



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO DE GRADUACIÓN

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

**“ANÁLISIS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES QUE TRABAJAN A
FLEXIÓN CON FIBRAS DE CARBONO”**

AUTOR: SIXTO GABRIEL VACA URIBE

**TUTOR: ING. M. Sc. JORGE WASHINGTON CEVALLOS
CABRERA**

**AMBATO – ECUADOR
2013**

APROBACIÓN DEL TUTOR

EN CALIDAD DE TUTOR DEL TRABAJO DE INVESTIGACION SOBRE EL TEMA: **“ANÁLISIS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES QUE TRABAJAN A FLEXIÓN CON FIBRAS DE CARBONO”** del estudiante: Sixto Gabriel Vaca Uribe, Egresado de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Carrera de Ingeniería Civil, el mismo que guarda conformidad con las disposiciones reglamentarias emitidas por la Facultad y la Universidad Técnica de Ambato, considero que dicho informe de investigación reúne los requisitos y méritos correspondientes para ser sometida a la evaluación del jurado examinador designado por el H. Consejo de Pregrado.

Es todo en cuanto puedo certificar en honor a la verdad.

Ing. M. Sc. Jorge Washington Cevallos

Tutor

AUTORÍA

El contenido del presente trabajo de investigación, así como las ideas y opiniones son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Yo, Sixto Gabriel Vaca Uribe, con C.I. 180269964-3 y Egresado de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Ambato, certifico por medio de la presente que el trabajo con el tema: **“ANÁLISIS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES QUE TRABAJAN A FLEXIÓN CON FIBRAS DE CARBONO”** es de mi completa autoría y fue realizado en el periodo Abril 2013 - Septiembre 2013.

Sr. Sixto Gabriel Vaca Uribe

C.I. 180269964-3

Autor

DEDICATORIA

*Este trabajo está dedicado
a la memoria de mis padres
Nelly Mariana Uribe Eivar (+)
Sixto Heriberto Vaca Espinoza (+)
a mi hija Victoria Anahí Vaca López
que ha llenado mi vida de alegría
y es el motivo para seguir luchando día a día,
a mi hermosa sobrina Ariana Sthepanie,
a mis hermanos Hernán, Raquel, Carolina y Lizbeth;
quienes han aportado de diferentes maneras
para poder cumplir un logro más
en el trayecto de mi carrera y vida profesional.*

AGRADECIMIENTO

*El Agradecimiento más distinguido y acertado es a **DIOS** que a pesar de las pruebas que ha puesto a lo largo del transcurso de mi vida, me ha dado fortaleza, decisión, y pese a no haber hecho las cosas de la manera que serían de su agrado nunca me ha olvidado dentro de su misericordia y por ello ahora me encuentro alcanzando un logro más en las puertas de lo que se vendrá más adelante.*

*A **MIS PADRES**, Nelly Mariana Uribe Eivar (+)-Sixto Heriberto Vaca Espinoza (+), quienes aportaron con su amor, bondad, paciencia, conocimientos y esa persistencia para seguir adelante frente a la adversidad, por lo mismo les debo ese agradecimiento desde lo más profundo de mi ser. Aptitudes que han permitido la culminación de un logro más en mi vida.*

*A **ADMIX y TECNOCRETO S.A**, Ing. Guillermo Loayza, quien ha aportado con los materiales compuestos y sus conocimientos para la realización del siguiente proyecto de investigación.*

Al Ing. Gonzalo Silva, quien con sus conocimientos ha aportado para el presente proyecto de investigación además de ser el facilitador del equipo para la realización del mismo.

INDICE GENERAL DE CONTENIDOS

A. PÁGINAS PRELIMINARES

Portada.....	I
Aprobación del Tutor.....	II
Autoría del Proyecto de Investigación.....	III
Dedicatoria.....	IV
Agradecimiento.....	V
Índice General de Contenidos.....	VI-X
Índice de Tablas y Gráficos.....	XI-XIV
Resumen Ejecutivo.....	XV

Capítulo I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Tema de Investigación.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	1
1.2.1 Contextualización.....	1
1.2.2 Análisis crítico.....	3
1.2.3 Prognosis.....	4
1.2.4 Formulación del problema.....	4
1.2.5 Preguntas Directrices.....	4
1.2.6 Delimitación del objeto de investigación.....	5
1.3 Justificación.....	6
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 General.....	6
1.4.2 Específicos.....	6

Capítulo II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes investigativos.....	7
2.2 Fundamentación filosófica.....	8
2.3 Fundamentación legal.....	8
2.4 Categorías fundamentales.....	9
2.5 Hipótesis.....	16

2.6 Señalamiento de variables.....	17
2.6.1 Variable Independiente.....	17
2.6.2 Variable Dependiente.....	17

Capítulo III

METODOLOGÍA

3.1.- Modalidad básica de la investigación.....	18
3.2.- Nivel o tipo de investigación.....	18
3.3.- Población y muestra.....	20
3.4.- Operacionalización de variables.....	22
3.5.- Plan de recolección de información.....	24
3.6.- Plan de procesamiento de la información.....	25

Capítulo IV

ANÁLISIS E INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

4.1.- Análisis de los resultados.....	26
4.2.- Interpretación de datos.....	31
4.3.- Verificación de Hipótesis.....	32

Capítulo V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.- Conclusiones.....	33
5.2.- Recomendaciones.....	34

Capítulo VI

PROPUESTA

6.1.- Datos informativos.....	35
6.2.- Antecedentes de la propuesta.....	36
6.3.- Justificación.....	38
6.4.- Objetivos.....	39
6.5.- Análisis de factibilidad.....	39
6.6.- Fundamentación.....	40
6.6.1 Diseño del Hormigón.....	40

6.6.1.1 Funciones de la Pasta en el Hormigón.....	40
6.6.1.2 Factores que modifican la Calidad de la Pasta.....	40
6.6.1.3 Curado del Hormigón.....	41
6.6.1.4 Propiedades Mecánicas del Hormigón.....	42
6.6.1.4.1 Resistencia a la compresión.....	42
6.6.1.4.2 Modulo de Elasticidad.....	42
6.6.1.4.3 Ductilidad.....	43
6.6.1.4.4 Resistencia Tracción.....	44
6.6.1.5 Ensayos.....	44
6.6.2 Acero de Refuerzo	
6.6.2.1 Propiedades Mecánicas del Acero.....	44
6.6.2.1.1 Rango de Comportamiento Elástico.....	44
6.6.2.1.2 Resistencia a la Rotura.....	45
6.6.2.1.3 Esfuerzo de Fluencia.....	45
6.6.2.1.4 Modulo de Elasticidad del Acero.....	45
6.6.3 Hormigón Estructural - Presentación Histórica	
6.6.3.1 Preámbulo.....	46
6.6.3.2 La armadura que da fibra a la piedra.....	46
6.6.3.3 Primeras realizaciones bajo patente.....	47
6.6.4 Diseño Flexión	
6.6.4.1 Primeros Estudios de Comportamiento y Dimensionamiento.....	49
6.6.4.2 Comportamiento a flexión.....	50
6.6.4.3 Hipótesis de Diseño a Flexión.....	50
6.6.4.4 Ensayo.....	53
6.6.5 Reforzamiento de Elementos Estructurales	
6.6.5.1 Presentación histórica de los trabajos de investigación.....	54
6.6.6 Caracterización de los Materiales Compuestos.....	55
6.6.6.1 Concepto de Materiales compuestos.....	56
6.6.6.2 Matrices Orgánicas.....	60
6.6.6.3 Descripción de las Fibras.....	61
6.6.7 Fibras de Carbono.....	62
6.6.7.1 Proceso de la obtención de las Fibras de Carbono.....	63
6.6.7.2 Orientación de las fibras de Carbono.....	64
6.6.7.3 Clasificación de hilados comerciales destinado al refuerzo de materiales.....	65
6.6.7.4 Propiedades Físicas.....	71

6.6.7.4.1 Estabilidad Térmica.....	71
6.6.7.4.2 Resistencia a la Compresión.....	72
6.6.7.4.3 Flexibilidad y Rotura de la Fibra.....	72
6.6.7.5 Criterios para la selección de fibras de refuerzo.....	73
6.6.7.6 Propiedades de la Fibra para el ensayo - CARBOWRAP 300 CFRP.....	73
6.6.8 Descripción de las Resinas.....	75
6.6.8.1 Conceptos.....	75
6.6.8.2 Naturaleza.....	76
6.6.8.3 Propiedades.....	77
6.6.8.4 Requisitos.....	78
6.6.8.5 Sistema Epóxico para el Ensayo.....	78
6.6.9 Tratamiento de la Superficie de Hormigón para el Reforzamiento.....	80
6.6.10 Preparación de la Superficie de Refuerzo.....	84
6.7.- Metodología	
6.7.1 Fabricación de las Vigas.....	89
6.7.1.1 Antecedentes.....	90
6.7.1.2 Planteamiento y Metodología	
6.7.1.2.1 Vigas de Hormigón Simple.....	91
6.7.1.2.2 Vigas de Hormigón Simple Reforzadas con Fibra de Carbono.....	92
6.7.1.2.3 Vigas de Hormigón Simple + Acero de Refuerzo a Flexión.....	93
6.7.1.2.4 Vigas de Hormigón Simple + Acero de Refuerzo a Flexión Reforzadas con Fibra de Carbono.....	99
6.7.1.2.5 Vigas de Hormigón Simple + Acero de Refuerzo a Flexión, Compresión y Corte.....	124
6.7.1.2.6 Vigas de Hormigón Simple + Acero de Refuerzo a Flexión, Compresión y Corte Reforzadas con Fibra de Carbono.....	125
6.7.1.2.7 Tipos de Falla Asociadas a un Reforzamiento con Fibras FRP.....	130
6.7.3 Análisis de los Resultados	
6.7.3.1 Determinación del Esfuerzo a Compresión en Probetas cilíndricas de Hormigón obtenidas en la fabricación de las vigas. Norma ASTM C31-84.....	132
6.7.3.2 Resistencia a Flexión en Vigas de Hormigón con Carga en el Punto Medio. Norma ASTM C293-79.....	134
6.7.3.3 Vigas de Hormigón Simple . Vigas de Hormigón Simple Reforzadas con Fibra de Carbono.....	135

6.7.3.4 Vigas de Hormigón Simple + Acero de Refuerzo a Flexión - Vigas de Hormigón Simple + Acero de Refuerzo a Flexión Reforzadas con Fibra de Carbono.....	138
6.7.3.5 Vigas de Hormigón Simple + Acero de Refuerzo a Flexión, Compresión y Corte - Vigas de Hormigón Simple + Acero de Refuerzo a Flexión Reforzadas con Fibra de Carbono.....	141
6.7.4 Interpretación de los Resultados.....	144
6.7.5 Conclusiones.....	150
6.7.6 Recomendaciones.....	150
6.8 Administración.....	151
6.9 Previsión de la evaluación.....	151

C. MATERIALES DE REFERENCIA

Bibliografía	152
Anexo 1 - Proceso de la Metodología	153
Anexo 2 – Encuesta	158

INDICE DE GRAFICOS Y TABLAS

INDICE DE GRAFICOS

I.1.- Supra ordenación de las Variables Independiente y Dependiente.	9
IV.2.- Resultados Encuesta Pregunta No. 1	26
IV.3.- Resultados Encuesta Pregunta No. 2	27
IV.4.- Resultados Encuesta Pregunta No. 3	28
IV.5.- Resultados Encuesta Pregunta No. 4	28
IV.6.- Resultados Encuesta Pregunta No. 5	29
IV.7.- Resultados Encuesta Pregunta No. 6	30
VI.8.- Grafico Esfuerzo vs. Deformación para determinar el módulo de elasticidad del hormigón.	43
VI.9.- Hormigón material frágil.	43
VI.10.- Diagrama de esfuerzo - deformación del acero.	45
VI.11.- Comportamiento a Flexión de una viga.	50
VI.12.- Diagrama de Hipótesis de diseño a Flexión.	52
VI.13.- Materiales Compuestos en función del tipo de refuerzo.	58
VI.14.- Ordenamiento hexagonal de la red de átomos de carbono.	62
VI.15.- Diversas Formas de presentación de los hilos CFRP.	66
VI.16.- Cintas - Tapes CFRP.	67
VI.17.- Chopped Strand CFRP.	67
VI.18.- Fieltros CFRP.	68
VI.19.- Tipo de tejidos CFRP.	68
VI.20.- Muestras de tipos de tejido CFRP.	70
VI.21.- Rollos de Pre-Preg en diversos formatos CFRP.	70
VI.22.- Curvas de Tensión Deformación de fibras. Flechas verticales indican rotura completa.	72
VI.23.- Limpieza del Hormigón.	81
VI.24.- Imprimación y protección de las armaduras.	81
VI.25.- Preparación del soporte.	84
VI.26.- Imprimación primaria del soporte.	85
VI.27.- Emparejamiento de la Superficie.	85
VI.28.- Capa de Resina saturante.	86
VI.29.- Preparación del laminado.	86
VI.30.- Saturación de la fibra seca.	86
VI.31.- Colocación del laminado de Fibra CFRP.	87
VI.32.- Extracción aire contenido.	87
VI.33.- Encapsulado de la fibra con resina.	88
VI.34.- Limpieza.	88

VI.35.- Capa Protectora.	88
VI.36.- Esquema final del reforzamiento CFRP.	89
VI.37.- Esquema del aparato para determinar la resistencia a flexión del concreto mediante la aplicación de carga en el centro de la luz.	91- 134
VI.38.- Esquema viga de hormigón simple.	92
VI.39.- Viga de hormigón simple + Reforzamiento CFRP.	93
VI.40.- Viga de hormigón simple + Acero de refuerzo a Flexión.	94
VI.41.- Esquema de diseño de la viga de hormigón simple + Acero de refuerzo a Flexión.	95
VI.42.- Esquema de diseño viga de hormigón simple + acero de refuerzo a flexión	97
VI.43.- Diagrama de Corte y Momento.	97
VI.44.- Momento de Fisuración.	99
VI.45.- Viga de hormigón simple + Acero de refuerzo a Flexión + Refuerzo con Fibras de Carbono.	100
VI.46.- Situación inicial antes del reforzamiento.	101
VI.47.- Situación Final después del Reforzamiento.	102
VI.48.- Coeficiente del fuego (efecto elevadas temperaturas)	104
VI.49.- Limite elástico del acero (efecto elevadas temperaturas)	105
VI.50.- Coeficiente reductor de ambiente	106
VI.51.- Sección fisurada transformada de una viga con armadura de tracción.	109
VI.52.- Inercia de una viga fisurada sin armadura de compresión y con armadura de compresión.	110
VI.53.- Momento de fisuración de la nueva sección fisurada.	123
VI.54.- Viga de hormigón simple + Acero de refuerzo a Flexión + Acero de refuerzo a compresión.	124
VI.55.- Esquema de la viga de hormigón simple + Acero de refuerzo a Flexión + Acero de refuerzo a compresión.	124
VI.56.- Situación inicial antes del reforzamiento a Corte.	125
VI.57.- Situación final después del reforzamiento a Corte.	130
VI.58.- Modos de fallo a flexión y cortante.	131
VI.59.- Evolución Resistencia Hormigón vs. Resistencia Hormigón Muestras.	133
VI.60.- Incremento de la capacidad de Carga con fibras CFRP - Cargas máximas y Módulos de Rotura Promedio.	137
VI.61.- Incremento de la capacidad de Carga con fibras CFRP - Cargas máximas y Módulos de Rotura Promedio.	140
VI.62.- Incremento de la capacidad de Carga con fibras CFRP - Cargas máximas y Módulos de Rotura Promedio.	143
VI.63.- Ensayo Viga de hormigón simple.	144
VI.64.- Falla viga hormigón simple.	144
VI.65.- Ensayo viga de hormigón simple con reforzamiento de fibra de carbono.	145

VI.66.- Falla viga de hormigón simple con reforzamiento de fibra de carbono.	145
VI.67.- Ensayo viga de hormigón simple más acero de refuerzo a flexión	146
VI.68.- Falla viga de hormigón simple más acero de refuerzo a flexión.	146
VI.69.- Ensayo viga de hormigón simple más acero de refuerzo a flexión con reforzamiento de fibra de carbono.	147
VI.70.- Falla viga de hormigón simple más acero de refuerzo a flexión con reforzamiento de fibra de carbono.	147
VI.71.- Ensayo viga de hormigón simple más acero de refuerzo a flexión, compresión y corte.	148
VI.72.- Falla viga de hormigón simple más acero de refuerzo a flexión, compresión y corte.	148
VI.73.- Ensayo viga de hormigón simple más acero de refuerzo a flexión, compresión y corte con reforzamiento de fibra de carbono.	149
VI.74.- Falla viga de hormigón simple más acero de refuerzo a flexión, compresión y corte con reforzamiento de fibra de carbono.	149

INDICE DE TABLAS

I.1.- Operacionalización de variable Independiente.	22
III.2.- Operacionalización de variable Dependiente.	23
III.3.- Plan de recolección de la información.	24
III.4.- Técnicas e Instrumentos.	24
IV.5.- Resultados Encuesta Pregunta No. 1	26
IV.6.- Resultados Encuesta Pregunta No. 2	27
IV.7.- Resultados Encuesta Pregunta No. 3	27
IV.8.- Resultados Encuesta Pregunta No. 4	28
IV.9.- Resultados Encuesta Pregunta No. 5	29
IV.10.- Resultados Encuesta Pregunta No. 6	29
IV.11.- Encuesta	30
VI.12.- Composición del Hormigón.	40
VI.13.- Norma ASTM para ensayos a Compresión muestras de hormigón	44
VI.14.- Norma ASTM para ensayos a Flexión en vigas.	53
VI.15.- Materias primas de los materiales compuestos.	57
VI.16.- Propiedades Físicas de la Fibra de Carbono.	71
VI.17.- Propiedades de la lamina	74
VI.18.- Propiedades de la Fibra en seco	74
VI.19.- Comparación de las propiedades de las resinas según su naturaleza.	77
VI.20.- Propiedades genéricas de las resinas epoxi	77
VI.21.- Propiedades sistema epóxico Epofix 300	80
VI.22.- Resumen de Cargas y Momentos Mayorados	100
VI.23.- Resultados Ensayo de Compresión - Muestras de Hormigón	132

VI.24.- Evolución hormigón Portland Normal	132
VI.25.- Evolución hormigón muestras	133
VI.26.- Modulo de Rotura de vigas de hormigón simple vs. Vigas de hormigón simple con reforzamiento de fibra de carbono	136
VI.27.- Modulo de Rotura vigas de hormigón simple + acero de refuerzo a flexión vs. Vigas de hormigón simple + acero de refuerzo a flexión con reforzamiento de fibra de carbono	139
VI.28.- Modulo de Rotura vigas de hormigón simple + acero de refuerzo a flexión, compresión y corte vs. Vigas de hormigón simple + acero de refuerzo a flexión, compresión y corte con reforzamiento de fibra de carbono	142

RESUMEN EJECUTIVO

El enfoque de esta investigación es básicamente experimental. Por ello se hace necesario indagar acerca de los materiales que intervienen para el presente estudio.

El reforzamiento de Elementos Estructurales con fibras CFRP implica un análisis del elemento a ser intervenido en la reparación, así como el proceso de aplicación que debe cumplir los parámetros establecidos por el código ACI 440-2R.

Para cumplir con el objetivo del presente estudio se evaluaron los siguientes aspectos: Se conoce el diseño del hormigón para evaluar las propiedades que presenta y determinar su resistencia a la compresión, posteriormente es necesario determinar la cuantía de acero y la armadura con la que se encuentra configurado el elemento sometido a estudio.

