos antes de continuar con el elemento horizontal para permitir que el concreto del elemento vertical sedimente.

### **c) Movimientos durante la ejecución**

Se originan por posibles movimientos en los encofrados o sus complementos (alzaprimas, puntales, riostras, etc.) o en movimientos de la sub-base, en caso de pavimentos. Producen fisuras amplias y poco profundas, de poca trascendencia estructural, Se cierran con vibrado. Se previene con un adecuado control de las obras.

### **d) Cambios volumétricos**

Es el mecanismo de producción de fallas más reiterado. Se manifiestan tanto en estado fresco como en el endurecido y pueden tomar la forma de contracciones (retracciones) o expansión (hinchazón). Como criterio general, si el concreto cambia de volumen, sin que le afecte ningún tipo de restricciones, no presenta ningún tipo de fallas. Son las restricciones las que originan el desarrollo de tensiones de tracción.

Cuando se excede la resistencia a tracción, se agrieta.

#### **d.1) Retracción plástica**

Se produce entre la primera y las seis horas luego de colocado el concreto

### **CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS: Porosidad, Permeabilidad y Durabilidad Del Concreto**

#### Generalidades

En los últimos treinta años ha crecido la necesidad de reparación de las estructuras de concreto armado, debido fundamentalmente a la corrosión de las armaduras.

Debido al aumento del volumen, del orden de 2,2 veces el volumen original, asociado a la transformación del acero en óxido de hierro, la corrosión del acero de refuerzo ejerce esfuerzos de tensión sobre el concreto circundante a las barras oxidadas. De lo anteriormente señalado se puede concluir que la corrosión de las armaduras tiene un doble efecto contra la durabilidad del concreto: el primero es precisamente la corrosión de las armaduras, que reduce su diámetro; el segundo efecto se produce debido a que el óxido que se forma genera un aumento de volumen, dando origen a grietas y rompiendo el recubrimiento. Como consecuencia de este proceso, puede ocurrir un agotamiento estructural, producto de la pérdida de adherencia entre el acero y el concreto, debido a grietas y fisuración, o bien como resultado de la reducción de la sección transversal del acero, lo que conduce a la pérdida de la durabilidad y utilidad de estructuras de concreto armado, o a su colapso en casos extremos.

La corrosión de las armaduras, al igual que toda corrosión metálica, es un fenómeno electroquímico. En la mayoría de los casos la causa principal y más común de la corrosión del acero de refuerzo y del deterioro subsiguiente de las estructuras, resulto ser la acción de los cloruros. Además, algunos factores ambientales, como son la humedad, el oxígeno, la temperatura y la presencia de sustancias agresivas, afectan la velocidad de corrosión. Los iones cloruros, son los agentes activos de la corrosión del acero de refuerzo de las estructuras de concreto armado, pero requieren para su acción de ciertos factores, entre estos los más determinantes son:

- La porosidad del concreto.
- Su compacidad.
- La relación agua/cemento de la pasta.
- El grado de compactación a que fue sometido.
- El espesor del recubrimiento.
- El tipo de cemento utilizado y el pH que él aporta.
- El método de dosificar el concreto y su tecnología de colocación, vibrado y curado.

### **La porosidad de la masa del Concreto**

El concreto armado por su versatilidad aporta posibilidades mecánicas muy importantes y posee una durabilidad adecuada para la mayoría de los usos a los que se destina. Esta durabilidad de las estructuras de concreto es producto de la acción protectora, de doble naturaleza, que la masa de concreto ejerce sobre el acero de refuerzo:

- El recubrimiento de la armadura constituye una barrera física.
- La elevada alcalinidad M concreto desarrolla sobre el acero una capa pasivante que lo protege de la corrosión.

Cuando el cemento se mezcla con el agua, sus distintos componentes se hidratan formando un conglomerado sólido, constituido por las fases hidratadas del cemento y una fase acuosa proveniente del exceso de agua de amasado, necesaria para la mezcla adecuada de todos los componentes y que aporta la trabajabilidad necesaria para la colocación en un molde. La porosidad de la masa del concreto la aporta fundamentalmente la pasta de cemento endurecida, razón por la cual la relación agua/cemento y la cantidad de pasta es un factor determinante en la cantidad y tipos de poros en el concreto.

### **Compacidad del Concreto**

La compacidad de una masa de concreto puede ser definida como la relación del volumen sólido al volumen aparente o total o también, el tanto

por ciento de un determinado volumen que es materia sólida. La compactación viene medida por la suma de los volúmenes absolutos de materias sólidas (grava, arena, cemento y el agua que reacciona químicamente con el cemento) contenidas en un metro cúbico de concreto. Con ella se logra incrementar la resistencia mecánica, química a la influencia atmosférica y al desgaste, el coeficiente de elasticidad y la impermeabilidad del concreto.

Desde el punto de vista técnico y económico es fundamental que la mayor parte de esta cantidad de sólidos la compongan los áridos (grava y arena) y la menor parte posible la pasta de cemento y a su vez que ésta sea de la más baja relación agua/cemento posible.

### **Relación Agua /Cemento**

Se ha comprobado que de la cantidad de agua de amasado que se agrega al concreto, para su confección, aproximadamente el 25 % (en relación al peso del cemento) interviene en las reacciones químicas de hidratación. Además se ha determinado que aproximadamente la cuarta parte del volumen de agua que reacciona químicamente quedará en forma de poros (llamados poros por contracción). Por consiguiente se considera que para relaciones agua/cemento mayores a valores entre 0.35 – 0.38, el agua incorporada dará origen a poros capilares.

A medida que aumenta el agua amasado, mayor es la cantidad de agua que no se combina. Al evaporarse el agua en exceso la pasta resultará tanto más porosa cuanto más agua se ha empleado, y como consecuencia, su resistencia decrecerá y será más permeable al acceso de agentes agresivos.

*Figura 1 Razón agua/cemento para condiciones de exposición, según Norma E.060*

## CONDICIONES ESPECIALES DE EXPOSICION

CONDICIONES DE EXPOSICIÓN	RELACIÓN AGUA/CEMENTO MÁXIMA
Concreto de baja permeabilidad: a) Expuesto a agua dulce: b) Expuesto a agua de mar o aguas salobres: c) Expuesto a la acción de aguas cloacales (*):	 0,50 0,45 0,45
Concreto expuesto a procesos de congelación y deshielo en condición húmeda : a) Sardineles, cunetas, secciones delgadas: b) Otros elementos:	 0,45 0,50
Protección contra la corrosión de concreto expuesto a la acción de agua de mar, aguas salobres o neblina o rocío de esta agua: Si el recubrimiento mínimo se incrementa en 15 mm:	 0,40 0,45

(\*) La resistencia  $f'c$  no deberá ser menor de 245 Kg/cm<sup>2</sup>, por razones de durabilidad.

### Compactación del Concreto

La compactación del concreto es la operación mediante la cual se le da la máxima densidad compatible con su dosificación, reduciendo la cantidad de aire atrapado.

Con la compactación se debe conseguir que el concreto adquiera la máxima densidad en todos sus puntos y recubra totalmente las armaduras; por lo que se debe realizar un vibrado del concreto acucioso y bien definido, sobre todo en aquellas zonas con alta densidad de armaduras.

### Recubrimiento

El espesor del recubrimiento del acero depende del grado de impermeabilidad del concreto, que estará dado por su compacidad y homogeneidad de la masa de concreto. Como regla general se puede establecer que a mayor relación agua/cemento mayor deberá ser el espesor del recubrimiento, para proteger adecuadamente al acero de refuerzo, contra la corrosión.

Es importante tomar una serie de medidas que garanticen la homogeneidad y la compacidad de la masa del concreto de recubrimiento: que el tamaño máximo del árido grueso que se emplee para dosificar el concreto pueda pasar a través de la distancia de espaciamiento entre barras, que el árido de la mezcla pueda ocupar espacio en el espesor del recubrimiento, y que la consistencia del concreto sea tal que se pueda vibrar sin riesgo de que se disgregue. Con respecto a la impermeabilidad y las posibilidades de protección del recubrimiento a las armaduras, es necesario considerar el papel de las grietas en el concreto, ya que pueden reducir la efectividad protectora del recubrimiento y así reducir la vida útil de la estructura.

El Código A.C.I.-318-99 establece los siguientes valores de recubrimientos mecánicos para armaduras:

**a) Concreto colocado en la Obra (no pretensado)**

Debe proporcionarse a la armadura el siguiente recubrimiento mínimo de concreto:

*Tabla 4 Recubrimiento mínimo de concreto no pretensado*

	Recubrimiento mínimo en mm.
Concreto colocado en contacto con el suelo y permanentemente expuesto a él	70
Concreto expuesto al suelo o a la acción del clima:	
- Barras del N° 20 al N° 55	50
- Barras del N° 15, alambre W31 o D31 y menores	40
Concreto no expuesto a la acción del Clima ni en contacto con el suelo:	

<b>Losas, muros, nervaduras:</b>	
- Barras del N° 45 y del N° 55	40
- Barras del N° 35 y menores	20
<b>Vigas y columnas:</b>	
- Armadura primaria, cercos, estribos, espirales	40
<b>Cáscaras y placas plegadas:</b>	
- Barras del N° 20 y mayores	20
Barras del N° 15, alambre W31 o D31 y menores	15

**b) Concreto prefabricado (fabricado en condiciones, de control en la planta)**

Debe proporcionarse a la armadura el siguiente recubrimiento mínimo de Concreto:

*Tabla 5 Recubrimiento mínimo de concreto pre fabricado*

	Recubrimiento mínimo en mm.
Concreto expuesto al suelo o a la acción del clima:	
<b>Paneles para muros:</b>	
- Barras del N° 45 y del N° 55	40
- Barras del N° 35 y menores	20
<b>Otros componentes:</b>	
- Barras del N° 45 y del N° 55	50
- Barras del N° 20 al N° 35	40

- Barras del N° 15, alambre W31 o D31 y menores	30
<p>Concreto no expuesto a la acción del clima ni en contacto con el suelo:</p> <p><b>Losas, muros, nervaduras:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Barras del N° 45 y del N° 55</li> <li>- Barras del N° 35 y menores</li> </ul> <p><b>Vigas y columnas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Armadura primaria</li> <li>- Cercos, estribos, espirales</li> </ul> <p><b>Cáscaras y placas plegadas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Barras del N° 20 y mayores</li> </ul> <p>Barras del N° 15, alambre W31 o D31 y menores</p>	<p>30</p> <p>15</p> <p>No&lt;15 y no &gt;40</p> <p>10</p> <p>15</p> <p>10</p>

### c) Concreto Pretensado

Debe proporcionarse el siguiente recubrimiento mínimo de concreto para las armaduras, ductos y accesorios de los extremos, pretensados y no pretensados, excepto:

- Para componentes de concreto pretensado expuestos al suelo, al clima o a ambientes corrosivos y en los cuales se excede la resistencia a tracción admisible, el recubrimiento mínimo se debe aumentar en un 50 %.
- Para los componentes de concreto pretensado fabricado en condiciones de control de fábrica, el recubrimiento mínimo de concreto para la armadura debe ser el estipulado para concreto prefabricado.

*Tabla 6 Recubrimiento mínimo de concreto pre tensado*

	Recubrimiento
--	---------------

	mínimo en mm.
Concreto colocado en contacto con el suelo y permanentemente expuesto a él	70
<p>Concreto expuesto al suelo o a la acción del clima:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Paneles para muros, losas y nervaduras 25</li> <li>- Otros componentes 40</li> </ul> <p>Concreto no expuesto a la acción del Clima ni en contacto con el suelo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Losas, muros, nervaduras 20</li> </ul> <p><b>Vigas y columnas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Armadura principal 40</li> <li>- Cercos, estribos, espirales 25</li> </ul> <p><b>Cáscaras y placas plegadas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Barras del N° 15, alambre W31 o D31 y menores 15</li> </ul> <p><b>Otro tipo de refuerzo</b> Db pero no &lt;20</p>	

### Tipo de Cemento

Como se necesita obtener una alta alcalinidad en el concreto como base para su eficiencia protectora, solamente los cementos Portland deben utilizarse en la confección del concreto para estructuras de concreto armado expuestas a la acción de los iones cloruros. Durante el proceso de hidratación los cementos Portland liberan del 15 al 30% de hidróxido de calcio del peso del cemento original. Esto generalmente resulta suficiente para mantener una solución con un pH 13 en el concreto. El ambiente alcalino  $\text{pH} > 11$  protege al acero al formar una capa pasivante de óxidos muy estables; cuando el pH llega a valores  $\leq 9.5$ , el concreto pierde su capacidad de protección del acero y éste inicia su proceso de corrosión.

Varios tipos de cementos mezclados, como cemento Portland de escoria, o cementos puzolánicos no se recomiendan generalmente para

este tipo de condiciones de servicio de estructuras armadas debido a la escasez de hidróxido de calcio liberado y a una alcalinidad insuficiente en el concreto endurecido que provoca a menudo solo un valor de pH por debajo de 8.

### **2.1.1. Las Fibras De Carbono**

#### **Generalidades**

En respuesta a la creciente necesidad de reparar o rehabilitar las estructuras de concreto armado ha surgido una nueva tecnología de reforzamiento estructural. Los desarrollos actuales de las técnicas de producción para Polímeros Reforzados con Fibras de Carbono (CFRP) han progresado a tal nivel que estos una vez referidos como materiales “de la edad del espacio” son ya utilizados para la industria de la construcción dada la relación costo - beneficio. Los ahorros de mano de obra inherentes con su bajo peso lo que facilita su instalación y su alta resistencia, lo que reduce el área de refuerzo, hacen del CFRP una alternativa atractiva con respecto a las platinas de acero para el reforzamiento de estructuras.

La pega de platinas de acero ha sido una herramienta para la industria de reparación del concreto en los últimos veinte años. Sin embargo el alto costo de instalación de las platinas, usualmente pesadas, las dificultades con el traslapo de las platinas, y lo relacionado con la corrosión de las platinas de acero han limitado el uso de esta técnica.

Los principios para la pega externa de láminas o tejidos de CFRP a las estructuras de concreto son muy similares a los principios utilizados en la aplicación de platinas de acero adheridas. En general, la resistencia a flexión, a corte o axial del elemento es incrementada por las aplicaciones externas del material que trabaja a la tensión.

El reforzamiento externo con CFRP es adecuado para varias aplicaciones estructurales, entre ellas:

- Aumento de capacidad debido a algún cambio en el uso.
- Confinamiento pasivo para aumentar la resistencia sísmica.
- Control y cosido de fisuras.
- Reforzamiento alrededor de las nuevas aberturas en las placas.

El uso de CFRP para el reforzamiento estructural tiene una corta historia, y son necesarias pruebas de laboratorio adicionales así como soporte con datos analíticos para ampliar su uso. En consecuencia, el uso de CFRP en reforzamiento estructural y aplicaciones de rehabilitación debe ser llevado a cabo con precaución y con el juicio de un ingeniero competente. CFRP no debe ser usado en las siguientes situaciones:

- La condición del substrato es desconocida o está muy deteriorado;
- Existe una corrosión substancial en curso en el acero de refuerzo interno;
- No existe acero de refuerzo suave para proporcionar comportamiento dúctil, etc.

El ICBO (International Conference of Building Officials) de Estados Unidos publicó en 1977 el documento AC-125 “Criterios de aceptación para reforzamiento de concreto y de mampostería reforzada y no reforzada con el uso de materiales compuestos”, en donde además de los criterios se dan guías de diseño.

Los polímeros reforzados de fibra de carbono (CFRP) en el Perú son distribuidos por las distintas empresas (Sika Perú, Z Aditivos, Química Suiza, etc) con diferentes nombres por razones comerciales pero en el fondo se trata del mismo material. Nos enfocaremos en los productos de la empresa Sika Perú quien es proveedor del sistema de reforzamiento de concreto armado, que está compuesto de varios productos como las platinas preformadas de fibra de carbono Sika CarboDur y su respectivo epóxico de adherencia Sikadur 30, tejidos de fibra de carbono SikaWrap y su respectivo epóxico de adherencia Sikadur 301 y platinas

preformadas en forma de L Sika CarboShear y su respectivo epóxico de adherencia Sikadur 30. Los sistemas antes mencionados son para reforzamiento pasivo. El sistema de reforzamiento activo con platinas pretensadas Sika Leoba LC no se abordará en este trabajo. El reforzamiento a cortante de vigas y reforzamiento de columnas se hace preferiblemente con tejidos SikaWrap de carbono por su facilidad de colocarse sobre superficies de forma irregular y de poder envolver el elemento.

### **Propiedades y Guías De Selección Del Tipo De Fibra**

En el Perú se puede encontrar productos diversos, los que sirven para el reforzamiento de estructuras y que pueden encontrarse con nombres comerciales diferentes dependiendo de la empresa que la distribuya, en nuestro caso tomaremos los productos de la empresa Sika Perú.

- Sika carbodur (Platinas de fibra de carbono)
- SikaWrap (Tejidos de fibra de carbono)
- L Sika CarboShear (platinas en forma de L)

El producto al cual nos avocaremos es el sika carbodur en el cual está basado este trabajo el cual detallamos a continuación.

#### **a) Sika CarboDur**

Sistema de reforzamiento de alto desempeño para diseñadas para el refuerzo de estructuras de concreto, madera. Sistema de dos componentes: Adhesivo Sikadur-30 para la pega del reforzamiento y Platina Sika CarboDur.

##### **a.1) Platinas Sika CarboDur S**

- Base : Fibras de carbono en matriz epóxica
- Color : Negro
- Densidad : 1.60 g/cm<sup>3</sup>
- Contenido de fibras en volumen : > 68% (tipo S)\*
- Resistencia a temperatura : >150 °C

- Presentación comercial : rollo de 100 m
- Módulo Elástico\* (valor medio) 1.650.000 kg/cm<sup>2</sup>
- Módulo Elástico\* (valor mínimo) > 1.600.000 kg/cm<sup>2</sup>
- Resistencia a la tracción\*(Valor Mínimo) > 28.000 kg/cm<sup>2</sup>
- Resistencia a la tracción\*(Valor medio) 30.500 kg/cm<sup>2</sup>
- Deformación a rotura\* (valor mínimo) > 1,7 %
- Deformación de diseño\*\* 0.85%

### Presentaciones

- | Tipo                    | Ancho  | Espesor | Sección             |
|-------------------------|--------|---------|---------------------|
| Sika CarboDur S512/80   | 50 mm  | 1.2 mm  | 60 mm <sup>2</sup>  |
| Sika CarboDur S1012/160 | 100 mm | 1.2 mm  | 120 mm <sup>2</sup> |

(\*) Las propiedades mecánicas corresponden a la dirección longitudinal de la fibra.

(\*\*) Se deberían utilizar estos valores para el diseño del refuerzo como la máxima deformación admisible de las platinas y deben ser adaptados a las normas de diseño locales si fuera necesario. Dependiendo del tipo de estructura y localización de la carga el ingeniero responsable del proyecto deberá minorar estos valores de acuerdo a las normas.

Mayor información en la Ficha técnica adjunta en los anexos.

#### a.2) Sikadur – 30

- Color : Componente A: Blanco  
Componente B: Negro
- Mezcla A+B : Gris claro
- Presentación comercial : 6 kg (comp. A + B)

- Relación de mezcla : Comp. A: Comp. B = 3:1 (en peso y volumen)
- Densidad : 1,77 kg/lit (A+B)
- Vida en el recipiente : 40 minutos (a 35°C) \*
- Tiempo abierto : 30 minutos (a 35 °C) \*

Mayor información en la Ficha técnica adjunta en los anexos.

### a.3) Información del Sistema Sika Carbodur + Sikadur 30

#### Consumo

Ancho de la platina Sikadur-30

50 mm 0,35 kg/m

100 mm 0,80 kg/m

Dependiendo de la rugosidad y planeidad del soporte, de si es necesario cruzar platinas o de las pérdidas de material, el consumo puede ser más alto.

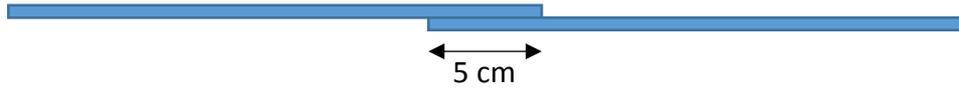
Mayor información en la Ficha técnica adjunta en los anexos.

### b) Ventajas

- No se corroe
- Muy altas resistencias
- Excelente durabilidad.
- Ligero y de poco peso
- Disponible en cualquier longitud, no requiere juntas.
- Espesor total pequeño, puede ser cubierto.
- Fácil de transportar (rollos).
- Fácil solape y entrecruzamiento entre platinas.

Traslape mínimo 5cm, según recomendación y experiencias Sika y el de mayor longitud va adherido primero.

*Figura 2 Traslape mínimo entre CFRP*



- Muy fácil de instalar, especialmente en techos
- Excelente resistencia a fatiga.
- Requiere una preparación mínima de la platina

### c) Usos Reforzamientos debidos a:

- **Incrementos de cargas**

Incremento de la capacidad resistente en losas y vigas.

Aumento de tráfico pesado en puentes.

Instalación de maquinaria pesada en edificios industriales.

Estructuras sometidas a vibraciones.

Cambios de uso de la estructura.

- **Daños de elementos estructurales.**

Envejecimiento de los materiales de la estructura.

Corrosión de las armaduras

Impactos sobre la estructura.

Acción del fuego.

Sismos

- **Mejora de las condiciones de servicio**

Disminución de flechas y deformaciones.

Corrosión de las armaduras con disminución de secciones útiles.

Disminución del ancho de grietas.

Reducción de la fatiga.

- **Cambio del esquema estructural**

Eliminación de muros o columnas.

Apertura de huecos en losas para la instalación de ascensores, escaleras.

- **Cambios por especificación**

Sismos

Cambio del esquema estructural.

- **Defectos de proyecto o construcción**

Armadura insuficiente.

Defectos de ejecución.

### **3.1.1.2 Refuerzo Por Flexión**

El refuerzo con CFRP adherido a la cara tensionada de un elemento de concreto armado, sometido a flexión proporciona un incremento en su capacidad resistente: de acuerdo con los estudios y ensayos realizados por diferentes autores, se consigue incrementos de capacidad a flexión entre el 10% y el 160% y tomando en cuenta factores como ductilidad se registran incrementos entre el 5% y el 40%.

En el presente trabajo se estudia el refuerzo estructural mediante fibra de carbono para elementos que trabajan netamente a flexión, se muestra el marco teórico de cálculo para finalmente resolver el caso de reforzamiento a flexión de una viga de concreto armado con platinas de CFRP y así indicar claramente el procedimiento de diseño y evaluar el aumento de resistencia que se produce al adherir este material al elemento.

Los conceptos dados en este capítulo se aplican a secciones rectangulares reforzadas en la zona de tracción, pero se extienden para formas no rectangulares como secciones T y secciones I.

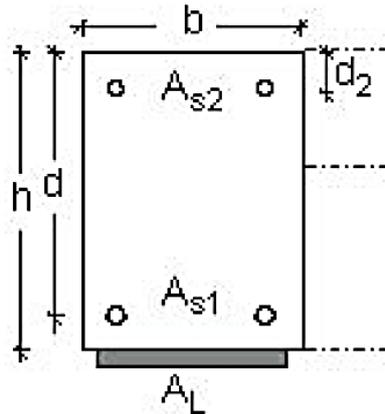
### **3.1.1.3 Esquema Típico de Refuerzo a Flexión Usando CFRP.**

El CFRP es un material que tiene en la dirección en la que se encuentran orientadas las fibras, una alta resistencia a tracción, por lo que al momento de aplicarlo como refuerzo a flexión es importante aprovechar esta característica e instalarlo de tal manera que las fibras sean paralelas a los esfuerzos generados.

Es decir el CFRP en un refuerzo a flexión se coloca bajo los mismos principios que el acero de refuerzo, en las zonas donde existe tracción. Por ejemplo en una viga simplemente apoyada sometida a una carga distribuida verticalmente hacia abajo, se sabe que la tracción se

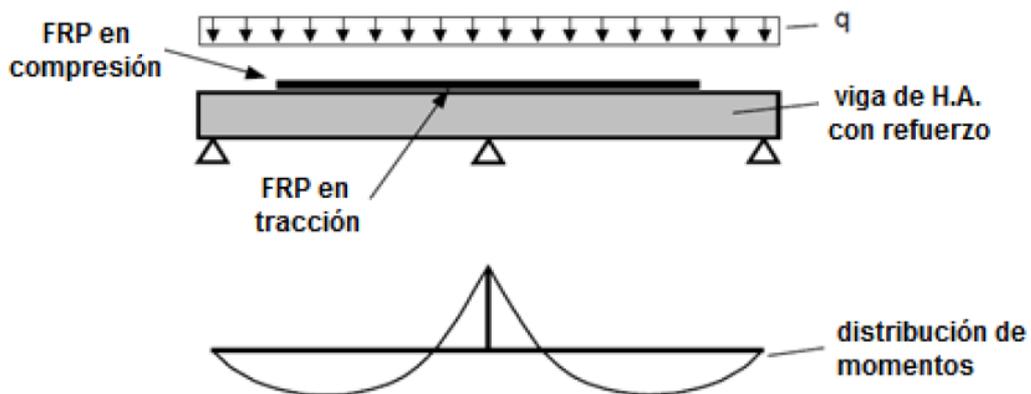
presenta en la cara inferior de la misma, por lo tanto se coloca el acero en la cara inferior de la misma manera si se requiere refuerzo adicional con CFRP, este se adhiere en la cara inferior de la viga para absorber el excedente de momento que el concreto y el acero son incapaces de resistir.

Figura 3 Esquema de refuerzo a flexión con CFRP



También es posible reforzar, con menos eficiencia, las zonas de tracción donde el momento es negativo, es decir en la cara superior de la viga que presenta tracción.

Figura 4 Refuerzo a flexión, momento negativo



De la misma manera se adhiere la platina en la parte superior para cubrir la zona de tracción, sin extenderla demasiado hasta zona de compresión para evitar que se desprenda del elemento.

En el caso de requerir varias tiras es recomendable aplicar una junta a la otra de una sobre la otra, pero de darse el segundo caso, por

recomendaciones de los fabricantes y códigos de diseño se puede colocar máximo 3 capas de platinas CFRP o 5 capas de tejido de fibra de carbono, por dos razones principales; primero porque se vuelve un refuerzo ineficiente y antieconómico, y la segunda razón es que aún no hay bases científicas ni experimentales del comportamiento de los elementos con dichos esfuerzo.

*Figura 5 Colocación de refuerzos multicapa*

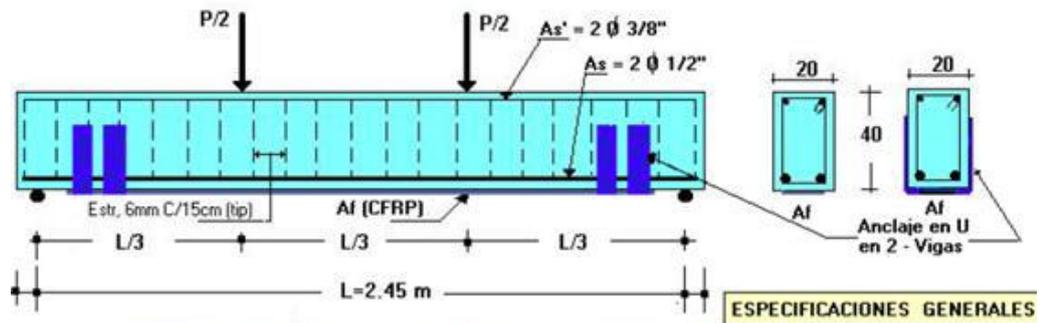


#### **3.1.1.4 Ensayos A Flexión De Vigas Reforzadas Con CFRP**

En Perú la Universidad Ricardo Palma ensayan elementos de concreto reforzados con FRP.

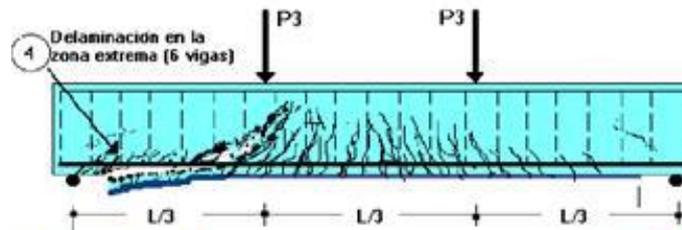
De todas las pruebas que se realizan, una de las más interesantes y concluyentes es la que se efectúa en la Universidad Ricardo Palma en Perú, donde se ensayan 8 vigas a flexión en escala natural, para lo que se aplica una carga centrada sobre un carril que la transmite a dos rodillos ubicados a los tercios de la viga. Se utiliza un hormigón  $f'c = 240\text{kg/cm}^2$  y un acero  $f_y = 4200\text{kg/cm}^2$  para elaborar las probetas, y se refuerza con platinas Sika CarboDur. El detalle de los modelos empleados es el siguiente:

*Figura 6 Esquema general de las vigas ensayadas*



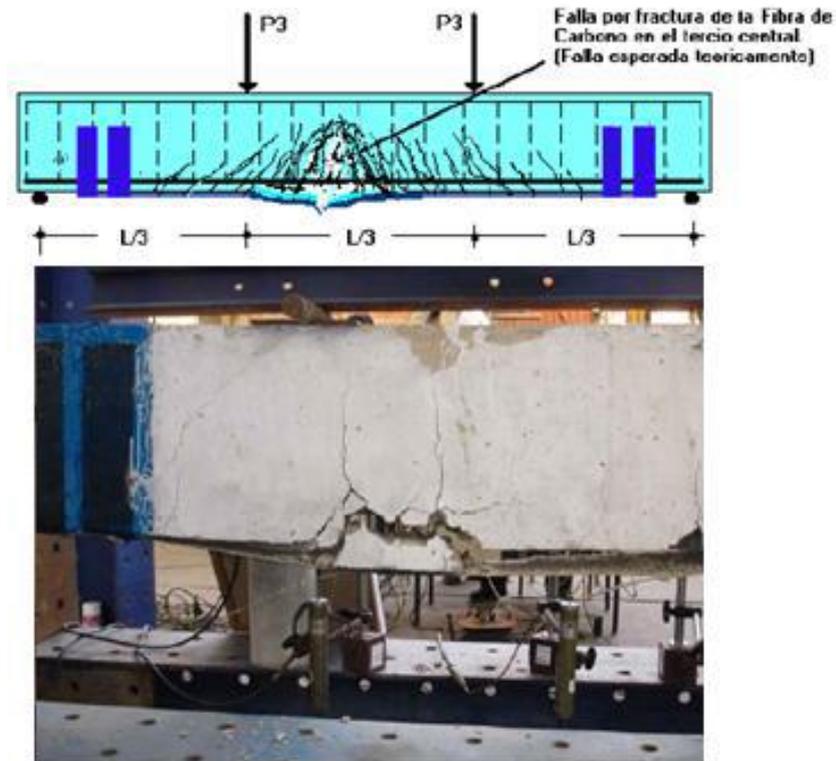
De los ensayos se observa que las fallas a flexión se producen principalmente por dos razones; la primera es por delaminación extrema que consiste en el despegue de la platina en los extremos de la viga.

Figura 7 Falla por delaminación en los extremos



Una vez que se soluciona el problema de la delaminación mediante anclajes en los extremos se presenta el segundo modo de falla que consiste en la fractura de la platina en la zona central de la viga.

*Figura 8 Falla por rotura de la platina*



Estos ensayos dejan conclusiones importantes como por ejemplo que el principal mecanismo de falla es la delaminación de la platina ya que el concreto a tracción se desprende completamente; para disminuir este efecto se recomienda anclar los extremos de las platinas mediante tiras perpendiculares o pernos de anclaje y así será más probable alcanzar la resistencia nominal teórica.

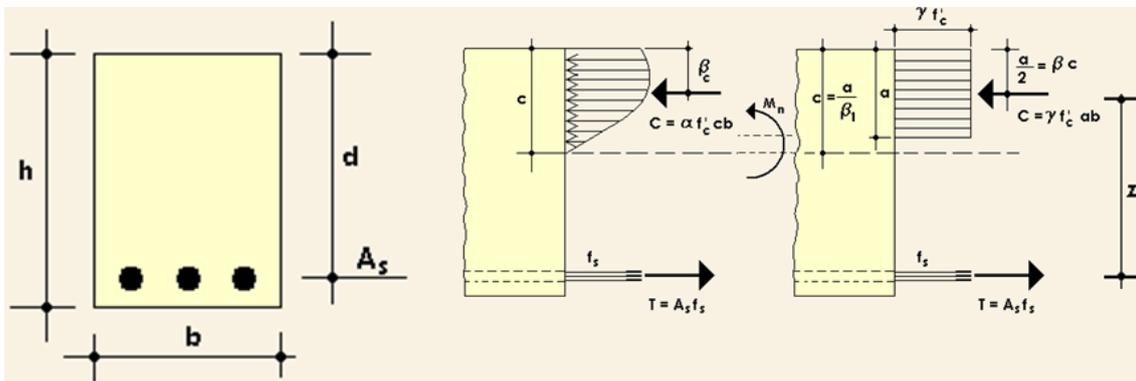
Las vigas que no llegan a la resistencia nominal teórica por el efecto de delaminación, fallan a resistencias del orden del 75%. Por último a menor ancho de platina de carbono mayor es el esfuerzo de adherencia y por lo tanto la delaminación ocurre a menores valores de flexión. Y de la misma manera hay un límite en el número de

capas sobre el cual el refuerzo deja de ser eficiente y al contrario comienza a disminuir la resistencia de la viga.

### 3.1.1.5 Resistencia Nominal De Una Viga Sin Reforzar

Para determinar la resistencia nominal de una viga simplemente armada con sección rectangular de base  $b$ , altura  $h$ , altura efectiva  $d$  y área de refuerzo  $A_s$ , que no se encuentre reforzada con CFRP hay que partir del bloque de esfuerzos equivalentes de Whitney.

Figura 9 Bloque de esfuerzos equivalentes de Whitney



Por equilibrio de fuerzas internas la tracción en el acero es igual a la compresión del concreto  $T = C$ , y el momento nominal resistente  $M_n$  es el momento que producen este par de fuerzas que se calcula como la magnitud de cualquiera de ellas por la distancia que las separa, en este caso nombrada  $Z$ .

Como se puede observar la distancia  $Z$  es:

$$Z = d - \frac{a}{2}$$

Entonces el  $M_n$  para una viga simplemente armada sería:

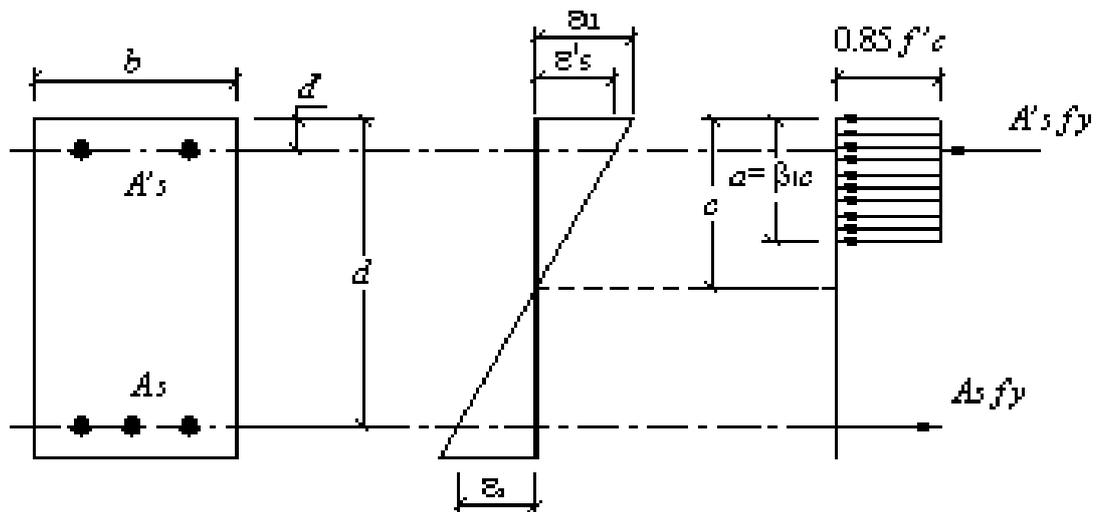
$$M_n = T \cdot Z = C \cdot Z$$

Por facilidad se toma la fuerza T de tracción, y se reemplaza ésta y Z en la ecuación anterior, además teniendo en cuenta el factor de reducción de capacidad para flexión, queda así:

$$\phi M_n = \phi A_s \cdot f_s \left( d - \frac{a}{2} \right)$$

Si se trata de una viga doblemente armada, es decir con acero en compresión, el procedimiento es el mismo, con la única diferencia que hay que tomar en cuenta el aporte de éste al momento nominal.

*Figura 10 Esquema de esfuerzos y deformaciones de una viga doblemente armada*



El momento nominal es la suma del momento del acero en tracción más el momento del acero en compresión.

$$\phi M_n = \phi (M_{ns} + M_{ns'})$$

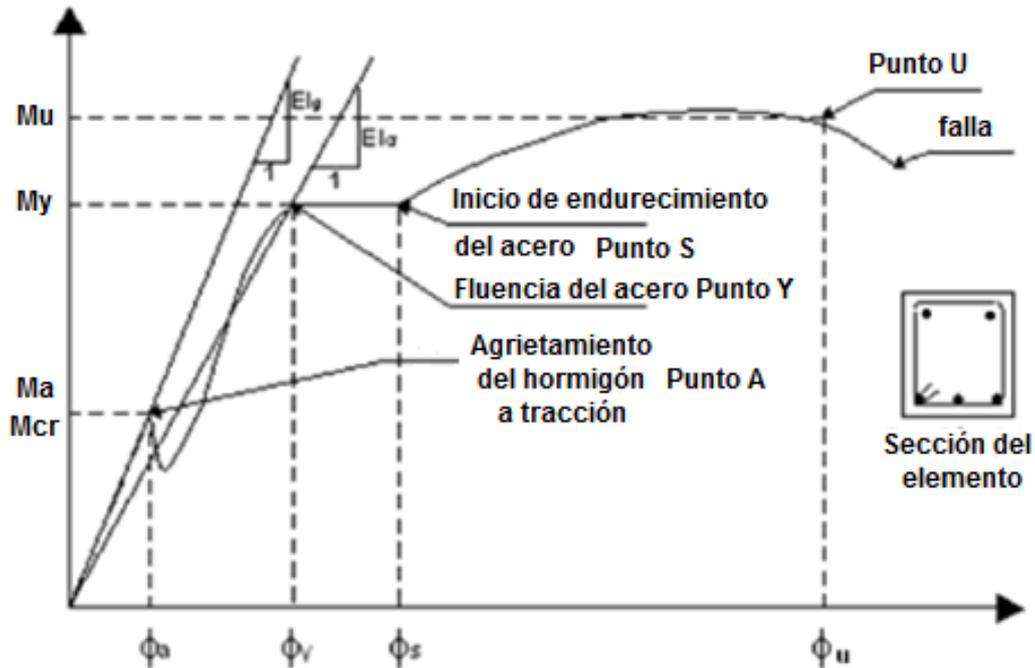
Al reemplazar cada momento se tiene que el momento nominal para una viga doblemente armada es:

$$\phi M_n = \phi \left[ A_s \cdot f_s \cdot \left( d - \frac{a}{2} \right) + A_s' \cdot f_s' \cdot \left( \frac{a}{2} - d' \right) \right]$$

### 3.1.1.6 Deformación Inicial al Colocar El CFRP

Ahora es preciso revisar el diagrama momento curvatura de una viga, este muestra el comportamiento del concreto armado a flexión en diferentes niveles de carga.

Figura 11 Diagrama Momento Curvatura de una viga rectangular



Se destacan cuatro puntos importantes que son motivo de análisis; primero se encuentra el punto A que queda definido al aparecer la primera grieta capilar en el concreto, indica que el hormigón a tracción está al límite mientras el acero continúa en la zona elástica; la pendiente de este tramo es la rigidez a flexión  $E \cdot I_g$ , donde E es el módulo de elasticidad del concreto e  $I_g$  es la inercia gruesa de la sección.

El esfuerzo correspondiente al punto de agrietamiento se lo relaciona aproximadamente con el módulo de rotura del hormigón que es  $f_r = 0.623 \sqrt{f'_c}$  en MPa y el momento  $M_a$  corresponde al momento de fisuración  $M_{cr}$  que se detalla más adelante. Dicho punto suele ignorarse por presentarse a un nivel muy bajo solicitaciones y porque las fisuras son muy pequeñas, tanto que casi no afectan el comportamiento del elemento estructural, pero para este análisis este punto es muy

importante, porque determina si la sección se encuentra fisurada o no, antes del refuerzo.

El siguiente punto del diagrama es Y, donde el acero en tensión termina su fase elástica y empieza la zona de fluencia, aquí la viga ya presenta un daño considerable y se encuentran fisuras importantes, igual que para el punto anterior, la pendiente de la recta que lo une con el origen representa la rigidez a flexión de la sección agrietada  $E \cdot I_{cr}$ , donde  $I_{cr}$  es la inercia agrietada, que para el caso de vigas, más adelante se indica las ecuaciones empleadas para determinar con mayor precisión los valores de inercia gruesa e inercia agrietada.

Muy cercano al punto Y se encuentra el punto S el cual tiene un momento ligeramente superior al anterior, a partir de aquí el acero incursiona en la zona de endurecimiento, pero debido a que se encuentra muy próximo a Y no se lo toma en cuenta, además porque los modelos de diseño del concreto armado convencional limitan el esfuerzo del acero hasta antes de la fluencia por seguridad.

Finalmente se encuentra el punto U, el cual se alcanza cuando el acero a tracción falla, se da la rotura del mismo, o cuando el hormigón a compresión alcanza su máxima deformación utilizable.

Generalmente los elementos de concreto armado sometidos a cargas verticales que producen esfuerzos de flexión, trabajan entre el punto A y el punto Y, es decir, entre el punto donde el concreto a tracción llega al límite y el punto donde el acero entra en fluencia; es por eso que se analiza un poco más estos dos instantes.

### **Propiedades de la sección fisurada y no fisurada**

Las propiedades de la sección fisurada y no fisurada son básicamente la profundidad del eje neutro y la inercia, la misma que toma en cuenta al área de concreto y de acero, para esto se utiliza lo que se conoce como sección transformada mediante la relación de módulos de elasticidad de un material con respecto al del concreto.

De esta manera para el acero se tiene  $ns = \frac{Es}{Ec}$  y para el CFRP  $nf = \frac{Ef}{Ec}$

Donde Es, Ef y Ec son los módulos de elasticidad del acero, FRP y concreto respectivamente.

Las siguientes ecuaciones para determinar las propiedades de la sección fisurada y no fisurada son tomadas del libro de “Principios de Hormigón Armado” de Joaquín Marín, 1966.