Se contempla la Evolución del hormigón como material estructural, además del diseño de elementos estructurales sometidos a flexión para hacer una revisión del reforzamiento de dichos elementos estructurales.

Se revisa la caracterización de los materiales compuestos en los cuales intervienen la Fibra de Carbono inmersas las propiedades del material, el análisis de la descripción de las resinas para su aplicación. Esto nos permitirá realizar la selección de los materiales que intervendrán en la investigación.

Una vez realizada este enfoque se procede con la fabricación y reforzamiento de vigas sometidas a ensayos de flexión con carga en el centro de la luz.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1.- TEMA

Análisis de elementos estructurales que trabajan a flexión con fibras de carbono.

1.2.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1.- CONTEXTUALIZACIÓN

En los últimos años la reparación, rehabilitación y mejora de las estructuras existentes han estado entre los más importantes retos de la ingeniería civil. Las razones fundamentales para el refuerzo de las estructuras abarcan las siguientes: mejorar la resistencia para soportar cargas subestimadas o imprevistas como impactos o intensos terremotos; aumentar la capacidad resistente para permitir mayores cargas; eliminar fallos prematuros debido a un inadecuado diseño o construcción; devolver la capacidad de carga perdida debido a la corrosión u otros tipos de degradación causados por el envejecimiento; etc. Todo esto unido a la construcción en lugares inaccesibles, requiere soluciones innovadoras.

Tradicionalmente, el refuerzo y mejora de estructuras de acero ha sido relativamente fácil. Gracias al uso de uniones soldadas o mecánicas, podemos añadir acero para incrementar la capacidad de carga de los elementos. Esto no es tan fácil de realizar con el hormigón. Hasta hace treinta años no existía un método seguro y económico para mejorar los elementos de hormigón armado excepto la demolición y el

reemplazamiento. La aparición de resinas de alta resistencia y otros adhesivos para estructuras cambio esta situación.

Desde 1967 ha sido posible incrementar la resistencia a flexión y a cortante de estructuras existentes de hormigón armado, por medio de platabandas de acero adheridas externamente. El principal inconveniente es la corrosión del acero, que puede llegar a destruir la unión entre el acero y el hormigón.

Gracias a investigaciones y desarrollos realizados en el Centro Federal de Investigaciones y Ensayos de Materiales (EMPA) en Dubendorf (Suiza), y otros centros de investigación, hoy día es posible reemplazar el acero (material pesado) por materiales compuestos livianos a base de fibras sintéticas, que han sido usados con éxito en la industria aeroespacial durante muchas décadas. Estos compuestos están formados por delgadas fibras, unidas entre sí con una matriz de resina u otros materiales termorrígidos. La resina actúa solamente como agente de unión. Las fibras pueden ser de distintos materiales entre las que podemos mencionar: fibras de vidrio (GFRP), fibras de aramida (AFRP) y fibras de carbono (CFRP). Estas últimas son las que poseen las mejores características mecánicas (resistencia a la tracción y alto módulo de elasticidad) y químicas.

El ingreso de esta metodología en España ocurrió hace pocos años. Inicialmente, en Suiza se investigó, se desarrolló y se aplicó este sistema en una gran cantidad de obras (puentes, edificios y estacionamientos) y, posteriormente, se introdujo en el resto de Europa; asimismo en EE.UU., Japón y Canadá se trabaja desde hace años con este tipo de productos. A nivel Sudamericano, Colombia lidera el campo de las innovaciones en los refuerzos de estructuras con numerosos trabajos con CFRP.

En el Ecuador la aplicación de fibras como elementos de reforzamiento estructurales tiene pocos años periodo en el cual ya se han realizado trabajos importantes,

permitiéndonos avanzar en la mitigación de nuevos métodos de reforzamiento estructural.

Esa investigación permitirá un aporte novedoso y de gran importancia para trabajos posteriores de los estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Ambato que les interese como método de reforzamiento estructural.

1.2.2.- ANÁLISIS CRÍTICO

La reparación y refuerzo de estructuras de hormigón armado mediante materiales compuestos, en especial mediante polímeros reforzados con fibras de carbono (CFRP), se presenta como una alternativa interesante frente a los sistemas tradicionales de intervención, debido fundamentalmente a las grandes prestaciones mecánicas de estos nuevos materiales (mayores relaciones resistencia/peso y rigidez/peso), a su buen comportamiento frente a la corrosión y a su facilidad y rapidez de puesta en obra, además de no ser necesaria mano de obra especializada.

Todo esto redundará en una economía general en el transporte, en el montaje, en el mantenimiento de la estructura, etc., que podría no ser visualizada por el alto costo inicial de las platabandas de CFRP (Carbon Fiber Reinforcement Polymer). Ahora bien, aunque son numerosas las investigaciones que han abordado el estudio de este tipo de refuerzos, no existe todavía un modelo establecido de dimensionamiento.

Este método de refuerzo es una herramienta más al alcance del ingeniero para llegar a la solución técnico-económica que más se adecue a las patologías evidenciadas en cada caso particular a resolver.

1.2.3.- PROGNOSIS

En caso de no realizar correcciones preventivas en elementos estructurales sometidos a flexión podría presentar fisuras en la fibra sometida a tensión y corte de acuerdo a la dirección de la carga; que se presenta de manera súbita afectando de manera integral a la estructura, por lo que lo primero que se espera en el cálculo y diseño es que falle por flexión.

Siendo necesaria la corrección preventiva de elementos que deberían ser restablecidos mediante este método de reforzamiento estructural para incrementar su capacidad de carga y resistencia, asegurando así una mejora en el elemento estructural, que está prestando un servicio para el correcto funcionamiento de la estructura en la cual está conformándose como un elemento más en su configuración.

De dicha forma se prevé el colapso parcial o total de una estructura con una correcta reparación empleando un nuevo método con el empleo de fibras de carbono, el cual influirá en el producto final de la reparación y por consiguiente el funcionamiento del elemento integrado en la estructura a la cual pertenezca.

1.2.4.- FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Es aplicable el uso de fibras de carbono para elementos estructurales que trabajen a flexión?

1.2.5.- PREGUNTAS DIRECTRICES

- ¿Se presenta este método de manera confiable en el reforzamiento de elementos estructurales sometidos a flexión?
- ¿Existen pasos para una correcta aplicación de este método en la reparación de elementos estructurales con fibras de carbono?

- ¿En qué porcentaje incrementara la capacidad de carga la aplicación de fibras de carbono?
- ¿Cómo influenciara la aplicación de nuevos métodos de rehabilitación estructural en el campo ingenieril de nuestro país?
- ¿Qué inconvenientes presentara la aplicación de la fibra con el hormigón?
- ¿Cuál es el costo de aplicación de fibras de Carbono?

1.2.6 DELIMITACIÓN DEL OBJETO DE INVESTIGACION

1.2.6.1.- DELIMITACIÓN ESPACIAL

La investigación se llevara a cabo en el cantón Quito, provincia de Pichincha en las instalaciones de Admix ubicada en la Tadeo Benítez Oe 1-639 y Juan de Selis. Los ensayos se realizaran en la Universidad Católica de Quito.

1.2.6.2.- DELIMITACIÓN TEMPORAL

La investigación propuesta se la llevara a cabo entre el mes de Marzo del 2013 hasta Noviembre del 2013.

1.2.6.3.- DELIMITACIÓN DE CONTENIDO

Esta área se ve involucrado directamente especialidades o conocimientos en:

Ingeniería Civil.

-Estructuras

-Diseño de Hormigones

- Ensayo de Materiales

- Análisis de elementos estructurales que trabajan a flexión con fibras de carbono

- Reparación de Estructuras

1.3.- JUSTIFICACIÓN

El objeto de estudio es lograr entender el comportamiento de vigas reforzadas con láminas en fibras de carbono, ya que es un método de reforzamiento actualmente utilizado en estructuras que ya han cumplido su servicio, y así lograr entender un criterio patrón para reforzamiento con nuevos materiales en el campo de la construcción.

Se desea experimentar y enfocar en el tema de refuerzo, y tomar como punto de partida teorías para el diseño a flexión, corte y propiedades mecánicas de materiales compuestos con fibras de carbono.

1.4.- OBJETIVOS

1.4.1.- GENERAL

Determinar el comportamiento de elementos estructurales que trabajen a flexión (vigas), reforzadas con fibras de carbono.

1.4.2.- ESPECÍFICOS

- Diseñar una serie de vigas que fallen a flexión, corte para reforzarlas con fibras de carbono.
- Verificar la capacidad de carga de las vigas antes y después de la colocación de las fibras de carbono.
- Verificar que se cumplan las condiciones para este método de reforzamiento.
- Realizar un análisis en elementos en estado fisurado y no fisurado cuando se instalan fibras de carbono.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.- ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Como antecedente investigativo se tiene los trabajos realizados por parte de la empresa TECNOCRETO que es una empresa pionera en la reparación de estructuras con la utilización de fibras de Sintéticas como fibras de carbono CFRP (Carbon Fiber Reinforcement Polimer).

A lo largo del proceso de investigación y en base a conversaciones de procesos de reparación que ha realizado la empresa en diversas estructuras que por diversos factores internos o externos o debido a sus procesos constructivos debieron ser reparadas logrando éxito con dichas fibras demostrando ser un material noble para una reparación estructural es necesaria la profundización en el campo de aplicación de estas fibras sintéticas.

No obstante siendo que se trata de un método poco común y descriptivo se presenta una base para el conocimiento y se deja la inquietud para estudios y la aplicabilidad en el desarrollo de la vida profesional.

La particularidad con la que se presente cada uno de los retos a cumplir en el comportamiento de una estructura es diversa y quedan muchos factores externos por descubrir lo cual hace menester el conocimiento de nuevos procesos de reparación eficaces y que aportaran cargas adicionales relativamente bajas, y así satisfacer los requerimientos esperados inicialmente.

2.2.- FUNDAMENTACIÓN FILOSÓFICA

La investigación se halla enfocado bajo el paradigma positivista, ya que la legalidad constitutiva es susceptible de ser descrita y descubierta de manera objetiva, se utiliza una metodología experimental, predominan los métodos cuantitativos, teniendo como única existencia leyes y reglamentos pre estructurados y esquematizados; es decir que no podemos cambiar el procedimiento, además está orientada a la verificación, confirmación, y análisis de resultados.

2.3.- FUNDAMENTACIÓN LEGAL

El siguiente trabajo se sustentara en lo enmarcado en los siguientes códigos:

Normas Ecuatorianas de la Construcción NEC-11

ACI 318S-08 American Concrete Institute

ACI 440.1R, guía para el diseño y construcción del concreto estructural reforzado con las barras de FRP (Fiber Reinforcement Polimer).

ACI 440.2R-02 Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures

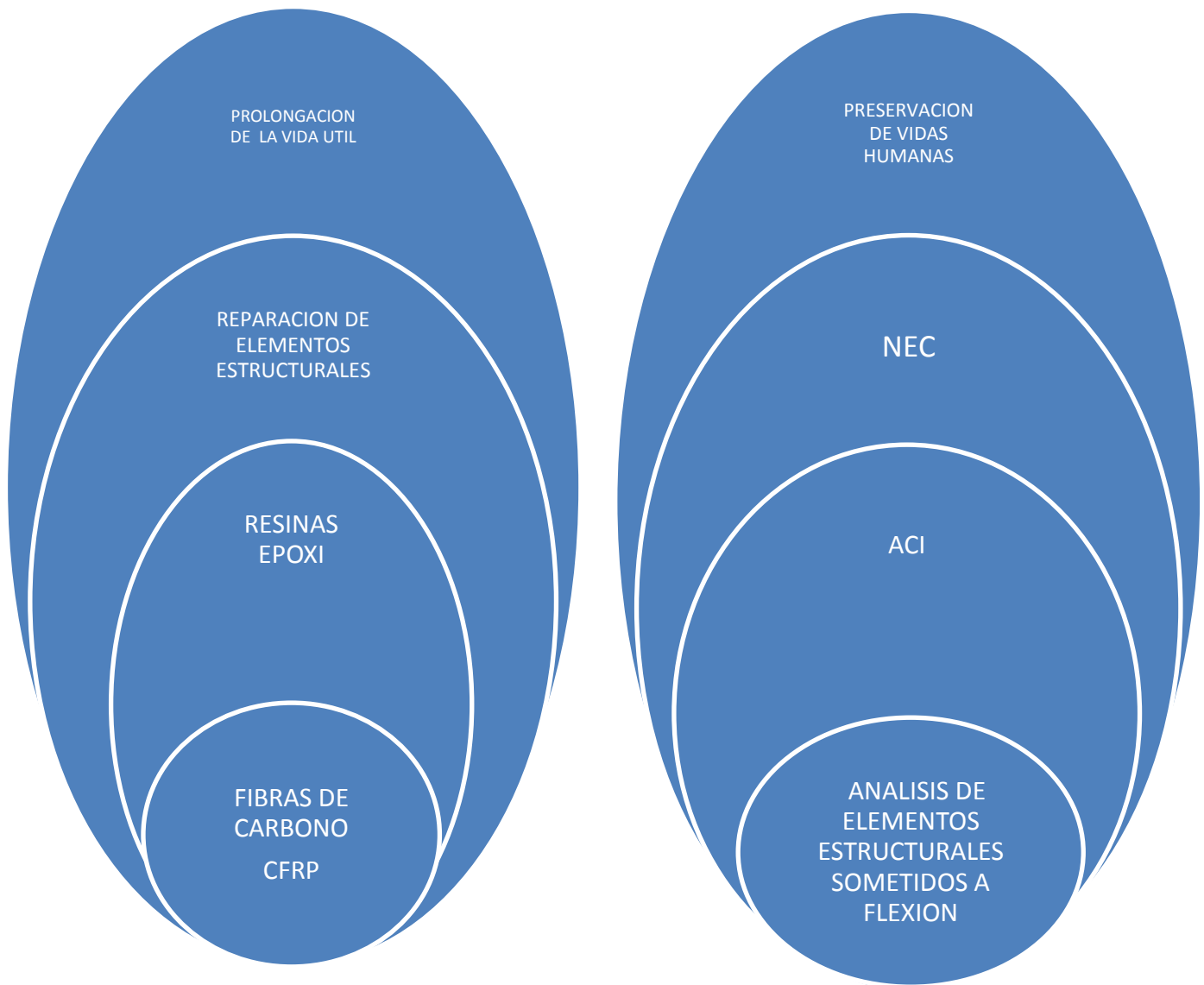
2.4.- CATEGORÍAS FUNDAMENTALES

2.4.1.- SUPRA ORDINACIÓN DE VARIABLES

VARIABLE INDEPENDIENTE

VARIABLE DEPENDIENTE

Grafico I.1.- Supra ordenación de las Variables Independiente y Dependiente



Elaboro Egd. Sixto Gabriel Vaca Uribe

2.4.2.- DESGLOSE DE LAS DEFINICIONES SUPRAORDINACIÓN DE LA VARIABLE INDEPENDIENTE.

2.4.2.1.- Prolongación de la Vida Útil

¹Las excepcionales virtudes del concreto armado como material de construcción, determinaron a fines del siglo pasado y principios del presente, una rápida expansión en su utilización. El volumen, pero sobre todo la variedad y el aspecto de las obras en concreto armado, generó una tecnología en constante transformación; como material de construcción se pensó que el concreto podría tener una duración ilimitada, sin embargo, en la actualidad se reporta cada día un número creciente de estructuras prematuramente deterioradas.

El concepto de vida útil de una estructura, indica ¹"Periodo en el que la estructura conserva los requisitos del proyecto sobre seguridad, funcionalidad y estética, sin costos inesperados de mantenimiento". En otras palabras, si la estructura careciera de cualquiera de estas tres propiedades (seguridad, funcionalidad y estética), esta sobrepasa el periodo de su vida útil.

Cabe resaltar que se puede resaltar dos tipos de vida útil:

Vida Útil de Diseño, que puede ser proyectada específicamente para una obra en particular (este es usualmente el caso de estructuras muy especiales) que siguen las especificaciones de normas y códigos.

Vida Útil Real, se manifiesta cuando se ha alcanzado un nivel crítico o inaceptable de deterioro en la estructura, tal que hace a esta inservible para el propósito para el que fue proyectada o diseñada.

Se dice que la estructura es Durable cuando la vida útil real iguala o supera la vida útil de diseño, aplicando un razonable esfuerzo de mantenimiento. La vida útil real

puede prolongarse si se aplican providencias de mantenimiento preventivas o reparaciones curativas.¹

2.4.2.2.- Reparación de Elementos Estructurales

²Si se ha de reforzar la estructura, primeramente habrá de plantear y analizar el tipo de refuerzo que se ajuste a la patología detectada intentando absorber con el esfuerzo la totalidad del cortante, siendo fundamental conocer cómo se realiza la transmisión de esfuerzos entre elemento reforzado y refuerzo al entrar en carga ambos. Otros factores a considerar son las limitaciones o condiciones de uso tales como escasez de espacio o la utilización de zonas y el tiempo de ejecución de la reparación y en menor medida, el aspecto estético y el factor económico.

La casuística en cuanto a materiales y técnicas es muy amplia:

- refuerzo con acero
- mediante perfiles
- con bandas de acero encoladas empleando una masilla epoxi
- con hormigón armado
- con hormigón proyectado
- mediante postensado
- variando el esquema estructural, etc.

Coexistiendo las técnicas tradicionales con otras más recientes que requieren unas condiciones de ejecución y de diseño de mayor calidad (además de desconocer algunos aspectos respecto a la forma de trabajo del conjunto, dimensiones de los elementos empleados, etc.).

¹ <http://blog.pucp.edu.pe/media/688>

Se deberán tener en cuenta aspectos tales como la rigidez original de los elementos reparados, en el momento de redistribuir los efectos provocados por las acciones sobre los elementos concurrentes o próximos, para no dotarles de una rigidez superior y provocar más daños.²

2.4.2.3.- Resinas Epoxi

³Una resina epoxi o poliepóxido es un polímero termoestable que se endurece cuando se mezcla con un agente catalizador o «endurecedor». Las resinas epoxi más frecuentes son producto de una reacción entre epiclorohidrina y bisfenol A. Los primeros intentos comerciales de producción tuvieron lugar en 1927 en los Estados Unidos.

Las resinas epoxídicas son un tipo de adhesivos llamados estructurales o de ingeniería; el grupo incluye el poliuretano, acrílico y cianoacrilato. Estos adhesivos se utilizan en la construcción de aviones, automóviles, bicicletas, esquís. Sirven para pegar gran cantidad de materiales, incluidos algunos plásticos, y se puede conseguir que sean rígidos o flexibles, transparentes o de color, de secado rápido o lento.

En general, si el secado de un adhesivo epoxídico se realiza con calor, será más resistente al calor y a los agentes químicos que si se seca a temperatura ambiente. La resistencia a la tracción de este tipo de adhesivos puede llegar a superar los 350 kg/cm², lo que les convierte en el adhesivo más resistente del mundo.³

²"Patologías de hormigón armado y pretensado" J. Calavera.

³Instituto Universitario de Tecnología de Valencia. Erick Chacon.

2.4.2.4.- Fibras de Carbono CFRP

⁴El refuerzo de estructuras de hormigón es el campo de la construcción donde más rápido y con mayor éxito se están aplicando los nuevos materiales compuestos (polímeros armados con fibras, o FRP). Los refuerzos con FRP se realizan de forma muy rápida, con pocos operarios y utilizando medios auxiliares ligeros, minimizándose las interrupciones del uso de la estructura y las molestias a los usuarios. La aplicación de estos materiales se traduce en un ahorro en costes de manos de obra respecto los refuerzos tradicionales entorno al 40-50%, compensando con creces el costo de la materia prima, y añadiendo la ausencia de mantenimiento requerido.

La fibra de carbono, un polímero 10 veces más resistente a la tracción que el acero (35,500 kg/cm² vs. 4,200 kg/cm²) y mucho más liviano.

Este polímero se obtiene de calentar sucesivamente a altas temperaturas (hasta 1500 °C) otro polímero llamado poliacrilonitrilo. Este proceso de recalentamiento da lugar a la formación de unas cintas perfectamente alineadas de casi carbono puro en su forma de grafito, por ello su nombre de fibras de carbono.

Aunque su aplicación en nuestro medio es reciente, el uso de esta fibra no es una novedad en el mundo: hace más de 30 años se viene aplicando en la industria aeroespacial y manufacturera de productos de bajo peso, alta resistencia a la tensión y anti-corrosivos, presentando innumerables ventajas en el campo de la construcción.⁴

⁴*Strengthening of structures with CFRP strips. W Steiner, AG, Tuffenwies 16-22, CH-8048 Zurich, Switzerland*

2.4.3.- DESGLOSE DE LAS DEFINICIONES SUPRAORDINACIÓN DE LA VARIABLE DEPENDIENTE.

2.4.3.1.- Preservación de Vidas Humanas

⁵Típicamente, las escuelas de Arquitectura se concentran en enseñar a sus estudiantes a ser creativos y que hagan diseños innovadores y usualmente no se toma en cuenta los roles y la importancia de los otros participantes en el diseño. De igual manera, en el desarrollo de diseños innovadores, muchas veces no se les enseña a los estudiantes a tomar en cuenta los aspectos relacionados a peligro debido a los efectos que pudieran tener desastres naturales en esas estructuras. Los ingenieros civiles son expuestos a los aspectos a considerar para que las estructuras resistan terremotos y huracanes cuando toman cursos de análisis y diseño estructural, ya que se diseña siguiendo las recomendaciones de los códigos. Se debe lograr que ambas disciplinas trabajen en conjunto de manera que se hagan que sean diseños innovadores, pero a la misma vez seguros para que las personas que van a utilizar las estructuras.

La ingeniería estructural se encarga de estimar la resistencia máxima de elementos sometidos a cargas variables, cargas permanentes y cargas eventuales (sismos, vientos, nieve, etc.) lo que ha generado a su vez varias subdisciplinas: ingeniería sísmica, ingeniería del viento, etc. El objetivo es crear una estructura segura dentro de unos costos óptimos y que cumpla con su cometido.⁵

2.4.3.2.- NEC

⁶La nueva Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-11) es una realidad. Su aplicación futura será de gran valor porque contempla normas que se cumplirán en los diferentes campos de la industria de la construcción para precautelar la vida humana,

⁵<http://www.ai.org/cntractdocs/IAS077630>

garantizar la calidad de las viviendas, construcciones e inversiones que se realizan a nivel público y privado.

Ecuador no contaba con una norma técnica que garantice las construcciones del país. En la actualidad se toma como referencia normas internacionales para construir y contrarrestar fenómenos naturales, sin embargo, estas normas no son ajustadas a nuestra realidad.

La elaboración de la Norma Ecuatoriana de la Construcción fue coordinada por la Cámara de la Construcción de Quito y cuenta con el respaldo del Gobierno Nacional, a través del Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, entidad que patrocinó su elaboración a través de un convenio suscrito con nuestro gremio. Uno de los logros de la NEC-11 es la elaboración del nuevo Mapa Sísmico del Ecuador, que determina las aceleraciones en proporción de la aceleración de la gravedad. Esto determina las zonas con mayor riesgo y por ende de aplicación rigurosa de las nuevas normas de construcción.

La Cámara de la Construcción de Quito, como entidad coordinadora de la elaboración de la Norma, fue uno de los espacios de trabajo de los comités de profesionales e investigadores conformados para la realización de los 16 capítulos. La NEC-11 se encuentra en la etapa de socialización. Sus aportes son valiosos y permitirán enriquecer este documento que será de obligatorio cumplimiento.⁶

2.4.3.3.- Código ACI

⁷Un reglamento para edificaciones prescribe únicamente los requisitos mínimos sobre este principio. Para cualquier estructura, el propietario o el profesional facultado para diseñar que realiza el diseño estructural pueden exigir materiales o procedimientos

⁶www.normaconstrucion.ec

constructivos mejores que los mínimos requeridos por el Reglamento para proteger al público en general; no obstante no se permiten inferiores.⁷

⁸En lugares donde no se cuente con un Reglamento de construcción legalmente adoptado, este reglamento define las disposiciones mínimas aceptables en la práctica del diseño y la construcción. Este reglamento también cubre la evaluación de resistencia de estructuras existentes.⁸

2.4.3.4.- Análisis de Elementos Estructurales sometidos a flexión

⁹Se realizar mediante un análisis de la sección, asumiendo una distribución lineal de deformación unitaria y un bloque de compresión equivalente de acuerdo ACI 318. La resistencia que aporte el refuerzo longitudinal en la zona de compresión será despreciada.⁹

¹⁰Las disposiciones del capítulo 10 se deben aplicar al diseño de elementos sometidos a flexión o cargas axiales, o la combinación de flexión y cargas axiales.¹⁰

2.5.- HIPÓTESIS

El reforzamiento de elementos estructurales sometidos a flexión con fibras de carbono es empleado en nuestro medio.

⁷Reglamento ACI 318S y Comentarios. Introducción.

⁸ Reglamento ACI 318S y Comentarios. Capítulo 1 Requisitos Generales.

⁹ NEC 2011, Capítulo 4, Estructuras de Hormigón Armado.

¹⁰ ACI 318S, Capítulo 10, Flexión y Cargas Axiales.

2.6.- SEÑALAMIENTO DE LAS VARIABLES

2.6.1.- Variable independiente

Reforzamiento de elementos estructurales sometidos a flexión con fibras de carbono.

2.6.2.- Variable Dependiente

Es empleada en nuestro medio.

CAPÍTULO III METODOLOGÍA

3.1.- MODALIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación tendrá una modalidad que abarca los siguientes niveles:

- Investigación de Campo, permitirá la participación real del investigador, desde el mismo lugar donde ocurren los hechos, el problema, la fenomenología en consideración. A través de esta modalidad, se establecerán las relaciones entre la causa y el efecto y se podrá predecir la ocurrencia del caso o fenómeno.
- Modalidad Documental, se realizara la revisión de diferentes fuentes bibliográficas y literatura sobre el tema de investigación.

3.2.- NIVEL O TIPO DE INVESTIGACIÓN

- La investigación descriptiva consiste en llegar a conocer las situaciones, costumbres y actitudes predominantes a través de la descripción exacta de las actividades, objetos, procesos. Su meta no se limita a la recolección de datos, sino a la predicción e identificación de las relaciones que existen entre dos o más variables.

Etapas:

1. Examinan las características del problema escogido.
 2. Lo definen y formulan sus hipótesis.
 3. Enuncian los supuestos en que se basan las hipótesis y los procesos adoptados.
 4. Eligen los temas y las fuentes apropiados.
 5. Seleccionan o elaboran técnicas para la recolección de datos.
 6. Establecen, a fin de clasificar los datos, categorías precisas, que se adecuen al propósito del estudio y permitan poner de manifiesto las semejanzas, diferencias y relaciones significativas.
 7. Verifican la validez de las técnicas empleadas para la recolección de datos.
 8. Realizan observaciones objetivas y exactas.
 9. Describen, analizan e interpretan los datos obtenidos, en términos claros y precisos.
-
- El Método analítico es aquel método de investigación que consiste en la desmembración de un todo, descomponiéndolo en sus partes o elementos para observar las causas, la naturaleza y los efectos. El análisis es la observación y examen de un hecho en particular. Es necesario conocer la naturaleza del fenómeno y objeto que se estudia para comprender su esencia. Este método nos permite conocer más del objeto de estudio, con lo cual se puede: explicar, hacer analogías, comprender mejor su comportamiento y establecer nuevas teorías.

3.3.- POBLACIÓN Y MUESTRA

3.3.1.- POBLACIÓN

La población que tomamos para la presente investigación será la información proporcionada por la empresa TECNOCRETO con proyectos ejecutados con este proceso de reforzamiento.

Profesionales, Egresados y Estudiantes en la rama de Ingeniería Civil.

3.3.2.- MUESTRA

Para alcanzar nuestros objetivos fueron analizadas la siguiente población que se identifica a continuación donde se obtuvieron los siguientes datos:

El tamaño de la población está en base al número de estudiantes que cursan los últimos semestres de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Ambato a profesionales entre los cuales se encuentran calculistas, contratistas con experiencia y egresados de la Facultad.

$$n = \frac{N p q}{i^2(N - 1) + Z^2 p q}$$

Donde:

n= tamaño de la muestra

N= tamaño de la población (350)

i²= margen de error en este caso 0.05

Z= Para un margen de error del 5% el valor de Z= 1.96

E= error admisible

p= probabilidad de confianza (0.5)

q= probabilidad de fracaso (0.5)

$$n = \frac{350 \times 0.50 \times 0.50}{0.05^2 (350 - 1) + 1.96^2 \times 0.50 \times 0.50}$$

n = 48 Personas

3.4.2 Variable Dependiente: Es empleada en nuestro medio.

Tabla III.2.- Operacionalización de variable dependiente

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítems	Técnicas e Instrumentos
<p>En la prolongación de la vida útil de una estructura se encuentra directamente involucrado el incremento de la capacidad de Carga y de Cortante de los elementos que se encuentran tensionados por lo que es importante asegurar ese incremento en la capacidad portante del elemento.</p>	<p>Cumplimiento del incremento de la capacidad de Carga y Cortante.</p> <p>Personal calificado para el trabajo.</p> <p>Procesos de Reforzamiento.</p> <p>Análisis de los Resultados después del reforzamiento</p>	<p>Especificaciones Técnicas.</p> <p>Memoria Técnica.</p> <p>Capacitación Personal.</p> <p>Certificaciones de Materiales.</p> <p>Ensayo de las muestras</p>	<p>¿Se está cumpliendo el incremento en la capacidad de carga y cortante?</p> <p>¿El personal que realiza el proceso está realmente capacitado para el trabajo?</p> <p>¿Qué porcentaje de carga se incrementa respecto al ensayo inicial?</p>	<p>Técnica: Observación Participante activa.</p> <p>Instrumentos: Ensayos destructivos. Ensayos especializados. Certificaciones de los Epóxicos y fibras CFRP.</p>

Elaboro Egdo. Sixto Gabriel Vaca Uribe

3.5.- PLAN DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La recolección de la información se realizará a través de encuestas, elaboración de las probetas, y ensayos de los materiales que permitirá obtener toda la información necesaria para la realización y sustentación del proyecto propuesto.

Tabla III.3.- Plan de recolección de información

Técnicas de Investigación	Instrumentos para la recolección de Información.
1. Información Secundaria 1.1. Lectura Científica	1.1.1. Proyectos de Tesis de Universidades en Latinoamérica 1.1.2 Antecedentes de los últimos avances publicados en el internet con fibras CFRP en elementos sometidos a flexión. 1.1.2. Buscadores en Internet. Navegadores Bibliografía virtual.
1.2. Encuesta	Profesionales, estudiantes y egresados en la Rama Ingeniería Civil
2. Información Primaria 2.1.1. TECNOCRETO	2.1.1.2.Últimos proyectos ejecutados, ensayos, archivos fotográficos.
2.1.2 Elaboración de muestras	2.1.2.1 Ensayos y comparación de los resultados

Elaboro Egdo. Sixto Gabriel Vaca Uribe

3.5.1.- TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

Tabla III.4.- Técnicas e instrumentos

TÉCNICAS	INSTRUMENTOS
Elaboración de Muestras	Ensayos y Resultados
Encuesta	Cuestionario

Elaboro Egdo. Sixto Gabriel Vaca Uribe

La recolección de información se realizará a través de la elaboración de probetas con ensayos no destructivos para el reforzamiento y luego realizar ensayos destructivos; además se realizaran encuestas por medio de un cuestionario que se aplicará a profesionales en la rama de Ingeniería Civil, lo cual permitirá obtener toda la información necesaria para la realización y sustentación del presente proyecto.

3.6.- PLAN DE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACION

Una vez realizadas las encuestas se procederá a su análisis, los que se presentaran tabulados en forma digital y presentada en cuadros estadísticos, procedimiento que se dispondrá de la siguiente manera:

- Revisión de la información recolectada de campo.
- Tabulación de cuadros según variables de la hipótesis.
- Obtener una concordancia estadística relacionando la muestra con el número de respuestas de una forma porcentual, con este resultado numérico y el porcentaje se estructura el cuadro de resultados para la interpretación.
- Representar los resultados por medio de gráficas estadísticas.
- Interpretar los resultados de acuerdo a la hipótesis propuesta.

CAPITULO IV

4.1.- ANALISIS DE RESULTADOS

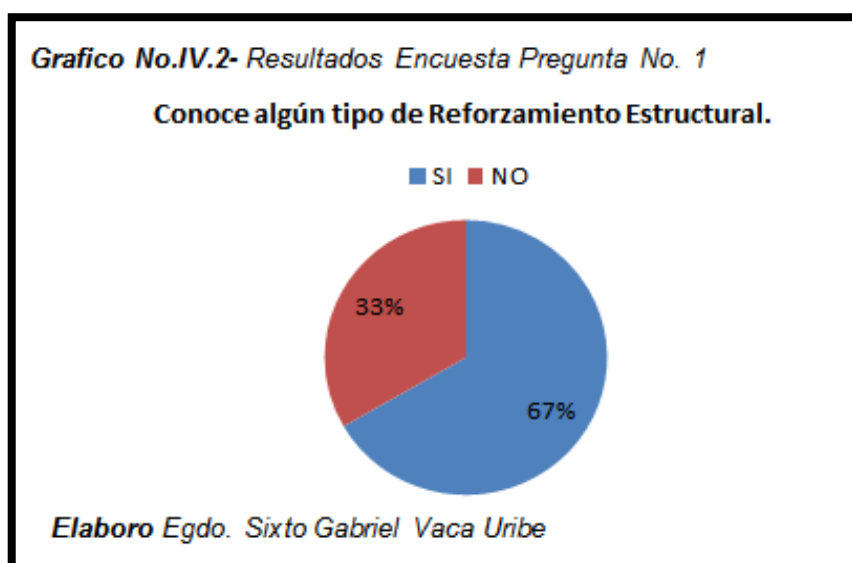
Se han realizado 48 encuestas a los profesionales, egresados y estudiantes en la rama de Ingeniería Civil entre los cuales se encuentran ingenieros calculistas, contratistas, egresados de la Facultad y aspirantes estudiantes la Universidad Técnica de Ambato, sobre el proyecto a realizarse en el empleo de fibras de Carbono en el cantón Quito provincia de Pichincha, obteniéndose la siguiente información:

4.1.1.- Pregunta 1.- Conoce algún tipo de Reforzamiento Estructural.

Tabla IV.5.- Resultados Encuesta Pregunta No. 1

PREGUNTA 1		PORCENTAJES
SI	32	33%
NO	16	67%
TOTAL MUESTRA	48	100%

Elaboro Egdo. Sixto Gabriel Vaca Uribe

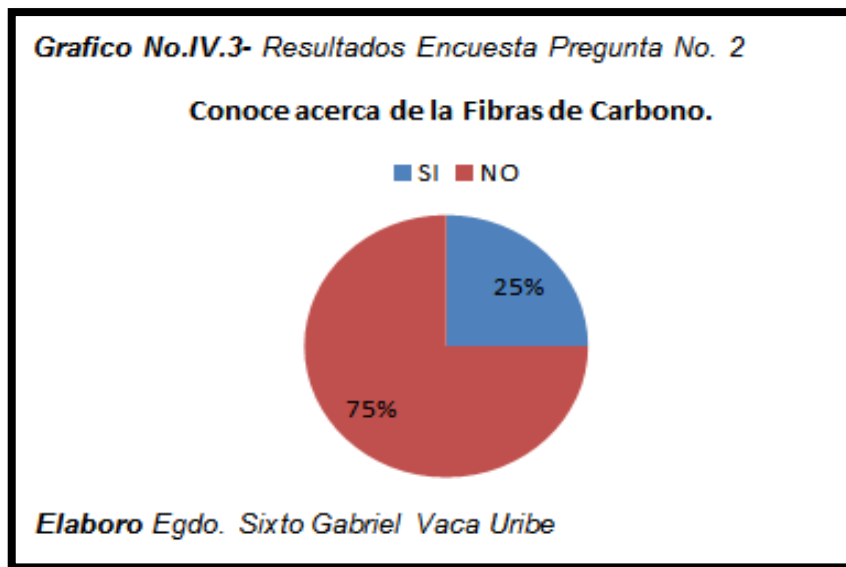


4.1.2.- Pregunta 2.- Conoce acerca de la Fibras de Carbono.

Tabla IV.6.- Resultados Encuesta Pregunta No. 2

PREGUNTA 1		PORCENTAJES
SI	12	25%
NO	36	75%
TOTAL MUESTRA	48	100%

Elaboro Egdo. Sixto Gabriel Vaca Uribe

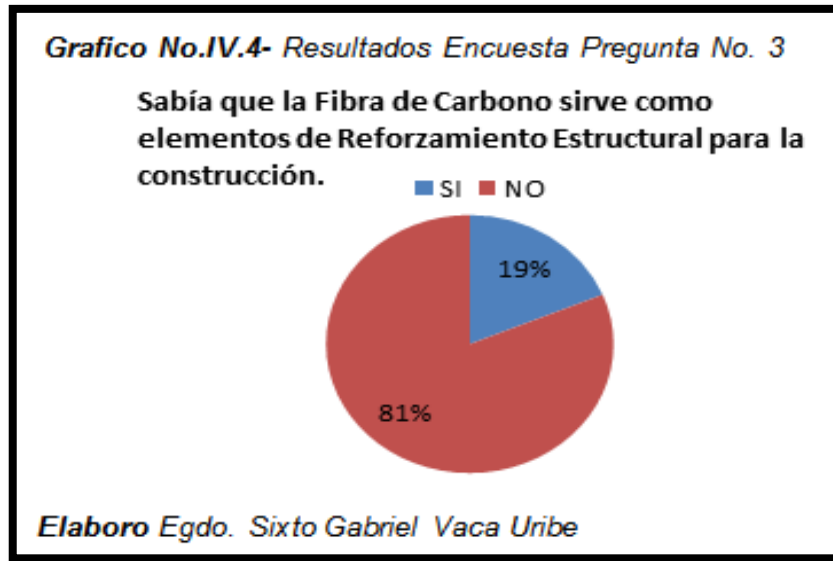


4.1.3.- Pregunta 3.- Sabía que la Fibra de Carbono sirve como elementos de Reforzamiento Estructural para la construcción.

Tabla IV.7.- Resultados Encuesta Pregunta No. 3

PREGUNTA 1		PORCENTAJES
SI	9	19%
NO	39	81%
TOTAL MUESTRA	48	100%

Elaboro Egdo. Sixto Gabriel Vaca Uribe

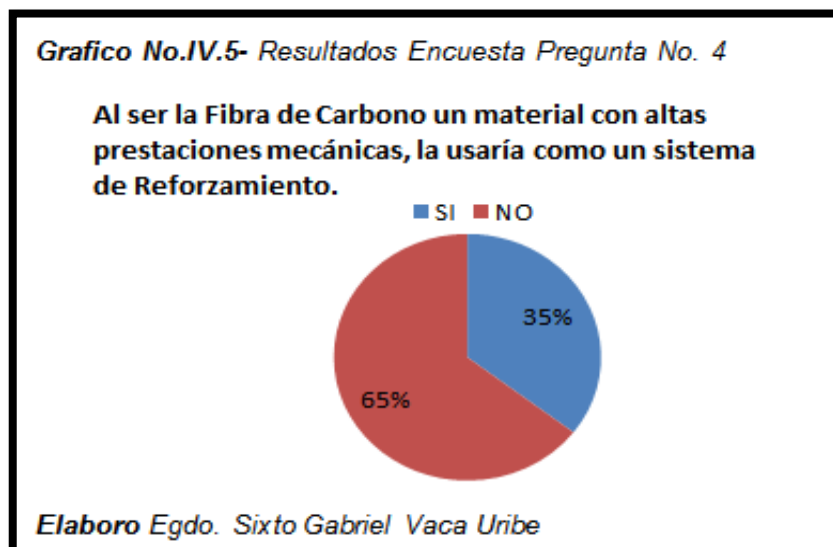


4.1.4.- Pregunta 4.- Al ser la Fibra de Carbono un material con altas prestaciones mecánicas, la usaría como un sistema de Reforzamiento.