La profundidad del eje neutro y la inercia de la sección **antes del agrietamiento** para una viga con acero a compresión quedan definidos por:

$$c_{b\_cr} = \frac{\frac{1}{2} \cdot bw \cdot h^2 + (ns - 1) \cdot As' \cdot d' + (ns - 1) \cdot As \cdot d}{bw \cdot h + (ns - 1) \cdot As' + (ns - 1) \cdot As}$$

$$I_g = \frac{1}{12} \cdot bw \cdot h^3 + bw \cdot h \cdot \left( c_{b\_cr} - \frac{1}{2} \cdot h \right)^2 + (ns - 1) \cdot As' \cdot (c_{b\_cr} - d')^2 + (ns - 1) \cdot As \cdot (c_{b\_cr} - d)^2$$

$c_{b\_cr}$  = profundidad del eje neutro

$I_g$  = inercia gruesa

$bw$  = base de la viga

$h$  = altura de la viga

$As'$  = área del acero a compresión

$d'$  = distancia desde la fibra a compresión al centroide del acero a compresión

$As$  = área del acero a tracción

$d$  = distancia desde la fibra en compresión al centroide del acero a tracción

$ns$  = relación de módulos para el acero

Si se trata de una viga simplemente armada basta con eliminar el término correspondiente al acero de compresión en las dos expresiones y se tiene la profundidad del eje neutro y la inercia antes del agrietamiento.

$$c_{b\_cr} = \frac{\frac{1}{2} \cdot bw \cdot h^2 + (ns - 1) \cdot As \cdot d}{bw \cdot h + (ns - 1) \cdot As}$$

$$I_g = \frac{1}{12} \cdot bw \cdot h^3 + bw \cdot h \cdot \left( c_{b\_cr} - \frac{1}{2} \cdot h \right)^2 + (ns - 1) \cdot As \cdot (c_{b\_cr} - d)^2$$

Al producirse la fisuración del elemento, el concreto que se encuentra en tracción deja de aportar en la inercia a la sección, por lo tanto la profundidad del eje neutro y la inercia de la sección **después del agrietamiento** se calculan así:

Viga simplemente armada

$$c_{a\_cr} = d \cdot \left( \sqrt{(\rho \cdot ns)^2 + 2 \cdot \rho \cdot ns} - \rho \cdot ns \right)$$

$$\rho = \frac{As}{b \cdot d}$$

$$I_{cr} = \frac{1}{3} \cdot bw \cdot c_{a\_cr}^3 + ns \cdot As \cdot (d - c_{a\_cr})^2$$

Viga doblemente armada

$$c_{a\_cr} = \frac{\left[ \sqrt{2 \cdot d \cdot B \cdot \left( 1 + \frac{r \cdot d'}{d} \right) + (1 + r)^2} - (1 + r) \right]}{B}$$

$$B = \frac{bw}{ns \cdot As}$$

$$r = \frac{(ns - 1).As'}{ns.As}$$

$$I_{cr} = \frac{1}{3}.bw.c_{a_{cr}}^3 + ns.As.(d - c_{a_{cr}})^2 + (ns - 1).As'.(c_{a_{cr}} - d')^2$$

Donde los términos que faltan definir son:

$c_{a_{cr}}$  = profundidad del eje neutro

$I_{cr}$  = inercia agrietada

$\rho$  = cuantía de acero a flexión

Todas las ecuaciones que se presentan anteriormente son para realizar un cálculo refinado de las propiedades de la sección, ya que se trabaja con la sección transformada que toma en cuenta el aporte del acero para el eje neutro y la inercia. Muchas veces todo este cálculo a detalle no se justifica por dos razones principales; primero porque el porcentaje de acero que se emplea es muy bajo y se puede despreciar y segundo porque el módulo de elasticidad del concreto no se conoce con precisión y por lo tanto la relación modular  $n$ , tampoco.

### **Momento de Fisuración**

Luego de determinar las propiedades de la sección antes y después de la fisuración, hay que saber si el elemento se encuentra o no agrietado inicialmente antes del reforzamiento, porque de esto depende como continuar al cálculo.

Para saber si la sección se encuentra agrietada primero se debe calcular el momento de fisuración  $M_{cr}$  y compararlo con el momento actuante al instante de colocar el refuerzo CFRP.

El momento de agrietamiento se relaciona con el módulo de rotura del hormigón  $f_r$ , es coincidente con el momento en el punto A del diagrama

momento-curvatura y para calcularlo la mayoría de autores llegan a la siguiente expresión:

$$M_{cr} = \frac{f_r \cdot I_g}{h - c_{b\_cr}}$$

$M_{cr}$  = momento de agrietamiento

$f_r$  = módulo de rotura del hormigón a tracción

$I_g$  = inercia gruesa

$h$  = altura

$c_{b\_cr}$  = profundidad del eje neutro antes de la fisuración

Si  $M_{cr} > M_i$ , la sección no está agrietada, por lo tanto se continúa el cálculo con las propiedades de la sección antes de la fisuración.

Si  $M_{cr} \leq M_i$ , la sección está inicialmente agrietada, por lo tanto se continúa el cálculo con las propiedades de la sección después de la fisuración.

El valor de  $M_i$  es el momento actuante al instante de colocar el refuerzo que por lo general corresponde al momento de carga muerta si se retira la carga viva antes de reforzar, o de lo contrario se determina mediante las cargas actuantes en ese instante.

### **Cálculo de deformaciones iniciales**

Por más que se elimine todo tipo de carga sobre el elemento a reforzar, al menos el peso propio siempre está presente, lo que indica que la sección tiene una deformación inicial aun cuando ésta sea muy pequeña.

El nivel de deformación inicial del concreto en la zona de tracción que es donde se coloca el CFRP, se determina a partir de un análisis elástico del diagrama momento curvatura, bajo la suposición que el  $M_i$  se encuentra dentro de los límites elásticos y luego de determinar si la

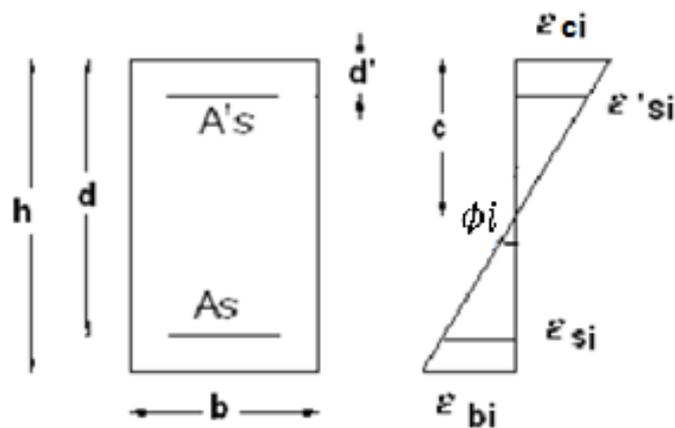
sección se encuentra agrietada o no; de esta manera, la pendiente en la zona elástica representa la rigidez a flexión así:

$$E_c \cdot I = \frac{M_i}{\phi_i}$$

Donde  $\phi_i$  es la curvatura asociada al momento  $M_i$ , que se determina por compatibilidad de deformaciones como se muestra en la figura siguiente.

Para una viga rectangular doblemente armada de base  $b$ , altura  $h$ , altura efectiva  $d$ , con una armadura de tracción  $A_s$  y una armadura de compresión  $A_s'$  a una distancia  $d'$  el diagrama de deformaciones es como se indica a la derecha de la figura siguiente.

*Figura 12 Distribución de deformaciones viga doblemente armada*



Donde:

$\epsilon_{ci}$ : deformación inicial del concreto a compresión.

$\epsilon'_{si}$ : deformación inicial del acero a compresión.

$\epsilon_{si}$ : deformación inicial del acero a tracción.

$\epsilon_{bi}$ : deformación inicial en la zona donde se colocará la fibra de carbono.

$\phi_i$ : curvatura asociada al momento  $M_i$ .

$c$ : profundidad del eje neutro.

Por tratarse de valores extremadamente pequeños se puede decir que la curvatura es igual a:

$$\phi_i = \frac{\varepsilon_{bi}}{h - c}$$

Al despejar la deformación inicial

$$\varepsilon_{bi} = \phi_i(h - c)$$

Finalmente se despeja la curvatura de la primera ecuación y al reemplazar en la anterior, queda que la deformación inicial para el concreto en donde se colocará el refuerzo es:

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_i(h - c)}{E_c \cdot I}$$

Es necesario indicar que de aquí en adelante los valores de la profundidad del eje neutro  $c$  y de la inercia  $I$ , son los correspondientes al caso de sección fisurada o sección antes de la fisuración según cuál sea el resultado obtenido del análisis previo.

Una vez que se obtiene la deformación inicial del concreto en la zona de tracción es fácil determinar las deformaciones iniciales tanto del concreto y acero en compresión y del acero en tracción por compatibilidad lineal de deformaciones, es así que se tiene:

Para el concreto en compresión

$$\varepsilon_{ci} = \frac{c}{h - c} * \varepsilon_{bi}$$

Para el acero en compresión

$$\varepsilon_{si'} = \frac{c - d'}{h - c} * \varepsilon_{bi}$$

Para el acero en tracción

$$\varepsilon_{si} = \frac{d - c}{h - c} * \varepsilon_{bi}$$

Aunque estos tres últimos valores no se ocupan en el diseño, dan una excelente visión de cómo se comporta cada material antes de instalar el CFRP.

### 3.1.1.7 Resistencia A Flexión De Una Viga Reforzada Con CFRP

#### Propiedades de diseño del CFRP

La exposición a diferentes condiciones de ambientes reducen las propiedades de tensión, fractura y fatiga de las láminas de CFRP, por lo tanto dichas propiedades deben ser limitadas en base a las condiciones de exposición ambiental, es decir, de acuerdo al lugar donde se vaya a colocar el refuerzo.

La norma ACI 440 del 2008 hace referencia al factor de reducción CE para limitar tanto la deformación unitaria y el esfuerzo en el CFRP mediante las siguientes expresiones:

$$\varepsilon_{fu} = CE \cdot \varepsilon_{fu}^*$$

$$f_{fu} = CE \cdot f_{fu}^*$$

Donde:

$\varepsilon_{fu}^*$  y  $f_{fu}^*$  son la deformación y esfuerzo últimos dados por el fabricante

$\varepsilon_{fu}$  y  $f_{fu}$  son la deformación y esfuerzo últimos por condiciones ambientales

Los factores de reducción ambiental vienen dados en la siguiente tabla y tienen su fundamento en estimaciones conservadoras de la durabilidad relativa de la fibra de carbono.

*Tabla 6 Factor de reducción ambiental FUENTE: ACI 440 2R-08*

Condiciones de exposición	CE
Ambiente interior	0.95
Ambiente exterior	0.85
Ambientes agresivos	0.85

*Nota:* Ambientes agresivos se refiere a lugares con prolongada exposición a humedad, agua salada, alcalinidad, etc.

Sin embargo la deformación unitaria se debe reducir todavía más para prevenir una falla prematura por despegue de la lámina en el sustrato de concreto, esta deformación es la correspondiente al nivel al cual el despegue puede ocurrir y se lo define con la siguiente expresión obtenida mediante ensayos a flexión de vigas reforzadas que realiza el EMPA en Suiza por encargo de SIKA:

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'c}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0.9\varepsilon_{fu}$$

Donde:

$\varepsilon_{fd}$  = deformación efectiva de diseño

$f'c$  = resistencia a compresión del concreto

$n$  = número de capas de CFRP que sea necesario colocar

$E_f$  = módulo de elasticidad del CFRP

$t_f$  = espesor del CFRP

La deformación obtenida de la ecuación anterior es la que se emplea para determinar el modo de falla y la deformación correspondiente en la fibra superior del concreto en estado último.

### **Posición del eje neutro para la sección con refuerzo CFRP**

Como es lógico, una vez que se coloca la lámina de refuerzo en el elemento de concreto, la profundidad del eje neutro cambia hasta lograr el equilibrio de las fuerzas internas de compresión y tracción en la sección.

El procedimiento para determinar la profundidad del eje neutro es un proceso iterativo ya que implica asumir una profundidad inicial, calcular el nivel de deformación en cada material mediante compatibilidad de deformaciones, calcular el nivel de esfuerzo asociado a la deformación en cada material y verificar el equilibrio de las fuerzas internas.

Si las fuerzas internas resultantes no se equilibran, se cambia la profundidad del eje neutro y se repite el procedimiento hasta que estas se igualen.

Para indicar claramente el proceso que se debe seguir, a continuación se indica paso a paso las ecuaciones hasta llegar a obtener las fuerzas internas.

### Paso 1

Asumir una posición inicial del eje neutro  $c$ ; una buena aproximación es empezar con el valor de  $c$  calculado anteriormente para sección fisurada.

Varios investigadores también recomiendan un valor de  $c$  entre  $0.15d$  y  $0.2d$ , donde  $d$  es la altura efectiva. Cualquiera sea el valor inicial debe ser ajustado durante el cálculo.

### Paso 2

Calcular las deformaciones en la fibra superior del concreto para los dos modos de falla que son; falla por aplastamiento del hormigón en compresión o falla del CFRP por delaminación o rotura.

- Aplastamiento del concreto

$$\varepsilon_{cu} = 0.003$$

Se toma la máxima deformación utilizable del concreto a compresión

- Falla del FRP

$$\varepsilon_{cu} = \frac{(\varepsilon_{fd} + \varepsilon_{bi}) \cdot c}{h - c}$$

La menor de las dos deformaciones consideradas, es la que se utiliza para el cálculo de deformaciones en estado último de los demás materiales y por lo tanto es la que define cuál es el modo de falla que gobierna.

### Paso 3

Determinar las deformaciones unitarias en estado último para el resto de materiales en base a la deformación de la fibra superior del concreto  $\varepsilon_{cu}$ .

- Acero a compresión

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{c - d'}{c}$$

- Acero a tracción

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{d - c}{c}$$

- CFRP

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{h - c}{c} - \varepsilon_{bi}$$

### Paso 4

Calcular los esfuerzos en condiciones últimas para cada material en base a las deformaciones últimas.

Si se trabaja en el rango lineal de la curva tensión deformación del acero se dice que:

$$\varepsilon_{sy} = \frac{f_y}{E_s}$$

Donde

$\varepsilon_{sy}$  = deformación del acero correspondiente al punto de fluencia

$f_y$  = esfuerzo de fluencia del acero

$E_s$  = módulo de elasticidad del acero

- Acero a compresión

Si la deformación última en el acero a compresión es mayor que la deformación de fluencia, el esfuerzo en condiciones últimas es directamente el valor de  $f_y$ , esfuerzo de fluencia del acero.

$$f_s' = f_y, \text{ si } \varepsilon_s' \geq \varepsilon_{sy}$$

Pero si la deformación última del acero a compresión es menor que la de fluencia el esfuerzo generado es:

$$f_s' = E_s \cdot \varepsilon_s' \text{ si } \varepsilon_s' < \varepsilon_{sy}$$

- Acero a tracción

Para el acero a tracción se cumplen las mismas condiciones que en compresión por lo que se indican únicamente las ecuaciones.

$$f_s = f_y, \text{ si } \varepsilon_s \geq \varepsilon_{sy}$$

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \text{ si } \varepsilon_s < \varepsilon_{sy}$$

- CFRP

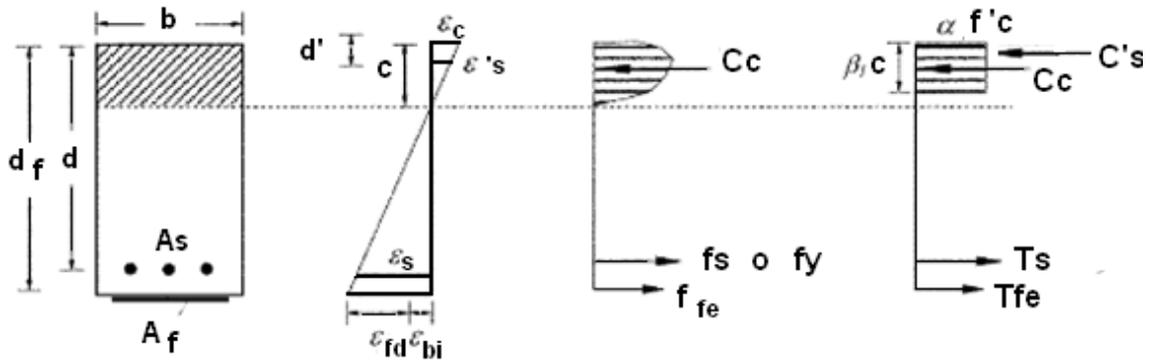
La lámina de carbono por tener un comportamiento netamente elástico se la considera como lineal-elástica hasta la rotura, entonces el esfuerzo en cualquier momento será:

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_f$$

### Paso 5

Calcular los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  del bloque de esfuerzos equivalentes del concreto que se indican en la figura siguiente.

*Figura 13 Bloque de esfuerzos y deformaciones del hormigón armado*



Los valores que recomienda el ACI 318 para secciones rectangulares son:

$$\alpha = 0.85$$

$\beta = 0.85$  para concreto con resistencia  $\leq 280 \text{ Kg/cm}^2$ . Para resistencias superiores a  $280 \text{ Kg/cm}^2$ , disminuye en 0.05 por cada  $70 \text{ kg/cm}^2$  que se incremente la resistencia del concreto  $f'_c$ , con un valor mínimo de 0.65.

### Paso 6

Calcular las resultantes de fuerzas internas en la sección.

- Fuerza de compresión en el concreto

$$C_c = \beta \cdot c \cdot \alpha \cdot f'_c \cdot b$$

- Fuerza de compresión en el acero

$$C's = f_s' \cdot A_s'$$

- Fuerza de tracción en el acero

$$T_s = f_s \cdot A_s$$

- Fuerza de tracción en el FRP

$$T_{fe} = f_{fe} \cdot A_f$$

### Paso 7

Chequear el equilibrio, la fuerza resultante debe ser nula.

$$C_c + C's - T_s - T_{fe} = 0$$

De no cumplirse esta última condición se regresa al paso 1 para modificar la profundidad del eje neutro y se desarrolla nuevamente todo el proceso hasta conseguir el equilibrio en el paso 7.

Debido a que es un proceso iterativo no complicado pero quizás muy largo como para hacerlo a mano, se recurre a la ayuda de los ordenadores que aproximan y devuelven rápidamente el valor final del eje neutro que equilibra las fuerzas internas de tracción y compresión en el elemento.

### **Cálculo de la capacidad a flexión en condiciones últimas**

Una vez que se obtiene la profundidad del eje neutro real que satisface el equilibrio de fuerzas internas y la compatibilidad de deformaciones, el nuevo momento último que resiste la sección reforzada con CFRP se calcula mediante la siguiente ecuación que no es más que la suma de los momentos resistentes del acero a tracción y compresión, y el CFRP.

$$\phi Mn = \phi (M_{ns} + M_{ns'} + \psi_f \cdot M_{nf})$$

$$\phi Mn = \phi \left[ A_s \cdot f_s \cdot \left( d - \frac{\beta \cdot c}{2} \right) + A_s' \cdot f_s' \cdot \left( \frac{\beta \cdot c}{2} - d' \right) + \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \cdot \left( h - \frac{\beta \cdot c}{2} \right) \right]$$

Todas las variables empleadas en la ecuación anterior ya se encuentran definidas anteriormente, solo falta indicar los valores de los coeficientes de reducción  $\phi$  y  $\psi_f$

El factor de reducción adicional  $\psi_f$  que se aplica a la contribución del refuerzo CFRP, está basado en las propiedades de la resistencia a la flexión, calibradas experimentalmente mediante estadística, se recomienda un valor de 0.85.

Al reforzar elementos estructurales con CFRP adherido externamente, se reduce la ductilidad de las secciones, muchas veces de manera insignificante, pero cuando es muy baja se debe compensar con una alta

reserva de resistencia que se logra a través de un factor de reducción de resistencia a flexión  $\phi$ , el cual se determina según el nivel de deformación del acero en estado último.

$$\phi = \begin{cases} 0.9 \text{ para } \varepsilon_s \geq 0.005 \\ 0.65 + \frac{0.25(\varepsilon_s - \varepsilon_{sy})}{0.005 - \varepsilon_{sy}} \text{ para } \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s < 0.005 \\ 0.65 \text{ para } \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \end{cases}$$

$\varepsilon_s$  = deformación del acero en estado último

$\varepsilon_{sy}$  = deformación del acero correspondiente a la fluencia

Esta ecuación establece un factor de reducción de 0.9 para secciones dúctiles, 0.65 para secciones frágiles y proporciona una transición lineal entre estos dos extremos.

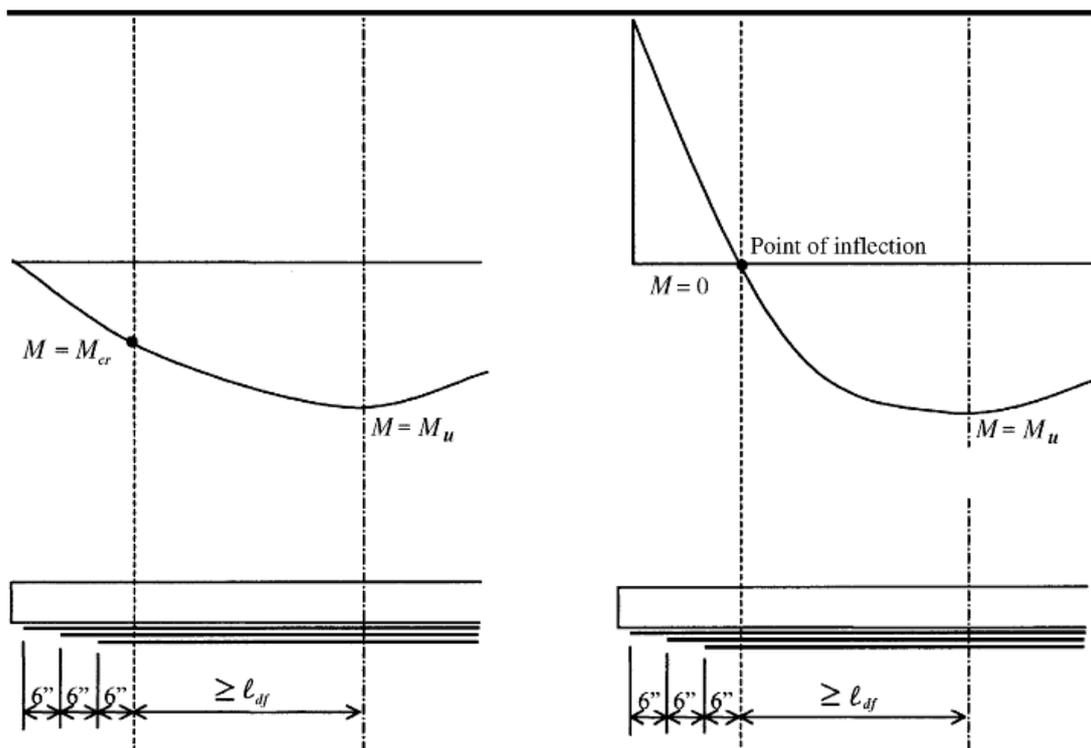
### **Longitud de desarrollo**

Muchas pruebas de laboratorio muestran que los elementos reforzados a flexión con Sika CarboDur, fallan por despegue de la lámina en zonas cercanas al final del refuerzo, por lo que es necesario tener una cierta longitud de adherencia para asegurar que la lámina no se despegue.

La longitud de anclaje debe exceder el valor dado por la siguiente expresión:

$$l_{df} = \sqrt{\frac{n \cdot E_t \cdot t_f}{\sqrt{f'c}}}$$

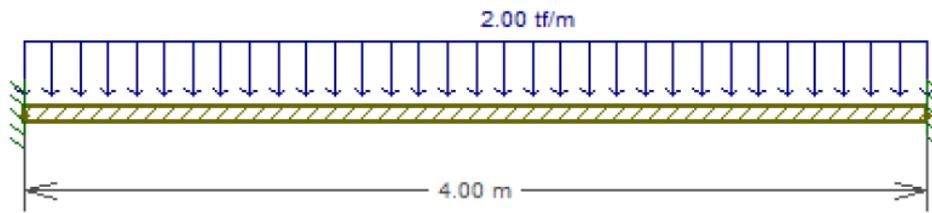
*Figura 14 Longitud de anclaje*



Para vigas continuas, el Sika CarboDur debe terminar en el punto de inflexión donde los esfuerzos son mínimos y para vigas simplemente apoyadas, las platinas y tejidos Sika CarboDur deben extenderse a lo largo de toda la luz para terminar tan cerca de los apoyos como sea posible.

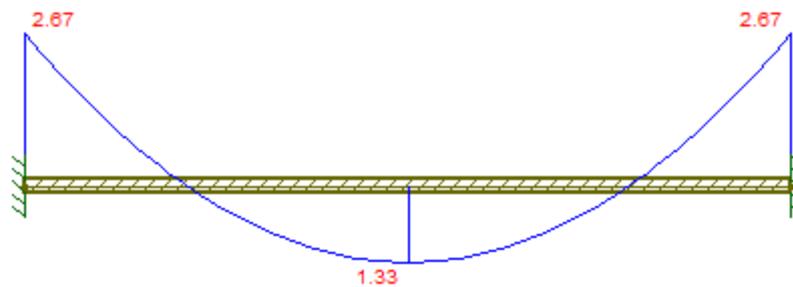
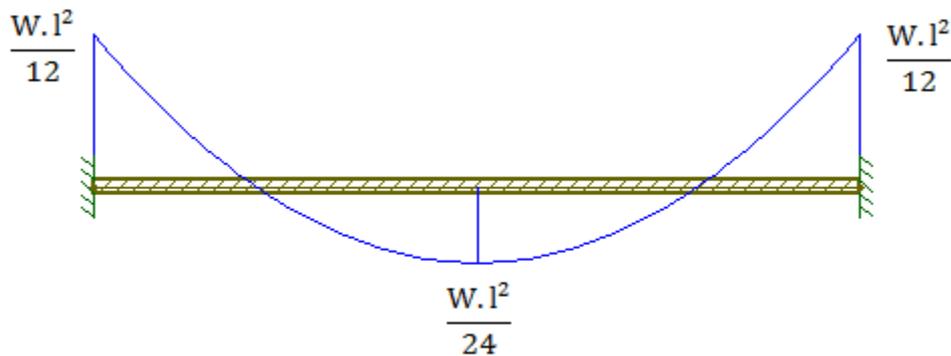
### 3.1.1.8 Aplicación Al Reforzamiento De Una Viga

Se desea reforzar una viga empotrada que soporta una carga distribuida de  $2T/m$  y que por motivos de cambio de uso su carga aumenta a  $3T/m$ , tiene  $4m$  de largo, con una sección de  $20cm$  de base por  $30cm$  de altura y recubrimiento de  $6\text{ cm}$ . El concreto utilizado tiene una resistencia a la compresión de  $210\text{ kg/cm}^2$ , el acero un límite de fluencia de  $4200\text{ kg/cm}^2$ , en la figura siguiente se muestra el esquema de la viga.



## SOLUCIÓN

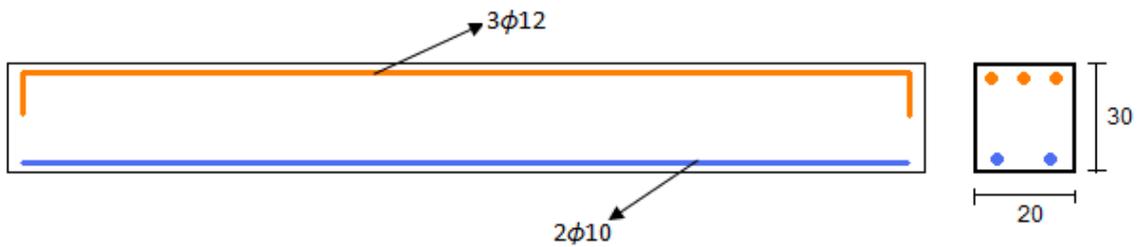
Lo primero es determinar el diagrama de momentos de la viga, con esos resultados se calcula la armadura de refuerzo longitudinal que debe tener.



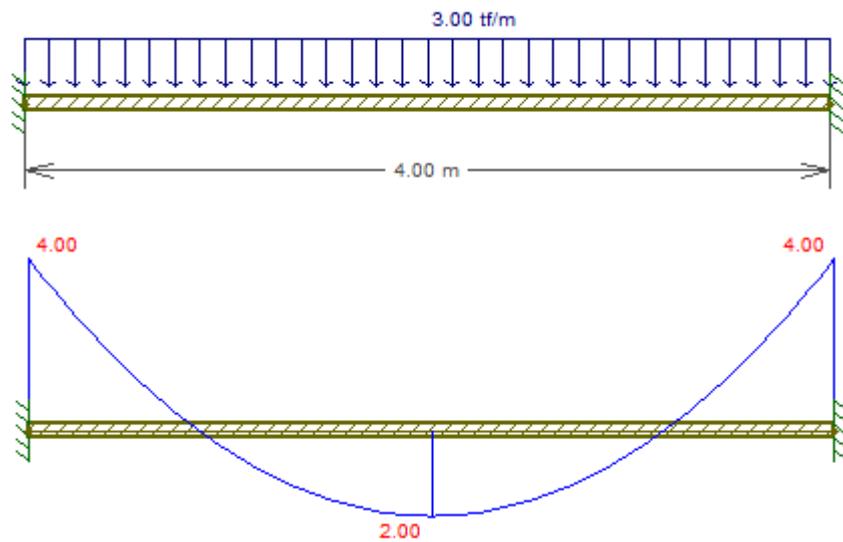
$$A_s = \frac{0.85f'c \cdot b \cdot d}{f_y} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M_u}{\phi \cdot 0.85f'c \cdot b \cdot d^2}} \right]$$

$$A_{s_{min}} = \frac{14}{f_y} \cdot b \cdot d$$

Mu (T.m)	As (cm <sup>2</sup> )	Asmin (cm <sup>2</sup> )	armadura
2.67	3.19	1.60	3 $\phi$ 12
1.33	1.52	1.60	2 $\phi$ 10



Cuando la carga distribuida sobre la viga aumenta a 3T/m, los momentos aumentan y la armadura anteriormente calculada es insuficiente para resistir a flexión por lo que se realiza el refuerzo con platinas de CFRP.



Con los datos indicados antes, la capacidad a flexión de la viga en el centro de luz es 1.52Tm. Este es el valor  $M_i$ , de acuerdo a la nomenclatura presentada. El momento de agrietamiento  $M_{cr} = 0.9050$  Tm. Por lo que la sección está inicialmente fisurada, la profundidad del eje neutro y momento de inercia son:

$$c_{a\_cr} = d \cdot (\sqrt{(\rho \cdot n_s)^2 + 2 \cdot \rho \cdot n_s} - \rho \cdot n_s) = 5.7904 \text{ cm.}$$

$$I_{cr} = \frac{1}{3} \cdot b_w \cdot c_{a\_cr}^3 + n_s \cdot A_s \cdot (d - c_{a\_cr})^2 = 7399.8 \text{ cm}^4.$$

El módulo de elasticidad del hormigón se calcula con  $E_c = 15000 \cdot \sqrt{f'_c}$ , en kg/cm<sup>2</sup>. La deformación inicial antes de colocar la platina S 512 es:

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_i(h - c)}{E_c \cdot I} = 0.0029$$

La deformación y esfuerzo últimos de la platina S 512, son:  $\varepsilon_{fu}^* = 0.018$ ;  $f_{fu}^* = 28000 \text{ kg/cm}^2$  El coeficiente de modificación por condiciones ambientales  $CE = 0.95$ , debido a que el reforzamiento se supone para una viga interior.

$$\varepsilon_{fu} = CE \cdot \varepsilon_{fu}^* = 0.017$$

$$f_{fu} = CE \cdot f_{fu}^* = 26600 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

La deformación última efectiva de las platinas S 512 se halla de la siguiente manera:

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f'_c}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0.9 \varepsilon_{fu}$$

El valor de  $\varepsilon_{fd} = 0.0042$ . Se recuerda que  $n$ , es el número de capas de CFRP, en este caso  $n = 1$ . El valor de  $\varepsilon_{fd}$  sirve para chequear cuál es el modo de falla. En este ejercicio la falla se presenta en el CFRP. Se obtuvo convergencia luego de 23 iteraciones y estos son algunos de los resultados hallados.

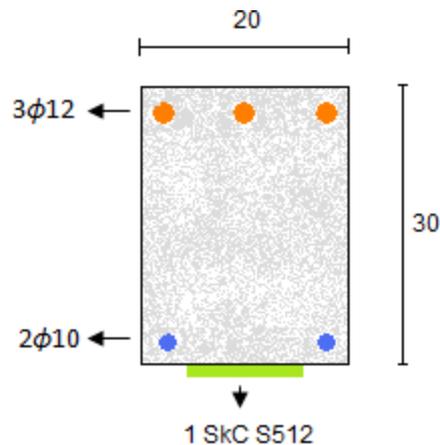
$$\varepsilon_{cu} = 0.0009 \quad \varepsilon_s = 0.0055 \quad \phi = 0.9$$

$$f_s = 4200 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad c = 3.5506 \text{ cm.} \quad f_f = 6967 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

La resultante de la fuerza a compresión del hormigón vale  $C_c = 10.774 \text{ T}$ .

Por otra parte la suma de las fuerzas a tracción es 10.774 T., de ésta cantidad la platina S 512 lleva 4.18 T.

El aporte de momento de la platina S 512 es  $M_f = 1.0123 \text{ Tm.}$ , y el aporte del acero es  $M_s = 1.4831 \text{ Tm.}$  Por lo tanto el momento nominal  $M_n = 2.4954 \text{ Tm.}$  Finalmente, la capacidad a momento último es  $M_u = 0.9 * 2.4954 = 2.2459 \text{ Tm.}$ , cantidad que es mayor al momento último requerido.



### 3.1.2 Instalación Del Sistema De Refuerzo

#### 3.1.2.1 Preparación previa a la Instalación de refuerzo

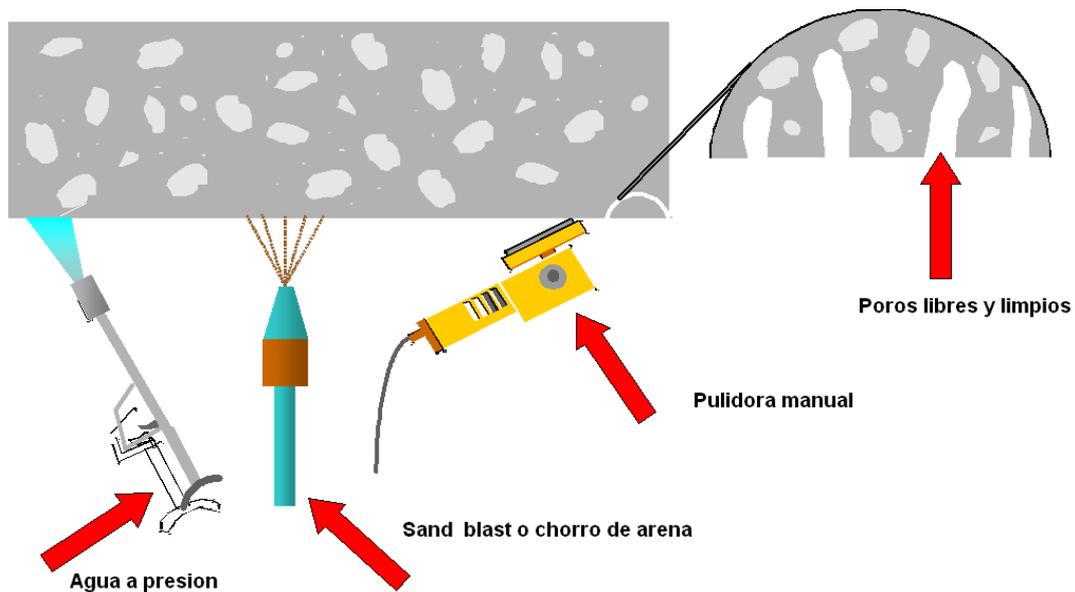
Es necesario hacer una inspección visual de la superficie del concreto, evaluando el estado de la viga donde se aplicara el sistema, así como presencia de grietas, oquedades, o imperfecciones del concreto, las cuales deben ser resanadas estructuralmente para poder tener una superficie óptima para la aplicación del sistema.

#### **Limpieza de la superficie de concreto.**

Gran parte del éxito del sistema de refuerzo es la adherencia que éste tenga con el sustrato de concreto, por lo que la limpieza profunda y el

perfil de anclaje a lograr, son indispensables para el funcionamiento del sistema. Existen varios métodos para lograr una limpieza profunda en la superficie del concreto, como limpieza con agua a presión, agua con arena a presión (Sand blast) y pulido abrasivo con un pulidor manual y corte entramado para adherencia del aditivo epóxico; estos logran que los poros del concreto queden abiertos y limpios para que sea allí donde se deposite la resina epóxica que adhiere las barras al concreto.

*Figuran 15 Equipos para realizar la Limpieza y preparación de superficie*



*Figura 16 Disco pulidor de concreto (Para dar uniformidad en la zona de pegado)*



*Figura 17 Disco de corte de concreto (Para dar la forma de entramado)*



*Figura 18 Disco tipo copa cepillo metálico (Para quitar las Impurezas)*



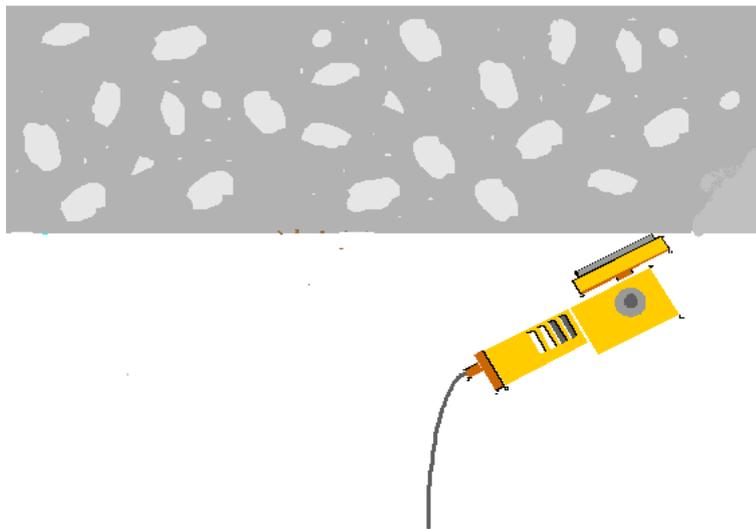
*Figura 19 Compresora de aire manual para eliminar restos sueltos.*



### **Espacio para colocación de barras.**

Con una pulidora manual se hace una limpieza, con un ancho deseado en nuestro caso 10 mm, El largo se calcula en función al incremento de la resistencia a flexión, pero no excede la zona de flexión que marca la curva elástica de la viga, debiendo hacerse en la cara inferior de la viga, al centro de la misma.

*Figura 20 Espacio para colocación de barras*



*Figura 21 Puliendo la cara inferior de la viga*



*Figura 22 Limpiando la cara inferior de la viga*



*Figura 23 Cara Inferior de la Viga para colocación de CFRP*

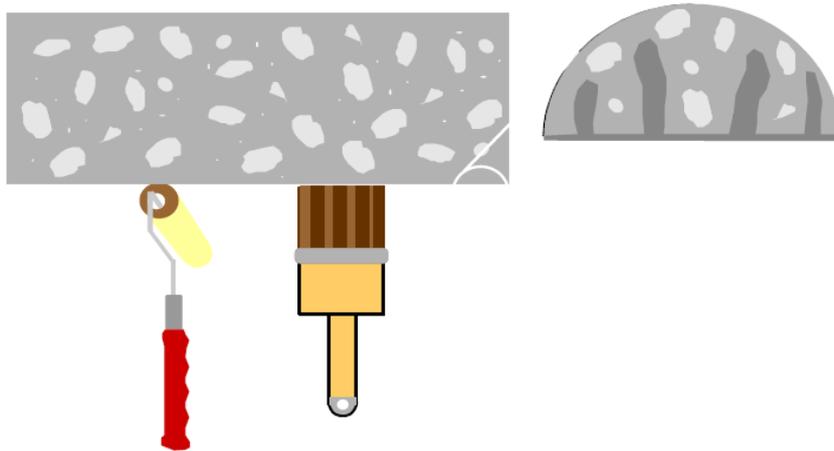


### **Secuencia de aplicación de los componentes del sistema de refuerzo**

#### **Imprimación epóxica en ranura**

Se coloca el adhesivo estructural o resina epóxica debajo de la arista de la viga donde será colocada la lámina de fibra de carbono a manera de llenar los poros del concreto y tener un recubrimiento total de la barra a insertar.

*Figura 24 Imprimación epóxica*



*Figura 25 Mezclando en Componente A y B*



*Figura 26 La mezcla debe quedar del color gris como se muestra*



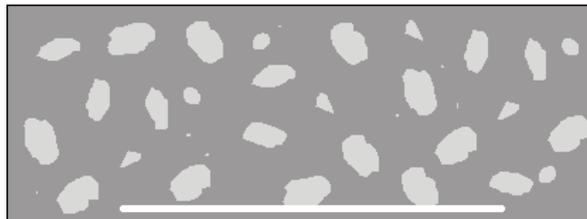
*Figura 27 Aplicando el epóxico en la zona donde se colocara la fibra de carbono*



### **Colocación de barras**

Se introduce la barra de fibra de carbono debajo de la viga, se remueve el exceso de resina epóxica y luego se recubre la barra de manera que ésta quede totalmente adherida, cubierta totalmente de resina.

*Figura 28 Colocación de barra*



*Figura 29 Cortando la fibra de carbono según medida calculada que se colocará en la viga*



*Figura 30 Aplicando el aditivo epóxico en la cara que se va a adherir en la viga*



*Figura 31 Dando uniformidad a epóxico antes de ser colocado*



*Figura 32 Colocando la Fibra de carbono en la cara inferior de la viga*



*Figura 33 Dando algunos ajustes con un listón de madera para el acabado final*



*Figura 34 Fibra colocada en la cara inferior de la viga*



**Recubrimiento epóxico final**

Para el recubrimiento final se recubre alrededor de la ranura con una cinta adhesiva para evitar exceso de adhesivo, con el fin de lograr el menor impacto estético posible.