Tabla IV.8.- Resultados Encuesta Pregunta No. 4

PREGUNTA 1		PORCENTAJES
SI	17	19%
NO	31	81%
TOTAL MUESTRA	48	100%

Elaboro Egdo. Sixto Gabriel Vaca Uribe

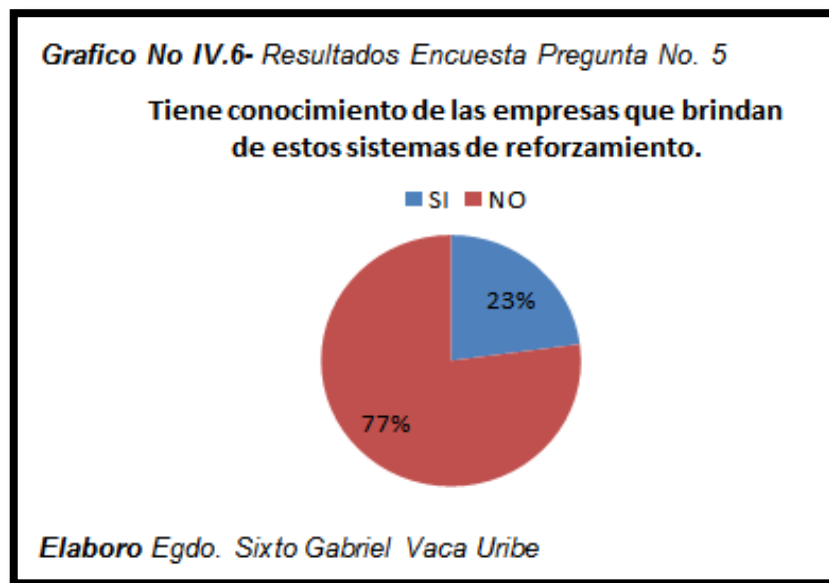


4.1.5.- Pregunta 5.- Tiene conocimiento de las empresas que brindan de estos sistemas de reforzamiento.

Tabla IV.9.- Resultados Encuesta Pregunta No. 5

PREGUNTA 1		PORCENTAJES
SI	11	19%
NO	37	81%
TOTAL MUESTRA	48	100%

Elaboro Egdo. Sixto Gabriel Vaca Uribe



4.1.6.- Pregunta 6.- Está de acuerdo de que se realicen investigaciones sobre nuevos materiales para la construcción, aplicada a diferentes tipos de solicitudes que puedan presentarse.

Tabla IV.10.- Resultados Encuesta Pregunta No. 6

PREGUNTA 1		PORCENTAJES
SI	48	100%
NO	0	0%
TOTAL MUESTRA	48	100%

Elaboro Egdo. Sixto Gabriel Vaca Uribe

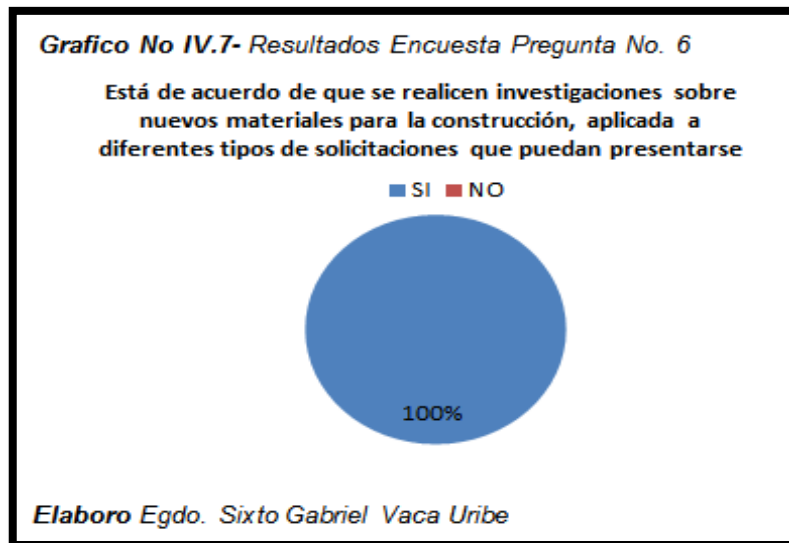


Tabla No IV.11- ENCUESTA

UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO		
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA		
CARRERA INGENIERIA CIVIL		
PROYECTO: “ANÁLISIS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES QUE TRABAJAN A FLEXIÓN CON FIBRAS DE CARBONO”		
PREGUNTA	RESPUESTA	
	SI	NO
1. Conoce algún tipo de Reforzamiento Estructural.		
2. Conoce acerca de la Fibras de Carbono.		
3. Sabía que la Fibra de Carbono sirve como elementos de Reforzamiento Estructural para la construcción.		
4. Al ser la Fibra de Carbono un material con altas prestaciones mecánicas, la usaría como un sistema de Reforzamiento.		
5. Tiene conocimiento de las empresas que brindan de estos sistemas de reforzamiento.		
6. Está de acuerdo de que se realicen investigaciones sobre nuevos materiales para la construcción, aplicada a diferentes tipos de solicitaciones que puedan presentarse.		

Elaboro Egdo. Sixto Gabriel Vaca Uribe

4.2 INTERPRETACION DE DATOS

4.2.1 Interpretación Pregunta No. 1

De acuerdo a los datos obtenidos se determina que el 67% de la muestra tiene algún tipo de conocimiento acerca de algún tipo de reforzamiento estructural, mientras que el 33% no conoce ningún tipo de reforzamiento estructural.

4.2.2 Interpretación Pregunta No. 2

De acuerdo a los datos obtenidos se determina que el 25% de la muestra tiene conocimiento de lo que son las fibras de carbono, mientras que el 75% desconoce el tema.

4.2.3 Interpretación Pregunta No. 3

De acuerdo a los datos obtenidos se determina que el 19% de la muestra tiene conocimiento de la aplicación de fibras de carbono en la construcción, mientras que el 81% desconoce el tema.

4.2.4 Interpretación Pregunta No. 4

De acuerdo a los datos obtenidos se determina que el 35% de los encuestados conociendo las propiedades de la fibra de carbono está de acuerdo en usarla como un sistema de reforzamiento, mientras que el 65% no lo haría.

4.2.5 Interpretación Pregunta No. 5

De acuerdo a los datos obtenidos se determina que el 23% de los encuestados conocen de alguna empresa que comercializa o aplica este sistema de reforzamiento, mientras que el 77% no conoce ninguna empresa que lo haga.

4.2.6 Interpretación Pregunta No. 6

De acuerdo a los datos obtenidos se determina que el 100% de los encuestados está de acuerdo en realizar investigaciones en temas relacionados a nuevos materiales para la construcción.

4.3 VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS

Una vez realizada las 48 encuestas a los profesionales, egresados y estudiantes en la rama de Ingeniería Civil entre los cuales se encuentran ingenieros calculistas, contratistas, egresados de la Facultad y aspirantes estudiantes la Universidad Técnica de Ambato, se determina que existe un desconocimiento en el empleo de fibras de carbono como reforzamiento estructural por lo que no se realiza el empleo de las mismas en nuestro medio.

Debido a sus altas prestaciones existe una aceptación para la investigación acerca de nuevos materiales como reforzamiento en el campo de la construcción.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.- Conclusiones

- 1.** Existe un porcentaje considerable de profesionales y estudiantes que tiene conocimiento acerca del reforzamiento de elementos estructurales.
- 2.** El desconocimiento acerca de las fibras de carbono es elevado en comparación a las personas que conocen acerca de algo en el tema expuesto.
- 3.** La aplicación de este método de reforzamiento sigue siendo desconocida en el campo de la construcción.
- 4.** Pese a las ventajas que brinda este método de reforzamiento el porcentaje de personas que están de acuerdo en usarla es bajo.
- 5.** La falta de información hace muy elevado el desconocimiento de empresas comercializadoras y así mismo de empresas que se encarguen de la aplicación de este método de reforzamiento estructural.

5.2.- Recomendaciones

- Realizar una investigación acerca de nuevos tipos de reforzamiento aplicados al campo de la Ingeniería Civil.
- Indagar en la búsqueda de empresas que brinden nuevos métodos en el campo de la construcción enfocados en el reforzamiento estructural.
- Involucrar a los estudiantes en la visión hacia nuevas técnicas constructivas.
- Conocer las ventajas que brindan las fibras de carbono CFRP, ponerlas en aplicación para realizar una evaluación de las mismas.

CAPITULO VI

PROPUESTA

6.1.- DATOS INFORMATIVOS

Título

Análisis de Elementos Estructurales que trabajan a Flexión con Fibras De Carbono

Institución ejecutora

La propuesta se ejecutará con el apoyo del Ing. M. Sc. Jorge Cevallos como director de tesis y Sixto Gabriel Vaca Uribe como proponente del proyecto.

Localización

La investigación se llevara a cabo en el cantón Quito, provincia de Pichincha en las instalaciones de Admix la empresa comercializadora de las fibras sintéticas, ubicada en la Tadeo Benítez Oe 1-639 y Juan de Selis.

Geográficamente

Se encuentra ubicada por las siguientes coordenadas Latitud 0°06'54,92" Longitud 78°28'39,02" con relación al meridiano de Greenwich y una altura de 2895 msnm. Presenta vientos de 3,10Km/h, humedad del 80%, clima templado con temperaturas de 12°C a 19°C.

Pontificia Universidad Católica del Ecuador Campus Quito

Los ensayos se realizarán en los laboratorios de Materiales de Construcción de la Facultad de Ingeniería Civil, ubicada en la Veintimilla y Av. 12 de Octubre, el laboratorio cuenta con la infraestructura para realizar los Ensayos.

6.2.- ANTECEDENTES DE LA PROPUESTA

La intervención o rehabilitación son etapas para el mejoramiento del desempeño que posee una estructura vulnerable. Esta rehabilitación consiste en realizar un reforzamiento o reparación de edificaciones con el fin de:

- Mitigar los efectos que dejan los sismos.
- Soportar el aumento de cargas por el cambio de uso de una estructura.
- Corregir los daños producidos por la corrosión, un ataque químico, incendios, impactos, entre otras; y que estos a su vez generan problemas en el medio ambiente.

En caso de requerir en una estructura previa la rehabilitación se realizan imprimaciones y protecciones de la armadura, regeneración del hormigón y por último el reforzamiento estructural que es lo que estamos investigando.

De los posibles daños que presente una estructura y estos estén asociados a diferentes patologías, indistintamente cualquiera que esta fuera deberá ser tratada, teniendo en cuenta; como una condición para el empleo de fibras CFRP, que la resistencia del elemento estructural no debe ser menor al 10% de su resistencia inicial.

Una estructura que es próxima a ser reforzada pasará un control previo, el cual consistirá en:

- Valoración y Evaluación de los planos de la Estructura.
- Revisión de la normativa vigente cuando se realizó el cálculo.
- Análisis visual y Diagnostico de los daños que presenta.
- Ensayos de resistencia de materiales.
- Selección de la solución constructiva más adecuada.

Una vez realizado el control previo de reconocimiento nos permitirá tomar conciencia del problema existente y la pronta ejecución, de la conclusión de la evaluación realizada.

En el momento de hacer una rehabilitación estructural se debe tener como aspecto importante la conexión entre elementos nuevos y antiguos por medio de fijaciones, adhesivos, refuerzo activo, es decir que el refuerzo se movilice al instante de su colocación, que el refuerzo se movilice durante el incremento de la carga, y otro aspecto a tener en cuenta debe ser el comportamiento de esta conexión.

El reforzamiento básicamente consiste en incrementar la resistencia o la rigidez en elementos de una construcción, que presente un cambio de uso o la necesidad de un mantenimiento para la prolongación de su vida útil. Se encuentran distintas técnicas de reforzamiento estructural que se encargan de corregir las deficiencias y lograr el objetivo propuesto.

¹¹Las condiciones para el reforzamiento serán las provocadas por deficiencias que pueden ser por defectos, daños o deterioro. En el presente estudio nos enfocaremos en reforzamientos provocados por defectos y daños, en los cuales es necesario el incremento de la resistencia y la rigidez de un elemento estructural.¹¹

¹¹http://sigar.chacao.gob.ve/EDURIESGO/documentos/vulnerabilidad_archivos/04_patologias_en_las_edificaciones.pdf¹¹

Adición de materiales compuestos en CFRP adheridos externamente contribuye eficientemente en el refuerzo de estructuras, ya que consiste en el uso de materiales compuestos en fibras de carbono, el cual garantiza gran resistencia y mejoramiento de los elementos estructurales, con una cualidad importante que no aumentan considerablemente el peso de las estructuras.

“El termino material compuesto se reserva para aquellos materiales bifásicos (fibra + matriz) fabricados expresamente para mejorar los valores de las propiedades que los materiales constituyentes presentan por separado, exhibiendo una interfaz identificable entre ellos”. Estos materiales tales como las fibras de carbono, son materiales compuestos por un 95% de carbono y un 5% por otros componentes, estas se obtienen a partir de una fibra precursora, generalmente poliacrilonitrilo, que es sometida a diferentes procedimientos de transformación: Estirado (orientación), oxidación, carbonatación y grafitización.

6.3.- JUSTIFICACIÓN

El presente estudio se ha realizado por el interés en conocer el comportamiento de un elemento estructural sometido a flexión reforzado con fibras CFRP, considerando las características que presenta bajo peso, alta resistencia a la tensión y anticorrosiva lo cual demuestra innumerables ventajas en el campo de la construcción.

La aplicación de fibras de carbono en un elemento que soporta cargas a flexión y corte será determinado en la aplicación de la misma colocando bandas de fibra en el cara inferior del elemento aumentando se resistencia a la flexión, en las caras laterales incrementando su resistencia al corte.

La presente investigación determinara un método de reforzamiento útil ya que nos ahorrara tiempo de aplicación, minimizara costos de inversión y se realizara con el empleo de equipo mínimo de construcción.

Las altas ventajas y propiedades que nos proporciona un reforzamiento con fibras CFRP, servirá para los profesionales en la reparación de obras civiles, empleando este método de reforzamiento. El mismo que les permitirá contemplar y aplicar todas las medidas de seguridad que deben tomar en cuenta.

6.4.- OBJETIVOS

Objetivo General

- Determinar el comportamiento estructural de las fibras de carbono ante cargas y cortante en un elemento estructural sometido a flexión.

Objetivos Específicos

- Ensayar una serie de vigas sin reforzamiento y otras con reforzamiento que fallen a flexión y corte.
- Verificar que se cumplan las condiciones básicas requeridas para este método de reforzamiento.
- Realizar un análisis en elementos en estado fisurado y no fisurado cuando se instale la fibra de carbono.

6.5.- ANALISIS DE FACTIBILIDAD

El presente proyecto es factible de realizarlo ya que se cuenta con el respaldo de la empresa Admix que entregara la fibra y la resina necesaria para el reforzamiento de las vigas que serán objeto del presente estudio.

La fabricación de las vigas de hormigón será con la ayuda de la empresa GUSI Cia. Ltda. Equipos y Construcciones.

Bajo estos antecedentes el proyecto de la presente investigación es totalmente factible y realizable.

6.6.- FUNDAMENTACIÓN

6.6.1 Diseño Hormigón

Llamado también Concreto, es una piedra artificial con ventajas muy superiores a una piedra natural, en lo posible debe ser más parecido a una piedra natural. Está Formado por una Pasta o Matriz y un material de Relleno.

Tabla No VI.12- Composición del Hormigón

AIRE 2-3%	SOLIDOS
PASTA O MATRIZ	RELLENO
CEMENTO + AGUA	AGREGADOS FINO Y GRUESO
Material Activo	Material Muerto
Aprox. 25%	Aprox. 75%

Fuente: Manual de Hormigón II Ing. Santiago Medina

6.6.1.1 Funciones de la Pasta en el Hormigón

- Llenar los vacíos que deja el árido.
- Dar plasticidad al hormigón fresco, ya que actúa como un lubricante.
- Al llenar la pasta los vacíos, le da también impermeabilidad al hormigón endurecido.
- Dar resistencia al hormigón.

6.6.1.2 Factores que modifican la Calidad de la Pasta

- La calidad de sus componentes (cemento - agua).

- La relación agua/cemento (A/C) que además es el factor individual más importante que controla la calidad del hormigón. La resistencia del hormigón es función inversa de la relación A/C.

-Debe haber una correcta y completa reacción CEMENTO-AGUA, reacción que se identifica en dos partes:

Hidratación: que es el proceso de absorción de agua durante el mezclado. Debe cuidarse la evaporación del agua durante el proceso de hidratación para evitar figuración del hormigón en el fraguado.

Curado: Es mantener al hormigón en condiciones favorables de humedad y temperatura. El tiempo de curado debe ser mínimo de 14 días, y si es mayor, es mucho mejor.

6.6.1.3 Curado del Hormigón

El curado es proporcionar un ambiente de apropiada temperatura y contenido de humedad en el hormigón recién colocado, de modo que este desarrolle el potencial de las propiedades que se esperan de él. Un hormigón curado adecuadamente alcanzara su máxima resistencia y durabilidad, será más impermeable y tendrá menor riesgo de fisuración.

Humedad: Para garantizar que la resistencia del hormigón no se vea seriamente comprometida, la humedad relativa debe ser superior al 80%.

Temperatura: Debe mantenerse en valores cercanos a 20°C, en todo caso superiores a 10°C e inferiores a 30°C. Su papel en el curado es importante pero de menor incidencia que el contenido de humedad.

El curado debe prevenir durante las primeras edades la evaporación del agua superficial, manteniendo al hormigón en condición preferentemente saturada.

Un contenido suficiente de humedad evita retracción por secado y permite una adecuada hidratación del cemento.

6.6.1.4 Propiedades Mecánicas del Hormigón

Para el diseño de estructuras de hormigón simple, armado, pre esforzado con perfiles laminados, soldados, etc. Se utilizan las propiedades mecánicas de hormigón endurecido, entre las más importantes tenemos:

6.6.1.4.1 Resistencia a la compresión

Se determina en muestras cilíndricas estandarizadas de 15cm de diámetro y 30cm de alto, llevadas a la rotura mediante la aplicación de cargas incrementadas relativamente rápidas. Esta resistencia se mide luego de 28 días de fraguado bajo condiciones controladas de humedad.

6.6.1.4.2 Modulo de Elasticidad

Cuando se dibujan las curvas Esfuerzo-Deformación se obtienen diferentes tipos de gráficos que dependen fundamentalmente de la resistencia a la rotura del material, la pendiente de la curva en el rango de comportamiento lineal recibe la deformación de módulo de elasticidad o módulo de Young "Ec".

El módulo de elasticidad del hormigón puede calcularse:

$$E_c = \sigma / \xi_c ;$$

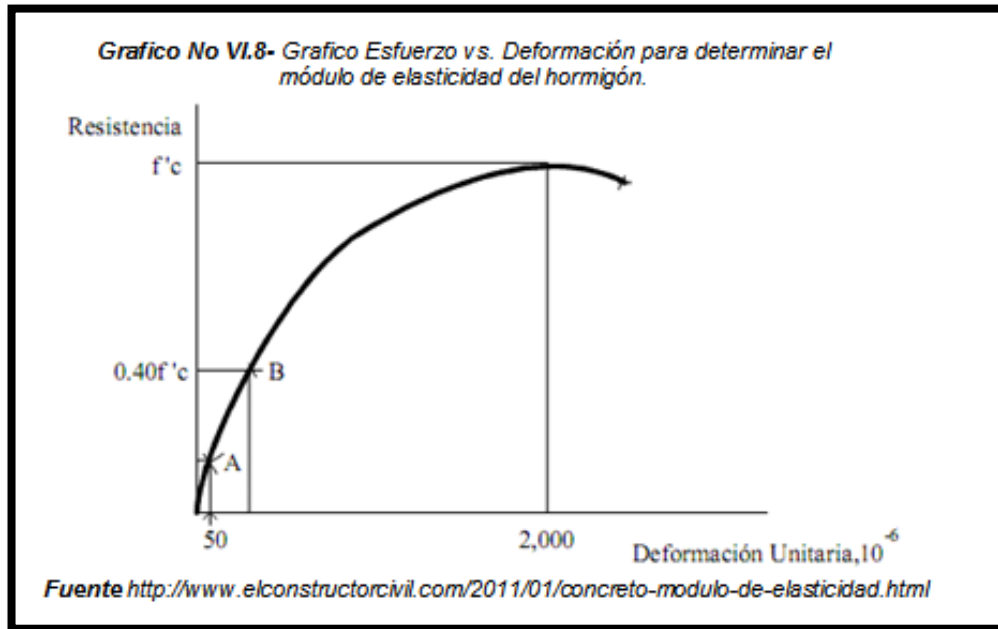
$$E_c = 15000 \sqrt{f'_c};$$

$$E_c = W_c^{1.5} \times 0.137 \sqrt{f'_c}$$

σ = Esfuerzo

ξ_c = Deformación Especifica Concreto = 0.003

W_c = Peso Específico del Concreto



6.6.1.4.3 Ductilidad

El hormigón es un material frágil no dúctil.

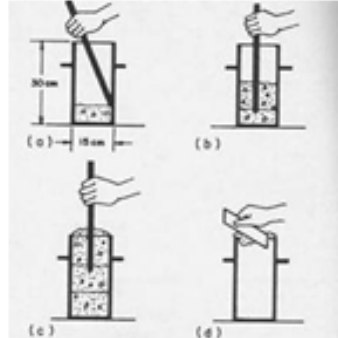


6.6.1.4.4 Resistencia Tracción

El hormigón posee muy baja resistencia a la tensión se considera alrededor del 10% de la resistencia a compresión, por lo tanto esta propiedad no se tiene en cuenta en el diseño de estructuras.

6.6.1.5 Ensayos

Tabla No VI.13- Norma ASTM para ensayos Compresión Muestras de hormigón

TIPO	NORMA ASTM	DESCRIPCION	GRAFICO
COMPRESIÓN	ASTM C-172	Manera Correcta de tomar muestras de Hormigón Fresco.	
	ASTM C31-84	Método Estándar para la elaboración y curado de probetas para ensayos a compresión y flexión en el campo	

Fuente: http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPMJ09/enright_spmj09.html

6.6.2 Acero de Refuerzo

6.6.2.1 Propiedades Mecánicas del Acero

El Acero trabaja perfectamente bajo cargas de tracción las mismas que varían dependiendo de la combinación química del material y de sus procesos de fabricación.

6.6.2.1.1 Rango de Comportamiento Elástico

Es el rango de refuerzos, a partir de la carga nula hasta una determinada carga P que al retirarla recupera su geometría inicial.

6.6.2.1.2 Resistencia a la Rotura

Es el mayor esfuerzo que puede soportar el acero, previo al proceso del colapso del material. El inicio del colapso es el punto más alto de la curva y se lo representa como "Fr".

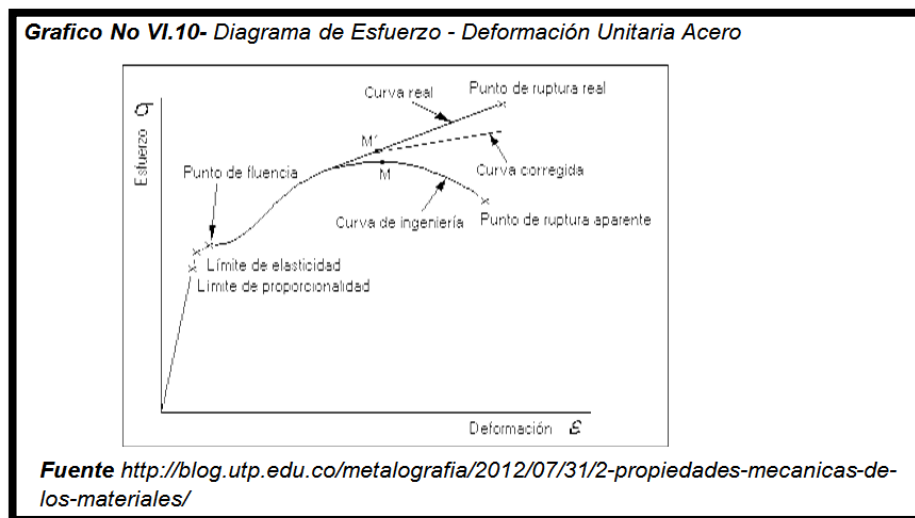
6.6.2.1.3 Esfuerzo de Fluencia

Se define como esfuerzo bajo el cual el acero continua deformándose sin necesidad de incrementar las cargas de tracción. La fluencia coincide con una recta horizontal, a continuación del rango elástico y un pequeño tramo de transición. El esfuerzo asociado se identifica como "fy".

6.6.2.1.4 Modulo de Elasticidad del Acero

La pendiente de la Recta que identifica al rango elástico de comportamiento de los materiales, y en el Acero se lo representa como "Es".

El módulo de elasticidad del Acero es único: $E_s=2.1 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$; es el cociente entre el esfuerzo y la deformación unitaria dentro del rango elástico.



6.6.3 Hormigón Estructural - Presentación Histórica

6.6.3.1 Preámbulo

El abordar históricamente la ingeniería es un método cada vez más frecuente, en paralelismo con otras ramas de la actividad humana. En todos casos la visión histórica nos da una perspectiva de conjunto, completa y ordenada, en el espacio y en el tiempo, que nos permite enfocar el tema de que se trate con la serenidad que proporciona la sensación de dominio del mismo.

6.6.3.2 La armadura que da fibra a la piedra

¹² "En 1835 Brunel presenta un prototipo de enorme importancia: en la ineludible necesidad de contar con la adherencia entre metal y mortero para asegurar la transferencia de las tracciones de uno a otro material.

Como se ha visto, la idea de hacer colaborar conjuntamente un material válido para compresiones y otro material adecuado para las tracciones no es nueva. De los griegos a los inventores del hormigón armado, pasando por civilizaciones antiguas de diferentes continentes -que han utilizado fibras vegetales en los adobes o en el tapial para conferir cohesión y, en definitiva, capacidad resistente a tracción-, el empleo de metales para resistir tracciones ha estado siempre presente.

Muchos textos atribuyen a Monier, jardinero de Versalles, la invención del hormigón armado de manera poco menos que casual o involuntaria. Todo apunta a que fue otro francés, Louis Lambot, quien presentó a la exposición Universal de París de 1854 una barca de hormigón armado que debió observar Monier.

El camino hacia el hormigón estructural quedaba abierto al desarrollo de los intrépidos."¹²

¹²"Notas para una historia del Hormigón Estructural " UD HORMIGÓN ESTRUCTURAL JLG.
ED. 02 Prof. Mesequer, García.

6.6.3.3 Primeras realizaciones bajo patente

¹³"Como ya se ha dicho, la barca de Lambot fue exhibida en la exposición de Paris de 1854. Para entonces el empleo del hormigón armado debía de haberse extendido en buena medida, como prueba el hecho de que el ingeniero francés Malot, encargado de considerar la solicitud de patente por parte de Lambot, estimo que las construcciones ya ejecutadas con este material eran tan simples y naturales que no se justificaba la concesión de patentes. Lambot debió insistir tanto que, finalmente, le fue concedida la dichosa patente. En el documento aparece, a parte de la barca, el diseño de algo parecido a una viga de hormigón armado y a un soporte de sección rectangular con cuatro barras de hierro.

Parece que el citado Monier visita la Exposición de Paris, y en un sentido pragmático y comercial le lleva a discurrir que la técnica de construcción de la barca puede ser la misma que permita la construcción de jardineras e, incluso, paneles de celosía formados por mortero armado, y así en 1867 patenta una jardinera con mortero de cemento armado con varillas de acero de pequeño diámetro. De forma progresiva, entre 1868 y 1875, extiende sus patentes a tuberías, puentes y pasarelas, depósitos y hasta féretros. Presenta diferentes detalles de otros tantos "inventos" en hormigón armado poco tecnificados.

En 1884 Monier vende las licencias obtenidas a Austria y Alemania, compradas por los ingenieros Gustav-Adolf Wayss y Conrad Freitag, de la firma Wayss und Freitag. Tras la venta Monier queda entro en decadencia y murió en la miseria.

A partir de la compra de la patente por los mencionados ingenieros, las armaduras, dispuestas con más intuición que juicio técnico, empiezan a situarse como aconsejan las reglas de la Mecánica y, sobre todo, la experiencia.

En los Estados Unidos aparece también una patente, prácticamente simultánea con la de Monier en Europa, presentada por el abogado e ingeniero Taddeus Hyatt quien, a diferencia de su coetáneo gozo de los beneficios de los derechos de su patente.

Con notable intuición y sentido estructural, este pionero del hormigón armado disponía las barras de acero en las zonas de tracción, levantándolas cerca de los soportes y anclándolas adecuadamente en la zona de compresión. Además dispone armadura transversal, vertical, en las zonas próximas a los apoyos.

En 1870 se realiza el primer edificio con estructura de hormigón armado y con materiales convencionales, y se evidencia que no es tan cierta la idea de que una estructura de hormigón tengan vida ilimitada por durabilidad, más bien permitía augurar un excelente comportamiento en el tiempo.

Así las cosas hacia 1890 y 1900 Hennebique tras diez años en estudiar el comportamiento de estructuras de hormigón, le permite definir la posición de las armaduras y toda clase de detalle en los armados, publicando las nuevas ventajas y posibilidades del nuevo material.

La apuesta de Hennebique triunfo, por seria, rigurosa y convincente. A partir de comienzos del siglo XX el empleo del hormigón armado se generalizó por todo el mundo. El sistema tuvo aceptación inmediata y, sustentando en una base suficiente, compitió exitosamente con los viejos procedimientos, tanto en edificación como en obra civil.

"La aparición de un nuevo material nunca desplaza al anterior; antes bien, tiene como efecto descubrir la verdadera esencia (y el verdadero campo de aplicación) del

material anterior, que resulta así más valorado. Esto es así en cualquier ámbito: arte, vida, etc."¹³

6.6.4 Diseño Flexión

6.6.4.1 Primeros Estudios de Comportamiento y Dimensionamiento

¹⁴Las primeras teorías y métodos de cálculo son publicados por Konen y Wayss en 1866. Un año más tarde Wayss y Bauschinger publican los resultados experimentales obtenidos. Sus conclusiones son las siguientes:

1. Entre el hormigón y el acero existe una adherencia de de magnitud considerable.
2. Incluso con cambios de temperatura notables y rápidos, no se produce una separación entre el hierro y el hormigón circundante.
3. Las armaduras insertadas en el hormigón permanecen completamente pulidas y exentas de óxido tras un periodo de tiempo prolongado.

A comienzos del siglo XX se publican las primeras instrucciones francesas y alemanas. Los métodos de cálculo permiten tratar el problema del dimensionamiento a flexión y cortante.¹⁴

¹³"Notas para una historia del Hormigón Estructural " UD HORMIGÓN ESTRUCTURAL JLG. ED. 02 Prof. Meseguer, García.

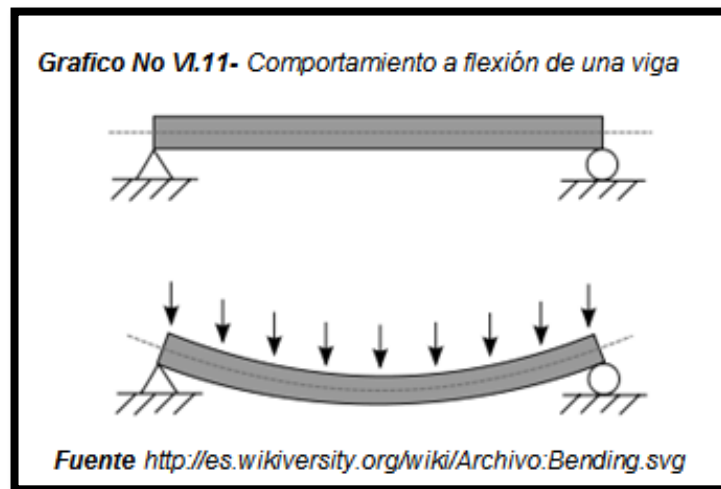
¹⁴"Notas para una historia del Hormigón Estructural " UD HORMIGÓN ESTRUCTURAL JLG. ED. 02 Prof. Meseguer, García.

6.6.4.2 Comportamiento a flexión

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

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

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



En vigas en concreto la flexión se manifiesta con una fisura en la fibra sometida a tensión.

6.6.4.3 Hipótesis de Diseño a Flexión

- El acero debe ir en las fibras que se tensionan

- Las deformaciones tanto para el concreto como para el acero son directamente proporcionales a la distancia desde el eje neutro.

- La deformación máxima del hormigón en su fibra más comprimida es igual $\xi_c = 0.003$

- Cuando la deformación del Acero ξ_s es menor o igual a su deformación máxima ξ_Y entonces el esfuerzo de trabajo del Acero es menor que el límite de fluencia f_y .

Cuando la deformación del Acero es mayor que su deformación máxima entonces el esfuerzo de trabajo del Acero es igual a su límite de fluencia.

$$\xi_s \leq \xi_Y \quad \longrightarrow \quad f_s < f_y$$

Diseño Dúctil

$$\xi_s > \xi_Y \quad \longrightarrow \quad f_s = f_y$$

Viga Doblemente Armada

$$f_y = E_s * \xi_Y$$

- El hormigón trabaja perfectamente a compresión mientras que su trabajo a flexión se considera nulo.

- El diagrama de esfuerzos reales del hormigón es una parábola.

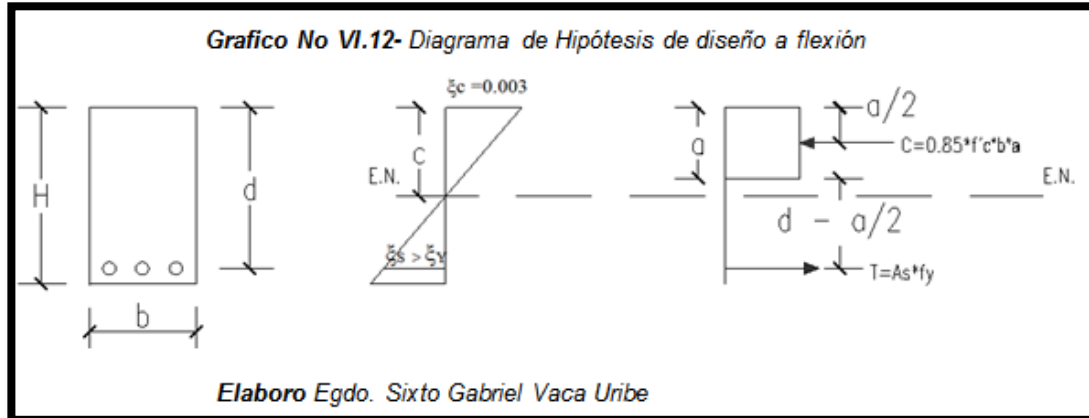
- Al diagrama real de esfuerzos lo podemos transformar en un diagrama o bloque rectangular equivalente cuya fuerza resultante debe ser igual a la fuerza resultante de la parábola para ello a la distancia c se la debe multiplicar por un factor β_1 que toma como valor mínimo 0.65 y como máximo 0.85.

El valor β_1 se debe tomar igual a 0.85 para resistencias $f'c$ de 280 Kg/cm^2 y se deberá disminuir en forma progresiva 0.05 por cada 70 Kg/cm^2 de resistencia en exceso de 280 Kg/cm^2 .

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 \frac{f_c - 280}{70}$$

$$\beta_1 = 1.05 - \frac{f_c}{1400}$$

-En el siguiente diagrama se pueden apreciar todas las hipótesis planteadas:



Nomenclatura:

c : es la distancia desde el eje neutro hasta la fibra más comprimida

H : altura de la sección transversal

b : base de la sección transversal

r : es la distancia que va desde el centro de gravedad de los aceros de refuerzo hasta la fibra más tensionada, se denomina recubrimiento.

d : peralte efectivo

C : resultante de los esfuerzos de compresión

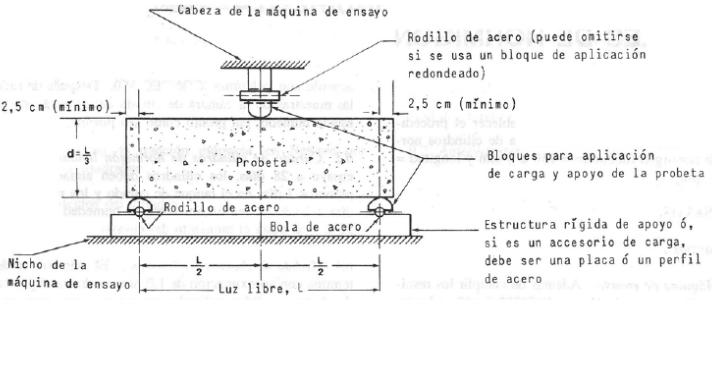
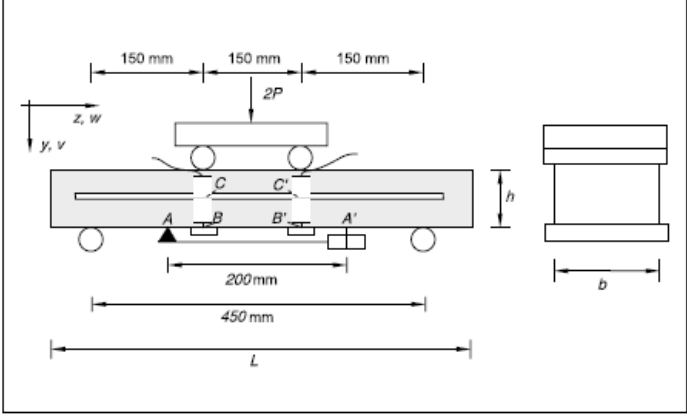
T : resultante de los aceros de tensión

a : altura rectangular del bloque equivalente

El ACI 318-02 establece un factor de reducción de capacidad para elementos sometidos a flexión 0.90

6.6.4.4 Ensayo

Tabla No VI.14- Norma ASTM para ensayos a compresión en vigas

TIPO	NORMA ASTM	DESCRIPCION	GRAFICO
FLEXIÓN	ASTM C 293-79	Método estándar para determinar la flexión del concreto (Usando una viga con carga en el centro de la luz)	 <p>Figura 1. Esquema del aparato para determinar la resistencia a flexión del concreto mediante la aplicación de carga en el centro de la luz.</p>
TIPO	NORMA ASTM	DESCRIPCION	GRAFICO
FLEXIÓN	ASTM C 78-84	Método estándar para determinar la flexión del concreto (Usando una viga con carga en los tercios de la luz)	

Fuente: http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPMJ09/enright_spmj09.html

6.6.5.1 Presentación histórica de los trabajos de investigación

Al finalizar la segunda guerra mundial, las investigaciones sobre refuerzos se orientan hacia la posibilidad de unión de elementos por encolado. Con la aparición de sistemas poliméricos, que polimerizan a temperatura ambiente y, que poseen características resistentes y adhesivas adecuadas para transmitir esfuerzos importantes, se busca la posibilidad de encolar externamente armaduras pasivas de tracción en forma de bandas de acero a vigas de hormigón, para reforzar elementos estructurales.