*Figura 35 Se aplicara el epóxico sikadur 32 para adherir el mortero del tarrajeo sobre la fibra de carbono*



### 3.2. PRUEBAS DE NORMATIVIDAD

#### **Normatividad**

- **Manual ACI-440 (American Concrete Institute)**  
Guía para el Diseño y Construcción de Sistemas Por fuera Consolidados con FRP (Fibra de Carbono) para Reforzar Estructuras de Concreto.
- **Norma E.020 del Reglamento Nacional de Construcción**  
Cargas
- **Norma E.030 del Reglamento Nacional de Construcción**  
Diseño Sismo resistente
- **Norma E.050 del Reglamento Nacional de Construcción**  
Suelos y Cimentaciones
- **Norma E.060 del Reglamento Nacional de Construcción**  
Norma Técnica de Edificación E.060 Concreto Armado
- **Norma Técnica Peruana NTP 400.011**  
AGREGADOS. Definiciones y clasificación de agregados para uso en morteros y concretos

- **NTP 339.047:1979**  
CONCRETO (CONCRETO). Definiciones y terminología relativas al concreto
- **ASTM C 150**  
Especificación Normalizada para Cemento Portland

# CAPÍTULO IV: PROCESO DE CONTRASTE DE HIPÓTESIS

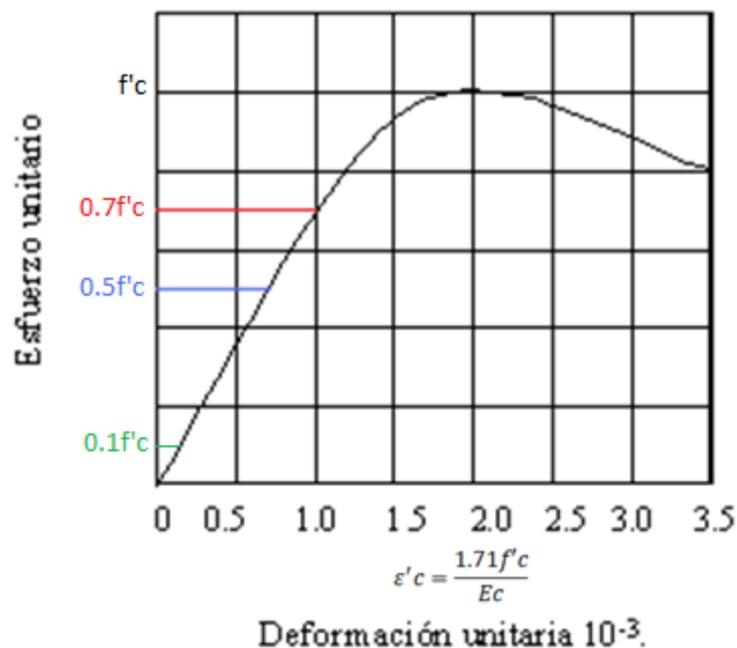
## 4.1. PRUEBA DE HIPÓTESIS GENERAL

### 4.1.1. Hipótesis Básicas Para El Análisis a Flexión

#### Hipótesis

El cálculo de refuerzo teniendo como base la teoría clásica o elástica ayuda a determinar parámetros y características del concreto antes y después de fisurarse.

Figura 36. Diagrama esfuerzo deformación del hormigón armado.



Rosero, L., I. (2013), *Reforzamiento de estructuras de hormigón armado con FRP (Fiber Reinforced Polymers)* extraído de <http://www.construaprende.com/docs/tesis/293-concreto-presforzado?start=6>

Mediante la curva anterior se explica porqué asumir una distribución lineal tanto de esfuerzos como de deformaciones; como se ve el concreto en un inicio tiene un comportamiento casi lineal, lo cual es

satisfactoriamente cierto hasta un nivel de esfuerzos aproximadamente por debajo de  $0.5f'_c$ , y el error es mínimo hasta que el esfuerzo en el concreto alcanza una magnitud de  $0.7 f'_c$ , para el cual el diagrama esfuerzo deformación se separa considerablemente de la línea recta. Además dos conceptos importantes que se muestran en este diagrama son; el esfuerzo a tracción del concreto, que muchos investigadores por facilidad lo estiman como el 10% de la resistencia a compresión  $f'_c$ , y la deformación unitaria del concreto correspondiente a  $f'_c$  que se calcula con la expresión:

$$\varepsilon'_c = \frac{1.71f'_c}{E_c}$$

Siendo  $E_c$  el módulo de elasticidad del hormigón calculado como  $E_c = 4700\sqrt{f'_c}$  en MPa, esto es equivalente al  $15000\sqrt{f'_c}$  que se ocupa comúnmente en Kg/cm<sup>2</sup>.

En el diseño de refuerzos a flexión con lámina de carbono se considera fundamentalmente los mismos principios que se emplean en refuerzos mediante chapas de acero y muchas de las suposiciones que se aplican son las que comúnmente se utilizan en el diseño de elementos de concreto armado.

Para desarrollar un modelo de cálculo se realizan las siguientes suposiciones:

- 1) Que existe una adhesión perfecta entre el CFRP y el substrato de concreto en el que se encuentra colocado.
- 2) La hipótesis de Navier-Bernouilli que indica que las secciones planas permanecen planas después de la deformación.
- 3) Los valores de las cargas del sitio, al momento de la instalación del CFRP, están dentro de los límites elásticos de la estructura.
- 4) Se ha evaluado adecuadamente las condiciones existentes incluidas las áreas y propiedades del acero, resistencia del concreto, fuerzas de pretensado efectivas, etc.

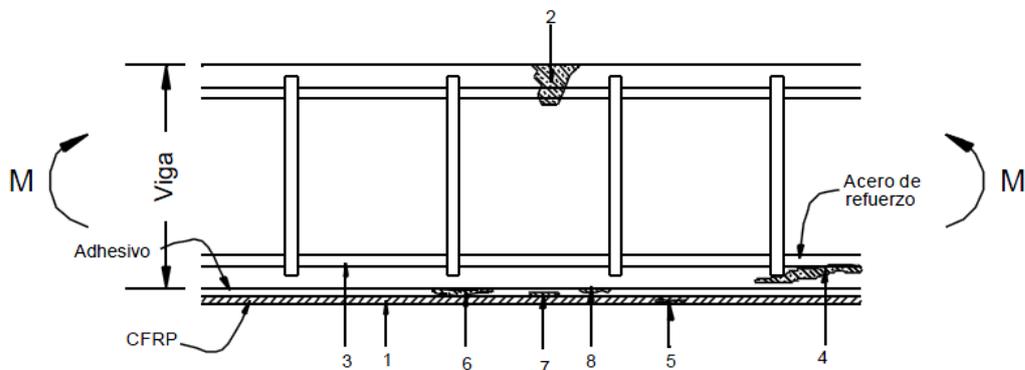
- 5) La contribución del hormigón a tracción es nula.
- 6) Se considera una distribución lineal de deformaciones a lo largo de toda la sección transversal.
- 7) Las deformaciones causadas por el cortante se desprecian.
- 8) No existe deslizamiento entre la lámina de carbono y el concreto.
- 9) Se supone que no existen fallas prematuras por delaminación.

### Modos de Fallas

Mucho tiempo y recursos se invierten en el estudio e investigación de los diferentes mecanismos de falla en elementos de concreto armado reforzados con láminas de CFRP. En el centro de investigación suizo EMPA, se realizan de modo sistemático ensayos de estructuras reforzadas con láminas de carbono sometidas a solicitaciones estáticas y dinámicas y con diferentes condiciones climáticas, la conclusión es que los modos de falla de los sistemas de refuerzo determinan varios parámetros en el diseño de elementos reforzados con CFRP.

Los posibles mecanismos de falla que se observan de manera experimental y que se deben tomar en cuenta al momento de diseñar son los siguientes:

*Figura 37 Mecanismos de falla*



- 1) Falla a tensión de la fibra: Cuando se alcanza la resistencia a tracción de la lámina.

- 2) Aplastamiento del concreto en la zona de compresión: Cuando se supera la máxima deformación en el hormigón a compresión ( $\epsilon=0.003$ ).
- 3) Fluencia del acero o rotura: Cuando se supera su resistencia a la fatiga o al excederse la deformación de fluencia.
- 4) Desprendimiento del concreto en la zona de tracción: Producto de un desplazamiento vertical de la superficie inferior de la viga por insuficiente preparación de la superficie o por desplazamientos debidos a cortante, todo esto provoca fisuras horizontales en el hormigón que desprenden la lámina en toda su longitud.
- 5) Rotura interlaminar: Ocurre si se supera la resistencia al corte en la lámina, esta falla a lo largo de las fibras y se da la rotura interlaminar.
- 6) Rotura de la película adhesiva: Cuando los esfuerzos cortantes en esta zona son muy altos o también es debido a presiones perpendiculares entre el concreto y la lámina, efecto conocido como pilling.
- 7) Falla de cohesión en la superficie de CFRP: Por falla en la adherencia en la capa de CFRP con el adhesivo debido a una mala preparación de la superficie de la lámina.
- 8) Falla de cohesión en la superficie de hormigón: Por falla en la adherencia en el hormigón con el adhesivo debido a una deficiente preparación de la superficie de concreto.

Las roturas de tipo 1, 2 y 4 son las más graves ya que se producen de una manera súbita en el elemento porque tienen un comportamiento frágil y explosivo, mientras que los modos del 5 al 8 provocan una rotura local que se puede reparar para no alterar el comportamiento y ductilidad del sistema de refuerzo.

La ganancia de resistencia a flexión que se determina teóricamente es significativa, pero debido a los tipos de falla que se observan, esta ganancia se limita y se producen roturas ante cargas mucho más bajas que las contempladas en el diseño del sistema de refuerzo.

Se debe mencionar que todos estos modos de falla se determinan de manera experimental y su análisis se considera limitado, ya que se ensayan

elementos de concreto simple, de sección rectangular y con CFRP en la cara inferior del elemento, lo cual deja mucha incertidumbre para otro tipo de configuraciones geométricas más complejas. Por esto existe la necesidad de comprender mejor los modos de falla en las vigas reforzadas con láminas de carbono.

#### 4.1.1.2. Planteamiento de solución

- Realizar los estudios respectivos planteados.
- Realizar el reforzamiento estructural donde existan patologías y fallas: reforzamiento de vigas con polímeros reforzados de fibra de carbono.

#### 4.1.1.3. Ingeniería Del Proyecto

### **Concepción Estructural De Las Edificaciones**

La arquitectura ha sido definida también, en cierta forma, en base a la concepción estructural de la edificación. Es común que las edificaciones hasta 03 o 04 pisos sean concebidas como un sistema aporticado, de manera que a través de la interacción de vigas y columnas se transmitan las cargas de la edificación al subsuelo con cierta uniformidad o equidad, así como también se disipe la energía que transmite a la estructura un eventual movimiento sísmico. Este sistema aporticado nos permite utilizar vigas no muy largas y columnas sin esbeltez alguna, y por ende, losas aligeradas y/o losas macizas.

Bajo ese criterio, se ha concebido preliminarmente el uso de zapatas aisladas para la cimentación, recomendado también por el estudio de suelos. De acuerdo a ese estudio de suelos, efectuado en la futura zona de obras, se ha podido determinar los siguientes parámetros de diseño de la cimentación: una capacidad portante del suelo igual a **1.41 kg/cm<sup>2</sup>** para el Módulo I y **1.36 kg/cm<sup>2</sup>** para el Módulo II; así como una profundidad de desplante de **2.30 metros** para el Módulo I y profundidad variable para el Módulo II.

El dimensionamiento se ha efectuado siguiendo los siguientes procedimientos:

1. Las columnas se han dimensionado utilizando la conocida fórmula del Índice de Compresión  $\eta = P / (f'c \times A_c)$ , con  $\eta = 0.30$  para columnas interiores,  $\eta = 0.25$  para columnas exteriores,  $P =$  carga axial de servicio,  $f'c = 210 \text{ k/cm}^2$  y  $A_c = b \times t$  el área de la sección transversal.
2. Las vigas se han dimensionado mediante las fórmulas  $h = L/11$  para determinar la altura de la sección transversal y la base de la viga  $b = L/20$  o  $h/2$  para encontrar el ancho de esa misma sección.
3. Las zapatas se han dimensionado mediante la expresión  $A_z = 1.10 \text{ Ps}/q_s$ , con Ps carga en condición de servicio, 1.10 el factor que toma en cuenta el peso probable de la zapata y  $q_s$  la capacidad portante del suelo, la cual tiene que ser verificada cuando las condiciones del suelo así lo exijan.
4. Los muros de contención se han dimensionado en base a la arquitectura del proyecto, principalmente a las alturas de relleno que los muros tienen que contener, para luego verificarlas utilizando los criterios de peligro de deslizamiento y de volteo.
5. El espesor  $t$  de las losas aligeradas se ha calculado mediante la fórmula  $t=L/25$ , donde  $L$  es la luz libre de la losa.
6. Los pasos y contrapasos de las escaleras han sido definidas en la arquitectura del proyecto. Su espesor o garganta  $t$  se ha determinado mediante la fórmula  $t = L/20$ , donde  $L$  es la luz libre de la losa de escalera.

#### Estudios Básicos

Para los reforzamientos de la edificación de la Institución Educativa Mariano Melgar se han realizado estudios previos en laboratorios externos como: estudios de suelos, estudios de pruebas destructivas (Diamantina), evaluación de estructuras. Para ello se contrató los servicios de terceros (empresas especializadas) para realizar los estudios necesarios.

4.1.1.4. De los Análisis De Suelos tenemos los siguientes resultados

De los análisis tenemos los resultados realizados según normatividad E 050 y Norma ASTM D420 (Pozos o calicatas y trincheras, técnicas de muestreo), D2487 (descripción manual, visual de los suelos) tenemos:

- **CORTE DIRECTO**

ASTM D3080 (Corte Directo)

*Tabla 7 Resultado por corte directo*

<b>CORTE DIRECTO - C -1</b>				
	C-1	C-2	C-3	C-4
ÁNGULO DE FRECCIÓN (*)	36.02	33.86	29.31	36.3
COHESIÓN kg/cm2	0.154	0.163	0.275	0.158

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, concreto y Pavimentos Inversiones Generales Centauro Ingenieros SAC.

- **HUMEDAD**

NTP 339.127 / ASTM D2216 (Contenido de Humedad)

*Tabla 8 Resultado de Contenido de Humedad de las calicatas*

CALICATA	HUMEDAD (%)
C-1	10.04
C-2	10.59
C-3	13.61
C-4	9.91

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, concreto y Pavimentos Inversiones Generales Centauro Ingenieros SAC.

- **CLASIFICACIÓN**

ASTM D2488 (Clasificación Unificada de Suelos SUCS)

*Tabla 9 Resultados de clasificación SUCS*

CALICATAS	PROFUNDIDAD (m)	DESCRIPCIÓN ESTRATIGRÁFICA				
		Nro	ESTRATO (m)	SUCS	CONTENIDO DE HUMEDAD %	Peso Volumétrico (g/cm <sup>3</sup> )
C-1	3.00	1	0 - 2.1	PT	5.61	1.23
		2	2.1 - 3.0	GM	10.04	2.19
C-2	3.00	1	0 - 0.5	PT	1.25	2.23
		2	0.5 - 3.0	GM	10.59	2.23
C-3	3.00	1	0 - 2.0	PT	5.98	1.23
		2	2.0 - 3.0	GM	13.61	2.26
C-4	3.00	1	0 - 1.4	PT	6.55	1.22
		2	1.4 - 3.0	GM	9.91	2.25

*Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, concreto y Pavimentos Inversiones Generales Centauro Ingenieros SAC.*

- GRANULOMETRÍA**

NTP 339.128/ASTM D422 (Análisis Granulométrico)

*Tabla 10 Resultados de Granulometría*

CALICATA	FINO (%)	ARENA (%)	GRAVA (%)
C-1	19.63	28.67	51.70
C-2	22.10	31.81	46.09
C-3	17.45	37.43	45.12
C-4	14.45	31.38	54.09

*Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, concreto y Pavimentos Inversiones Generales Centauro Ingenieros SAC.*

- LÍMITES DE ATTERBERG**

ASTM D4318 (Limite Líquido y Limite Plástico)

*Tabla 11 Resultados de LL y LP*

CALICATA	% LÍMITE LÍQUIDO	% LÍMITE PLÁSTICO	% ÍNDICE DE PLASTICIDAD
C-1	21.71	17.65	4.05
C-2	20.46	16.70	3.37
C-3	20.53	17.19	3.34
C-4	22.68	19.05	3.64

*Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, concreto y Pavimentos Inversiones Generales Centauro Ingenieros SAC.*

- RESULTADOS DE LA CAPACIDAD DE CARGA**

**CIMENTACIONES DE LA ESTRUCTURA TIPO OINFES A TOMAR EN CUENTA PARA EL CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE CARGA**

*Tabla 12 Resultados de capacidad de Carga C1*

DESCRIPCIÓN DE CALICATA	PROFUNDIDAD DE LA CALICATA	PROFUNDIDAD DE LA CIMENTACIÓN	FACTOR DE SEGURIDAD	CAPACIDAD ADMISIBLE DEL TERRENO CIMENTACIÓN CORRIDA	CAPACIDAD ADMISIBLE DEL TERRENO CIMENTACIÓN CUADRADA	CAPACIDAD ADMISIBLE DEL TERRENO CIMENTACIÓN CIRCULAR
C-1	3.00 m	1.50 m	2.50	2.50 kg/cm <sup>2</sup>	2.63 kg/cm <sup>2</sup>	2.65 kg/cm <sup>2</sup>
C-1	3.00 m	1.50 m	3.00	2.08 kg/cm <sup>2</sup>	2.19 kg/cm <sup>2</sup>	2.21 kg/cm <sup>2</sup>
C-1	3.00 m	1.50 m	3.50	1.79 kg/cm <sup>2</sup>	1.88 kg/cm <sup>2</sup>	1.89 kg/cm <sup>2</sup>
C-1	3.00 m	1.50 m	4.00	1.56 kg/cm <sup>2</sup>	1.64 kg/cm <sup>2</sup>	1.66 kg/cm <sup>2</sup>

*Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, concreto y Pavimentos  
Inversiones Generales Centauro Ingenieros SAC.*

**Tabla 43 Resultados de capacidad de carga C2**

**USANDO CARGA LOCAL - FACTORES DE CARGA SEGÚN TERZAGUI - C -2,  
C-2, P-4, Z-1**

DESCRIPCIÓN DE CALICATA	PROFUNDIDAD DE LA CALICATA	PROFUNDIDAD DE LA CIMENTACIÓN	FACTOR DE SEGURIDAD	CAPACIDAD ADMISIBLE DEL TERRENO CIMENTACIÓN CORRIDA	CAPACIDAD ADMISIBLE DEL TERRENO CIMENTACIÓN CUADRADA	CAPACIDAD ADMISIBLE DEL TERRENO CIMENTACIÓN CIRCULAR
C-2, P-4, Z-1	3.00 m	2.50 m	2.50	3.07 kg/cm <sup>2</sup>	3.35 kg/cm <sup>2</sup>	3.33 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-4, Z-1	3.00 m	2.50 m	3.00	2.56 kg/cm <sup>2</sup>	2.79 kg/cm <sup>2</sup>	2.77 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-4, Z-1	3.00 m	2.50 m	3.50	2.19 kg/cm <sup>2</sup>	2.40 kg/cm <sup>2</sup>	2.38 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-4, Z-1	3.00 m	2.50 m	4.00	1.92 kg/cm <sup>2</sup>	2.10 kg/cm <sup>2</sup>	2.08 kg/cm <sup>2</sup>

*Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, concreto y Pavimentos  
Inversiones Generales Centauro Ingenieros SAC.  
C-2, P-5, Z-4*

DESCRIPCIÓN DE CALICATA	PROFUNDIDAD DE LA CALICATA	PROFUNDIDAD DE LA CIMENTACIÓN	FACTOR DE SEGURIDAD	CAPACIDAD ADMISIBLE DEL TERRENO CIMENTACIÓN CORRIDA	CAPACIDAD ADMISIBLE DEL TERRENO CIMENTACIÓN CUADRADA	CAPACIDAD ADMISIBLE DEL TERRENO CIMENTACIÓN CIRCULAR
C-2, P-5, Z-4	3.00 m	2.50 m	2.50	3.07 kg/cm <sup>2</sup>	3.35 kg/cm <sup>2</sup>	3.33 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-5, Z-4	3.00 m	2.50 m	3.00	2.56 kg/cm <sup>2</sup>	2.79 kg/cm <sup>2</sup>	2.77 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-5, Z-4	3.00 m	2.50 m	3.50	2.19 kg/cm <sup>2</sup>	2.40 kg/cm <sup>2</sup>	2.38 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-5, Z-4	3.00 m	2.50 m	4.00	1.92 kg/cm <sup>2</sup>	2.10 kg/cm <sup>2</sup>	2.08 kg/cm <sup>2</sup>

*Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, concreto y Pavimentos  
Inversiones Generales Centauro Ingenieros SAC.  
C - 2, P - 6, Z - 2*

DESCRIPCIÓN DE CALICATA	PROFUNDIDAD DE LA CALICATA	PROFUNDIDAD DE LA CIMENTACIÓN	FACTOR DE SEGURIDAD	CAPACIDAD ADMISIBLE DEL TERRENO CIMENTACIÓN CORRIDA	CAPACIDAD ADMISIBLE DEL TERRENO CIMENTACIÓN CUADRADA	CAPACIDAD ADMISIBLE DEL TERRENO CIMENTACIÓN CIRCULAR
C - 2, P - 6, Z - 2	3.00 m	2.50 m	2.50	3.09 kg/cm <sup>2</sup>	3.09 kg/cm <sup>2</sup>	3.34 kg/cm <sup>2</sup>
C - 2, P - 6, Z - 2	3.00 m	2.50 m	3.00	2.57 kg/cm <sup>2</sup>	2.57 kg/cm <sup>2</sup>	2.78 kg/cm <sup>2</sup>
C - 2, P - 6, Z - 2	3.00 m	2.50 m	3.50	2.20 kg/cm <sup>2</sup>	2.20 kg/cm <sup>2</sup>	2.38 kg/cm <sup>2</sup>
C - 2, P - 6, Z - 2	3.00 m	2.50 m	4.00	1.93 kg/cm <sup>2</sup>	1.93 kg/cm <sup>2</sup>	2.09 kg/cm <sup>2</sup>

**Tabla 14 Resultados capacidad de carga admisible C3**

**USANDO CARGA LOCAL - FACTORES DE CARGA SEGÚN TERZAGUI - C - 3**

**C - 3, P - 1, Z - 2**

DESCRIPCIÓN DE CALICATA	PROFUNDIDAD DE LA CALICATA	PROFUNDIDAD DE LA CIMENTACIÓN	FACTOR DE SEGURIDAD	CAPACIDAD ADMISIBLE DEL TERRENO CIMENTACIÓN CORRIDA	CAPACIDAD ADMISIBLE DEL TERRENO CIMENTACIÓN CUADRADA	CAPACIDAD ADMISIBLE DEL TERRENO CIMENTACIÓN CIRCULAR
C - 3, P - 1, Z - 2	3.00 m	2.50 m	2.50	2.71 kg/cm <sup>2</sup>	3.10 kg/cm <sup>2</sup>	3.09 kg/cm <sup>2</sup>
C - 3, P - 1, Z - 2	3.00 m	2.50 m	3.00	2.26 kg/cm <sup>2</sup>	2.58 kg/cm <sup>2</sup>	2.57 kg/cm <sup>2</sup>
C - 3, P - 1, Z - 2	3.00 m	2.50 m	3.50	1.94 kg/cm <sup>2</sup>	2.22 kg/cm <sup>2</sup>	2.20 kg/cm <sup>2</sup>
C - 3, P - 1, Z - 2	3.00 m	2.50 m	4.00	1.70 kg/cm <sup>2</sup>	1.94 kg/cm <sup>2</sup>	1.93 kg/cm <sup>2</sup>

Tabla 15 Resultados capacidad de carga admisible C4  
USANDO CARGA LOCAL – FACTORES DE CARGA SEGÚN TERZAGUI - C - 4

DESCRIPCIÓN DE CALICATA	PROFUNDIDAD DE LA CALICATA	PROFUNDIDAD DE LA CIMENTACIÓN	FACTOR DE SEGURIDAD	CAPACIDAD ADMISIBLE DEL TERRENO CIMENTACIÓN CORRIDA	CAPACIDAD ADMISIBLE DEL TERRENO CIMENTACIÓN CUADRADA	CAPACIDAD ADMISIBLE DEL TERRENO CIMENTACIÓN CIRCULAR
C-4	3.00 m	1.50 m	2.50	2.56 kg/cm <sup>2</sup>	2.76 kg/cm <sup>2</sup>	2.77 kg/cm <sup>2</sup>
C-4	3.00 m	1.50 m	3.00	2.13 kg/cm <sup>2</sup>	2.30 kg/cm <sup>2</sup>	2.31 kg/cm <sup>2</sup>
C-4	3.00 m	1.50 m	3.50	1.83 kg/cm <sup>2</sup>	1.97 kg/cm <sup>2</sup>	1.98 kg/cm <sup>2</sup>
C-4	3.00 m	1.50 m	4.00	1.60 kg/cm <sup>2</sup>	1.72 kg/cm <sup>2</sup>	1.73 kg/cm <sup>2</sup>

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, concreto y Pavimentos  
Inversiones Generales Centauro Ingenieros SAC.

## RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LA CIMENTACIÓN

### Profundidad de Cimentación

DESCRIPCIÓN DE CALICATA	PROFUNDIDAD DE CIMENTACIÓN D <sub>f</sub>	PROFUNDIDAD DE INVESTIGACIÓN
C-1	1.50 m	3.00 m
C-2, P-4, Z-1	2.50 m	3.00 m
C-2, P-5, Z-4	2.50 m	3.00 m
C-2, P-6, Z-2	2.50 m	3.00 m
C-3, P-1, Z-2	2.50 m	3.00 m
C-4	1.50 m	3.00 m

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, concreto y Pavimentos  
Inversiones Generales Centauro Ingenieros SAC.

### Tipo de Cimentación

DESCRIPCIÓN DE CALICATA	TIPO DE CIMENTACIÓN	D <sub>f</sub>	ANCHO DE CIMENTACIÓN B	CONDICIÓN DE QULT > QACT
C-1	CUADRADA	1.50 m	1.50 m	
C-2, P-4, Z-1	CUADRADA	2.50 m	2.20 m	CUMPLE
	CUADRADA	2.50 m	2.40 m	CUMPLE
	CUADRADA	2.50 m	2.90 m	CUMPLE
C-2, P-5, Z-4	CUADRADA	2.50 m	1.50 m	CUMPLE
	CUADRADA	2.50 m	2.00 m	CUMPLE
	CUADRADA	2.50 m	2.40 m	CUMPLE
C-2, P-6, Z-2	CUADRADA	2.50 m	2.90 m	CUMPLE
	CUADRADA	2.50 m	1.50 m	CUMPLE
	CUADRADA	2.50 m	2.00 m	CUMPLE
C-3, P-1, Z-2	CUADRADA	2.50 m	2.50 m	CUMPLE
	CUADRADA	2.50 m	2.70 m	CUMPLE
	CUADRADA	2.50 m	2.00 m	CUMPLE
C-4	CUADRADA	2.50 m	2.40 m	CUMPLE
	CUADRADA	2.50 m	2.90 m	CUMPLE
C-4	CUADRADA	1.50 m	1.00 m	

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, concreto y Pavimentos  
Inversiones Generales Centauro Ingenieros SAC.

### Resultados del Cálculo y Análisis de la Capacidad Admisible De Carga

Los cálculos efectuados para determinar la capacidad admisible de carga fueron realizados usando el Corte Local y Factores Modificados según Therzaghi.

#### FÓRMULA PARA CIMENTACIÓN CORRIDA

$$Q_{ult} = 2/3c'N'c + qN'q + 1/2yBN'y$$

DESCRIPCIÓN DE CALICATA	FACTOR DE SEGURIDAD	CAPACIDAD ADMISIBLE DEL TERRENO CIMENTACIÓN CORRIDA
C-1	2.50	2.50 kg/cm <sup>2</sup>
C-1	3.00	2.08 kg/cm <sup>2</sup>
C-1	3.50	1.79 kg/cm <sup>2</sup>
C-1	4.00	1.56 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-4, Z-1	2.50	3.07 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-4, Z-1	3.00	2.56 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-4, Z-1	3.50	2.19 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-4, Z-1	4.00	1.92 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-5, Z-4	2.50	3.07 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-5, Z-4	3.00	2.56 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-5, Z-4	3.50	2.19 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-5, Z-4	4.00	1.92 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-6, Z-2	2.50	3.09 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-6, Z-2	3.00	2.57 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-6, Z-2	3.50	2.20 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-6, Z-2	4.00	1.93 kg/cm <sup>2</sup>
C-3, P-1, Z-2	2.50	2.71 kg/cm <sup>2</sup>
C-3, P-1, Z-2	3.00	2.26 kg/cm <sup>2</sup>
C-3, P-1, Z-2	3.50	1.94 kg/cm <sup>2</sup>
C-3, P-1, Z-2	4.00	1.70 kg/cm <sup>2</sup>
C-4	2.50	2.56 kg/cm <sup>2</sup>
C-4	3.00	2.13 kg/cm <sup>2</sup>
C-4	3.50	1.83 kg/cm <sup>2</sup>
C-4	4.00	1.60 kg/cm <sup>2</sup>

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, concreto y Pavimentos  
Inversiones Generales Centauro Ingenieros SAC.

### FÓRMULA PARA CIMENTACIÓN CUADRADA

$$Q_{ult} = 0.867c'N'c + qN'q + 0.4yBN'y$$

DESCRIPCIÓN DE CALICATA	FACTOR DE SEGURIDAD	CAPACIDAD ADMISIBLE DEL TERRENO CIMENTACIÓN CORRIDA
C-1	2.50	2.63 kg/cm <sup>2</sup>
C-1	3.00	2.19 kg/cm <sup>2</sup>
C-1	3.50	1.88 kg/cm <sup>2</sup>
C-1	4.00	1.64 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-4, Z-1	2.50	3.35 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-4, Z-1	3.00	2.79 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-4, Z-1	3.50	2.40 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-4, Z-1	4.00	2.10 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-5, Z-4	2.50	3.35 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-5, Z-4	3.00	2.79 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-5, Z-4	3.50	2.40 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-5, Z-4	4.00	2.10 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-6, Z-2	2.50	3.09 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-6, Z-2	3.00	2.57 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-6, Z-2	3.50	2.20 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-6, Z-2	4.00	1.93 kg/cm <sup>2</sup>
C-3, P-1, Z-2	2.50	3.10 kg/cm <sup>2</sup>
C-3, P-1, Z-2	3.00	2.58 kg/cm <sup>2</sup>
C-3, P-1, Z-2	3.50	2.22 kg/cm <sup>2</sup>
C-3, P-1, Z-2	4.00	1.94 kg/cm <sup>2</sup>
C-4	2.50	2.76 kg/cm <sup>2</sup>
C-4	3.00	2.30 kg/cm <sup>2</sup>
C-4	3.50	1.97 kg/cm <sup>2</sup>
C-4	4.00	1.72 kg/cm <sup>2</sup>

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, concreto y Pavimentos  
Inversiones Generales Centauro Ingenieros SAC.

**FÓRMULA PARA CIMENTACIÓN CIRCULAR**

$$Q_{ult} = 0.867c'Nc' + qN'q + 0.3yBN'y$$

DESCRIPCIÓN DE CALICATA	FACTOR DE SEGURIDAD	CAPACIDAD ADMISIBLE DEL TERRENO CIMENTACIÓN CORRIDA
C-1	2.50	2.65 kg/cm <sup>2</sup>
C-1	3.00	2.21 kg/cm <sup>2</sup>
C-1	3.50	1.89 kg/cm <sup>2</sup>
C-1	4.00	1.66 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-4, Z-1	2.50	3.33 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-4, Z-1	3.00	2.77 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-4, Z-1	3.50	2.38 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-4, Z-1	4.00	2.08 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-5, Z-4	2.50	3.33 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-5, Z-4	3.00	2.77 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-5, Z-4	3.50	2.38 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-5, Z-4	4.00	2.08 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-6, Z-2	2.50	3.34 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-6, Z-2	3.00	2.78 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-6, Z-2	3.50	2.38 kg/cm <sup>2</sup>
C-2, P-6, Z-2	4.00	2.09 kg/cm <sup>2</sup>
C-3, P-1, Z-2	2.50	3.09 kg/cm <sup>2</sup>
C-3, P-1, Z-2	3.00	2.57 kg/cm <sup>2</sup>
C-3, P-1, Z-2	3.50	2.20 kg/cm <sup>2</sup>
C-3, P-1, Z-2	4.00	1.93 kg/cm <sup>2</sup>
C-4	2.50	2.77 kg/cm <sup>2</sup>
C-4	3.00	2.31 kg/cm <sup>2</sup>
C-4	3.50	1.98 kg/cm <sup>2</sup>
C-4	4.00	1.73 kg/cm <sup>2</sup>

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, concreto y Pavimentos Inversiones Generales Centauro Ingenieros SAC.

## RESULTADOS DEL CÁLCULO DE ASENTAMIENTO

### CÁLCULO DE ASENTAMIENTO – MÉTODO ELÁSTICO

DESCRIPCIÓN DE CALICATA	PROFUNDIDAD (m)	ANCHO (B)	S (cm) RIGIDA	S (cm) FLEXIBLE CENTRO	S (cm) FLEXIBLE ESQUINA	S (cm) FLEXIBLE MEDIO
C-2, P-4, Z-1	2.5	1.5	0.86	1.17	0.58	0.99
C-2, P-5, Z-4	2.5	1.5	0.64	0.87	0.44	0.74
C-2, P-6, Z-2	2.5	1.5	0.64	0.87	0.44	0.74
C-3, P-1, Z-2	2.5	1.5	0.64	0.87	0.44	0.74

Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, concreto y Pavimentos Inversiones Generales Centauro Ingenieros SAC.

#### 4.1.1.5. Estudios de pruebas destructivas (diamantina)

Norma de Referencia NTP 339.034:2015

### RESULTADOS DE LOS ESTUDIOS REALIZADOS EN LABORATORIOS

Tabla 16 Resultados de los estudios realizados de probetas cilíndricas  
RESULTADOS DE LOS ESTUDIOS REALIZADOS EN LABORATORIOS

Nro	IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS	FECHA DE EXTRACCIÓN	DIÁMETRO (cm)	ALTURA (cm)	ÁREA (cm <sup>2</sup> )	CARGA (kg)	FACTOR DE CORRECCIÓN (Alt./Diam.)	RESIST. A LA COMPRESIÓN (kg/cm <sup>2</sup> )	RESIST. A LA COMPRESIÓN (Mpa)	TIPO DE FRACTURA
1	D-1 COLUMNA C-2 MODULO II	05/04/16	4.30	8.80	14.50	2000	1.00	138	13.5	TIPO 3
2	D-2 COLUMNA C-2 MODULO II	05/04/16	4.30	8.20	14.50	2350	1.00	162	15.9	TIPO 3
3	D-3 MURO DE CONTENCIÓN -1	05/04/16	4.30	9.00	14.50	3000	1.00	207	20.3	TIPO 3
4	D-4 VIGA V-102 MODULO II	05/04/16	4.30	9.10	14.50	3500	1.00	241	23.6	TIPO 3
5	D-5 COLUMNA C-2 MODULO I	05/04/16	4.30	8.80	14.50	2800	1.00	193	18.9	TIPO 3
6	D-6 COLUMNA C-4 MODULO I	05/04/16	4.30	8.80	14.50	2650	1.00	182	17.9	TIPO 3
7	D-7 VIGA MODULO I	05/04/16	4.30	7.30	14.50	2350	0.98	158	15.5	TIPO 3
8	D-8 COLUMNA MODULO I	05/04/16	4.30	9.00	14.50	2100	1.00	145	14.2	TIPO 3
9	D-9 LOSA ALIGERADA MODULO I	05/04/16	4.30	7.80	14.50	4750	1.00	327	32.1	TIPO 3
10	D-10 VIGA DE CIMENTACIÓN MODULO III	05/04/16	4.30	6.30	14.50	2000	0.96	132	12.9	TIPO 3

Fuente: Laboratorio Nro 01 Ensayo de Materiales Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)

#### 4.1.1.6. Estudios De Evaluación De Estructuras

De los resultados de la identificación de muestras de pruebas de Diamantina podemos notar que D-7 VIGA Modulo I, con resultados de los análisis se tiene:  $f'c=158$  kg/cm<sup>2</sup>, carga resistida = 2350 kg. La cual

será parte de nuestra investigación de demostración y además será aplicada con el sistema de reforzamiento con CFRP (Polímeros Reforzados con Fibra de Carbono).

## Estructuración

**Vigas.-** Las vigas se dispondrán de tal manera que una las placas y columnas entre sí y formen pórticos y pórticos mixtos con placas de concreto armado.

Se usarán vigas chatas para soportar los tabiques de ladrillo en la zona de los baños, aulas, ambientes destinados a la parte administrativa.

## Dimensionamiento De Vigas

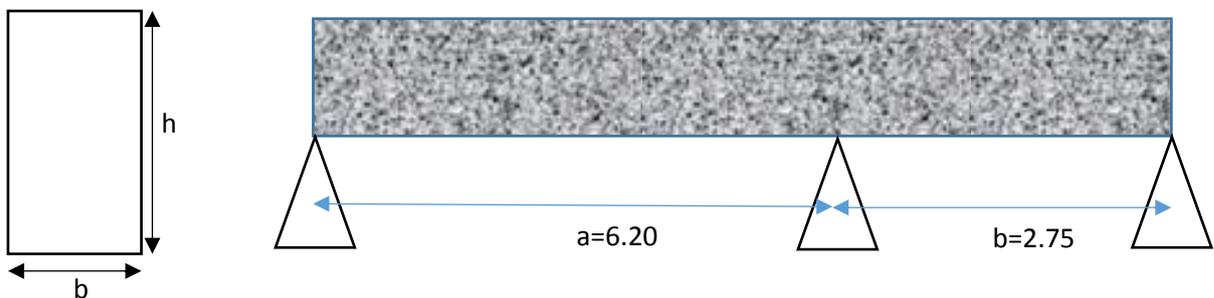
### Condiciones De Diseño Inicial

Las vigas se han dimensionado mediante las fórmulas  $h = L_{uz}/11$  (para cargas verticales) para determinar la altura de la sección transversal y  $b = L/20$  o  $h/2$  para encontrar el ancho de esa misma sección.  $f_c=210$  kg/cm<sup>2</sup>,  $f_y=4200$  kg/cm<sup>2</sup>

Las secciones según los planos son:  $h=60$  cm,  $b=25$ cm,  $L_1=6.20$  m,  $L_2=2.75$

Factores de amplificación 1.5 (D) y 1.8 (L) condición inicial.

*Figura 38 Croquis de viga en análisis*



Para la viga en análisis tenemos luces de: 6.20, 2.75 mts, por lo que consideramos la viga con peralte de 60 cm y 30 cm respectivamente y un ancho de 25 cm.

El Reglamento Nacional de Construcciones en la NTE-060 en su acápite 10.4.1.3, dice que la condición para no verificar deflexiones en una viga es que el peralte debe ser mayor o igual que el dieciseisavo de la luz libre.

→Tramo "a"  $h=0.60 \geq 6.20/16 = 0.3875$  ok (cumple)

→Tramo "b"  $h=0.30 \geq 2.75/16 = 0.1719$  ok (cumple)

### Limites en el Área de acero a flexión.

Verificación que el área de acero esté dentro de los límites reglamentarios. En el grafico siguiente se ven los detalles de la viga y los cortes en todo el tramo de la viga los cuales muestran aceros en diferentes cantidades.

Usaremos las fórmulas:

$$A_{smin} = \frac{0.7\sqrt{f'c}}{f_y} bd, \quad A_{smax} = \frac{0.9f''c}{f_y} \left( \frac{6000\beta_1}{f_y+6000} \right) bd$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd}, \quad \rho_{min} = \frac{0.7\sqrt{f'c}}{f_y}$$

$$f''c = 0.85 * 0.8 * f'c$$

$$B1 = 0.85$$

Donde:

$A_s$ : área de acero

$A_{smin}$ : área de acero mínimo

$A_{smax}$ : área de acero máximo

$f''c$ : Esfuerzo Uniforme

p: cuantía de acero

Calculando el área de acero de las secciones de corte de la viga a flexión para el acero de refuerzo. Además de los resultados obtenidos de los laboratorios y diseño actual tenemos:

$f'_c=158 \text{ kg/cm}^2$ ,  $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$ ,  $b=25 \text{ cm}$ ,  $h_1=60 \text{ cm}$ ,  $h_2=30 \text{ cm}$ ,  $L_1=6.20 \text{ m}$ ,  $L_2=2.75 \text{ m}$

$f''_c = 0.85 \cdot 0.8 \cdot 158 = 107.44 \text{ kg/cm}^2$

Corte 1 – 1

$$As1 = 2 \text{ } \varnothing 5/8'' + 2 \text{ } \varnothing 1/2''$$

$$As1 = 6.5 \text{ cm}^2$$

$$As_{min} = \frac{0.7\sqrt{158}}{4200} \times 25 \times 60 = 3.14 \text{ cm}^2$$

$$As_{max} = \frac{0.9 \cdot 107.44}{4200} * \frac{6000 \cdot 0.85}{4200 + 6000} * 25 * 60 = 17.27 \text{ cm}^2$$

**$As_{min} \leq As1 \leq As_{max}$  (Cumple)**

Corte 2 – 2

$$As2 = 3 \text{ } \varnothing 3/4'' + 2 \text{ } \varnothing 5/8'' + 2 \text{ } \varnothing 1/2''$$

$$As2 = 15.05 \text{ cm}^2$$

$$As_{min} = 3.14 \text{ cm}^2$$

$$As_{max} = 17.27 \text{ cm}^2$$

**$As_{min} \leq As2 \leq As_{max}$  (Cumple)**

Corte 3 – 3

$$As3 = 2 \text{ } \varnothing 5/8'' + 2 \text{ } \varnothing 1/2''$$

$$As3 = 6.5 \text{ cm}^2$$

$$As_{min} = 3.14 \text{ cm}^2$$

$$As_{max} = 17.27 \text{ cm}^2$$

**$As_{min} \leq As3 \leq As_{max}$  (Cumple)**

Corte 4 – 4

$$As4 = 2 \text{ } \varnothing 5/8''$$

$$As4 = 3.96 \text{ cm}^2$$

$$As_{min} = \frac{0.7\sqrt{158}}{4200} \times 25 \times 30 = 1.57 \text{ cm}^2$$

$$As_{max} = \frac{0.9 \times 107.44}{4200} * \frac{6000 \times 0.85}{4200 + 6000} * 25 * 30 = 8.64 \text{ cm}^2$$

$$\mathbf{As_{min} \leq As4 \leq As_{max} \text{ (Cumple)}}$$

Corte 5 – 5

$$As5 = 1 \text{ } \varnothing 3/4'' + 2 \text{ } \varnothing 5/8''$$

$$As5 = 6.81 \text{ cm}^2$$

$$As_{min} = 1.57 \text{ cm}^2$$

$$As_{max} = 8.64 \text{ cm}^2$$

$$\mathbf{As_{min} \leq As5 \leq As_{max} \text{ (Cumple)}}$$

Corte 6 – 6

$$As6 = 2 \text{ } \varnothing 5/8''$$

$$As6 = 3.96 \text{ cm}^2$$

$$As_{min} = 1.57 \text{ cm}^2$$

$$As_{max} = 8.64 \text{ cm}^2$$

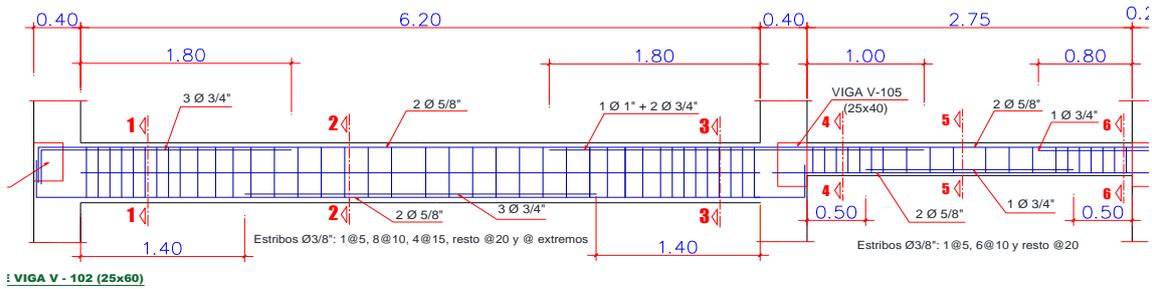
$$\mathbf{As_{min} \leq As6 \leq As_{max} \text{ (Cumple)}}$$

De los resultados obtenidos se puede notar que el área del acero de refuerzo cumple La condición de la normatividad, lo que demuestra que a una resistencia de concreto mínimo de  $f'c = 158 \text{ kg/cm}^2$  aún se desempeña en condiciones, lo cual no es recomendable en estructuras como vigas, dicho resultado son extraído de laboratorio en cual será motivo para el reforzamiento a flexión de la viga. El diseño inicial contemplaba la resistencia del concreto de  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ , por ello se

pretende realizar el reforzamiento con otro tipo de sistemas como es el de polímeros reforzados con fibra de carbono y adherido con epóxicos.