Los primeros trabajos de investigación sobre refuerzos mediante bandas de acero encoladas al hormigón.

¹⁵"Una viga sometida a flexión bajo la acción de los incrementos de carga se encuentra sometida a aumentos de tensiones que se repartirán entre la armadura existente y la banda de refuerzo de acero encolada"¹⁵

La aparición de nuevos materiales, como la fibra de carbón y nuevas resinas sintéticas con mejores características mecánicas y de manipulación, han dado un giro en la investigación.

Si bien es cierto que con respecto al refuerzo con bandas de FRP había poca información técnica y por supuesto carencia de normativa en la mitad de la década de 1990, también es verdad que con respecto a los encolados con chapas de acero si existía en esos años una amplia experiencia y recomendaciones fruto de muchos trabajos de investigación que se habían realizado.

¹⁵L' Hermite: *"Reinforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie par collage."*
Annales ITBTP 349

Posteriormente el ACI 440.2R-02 presenta una guía muy completa para el diseño de refuerzo de estructuras mediante encolados externos con FRP.

6.6.6 Caracterización de los Materiales Compuestos

En el presente, la industria de la construcción e ingeniería ha empezado a conocer las bondades y ventajas de nuevos materiales estructurales de naturaleza sintética, provenientes de procesos químicos sofisticados; hoy en día conocidos como materiales compuestos.

Dichos materiales en un principio sólo eran usados como materiales arquitectónicos o decorativos, pasando después a tener aplicaciones estructurales en construcción, en aeronáutica y posteriormente aplicaciones de reparación tanto estructural como estético, llegando a ser conocidos estos materiales como compuestos estructurales.

Es cada vez más evidente la aplicación de materiales compuestos desde la última década, ya que tiempo atrás, su aplicación era prácticamente inexistente. Las ventajas de estos materiales se hicieron cada vez más evidentes al empezar a aplicarlos en diversas construcciones sometidas a las acciones de ambientes agresivos, plataformas marinas, depósitos, anclajes al terreno, construcciones no conductivas y no magnéticas, refuerzos de estructuras, armaduras pasivas, armaduras activas, cables, recubrimiento de túneles, etc.

Para poder entender y predecir hasta cierto punto el comportamiento de los materiales compuestos es necesario conocerlos un poco más, tanto en las características de los materiales como en el comportamiento de éstos durante su proceso de aplicación, sin necesidad de entrar necesariamente en aspectos muy complejos de ingeniería química.

El refuerzo FRP adherido a la cara en tensión de un elemento de concreto a flexión con las fibras orientadas a lo largo de la longitud del elemento proporcionara un incremento en la capacidad a flexión.

Se han documentado incrementos globales en la capacidad a flexión entre el 10 y el 160% (Meier y Kaiser 1991; Ritchie et al 1991; Sharif et. al 1994). Sin embargo, cuando se toman en cuenta los límites de ductilidad y de servicio, los incrementos del 6 al 40% son más razonables.

6.6.6.1 Conceptos de Materiales Compuestos

Los materiales compuestos o “composites” deben su nombre a que están formados por dos o más materiales, fases o constituyentes, que actúan de manera conjunta y solidaria.

Se consiguen, de esta manera, unas prestaciones óptimas en cuanto a comportamiento mecánico, principalmente, que no pueden ser obtenidas en los materiales originales.

Además de matriz y refuerzo existen otros tipos de componentes como cargas y aditivos que dotan a los materiales compuestos de características peculiares para cada tipo de fabricación y aplicación.

El refuerzo en el material compuesto aporta la resistencia mecánica, rigidez, dureza y va a ser determinante para obtener las principales propiedades mecánicas. Las características más sobresalientes corresponden a su resistencia a la tracción específica y su elevado módulo de elasticidad. También cabe destacar su alta fragilidad.

La matriz tiene por su parte la misión de transmitir los esfuerzos al refuerzo, hace la función de aglomerante y protección del mismo. A su vez, aporta mayor flexibilidad y proporciona la forma. Tiene menor resistencia que el refuerzo.

Tabla No VI.15- Materias primas de los materiales compuestos

REFUERZO	Cerámicas (carburo de silicio, alúmina)
	Metálicas
	Orgánicas (aramida, polietileno)
	Inorgánicas (carbono, vidrio, boro)
MATRICES	Matrices Inorgánicas (cemento, yeso)
	Matrices Termoestables (epoxi, viniléster, poliéster, fenólica)
	Matrices Termoplásticas (polipropileno, policarbonato, acetato)

Fuente: TRABAJO FIN DE MÁSTER - MÁSTER EN EDIFICACIÓN. ESPECIALIDAD TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN - Javier López Molina

Aunque esta definición incluye una gran diversidad de materiales (entre los materiales de construcción, el hormigón armado es el ejemplo más habitual), en este trabajo se utiliza el término material compuesto para referirse a los polímeros armados con fibras (fiber-reinforced polymers, FRP)

Las características finales de un material compuesto dependen de las propiedades de las fases, de la proporción en que se encuentran cada una de ellas, de la geometría (forma, tamaño, orientación) y grado de dispersión de la fase dispersa en la matriz.

Existen clasificaciones de los materiales compuestos en función de cada una de sus fases:

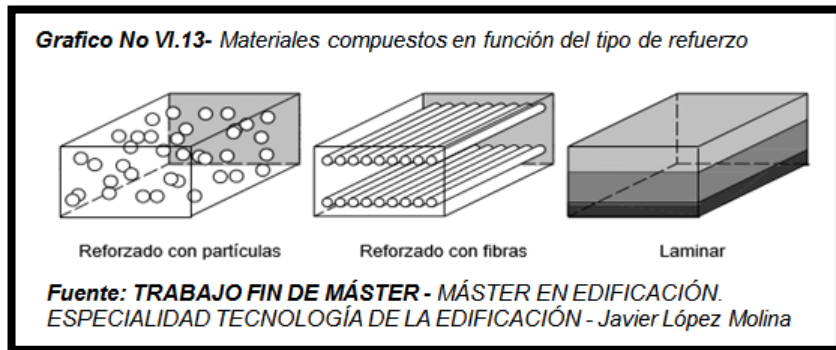
Dependiendo del tipo de matriz empleado

- Compuestos de matriz polimérica (PMC):

- Resinas de poliéster y resinas epóxicas reforzadas con fibra de vidrio, fibra de carbono o fibra de aramida.
- Compuestos de matriz metálica (MMC):
 - Aleaciones de aluminio, titanio y magnesio.
- Compuestos de matriz cerámica (CMC):
 - Alúmina, carburo de silicio.

Dependiendo del tipo de refuerzo empleado

- Compuestos particulados: Partículas en una matriz.
- Compuestos fibrosos: Fibras en una matriz.
- Compuestos laminados: Capas o láminas alternadas de las fases.



Los compuestos de matriz polimérica corresponden al grupo de materiales compuestos más empleado en el refuerzo de estructuras de hormigón armado, por lo que a continuación se estudiará de forma más ampliada y analizaremos las características que les proporcionan su aplicación en la práctica de los refuerzos de estructuras.

Un compuesto estructural es un sistema material consistente de dos o más fases en una escala macroscópica, cuyo comportamiento mecánico y propiedades están

diseñados para ser superiores a aquellos materiales que lo constituyen cuando actúan independientemente.

- materiales compuestos de matriz Orgánica o **RP (Reinforced Plastics)** y dentro de estos, son los más utilizados:

- los CFRP (CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS) o materiales compuestos de fibra de carbono con matriz orgánica,
- los GFRP (GLASS FIBER REINFORCED PLASTICS) o materiales compuestos de fibra de vidrio con matriz orgánica.

Tal y como se han resaltado, los materiales compuestos más utilizados son los de matriz **orgánica** y refuerzos en forma de **fibras**.

Los materiales compuestos pueden operar en ambientes hostiles por grandes periodos de tiempo. Estos materiales tienen grandes periodos de vida bajo fatiga y su mantenimiento y reparación son muy fáciles.

Sin embargo, presentan sensibilidad a ambientes hidrotermales, donde existen cambios severos de humedad de la atmósfera, causando daños durante su vida de servicio, y pudiendo crecer los daños internos. Para poder detectar y pronosticar estos posibles daños, se requiere de sofisticadas técnicas no destructivas.

Algunas veces es necesaria la aplicación de capas protectoras contra la erosión, el daño superficial y contacto con la luz, principalmente la luz solar, ya que la luz solar es portadora de los rayos ultravioleta, los cuales son causantes de que se rompan las cadenas moleculares de los polímeros. (*Recuero, 1997*).

6.6.6.2 Matrices orgánicas

Antes de describir los distintos tipos de matrices orgánicas, conviene repasar cuales son las funciones que debe cumplir la matriz. Estas son:

- Dar estabilidad al conjunto, transfiriendo las cargas al refuerzo.
- Proteger al refuerzo del deterioro mecánico y químico.
- Evitar la propagación de grietas.

Para todo ello, se debe dar una buena adherencia entre la matriz y el refuerzo.

Las matrices orgánicas (más vulgarmente conocidas como plásticos) pueden ser:

- TERMOPLÁSTICOS, usadas en aplicaciones de bajos requisitos, aunque se están empezando a emplear termoplásticos avanzados para altas prestaciones.
- ELASTOMEROS, utilizadas en neumáticos y cintas transportadoras,
- DUROPLÁSTICOS o TERMOESTABLES, las más empleadas en materiales compuestos de altas prestaciones.

Entre los duro plásticos, también denominados RESINAS (todos ellos necesitan un proceso de curado para alcanzar su estructura reticulada) encontramos los siguientes tipos de materiales para matrices:

- EPOXIS, que son las de uso más general en altas prestaciones, con una temperatura máxima de uso en torno a los 170°C.
- BISMALEIMIDAS (BMI), para altas temperaturas (hasta 250°C).
- POLIAMIDAS (PI), también para aplicaciones de altas temperaturas, en el entorno de los 300°C.
- FENOLICAS, resistentes al fuego. Utilizadas, por ejemplo, en mamparas contra incendios y paneles interiores de aviones.

- POLIÉSTERES, poco usados por sus bajas características mecánicas. Además, absorben mucha agua y se contraen al curar.
- CIANOESTERES, utilizadas en aplicaciones radioeléctricas (antenas), ya que presentan baja absorción de humedad y buena "tangente de pérdidas" (característica radioeléctrica de los materiales).

6.6.6.3 Descripción de las Fibras

Este apartado sólo pretende dar una breve descripción de las fibras como material de refuerzo con la finalidad de valorar las bondades y limitaciones de las fibras en las que nos ocuparemos en este trabajo.

Son tres los tipos de fibras sintéticas que, fundamentalmente, se utilizan para reforzar:

Fibras de Vidrio

Fibras Orgánicas (*Aramida*)

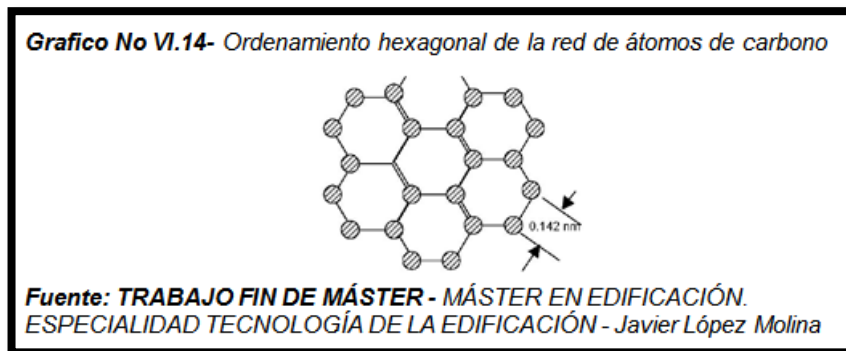
Fibras de Carbono

Existe otro tipo que son las fibras metálicas, aunque su aplicación esta más enfocada al refuerzo del hormigón formando parte del mismo en forma homogénea. Respecto a los otros tipos de fibras podemos comentar que el vidrio, es sin duda una de las fibras más extendida para el refuerzo plástico, siendo la de más bajo precio y, por otra parte, las fibras Orgánicas y de Carbono son fibras muy consistentes y de baja densidad, por lo que tiene múltiples aplicaciones, fundamentalmente hoy día, en el ámbito aeroespacial y aplicaciones de ingeniería, a pesar de su elevado precio.

Enseguida se da una descripción de la Fibra de Carbono que es la que nos enfocaremos en el presente estudio.

6.6.7 Fibras de Carbono

Las fibras de carbono de alta resistencia y alto módulo tienen un diámetro de 7 a 8 μm y constan de pequeñas cristalitas de grafito “turbostrático” (una de las formas alotrópicas del carbono) En un monocristal de grafito los átomos de carbono se ordenan en redes hexagonales.



Se distinguen los siguientes tipos:

- De muy alto módulo (para aplicaciones que requieran rigidez, 500 GPa de Módulo elástico)
- De alto módulo (400 GPa)
- De módulo intermedio (300 GPa)
- De alta resistencia (200 GPa)

El módulo de elasticidad de las fibras de carbono depende del grado de perfección de la orientación, la cual varía considerablemente con las condiciones y proceso de fabricación. Las imperfecciones en orientación dan como resultado, huecos de forma compleja, alargados y paralelos al eje de la fibra. Estos actúan como puntos de concentración de tensiones y puntos débiles que llevan a la reducción de las propiedades. Otras causas de debilidad, que se asocian a menudo al proceso de fabricación, incluyen las picaduras y las macrocristalitas.

6.6.7.1 Proceso de Obtención de las Fibras de Carbono

Se producen a partir de los elementos como el poliacrilonitrilo (PAN). La elaboración de las fibras de carbono basándose en fibras (PAN) tiene lugar en tres fases:

La primera las fibras (PAN) se estiran y se distribuyen para su establecimiento en paralelo y mantenidas en tensión, se procede a su oxidación por la acción del aire y temperaturas que rondan entre los 200 - 220°C.

En la segunda fase el procedimiento de carbonización se lleva a cabo por pirolisis, es decir, descomposición del oxígeno, hidrógeno y nitrógeno por acción calorífica en ambientes inertes y con temperaturas que oscilan desde los 1000 a los 1500° C.

El resultado es que se fortalece en grado sumo la resistencia a la tracción de este material debido a que durante el tratamiento de carbonización se contribuye en el interior de cada fibra unos filamentos o bandas de esqueletos estratificados como el grafito. En la última fase se consigue aumentar el punto de ubicación de los cristales modelo grafito dentro de cada fibra. Estas fibras de grafito llegan a contener hasta un 99% de carbono.

Las fibras de carbono también tienen su clasificación:

Fibra de carbono Tipo 1. Se aplica la mayor temperatura en su proceso de elaboración, es la más firme de las conocidas.

Fibra de carbono Tipo 2. Se carboniza a temperaturas que la dotarán de la superior resistencia a la tensión o estiramiento.

Fibra de carbono Tipo 3. Su fabricación se lleva a cabo a temperaturas más inferiores, da lugar a una fibra más barata, de provechosa resistencia pero de rigidez más escasa que las dos anteriores.

6.6.7.2 Orientación de las Fibras de Carbono

¹⁶ Existen tres procedimientos principales para producir fibras con las capas gráficas orientadas preferencialmente paralelas al eje de la fibra como se describen enseguida:

a) **Orientación del polímero precursor por estiramiento.** El PAN se emplea como material de origen, el cual es un polímero que se asemeja mucho al polietileno en su conformación molecular en la que cada grupo lateral alternado de hidrógeno del polietileno es reemplazado por un grupo nitrilo. En el primer estado del proceso la masa de PAN se convierte en una fibra que se estira entonces para producir la orientación de las cadenas a lo largo del eje de la fibra.

Cuando se la calienta la fibra estirada, los grupos activos nitrilo interaccionan y producen un polímero en escalera que consta de una fila de anillos hexagonales. Mientras la fibra está todavía bajo tensión se calienta en una atmósfera de oxígeno que conduce a la siguiente reacción química y a la formación de enlaces cruzados entre las moléculas de la escalera.

El PAN oxigenado se reduce entonces para dar la estructura de anillo de carbono que se convierte en grafito turbostrático por calentamiento a temperaturas más altas. El módulo de elasticidad y la resistencia de las fibras dependerá de la temperatura del tratamiento de calentamiento final que determina el tamaño y la orientación de las cristalitas.

b) **Orientación por hilado.** Este método consta del moldeo de hilos de alquitrán fundido para producir fibras. Durante este proceso de hilado los efectos hidrodinámicos en el orificio la orientación de las moléculas planas, pudiéndose inducir diferentes clases de orientación. EL hilo se hace infundible por oxidación a temperaturas por debajo de su punto de ablandamiento para evitar la fusión de los

filamentos en un conjunto. Se carburiza entonces a temperaturas normalmente alrededor de los 2000°C.

Se requerirán esfuerzos de tracción durante algunas de estas etapas para prevenir la relajación y pérdida de la orientación preferencial.

c) **Orientación durante la grafitización.** A temperaturas muy altas las fibras carburizadas a partir de rayón, alquitrán o PAN pueden estirarse durante la etapa de grafitización. Esto tiene como consecuencia el deslizamiento de las capas de grafito unas sobre otras y la posterior orientación de las capas paralelamente al eje de la fibra.

6.6.7.3 Clasificación de hilados comerciales destinados al refuerzo de materiales

Independientemente del tipo de material en que estén hechas, las fibras pueden presentarse en forma de:

- HILOS, conjunto de fibras asociadas en un cilindro de diámetro uniforme y longitud indefinida.

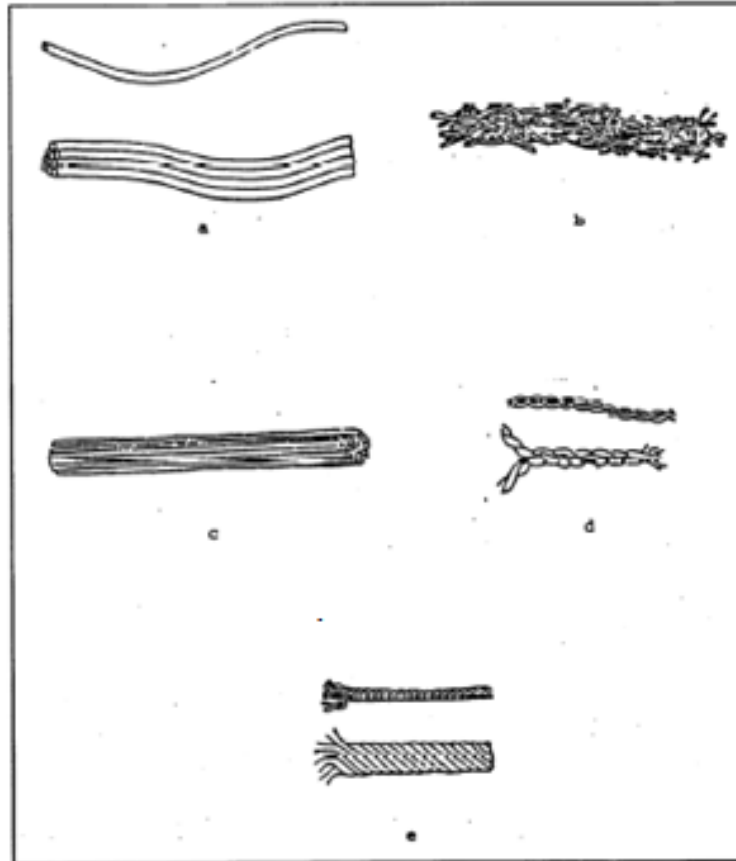
- Dos o más hilos se pueden retorcer sobre sí mismos y formar hilos más gruesos.

- Su densidad se expresa como el peso en gramos de 9.000 metros de hilo (DERNIER).

- Su resistencia, denominada tenacidad, se mide en gramos por DERNIER.

Grafico No VI.15- Diversas formas de presentación de los hilos CFRP:

- a) uno o más filamentos continuos
- b) filamento no continuo o fibras cortadas
- c) filamento continuo, unido sin torsión
- d) hilos simples o doblados, retorcidos juntos
- e) muchos hilos doblados juntos



Fuente: LRichardson & Lokensgard "Industria del plástico".
Madrid. Editorial Paraninfo, 2002.

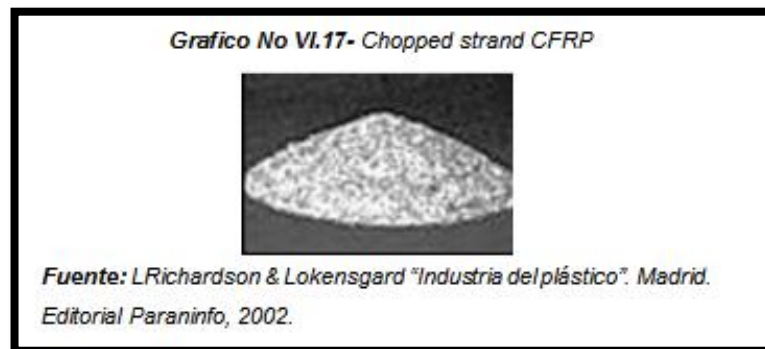
CINTAS ('TAPES'), hilos dispuestos paralelos en forma unidireccional.

Sólo se presentan en forma de pre impregnados, en los que el refuerzo viene impregnado en resina sin polimerizar en estado semilíquido y sirve como ligante de los hilos.



- **Chopped strand:** consiste en fibras cortadas entre 2 a 50 mm, en diferentes longitudes para ser pulverizados con resina o ser adicionados a masillas resinosa.

Del mismo modo, disponemos de fibras trituradas que se añaden a las resinas para aumentar la viscosidad y la resistencia del manufacturado. Su utilización queda reservada a tareas de aplicación por pistola a presión en simbiosis con resina.



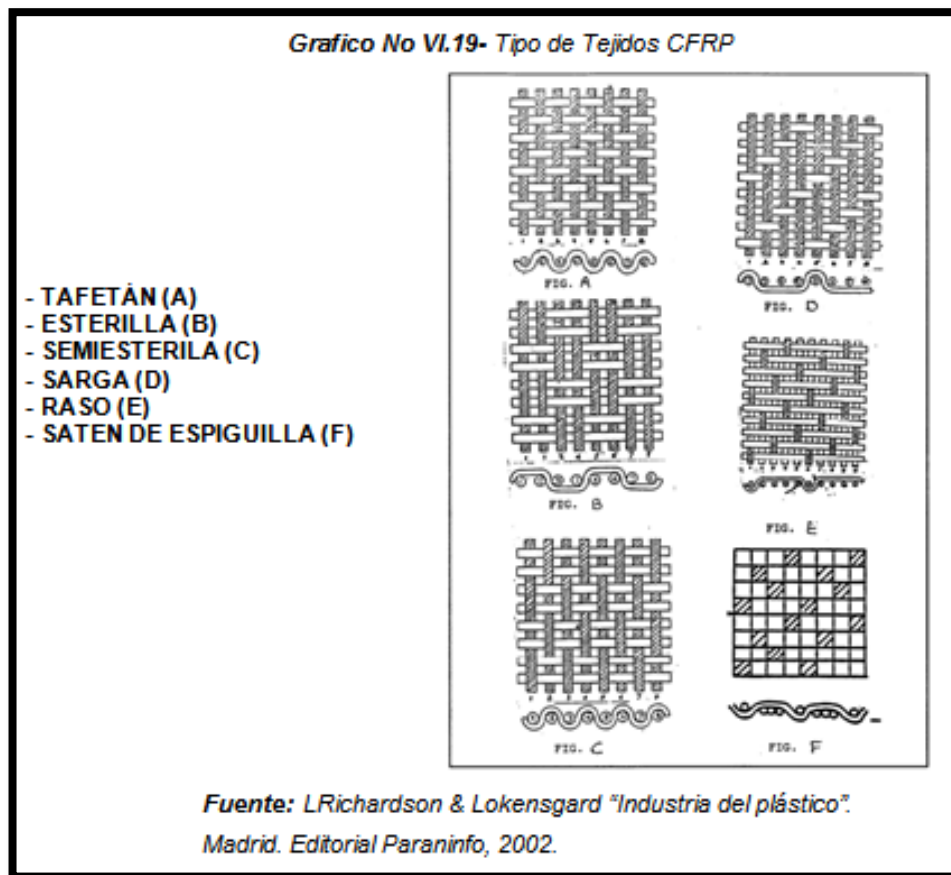
FIELTROS, hilos continuos o cortados depositados de forma multidireccional, aleatoriamente.

Hay que puntualizar que se adaptan mejor a las formas complicadas pero tienen el inconveniente de que son menos resistentes que los tejidos. Matizamos que la

resistencia que ofrecen estos fieltros de fibras cortadas al azar es igual en todas las direcciones.



TEJIDOS ("FABRICS), productos en los que los hilos se entrelazan perpendicularmente. Según la forma de cruzarse, los tejidos se denominan.



Los tenemos en una amplia gama de formas cuya diferencia se aprecia en el tipo de tejido, en el peso por metro cuadrado y en la naturaleza de la fibra empleada.

Los tejidos se dividen en tres grupos:

a) Taffetas o telas, en las que cada hilo de la urdimbre y trama pasa sucesiva y regularmente por encima y por debajo de los hilos que cruza. Urdimbre y trama tienen igual relieve en ambas caras del tejido.

b) Las Sargas, en cuya confección, dos o más hilos se cruzan en forma alternada por encima y por debajo de igual número de hilos en trama o urdimbre, respectivamente. Se caracterizan por presentar un típico esquema de líneas diagonales en su superficie.

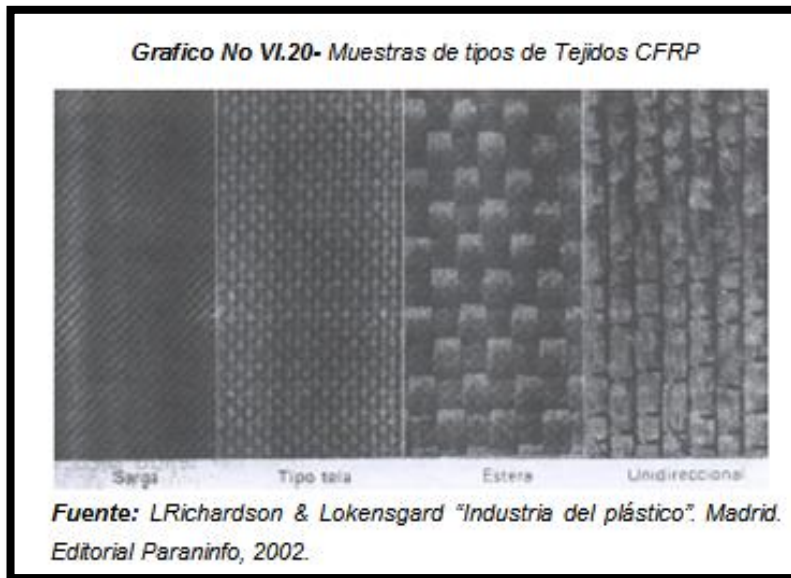
c) Los Satens o Rasos, los hilos de la trama y de la urdimbre pasan primero por debajo o por encima, del primer hilo que cruzan, luego por encima o por debajo de tres, cuatro, siete o más hilos (hilos flotantes), y así sucesivamente.

Hay que subrayar que los tejidos no son aptos para adaptarse a formas complicadas, sin embargo se pueden acoplar como refuerzo adicional a los mats de superficie. Su precio es más elevado que el de las esteras Mat pero como beneficio, proporcionan la mayor resistencia física de todas las formas fibrosas.

Merecen ser nombrados tres tipos de tejido fibroso:

1) Tejido cuadrado: presentan una resistencia mecánica en sentido a los tejidos, determinada por el sentido de la urdimbre y de la trama.

2) Tejido unidireccional: presentan una resistencia mecánica en una sola dirección determinada por el sentido de la urdimbre.



3) Mechas conformadas de tejido cuadrado.

Pre impregnados o Pre-Preg: son fibras englobadas en una resina no polimerizada, el agente de curado permanece en estado latente y sólo desarrolla su labor cuando se separa el plástico de la fibra y se aplica calor y/o presión. Vienen presentadas a modo de cintas de diversas longitudes o como de finas hojas que pueden llegar a alcanzar más de dos metros.

Recomendamos el empleo de los Pre-preg en la obtención de esculturas geométricas y de superficies lisas y amplias.¹⁶



¹⁶LRichardson & Lokensgard "Industria del plástico". Madrid. Editorial Paraninfo, 2002.

6.6.7.4 Propiedades Físicas de la Fibra de Carbono

<i>Tabla No VI.16- Propiedades Físicas de la Fibra de Carbono</i>	
CRITERIO	REFUERZO CON PLATABANDAS DE FRP
Peso Propio	Bajo
Resistencia a la Tracción	Muy Alta
Espesor	Muy bajo
Corrosión	Ninguna
Longitud de las Platabandas	Cualquiera
Manejo	Flexible, fácil
Capacidad de Carga	En dirección longitudinal únicamente
Cruces	Fácil
Comportamiento a la Fatiga	Sobresaliente
Costo de Materiales	Alto
Costo de Instalación	Bajo
Aplicación	Herramientas menores

Fuente: TRABAJO FIN DE MÁSTER - MÁSTER EN EDIFICACIÓN. ESPECIALIDAD TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN - Javier López Molina

6.6.7.4.1 Estabilidad Térmica

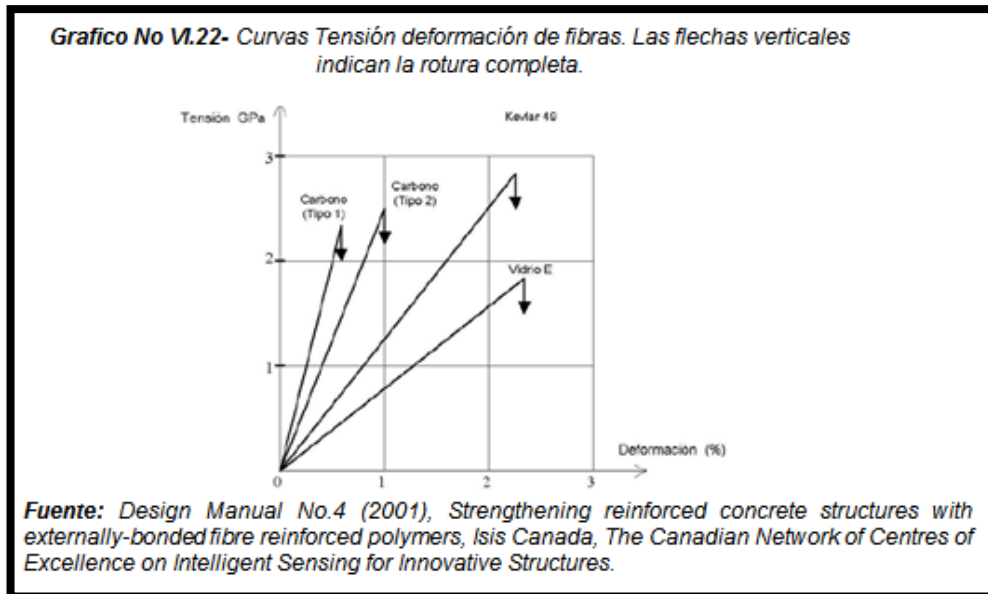
En ausencia de aire y de otras atmósferas oxidantes, las fibras de carbono poseen unas propiedades excepcionalmente buenas a altas temperaturas. La resistencia y el módulo elástico dependen de la temperatura final del tratamiento térmico, como ya hemos comentado. Las fibras de carbono mantienen sus propiedades a temperaturas por debajo de los 2000°C. Para aplicaciones que incluyan matrices de polímeros esta propiedad no puede ser aprovechada porque la mayoría de las matrices pierden sus propiedades aproximadamente por encima de los 200°C.

6.6.7.4.2 Resistencia a la Compresión

La resistencia a la tracción es fácil de medir, no así la compresión: Pueden fallar a cortadura, aplastamiento o pandeo. La tensión de pandeo de una barra cilíndrica. Estas propiedades son difíciles de medir y sólo pueden inferirse a partir de las propiedades de los materiales compuestos fabricados con dichas fibras. Se ha encontrado que la rigidez axial en compresión es aproximadamente la misma que en tracción para todas las fibras.

6.6.7.4.3 Flexibilidad y Rotura de la Fibra

¹⁷ Las curvas “tensión – deformación”, mostradas en el Grafico No VI.26- sugiere que todas las fibras rompen de manera frágil a tracción sin ninguna deformación plástica o fluencia. Las láminas de fibras de carbono y vidrio son frágiles y se rompen sin ninguna reducción de su sección transversal, en contraste con las láminas de fibras de Aramida, las cuales rompen de manera dúctil, con un pronunciado estrechamiento local muy grande. La fractura de las láminas a menudo implica el deshilachado de las fibras (*Hull, 1987*).



6.6.7.5 Criterios para la selección de fibras de refuerzo

Tendremos en cuenta los siguientes aspectos:

1. Ha de ser de calidad y ser compatible con la resina de poliéster.
2. Estará totalmente exento de humedad.
3. Deberá, imprescindiblemente, ser bien impregnado con la resina.
4. Se deberán conocer las características de los diferentes tipos de refuerzos, para no equivocarnos en la elección de éstos.¹⁷

6.6.7.6 Propiedades de la fibra para el ensayo - EMPRESA ADMIX CIA. LTDA CARBOWRAP 300 CFRP

Descripción - Sistema Compuesto Setmix - Empresa Admix: Refuerzo Estructural.- El Carbowrap 300 CFRP de Setmix, está conformado por el Tejido de refuerzo VCF-900 de fibra de carbono unidireccional de alta resistencia (aerospace grade).

USO.- Epowrap CFRP es usado para reforzar puentes, edificios y otras estructuras.

VENTAJAS

- Buenas propiedades a altas y bajas temperaturas
- Tiempo alargado de trabajo
- Alta resistencia y alto módulo de tensión
- Curado al ambiente
- 100% libre de solventes

¹⁷*Design Manual No.4 (2001), Strengthening reinforced concrete structures with externally-bonded fibre reinforced polymers, Isis Canada, The Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures.*

CUBRIMIENTO.- Aproximadamente 55m² con un rollo de Tejido de refuerzo VCF-0900 (91mx0,61m).

Tabla No VI.17- PROPIEDADES DE LA LAMINA		
Propiedades	ASTM	Valor Típico de ensayo Diseño: refiérase a ACI
Resistencia ultima a tensión en la dirección principal de la fibra	D-3039	446 Kg/cm ancho 842 MPa
Elongación a la rotura	D-3039	1.2%
Módulo de Tensión	D-3039	69.6 GPa
Resistencia ultima a tensión de la fibra a 90° de la principal	D-3039	0
Espesor de la lámina (normalizada)		0.50mm

Fuente: EMPRESA ADMIX CIA. LTDA CARBOWRAP 300 CFRP

Tabla No VI.18- PROPIEDADES DE LA FIBRA EN SECO	
Resistencia Tensión	550000psi 3.79 GPa 38750 Kg/cm ²
Módulo de Tensión	33.4x10 ⁶ psi 230GPa
Elongación a la rotura	1.8%
Densidad	1.76g/cm ³
Peso por m ²	300gr
Resistencia ultima a Tensión	640 Kg/cm de ancho del refuerzo VCF-900

Fuente: EMPRESA ADMIX CIA. LTDA CARBOWRAP 300 CFRP

6.6.8 Descripción de las Resinas

La función del adhesivo es formar y conformar el material compuesto, y transmitir los esfuerzos rasantes movilizados entre el soporte a reforzar y el esqueleto de fibras resistentes.

Para una adherencia perfecta es preciso determinar: materiales a adherir, relación y requisitos de mezcla, tecnología de aplicación, temperatura y humedad de curado, técnicas de preparación de superficies, coeficientes de expansión térmica, fluencia, abrasión y resistencia química y viscosidades en adhesivos.

6.6.8.1 Conceptos

Hay conceptos importantes a ligados a la naturaleza de los adhesivos epoxi:

- Pot life: tiempo máximo de aplicación tras la mezcla de los dos componentes, debido a inicio de endurecimiento de la resina. Depende de la temperatura ambiente, cantidad de producto mezclado y tipo de resina.
- Tiempo abierto: tiempo máximo tras la aplicación del adhesivo sobre las superficies a unir, para adherirlas.
- Temperatura de transición vítrea: Temperatura de pérdida de propiedades: comportamiento vítreo a plástico sin prestaciones mecánicas. Esta temperatura es diferente para distintos polímeros y formulación. Inversamente ligado a la elasticidad del polímero.

El uso los adhesivos de naturaleza epoxi, viene motivado, por:

- Perfecta adherencia sobre multitud de soportes, especialmente soportes minerales: hormigón, mampostería, piedra.
- Largo tiempo abierto, facilitando los trabajos de puesta en obra.
- Elevada cohesión interna y adherencia.
- Posibilidad de elastificación, mediante adiciones.
- No forma subproductos tras el endurecimiento.
- Baja retracción en comparación a resinas de poliéster, vinilester y acrílicas.
- Baja fluencia, ni fatiga bajo carga sostenida.
- Formulación con tixotropía para trabajos en vertical y sobre cabeza.
- Capacidad de unión de soportes irregulares.

6.6.8.2 Naturaleza

La naturaleza empleada en los adhesivos estructurales empleados en construcción es, generalmente, epoxi. Según su uso requiere adición de fillers, fluidificantes, tixotropantes, promotores de adherencia, aditivos y pigmentos, entre otros. Las resinas epoxi bicomponentes deben tener la viscosidad y consistencia de acuerdo al modo de aplicación del refuerzo.

En las condiciones atmosféricas de aplicación las resinas deben ser trabajables y con pot-life (tiempo de endurecimiento dentro del conjunto) compatibles con el formato de presentación del producto.

Los productos planteados como alternativas a los adhesivos epoxi son:

- Adhesivos de poliéster, de rápido fraguado, aunque presentan eventuales problemas de retracción, alto coeficiente de expansión térmico, sensibilidad a medios alcalinos y mala adherencia sobre poliéster endurecido.

- Adhesivos de vinilester, con problemas de retracción y afectados en gran medida por el contenido de humedad del soporte.