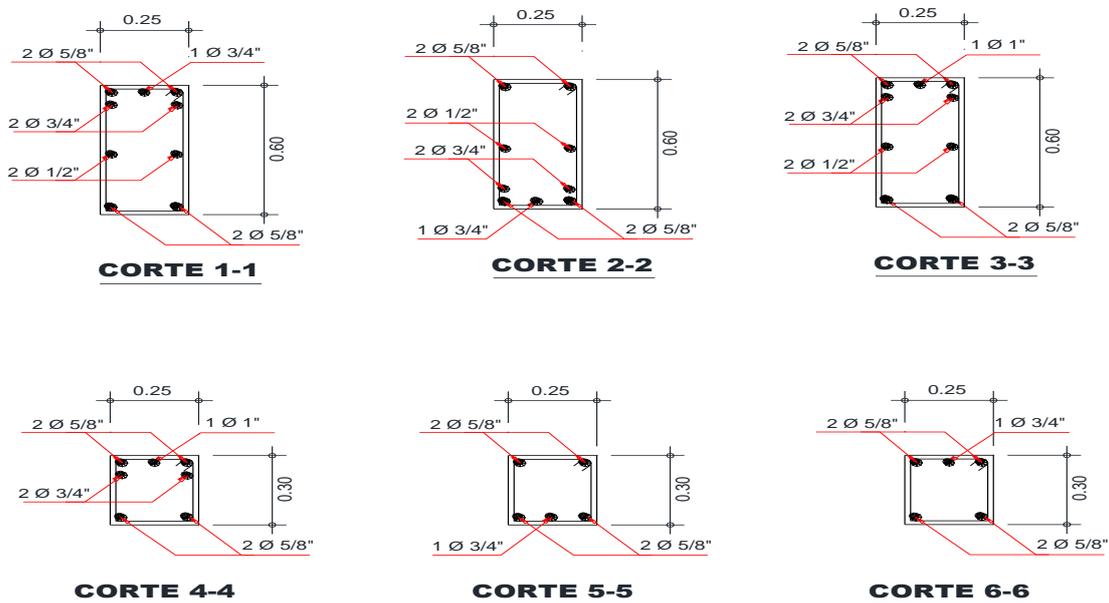
Figura 39 Croquis de viga en análisis

**PLANO DE DETALLE DE VIGA**



**DETALLE DE SECCIÓN DE VIGA**

Figura 40 Detalle de cortes de la viga en análisis



## **CÁLCULO DE METRADO DE CARGAS**

Las cargas unitarias que usaremos son las siguientes:

Densidad del concreto	: 2400 kg/m <sup>3</sup>
Densidad del agua	: 1000 kg/m <sup>3</sup>
Aligerado (h = 20 cm)	: 300 kg/m <sup>2</sup>
Acabados revoques	: 2000 kg/m <sup>3</sup>
Tabiquería fija	: 1350 kg/m <sup>3</sup>

### **Sobrecargas o cargas vivas:**

Oficinas y baños	: 300 kg/m <sup>2</sup>
Aulas	: 250 kg/m <sup>2</sup>
Bibliotecas sala de almacenamiento.	: 750 kg/m <sup>2</sup>
Comedor	: 400 kg/m <sup>2</sup>
Hall y escalera	: 400 kg/m <sup>2</sup>
Azotea	: 100 kgm <sup>2</sup>
Corredores	: 400 kg/m <sup>2</sup>

**(Datos obtenidos del RNC. Norma E.020 Cargas: Anexo 1, Tabla 1)**

## **METRADO DE CARGAS DE VIGAS**

Se realizó el método del área tributaria, que es un método práctico y rápido, también consideraremos la viga con mayor carga contenida el resto de vigas son del mismo tipo y su análisis es similar considerando cargas menores.

Las vigas se encuentran sujetas a las cargas que transmite la losa, así como las cargas que actúan sobre ella como su peso propio, peso de tabiques, etc.

### **Consideraciones:**

Las vigas están diseñadas de la misma manera que la losa aligerada en una dirección, con la diferencia que estas están diseñadas usando el ancho tributario más desfavorable.

La influencia de aligerados, piso terminado y sobre carga se toman con sus distancias a ejes de pórticos, que están establecidos en el plano estructural.

La influencia de tabiques paralelos en las vigas que cargan techo, se ve reflejada en un porcentaje de carga repartida de tabique. Este porcentaje es el cociente de la distancia de la viga vecina al tabique, dividida por la distancia entre las vigas.

La influencia de tabiques perpendiculares a las vigas que cargan techo, se ve reflejada en un porcentaje de carga concentrada de tabique; dicho porcentaje es el cociente de la distancia del centro de gravedad del tabique a la viga vecina entre la distancia entre vigas.

### **Datos Existentes Según los Resultados de los laboratorios**

$f'c=158 \text{ kg/cm}^2$ ,  $b=25 \text{ cm}$ ,  $h_1=60 \text{ cm}$ ,  $h_2=30 \text{ cm}$ ,  $L_1=6.20 \text{ m}$ ,  $L_2=2.75 \text{ m}$

#### **Aligerado:**

$H_{\text{losa}} = 20 \text{ cm}$

$PT = 2000 \text{ kg/m}^3$

#### **Tabique:**

$E = 0.15 \text{ m}$

$H1 = 2.60 \text{ m}$ ,  $H2 = 3.00 \text{ m}$

Figura 41 croquis de la viga en planta

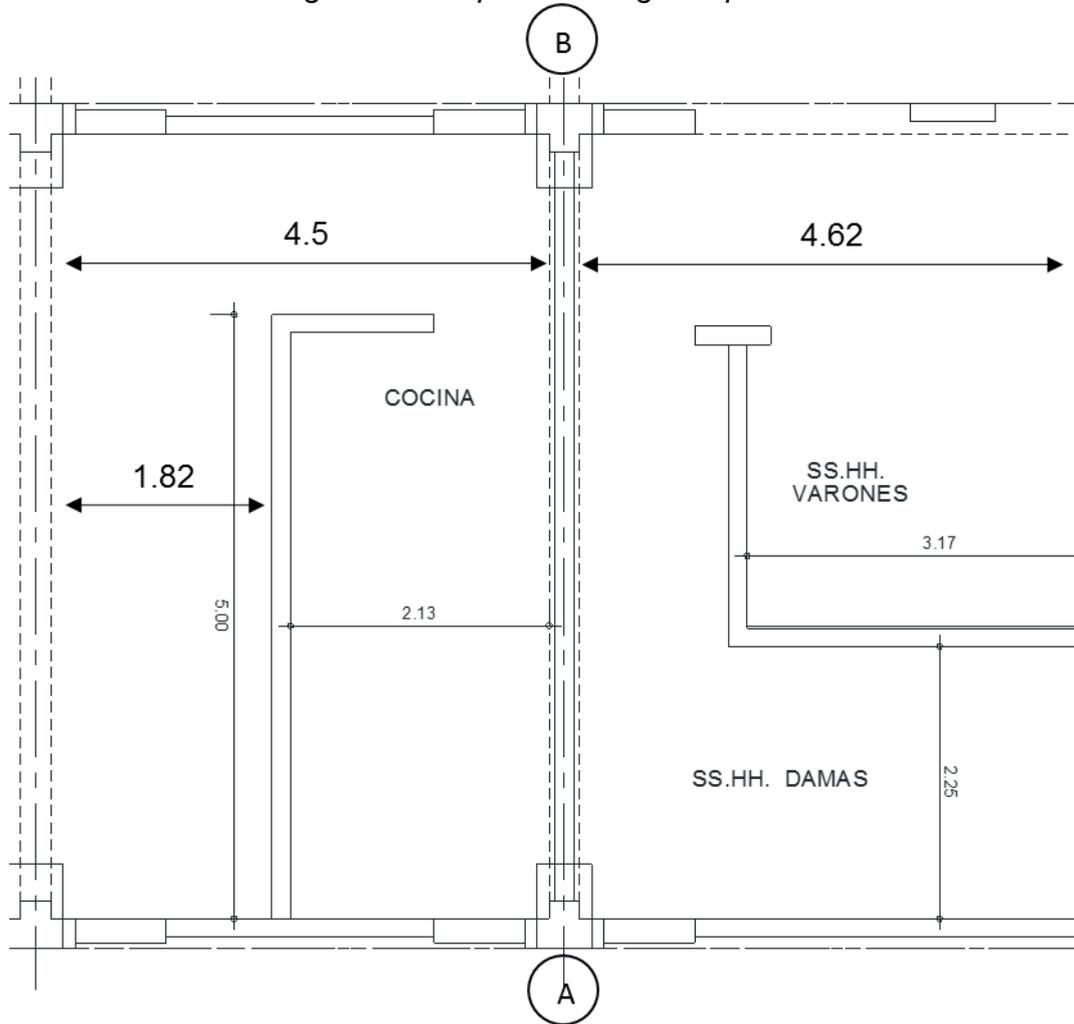
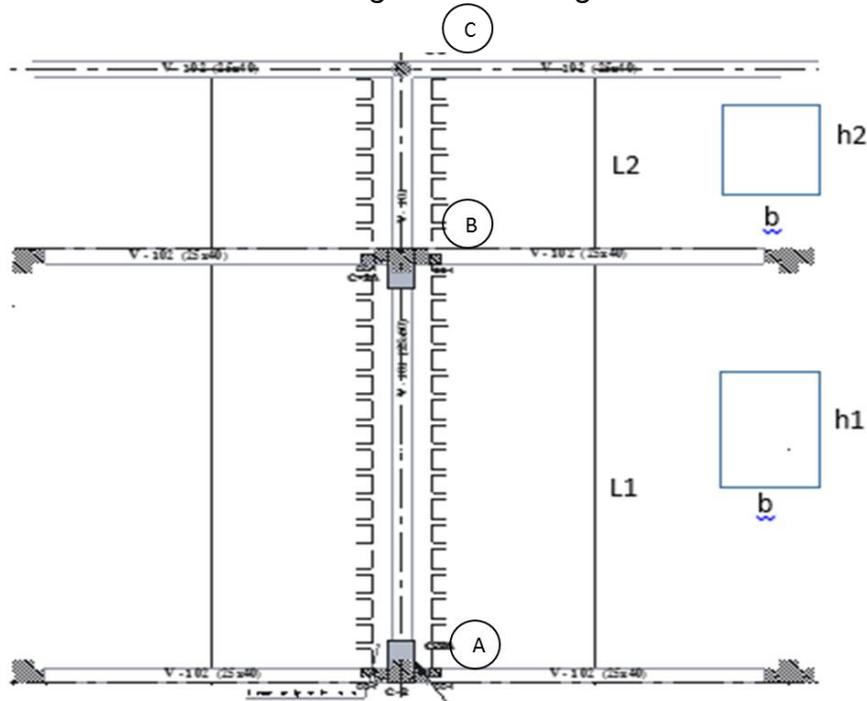


Figura 38 Área Tributaria de la Viga con losa aligerada en usa sola dirección



**Viga Tramo A - B:**

Peso Propio =  $2400 \text{ kg/m}^3 \cdot (0.25 \cdot 0.60) = 360 \text{ kg/m}$

Carga de losa:

Peso propio =  $300 \text{ kg/m}^2 \cdot (4.5/2 + 4.62/2) = 1368 \text{ kg/m}$

Acabados PT =  $2000 \text{ kg/m}^3 \cdot (4.5/2 + 4.62/2 + 0.25) \cdot 0.05 = 481 \text{ kg/m}$

Tabiquería Sobre Viga =  $1350 \text{ kg/m}^3 \cdot (0.15 \cdot 2.60) = 526.5 \text{ kg/m}$

Tabiquerías =  $607.50 \text{ kg/m} \cdot (1.82/4.5) = 245.7 \text{ kg/m}$

Tabiquerías =  $607.50 \text{ kg/m} \cdot (3.17/4.62) = 416.83 \text{ kg/m}$

(Peso tabique x ml =  $0.15 \cdot 3.00 \cdot 1350$ ) =  $607.50 \text{ kg/m}$

$WD_v = 360 + 1368 + 481 + 526.50 + 245.70 + 416.83$

**$WD_v = 3398.03 \text{ kg/m}$**

Sobre Carga: Carga viva

$$\text{Cocina/comedor} = 400 \text{ kg/m}^2 * (4.5/2) = 900 \text{ kg/m}$$

$$\text{SSH} = 300 \text{ kg/m}^2 * (4.62/2) = 693 \text{ kg/m}$$

$$\text{WL}_v = 900 + 693$$

$$\text{WL}_v = 1593 \text{ kg/m}$$

### **Carga Última**

$$\text{WU} = 1.5(\text{WD}) + 1.8(\text{WL})$$

$$\text{WU} = 1.5(3398.03) + 1.8(1593)$$

$$\text{WU} = 7964.45 \text{ kg/m}$$

### **Viga Tramo B - C:**

$$\text{Peso Propio} = 0.25\text{m} * 0.30\text{m} * 2400 \text{ kg/m}^3 = 180 \text{ kg/m}$$

Carga de losa:

$$\text{Peso propio} = 300 \text{ kg/m}^2 * (4.5/2 + 4.62/2) = 1368 \text{ kg/m}$$

$$\text{Acabados} = 2000 \text{ kg/m}^3 * (4.5/2 + 4.62/2 + 0.25) * 0.05 = 481 \text{ kg/m}$$

$$\text{WD}_v = 180 + 1368 + 481$$

$$\text{WD}_v = 2029 \text{ kg/m}$$

Sobre Carga: Carga viva

$$\text{Corredores} = 400 \text{ kg/m}^2 * (4.5/2 + 4.62/2 + 0.25) = 1924 \text{ kg/m}$$

$$\text{WL}_v = 1924 \text{ kg/m}$$

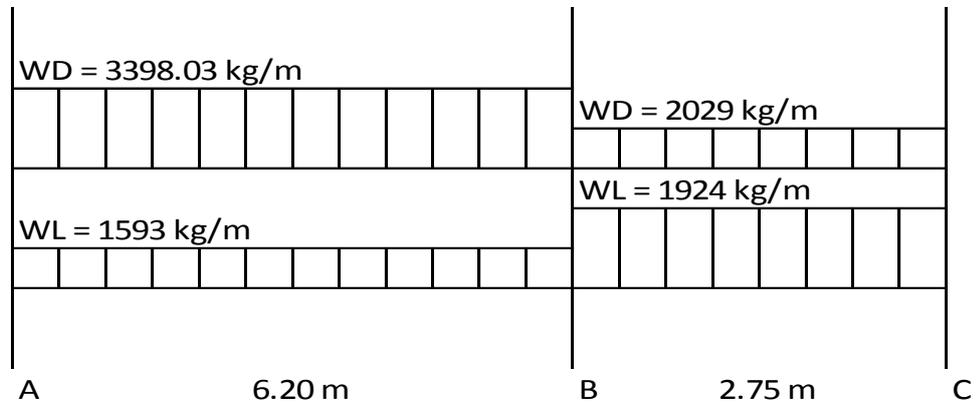
### **Carga Última**

$$\text{WU} = 1.5(\text{WD}) + 1.8(\text{WL})$$

$$\text{WU} = 1.5(2029) + 1.8(1924)$$

$$\text{WU} = 6506.70 \text{ kg/m}$$

Figura 39 Diagrama de Fuerzas actuantes sobre la viga



De forma similar se hacen los cálculos para las demás vigas que se encuentran en los ejes J, K, L y M, como hemos mencionado para este trabajo consideramos la viga con mayor carga soportada, para realizar los análisis de reforzamiento ya que si en esta viga seleccionada soporta mayor cantidad de carga por consiguiente las demás también tendrán la misma condición pero con menor carga.

## CALCULO DE MOMENTOS, CORTANTES Y DEFLECCIONES CON LA AYUDA DE SOFTWARE SAP2000.

Con el programa SAP2000 diseñamos y modelamos la viga con los valores calculados

Las cargas aplicadas en el tramo A – B es de 7.96 Tn/m, y el tramo B –C = 6.5 Tn/m

*Figura 40 Comportamiento de la viga*



Diagrama de Fuerzas cortantes

*Figura 41 Diagrama de Fuerzas cortantes*

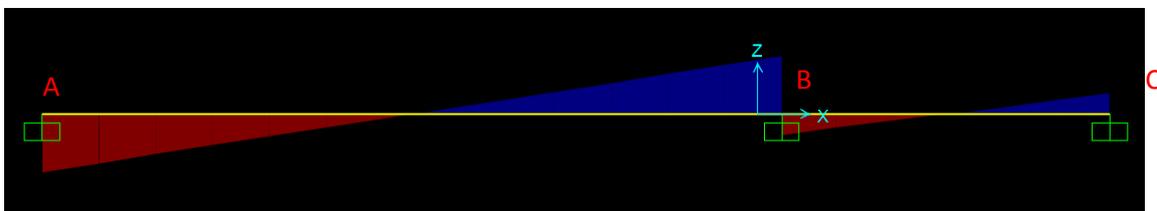
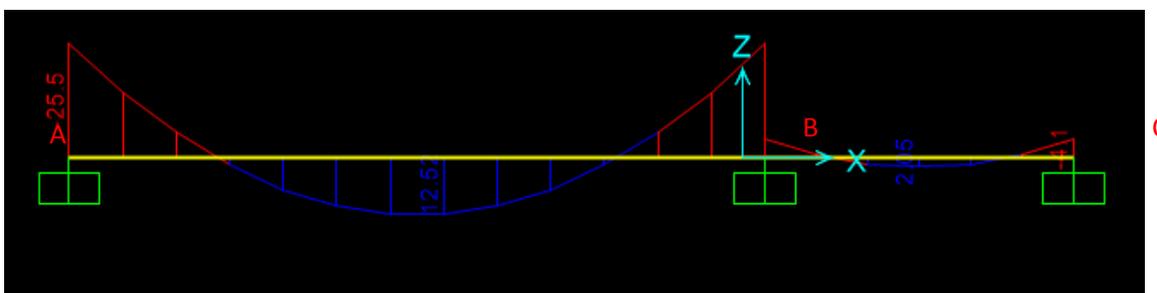


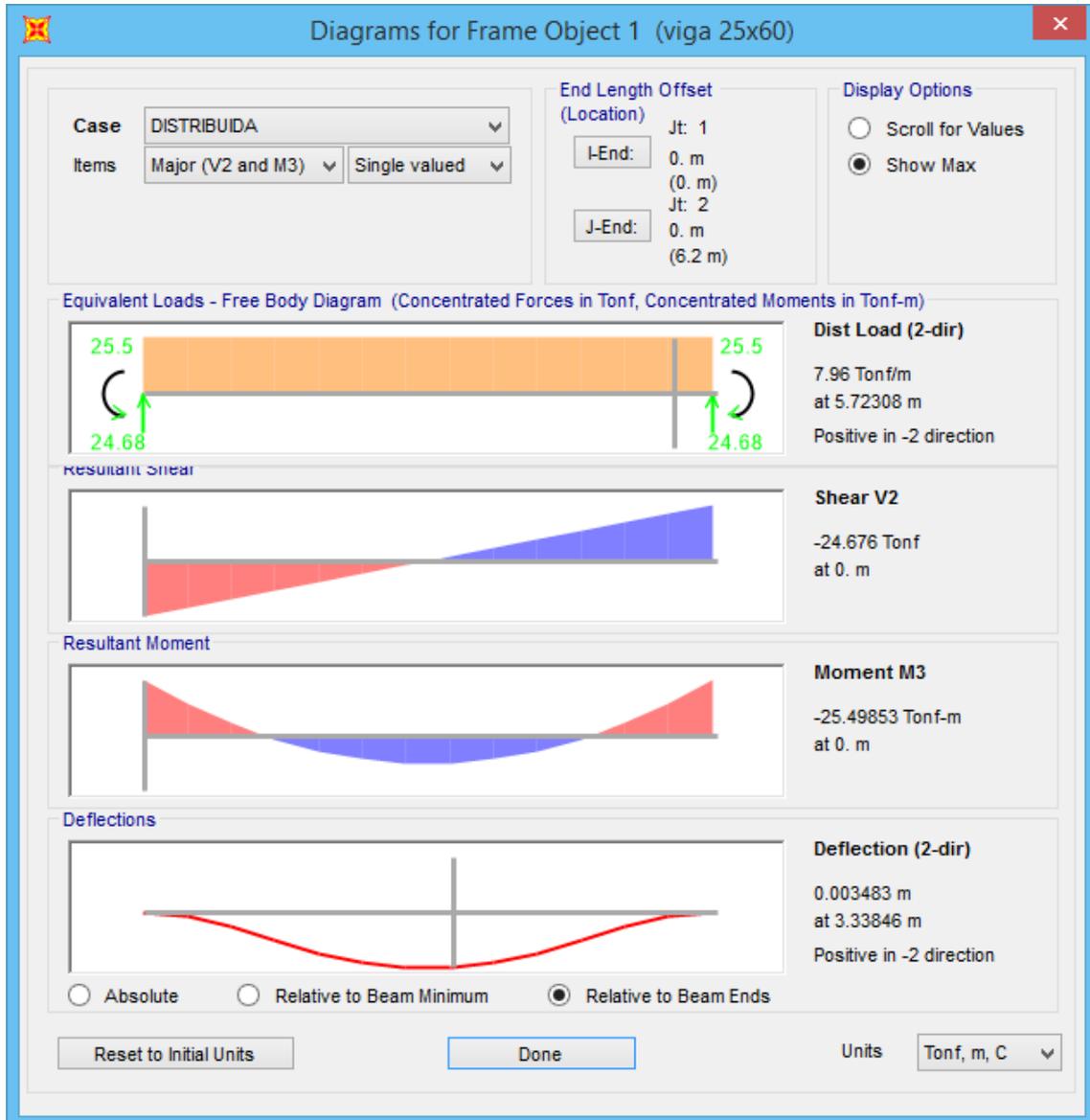
Diagrama de momentos

*Figura 42 Diagrama de momentos actuantes*



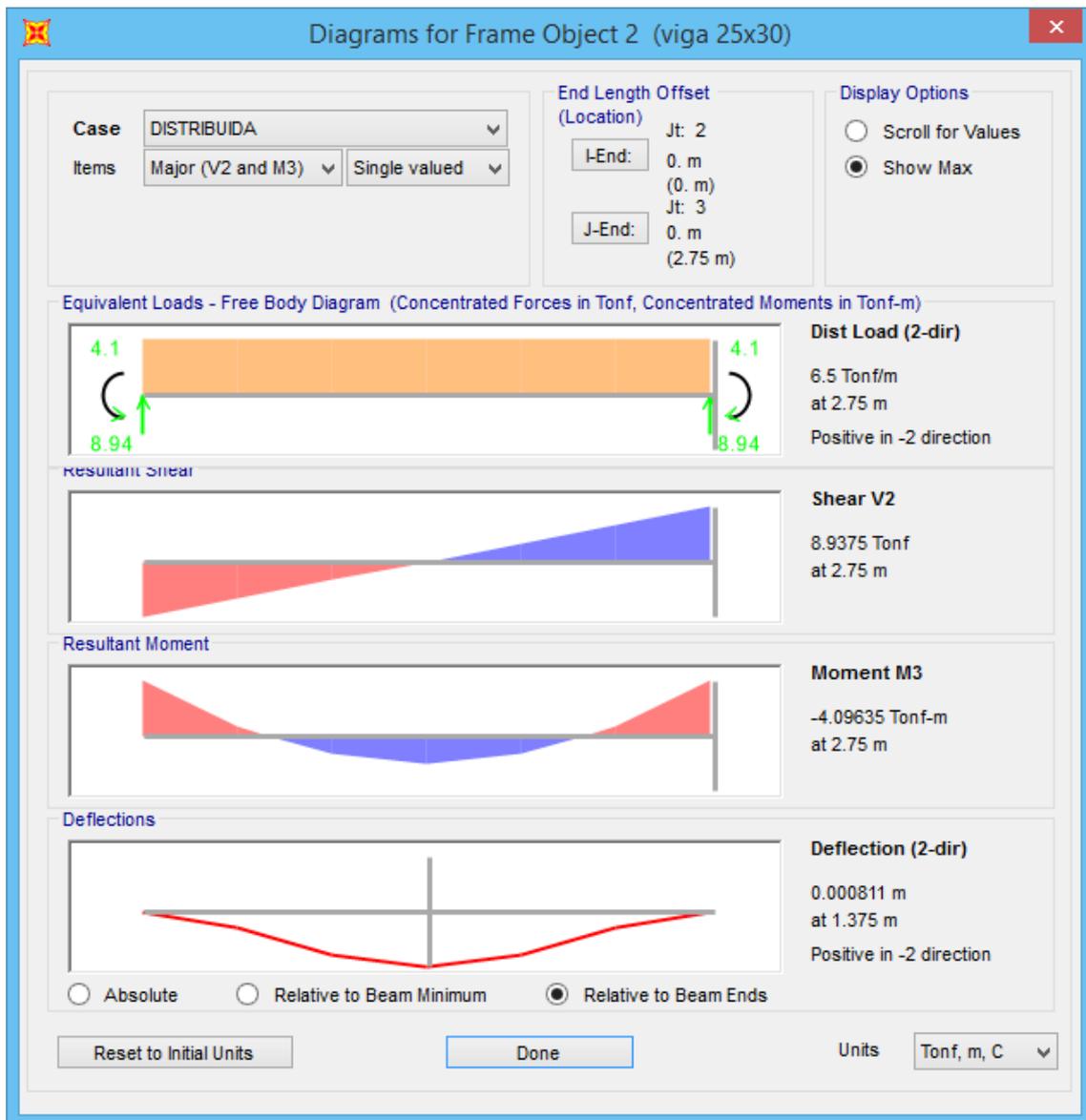
Resultados en la Viga tramo A – B 25x60

Figura 43 Resultados de la viga tramo A - B



Resultados en la Viga tramo B – C 25x30

Figura 44 Resultados de la Viga tramo B-C



## CÁLCULO DE REFORZAMIENTO CON EL USO DEL SIKA CARBODUR V.3.4.

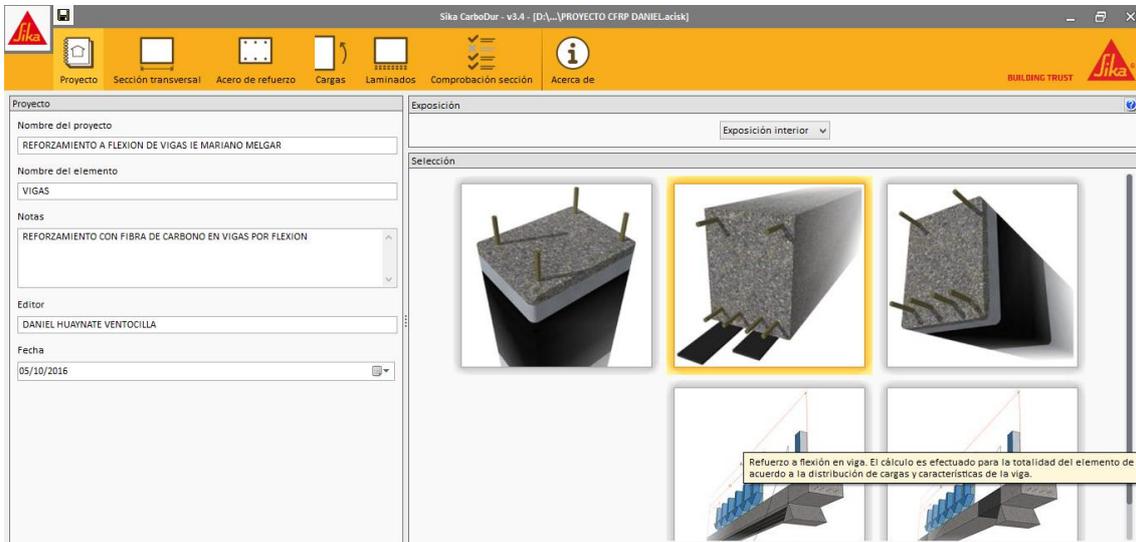
Con los valores obtenidos se insertan dichos valores en el programa de Sika y configuramos los valores para el **Reforzamiento a Flexión** de la viga en la zona crítica.

### Paso 1: ficha Proyectos

Elegimos el modelo de nuestra viga, rectangular y con reforzamiento en la zona crítica, el cual estará en uso expuesto para ambientes en interiores.

Para nuestro diseño elegimos la forma rectangular con reforzamiento en parte inferior, con exposición interna.

Figura 45 Ficha Proyectos

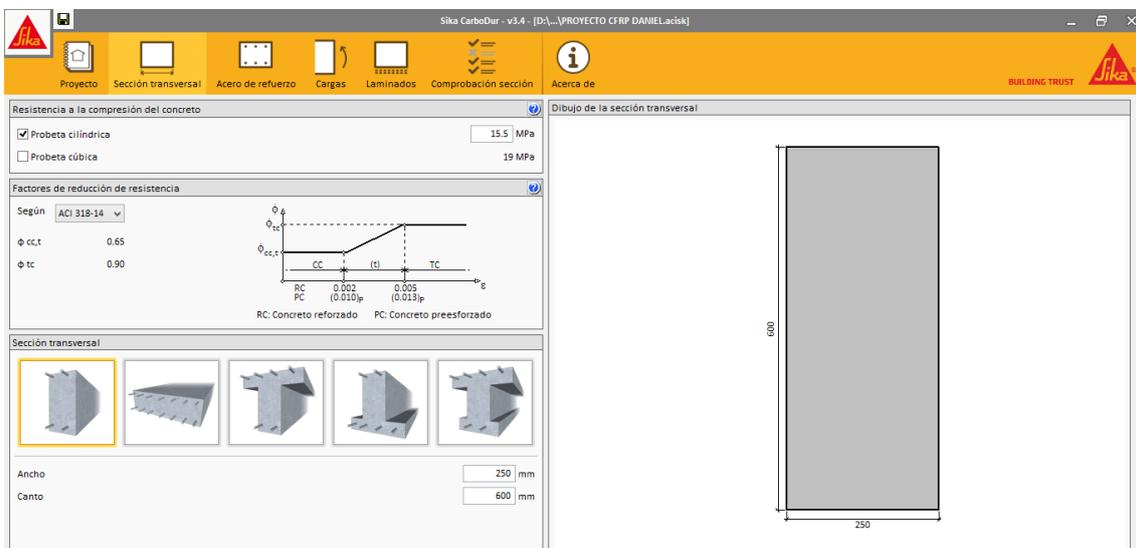


## Paso 2: Ficha Sección Transversal

Se dibuja la sección transversal de la viga y su resistencia a compresión del concreto los cuales fueron obtenidos en los laboratorios después de la prueba destructiva de diamantina.

Tenemos  $F'_c = 158 \text{ kg/cm}^2$  equivalente a 15.5 MPa de los resultados de las pruebas de rotura adquiridas por diamantina, la sección de la viga es  $b=25 \text{ cm}$ ,  $h= 60 \text{ cm}$

Figura 46 Ficha Sección Transversal



### Paso 3: Ficha Acero de Refuerzo

La sección transversal de nuestra viga con el acero de refuerzo superior e inferior.

Tenemos: acero en la parte superior 2 de 5/8" a 4 cm, en el centro 2 de 1/2" a 30 cm, en la parte inferior 2 de 5/8" a 4 cm, 1 de 3/4" a 4 cm, 2 de 3/4" a 8 cm.

Figura 47 Ficha Acero de Refuerzo

The screenshot shows the 'Acero de refuerzo' (Reinforcement) tab in the Sika CarboDur software. It displays three tables for reinforcement details and a cross-section diagram of a beam.

Acero de refuerzo superior						
D1 (mm)	Acero	fy (MPa)	Definida	Num. barras	Diámetro (mm)	Área (mm²)
1. 50	Grade 60	413.69	Por barras	2	15.87	--
2. 300	Grade 60	413.69	Por barras	2	12.7	--

Acero de refuerzo inferior						
D1 (mm)	Acero	fy (MPa)	Definida	Num. barras	Diámetro (mm)	Área (mm²)
1. 50	Grade 60	413.69	Por barras	2	15.87	--
2. 50	Grade 60	413.69	Por barras	1	19.05	--
3. 80	Grade 60	413.69	Por barras	2	19.05	--

Acero preesforzado								
D1 (mm)	Acero	fpu (MPa)	fpy (MPa)	Definida	Num. barras	Diámetro (mm)	Área (mm²)	fse (MPa)

The cross-section diagram shows a rectangular beam with a height of 600 mm and a width of 250 mm. It illustrates the placement of reinforcement bars: two bars at the top, two bars in the center, and three bars at the bottom.

### Paso 4: Ficha Cargas

Las cargas calculadas en el metrado de cargas 33.32 KN-m y los factores de seguridad 1.5(D), 1.8(L), las cargas esperadas y el tipo de estructura isostática. El programa verificará si cumplen con cada condición para seguir adelante de cumplir el programa no continuo calculando.

Figura 48 Ficha de Cargas

The screenshot shows the 'Cargas' (Loads) and 'Resultados' (Results) tabs in the Sika CarboDur software. It displays load calculation parameters, results, and diagrams of a beam under various load conditions.

**Cargas (Loads):**

- Tipo de estructura: Isostática
- Tipo de flexión: Positiva
- Acciones iniciales: 33.32 kN-m
- Cargas previstas:
  - Cargas muertas: 132.32 kN-m
  - Cargas vivas: 45.62 kN-m

**Resultados (Results):**

- Acciones iniciales:  $\phi M_u$  (Sin refuerzo)  $\geq M_u$  (Cargas iniciales); 240.50 kN-m  $\geq$  33.32 kN-m
- Combinación mínima de cargas que debe resistir el elemento sin reforzar (ACI440.2R-08, Sección 9.2):  $\phi M_u$  (Sin refuerzo)  $\geq M_u$  (Límites del refuerzo); 240.50 kN-m  $\geq$  179.77 kN-m
- Las cargas previstas deben exceder la capacidad resistente del elemento sin refuerzo:  $\phi M_u$  (Sin refuerzo)  $< M_u$  (Cargas previstas); 240.50 kN-m  $<$  280.60 kN-m

The diagrams show a beam under different load scenarios: initial loads, minimum load combination, and full service load combination.

## Paso 5: Laminados

En esta parte el programa arroja la cantidad de láminas de fibra a usar en la viga y la cantidad de capas, también nos dará el espesor. Ancho, modulo elástico.

En esta sección el tipo de material a usar para el reforzamiento, el tipo de colocación y el programa calcula la cantidad de platinas de CFRP a usar en nuestra viga a reforzar

El programa de Sika CarboDur muestra los siguientes resultados por cada viga a reforzar.

Tipo de CFRP: S 1012

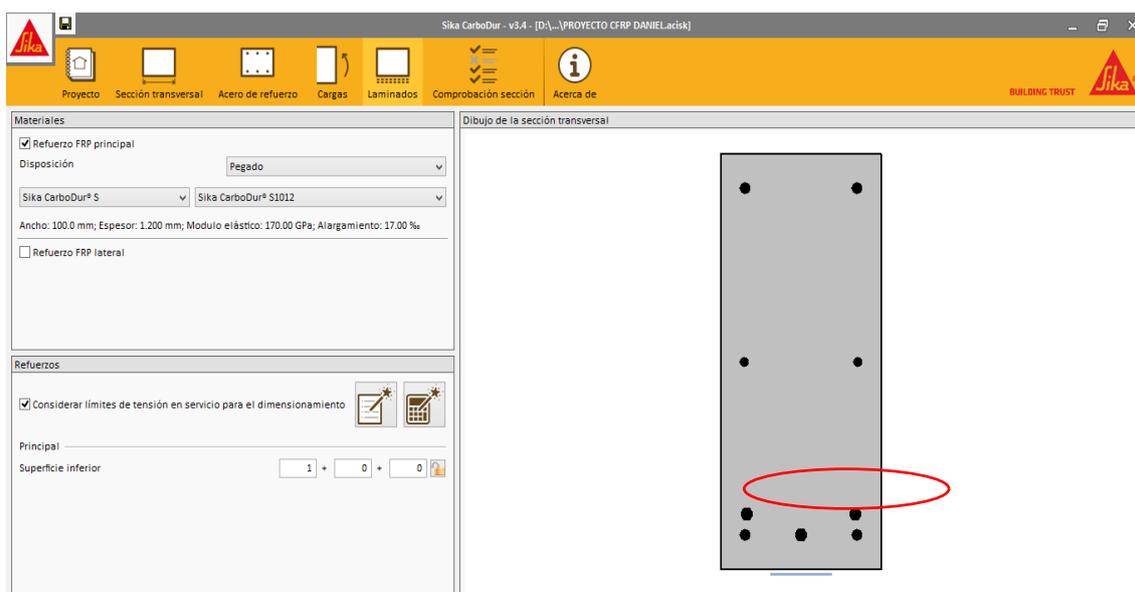
Láminas = 01 und

Ancho = 100 mm

Espesor = 1.2 mm

Largo = 6.2 m

Figura 49 Ficha Laminados



## CONCLUSIONES

- El reforzamiento con el sistema de Polímeros Reforzados con fibra de Carbono, ayuda a incrementar la resistencia de las vigas de concreto armado en la edificación.
- Solo se hizo el reforzamiento en la parte inferior de la viga, pero también se puede realizar en cualquier parte de la viga u otros elementos este sistema puede aplicarse casi a todo tipo de estructuras.
- Su instalación es muy sencilla lo que hace que sea muy económico y de alta durabilidad su uso siempre en cuando se sigan los pasos planteados.
- Por ausencia de un supervisor responsable en la obra, se cometen una serie de errores en la preparación de la mezcla de concreto obteniéndose una mezcla de resistencia inferior a lo que estipula en la normatividad de construcción ocasionando riesgos de vida futuros y mayores gastos económicos.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso de Polímeros Reforzados con Fibra de carbono para el reforzamiento de las estructuras de la edificación donde exista presencia de grietas y fisuras, ya que se desempañara cumpliendo las funciones iniciales y los costos se reducirán considerablemente.
- Con la finalidad de obtener una respuesta dúctil y una mayor resistencia se debe diseñar el refuerzo con CFRP, de modo que la rotura de la lámina ocurra durante la plastificación del acero y antes que el concreto falle por compresión.
- En este trabajo se observó que el  $F'_c$  del concreto en la viga está por debajo de lo que recomienda la Norma E.060, por lo que se recomienda una verificación exhaustiva la calidad de mezcla antes de proceder con su colocación y disposición del concreto fresco.

## FUENTES DE INFORMACIÓN

Rosero, L. (2013), Reforzamiento de estructuras de hormigón armado con FRP (Fiber Reinforced Polymers) aplicación al caso de refuerzo de una losa y columnas de un salón de audiovisuales y un auditorio. Tesis de Ingeniería Civil, extraído de <http://www.construaprende.com/docs/tesis/293-concreto-presforzado?start=6>

Tolosa, L. (2005). Recuperación de estructuras de hormigón en base a CFRP. (Polímeros Reforzados con Fibras de Carbono), Tesis para optar al título de: Ingeniero Constructor. Extraído de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2005/bmfci653r/doc/bmfci653r.pdf>

- REGLAMENTO NACIONAL DE EDIFICACIONES 2006  
Norma E.020, E.050, (E.030, E.060 Actualizado 2016)
- MANUAL ACI 440 (2008)
- MANUAL SOFTWARE Sika CarboDur ACI440 2015 – Colombia (WWW.SIKA.COM)
- COMPORTAMIENTO DE VIGAS DE CONCRETO REFORZADAS CON FIBRAS DE CARBONO EN ENSAYOS A ESCALA NATURAL, William Baca Escobar, Cristian Espinoza Anaya, Erik Baca Escobar.
- REFORZAMIENTO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO CON FRP (FIBER REINFORCED POLYMERS). APLICACIÓN AL CASO DE REFUERZO DE UNA LOSA Y COLUMNAS DE UN SALÓN DE AUDIOVISUALES Y UN AUDITORIO”, Luis Fernando Rosero Landeta, Sangolquí, Ecuador 2013.
- REFUERZO A FLEXION DE VIGAS DE HORMIGON MEDIANTE POLIMEROS REFORZADOS CON FIBRA DE CARBONO, Javier López Molina, Valencia 2012.

- Informe Final: EVALUACIÓN ESTRUCTURAL Y ALTERNATIVA REFORZAMIENTO DEL TEATRO MUNICIPAL DE LIMA, CISMID, 2009 Lima – Perú.
- COMPORTAMIENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORZADAS EXTERNAMENTE CON PLATINAS DE FIBRAS DE CARBONO, Ingº Luis Ricardo Proaño Tataje, Lima – Perú, 2011.
- DESEMPEÑO SÍSMICO DE UNA VIGA REPARADA CON FIBRAS DE CARBONO, José Paúl Yauli Paredes, Ambato – Ecuador, 2014.
- RECUPERACION DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON EN BASE A CFRP. (POLIMEROS REFORZADOS CON FIBRAS DE CARBONO), León Alberto Toloza Salazar, Valdivia – Chile, 2005.
- DEFORMACIONES EN VIGAS, Arq. Veronica Veas B., Arq. Jing Chang Lou, 2000.
- EDIFICIO DE SÓTANO Y 12 PISOS DE OFICINAS, Carlos Hernán Canales Quiñones, Lima – Perú, 2006

## **ANEXOS**

- Manual de Sika Carbodur
- Resultados de Estudios de suelos
- Resultados de Estudios destructivos (diamantina).
- Hoja de metrados de vigas a reforzar de la Estructura.
- Planos de estructuras y arquitectura