Tabla No VI.19- Comparación de las propiedades de las resinas según su naturaleza

Resina	Densidad, kg/m ³	Resistencia a tracción, MPa	Módulo de Elasticidad, MPa	Elongación en rotura, %	Temperatura máxima, °C
Poliéster	1.2	50-65	3.0	2-3	120
Vinilester	1.15	70-80	3.5	4-6	140
Epoxi	1.1-1.4	50-90	3.0	2-8	120

Fuente: TRABAJO FIN DE MASTER - MASTER EN EDIFICACION. ESPECIALIDAD TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN - Javier López Molina

6.6.8.3 Propiedades

A continuación se presentan las propiedades mecánicas y físicas de las resinas epoxi, comparándolas con el hormigón y acero.

Tabla No VI.20- Propiedades genéricas de las resinas epoxi

Propiedades	Adhesivo Epoxi endurecido	Hormigón	Acero
Densidad, Kg/m ³	1100 - 1700	2350	7800
Módulo elástico, GPa	0.5 - 2	20 - 50	200
Módulo cortante, GPa	0.2 - 8	8 - 21	80
Coefficiente de Poisson	0.3 - 0.4	0.2	0.3
Resistencia Tracción, MPa	9 - 30	1.4	200 - 600
Resistencia Cortante, MPa	10 - 30	2 - 5	200 - 600
Resistencia a Compresión, MPa	55 - 110	25 - 150	200 - 600
Elongación en rotura %	0.5 - 5	0.015	25
Energía de Fractura, JM-2	200 - 1000	100	105 - 106
Coefficiente de expansión térmica 10 ⁻⁶ /°C	25 - 100	11 - 13	10 - 15
Absorción agua	0.1 - 3	5	0
Temperatura de transición vítrea	45 - 60	-	-

Fuente: TRABAJO FIN DE MÁSTER - MÁSTER EN EDIFICACIÓN. ESPECIALIDAD TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN - Javier López Molina

6.6.8.4 Requisitos

La selección del tipo de resina debe tener en cuenta el rango de temperaturas durante la aplicación así como una vez la estructura esté en condiciones de servicio. Merece especial atención el punto de transición vítrea de la resina, a partir del cual el producto empieza a perder propiedades mecánicas, con mayores deformaciones y menor rigidez. En general esta temperatura depende de la temperatura de curado, y se sitúa alrededor de 50-60°C. Adicionalmente a los criterios de resistencia estructural, debe prestarse especial atención a la producción de gases tóxicos durante la combustión, limitándose por parte de la propiedad los valores límites, y exigiéndoselos a los fabricantes.

6.6.8.5 Sistema Epóxico para el ensayo - EMPRESA ADMIX CIA. LTDA

No existe adhesivo universal que permita efectuar cualquier encolado. La elección del adhesivo es un sistema muy importante en la realización de un encolado estructural. Está condicionado por los materiales a encolar, el estado de las superficies, cargas que lleva el adhesivo, modos de aplicación y la calificación del operador.

El uso de formulaciones epoxídicas en la ejecución de refuerzos mediante pegado de armadura adicional, viene justificado por la alta adherencia sobre soportes de hormigón y materiales de adherencia, estabilidad dimensional, endurecimiento rápido e irreversible, resistencia a ataques químicos, elevadas resistencias mecánicas.

Las formulaciones epoxídicas son un conjunto resultante de la combinación de dos componentes principales, una base epoxídica y un endurecedor.

Las bases epoxídicas, llamadas también resinas epoxi, provienen de la reacción de la epidioridrina sobre el bisfenol, son productos de condensación que contienen grupos epoxi funcionales.

Los endurecedores son aminas, amidas, tiokoles y, raramente isocianatos. Son moléculas orgánicas con elevado número de grupos reactivos, que provocan un endurecimiento del conjunto. Cabe notar que las propiedades finales de la formulación, dependen fundamentalmente del tipo de endurecedor elegido.

Pueden añadirse cargas a las formulaciones para modificar propiedades de viscosidad, tixotropía, características mecánicas, solubilidad en agua, reactividad. Las cargas están constituidas por polvo o granulados, en general insolubles, y minerales.

Sistema epóxico epofix 300. El epofix 300 es un sistema epóxico de 2 componentes sin solventes, sin carga, de modulo alto, tixotrópico.

USO

2 a 3 unidades de 18Kg de epofix 300 con un rollo de Tejido de refuerzo VCF-1800 (91mx0,61m).

RELACION DE MEZCLA DE EPOFIX 300

100 partes de peso en componente A con 50 partes de componente B

ALMACENAMIENTO

Epoxico-2años en los envases originales sin abrir y guardado bajo techo a la sombra

Tabla No VI.21- Propiedades sistema Epóxico Epofix 300 genéricas de las resinas epoxi

	METODO ASTM	VALOR DE ENSAYO
Resistencia a Tensión	D-638	72.4 MPa
	TIPO I	10500 psi
Módulo de Tensión	D-638	3.18GPa
	TIPO I	461000 psi
Porcentaje de Elongación	D-638	5.0%
	TIPO I	
Resistencia a Flexión	D-790	123.4 MPa
		17900 psi
Módulo de Flexión	D-790	3.12 GPa
		452000 psi
Densidad a 23°C	ISO 868 - 1985	1.10g/cm ³
Tiempo de aplicación		1 hora a 18°C

Fuente: EMPRESA ADMIX CIA. LTDA CARBOWRAP 300 CFRP

6.6.9 Tratamiento de la superficie de Hormigón para reforzamiento

Operaciones previas

Tienen por objeto la eliminación del hormigón deteriorado y preparar la superficie de contacto para los trabajos de reparación posteriores.

-**Picado mecánico** con pistolete eléctrico o neumático, adecuado para pequeñas superficies y hormigones no excesivamente duros.

-**Chorro de arena**, proyectado mediante compresor. Este procedimiento esta indicado para hormigones blandos y muy deteriorados, permite al tiempo la limpieza de las armaduras.

-**Hidrodemolición**, con chorro de agua a presión que provoca el "arrancamiento" del hormigón de baja resistencia.

-**Limpieza de las armaduras** con chorro de arena o de arena-agua para la eliminación del óxido y sustitución de aquellas que hayan perdido una parte de su sección.



- **Imprimación y protección de las armaduras**

Mediante la protección de las armaduras se retrasa la aparición de la corrosión y se cubre completamente la armadura que ha quedado descubierta y facilita la unión con los morteros de reparación.



- Regeneración del Hormigón

Esta etapa comprende el proceso de reparación propiamente dicho. Tiene por objeto reemplazar el hormigón dañado recomponiendo su geometría original y sus características mecánicas mediante el uso de morteros especiales de gran adherencia sobre el soporte.

Las características que deben reunir los morteros de reparación son:

- Baja relación agua/cemento con el fin de obtener buenas prestaciones mecánicas, químicas, reducción de la porosidad y una mayor impermeabilidad.
- Tixotropía, cuando el mortero es proyectado permite su adherencia en estructuras verticales y techos.
- Gran trabajabilidad y facilidad de manipulación.
- Calidad uniforme.
- Excelente curado interno que evita la exudación y desecado de las superficies.
- Durabilidad garantizada a través del diseño de mezcla, a base de ligantes modificados y aditivos.

Dependiendo del nivel de los daños diagnosticados y, por tanto, del alcance de la reparación debe distinguirse entre:

- Reparación estructural, en los casos en los que se ve comprometida la capacidad de carga de la estructura por la profundidad de los daños.

- Reperfilado o reparación no estructural, cuando los daños sólo afectan a las zonas exteriores y el alcance de la reparación se limita a la regeneración del hormigón superficial y a la recuperación de la geometría original.

Reparación Estructural

Los problemas habituales que hacen necesario un refuerzo estructural son:

- Accidentes en la estructura: incendios, choques, etc.
- Errores de proyecto o de ejecución.
- Aumento de las cargas.
- Deterioro grave en las armaduras y en el hormigón.
- Nueva distribución de las cargas.

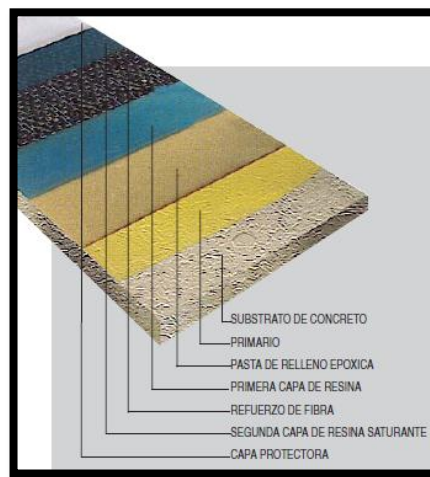
El refuerzo se realiza aumentando la sección del hormigón, en vertical u horizontal, en pilares, vigas, forjados, etc. Y puede llevarse a cabo en dos momentos distintos de la reparación estructural:

- Antes de la etapa de regeneración del hormigón con morteros de reparación estructural, mediante la colocación de armaduras complementarias o elementos metálicos (ángulos, chapas, etc.). En este caso, la complejidad geométrica hace aconsejable el empleo de morteros fluidos, sin retracción o de retracción controlada y altas resistencias mecánicas.
- Pegado externo de materiales compuestos a base de fibra de carbono, posteriormente a la aplicación de los morteros de reparación y antes de la etapa de revestimiento y acabado de la estructura de hormigón. Su gran ventaja, al margen de las excelentes resistencias, es su facilidad de aplicación.

En este caso nos referiremos al pegado externo de materiales compuestos a base de fibra de carbono.

6.6.10 Preparación de la superficie de refuerzo

Una vez realizadas cada una de las operaciones antes descritas en el caso de un reforzamiento, se deben seguir los siguientes requerimientos que garantizaran el proceso de reforzamiento:



1. Preparación del soporte se debe tener un soporte rugoso llegando al sustrato de concreto y realizar la limpieza del mismo. De acuerdo a la orientación del refuerzo y de ser necesario al tener aristas estas deben ser redondeadas.



2. Imprimación del soporte regularización primaria con aplicación de morteros, utilizando un rodillo medio.



3. Pasta de relleno Epóxica con ayuda de una liana aplica la pasta para realizar un emparejamiento de la superficie eliminando irregularidades.



4. Primera capa saturante de resina con ayuda de un rodillo medio aplicar una capa de resina saturante.



5. Medir y cortar el laminado con la utilización de una cizalla o una cuchilla de uso general, cortar las secciones de acuerdo al requerimiento de la fibra seca.



6. Saturación de la fibra seca además de aplicación de resina saturante en el elemento es necesario saturar la fibra seca con resina para asegurar la adherencia.



7. Aplicar el laminado una vez saturada la fibra aplicarla contra el saturante húmedo. Pasar un rodillo nervado oprimiéndole contra la superficie del elemento a ser reforzado.



8. Extracción aire contenido con un rodillo o espátula



9. Segunda capa saturante de resina esta capa de resina permitirá el encapsulado completo de las fibras.



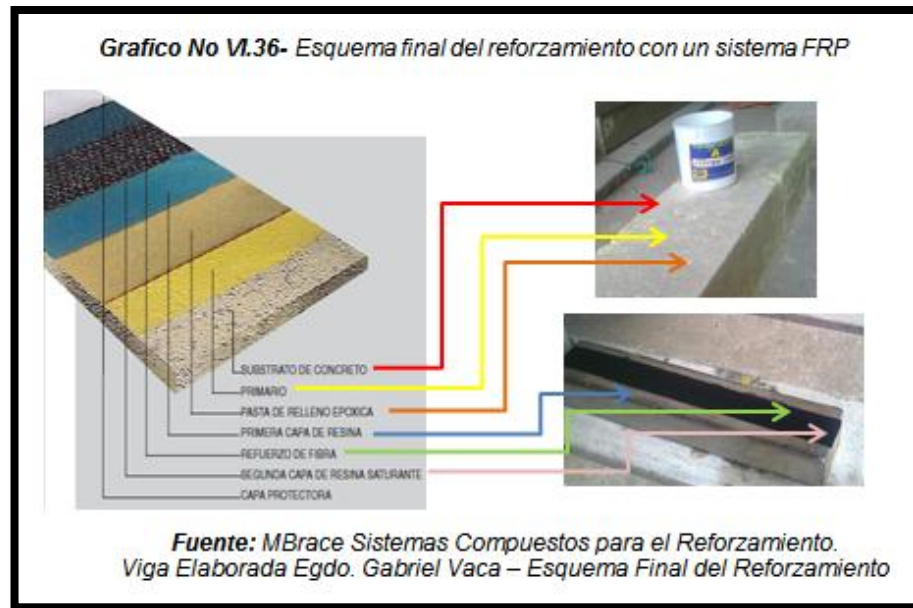
11. Limpieza de los restos sistema epóxico



11. Capa protectora después de curada la resina el resultado final es un sólido polímero reforzado con fibra adherido a la superficie de la estructura, habitualmente el sistema alcanza suficiente endurecimiento, no obstante requiere protección. Además de protección esta logra una apariencia similar al concreto común.



12. Configuración final refuerzo



6.7.- METODOLOGÍA

6.7.1 Fabricación de las Vigas

Para proyectar las vigas se tiene en cuenta los medios con los que se cuenta a efectos de manipulación, especialmente en el montaje para el ensayo.

Equipos y Materiales

Equipo

- Tablas de Encofrado
- Pistola de Clavos
- Sierra
- Prensa
- Concreteira
- Parihuelas
- Palas

Materiales

- Agregado Grueso
- Agregado Fino
- Superplastificante de Alto Desempeño Megamix 400 AC
- Agua
- Cemento
- Acero Figurado

6.7.1.1 ANTECEDENTES

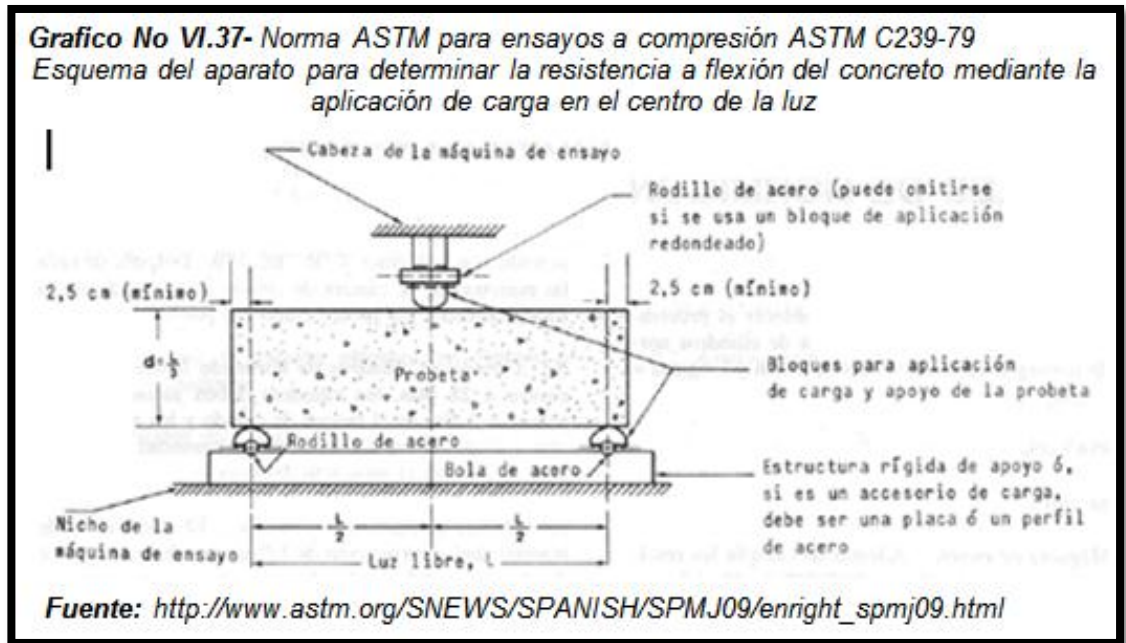
Una vez caracterizados los materiales y el equipo empleado para la elaboración del hormigón que conformara parte de las vigas dispuestas para este estudio, este se elabora con un aditivo Superplastificante el mismo que nos permitirá obtener el 90% de la resistencia a una temprana edad. El que nos asegurara la resistencia del hormigón esperado, y el fraguado para la aplicación de la fibra.

Se elaboraran 18 vigas de 20x15x100 cm, se tiene previsto elaborar 6 vigas elaboradas de hormigón simple, tres serán reforzadas con CFRP (polímeros reforzados con fibra de carbono), 6 vigas elaboradas con acero en la zona tracción de las cuales 3 serán reforzadas con CFRP (polímeros reforzados con fibra de carbono) y, 6 vigas con acero en la zona de tracción y compresión de las cuales 3 serán reforzadas con CFRP (polímeros reforzados con fibra de carbono).

Las 18 vigas serán fundidas el mismo día y serán dispuestas a un proceso de curado, para garantizar la resistencia del hormigón.

Hipótesis de Carga

Para estudiar el comportamiento y el modo de fallo de una viga de hormigón, se dispone de una prensa de ensayos a flexión. El esquema es el que se muestra en la siguiente figura.



6.7.1.2 PLANTEAMIENTO Y METODOLOGIA

6.7.1.2.1 VIGAS DE HORMIGÓN SIMPLE

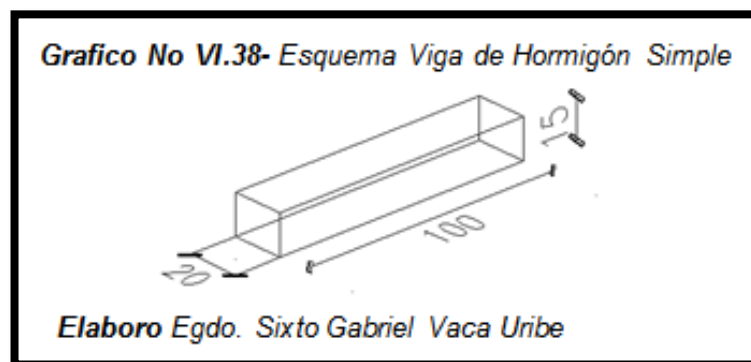
Se elaboran 6 vigas de Hormigón Simple con una sección de 20x15x100 cm.

Estas dimensiones se adecuan perfectamente a las limitaciones de espacio en la elaboración, el curado y el tratamiento para el ensayo. Son señaladas e identificadas para la toma de resultados después del ensayo.

La resistencia del hormigón a compresión es de 450 Kg/cm^2 la misma que será comprobada por las muestras tomadas durante la elaboración, al saber que el hormigón simple tiene el 10% de resistencia a la tracción y se desprecia dicha resistencia asumiremos que tiene una resistencia a la tracción de 45 Kg/cm^2 .

Resistencia a la Compresión: 44,1 MPa

Resistencia a la Tracción: 4,29 MPa



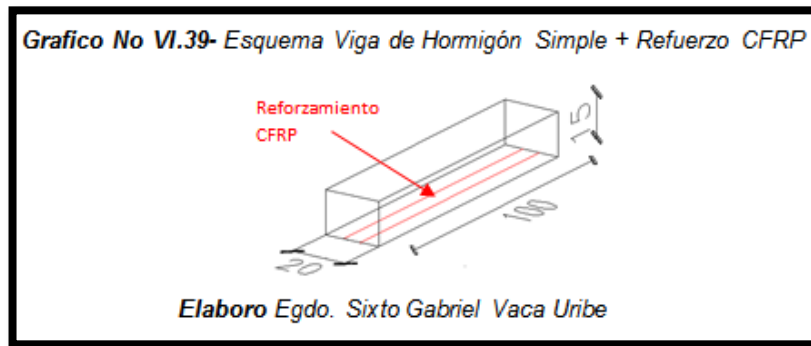
Ensayo de viga de hormigón simple (20x15x100 cm). Esta viga tendrá un comportamiento no dúctil con un momento de rotura equivalente al 10% de la resistencia inicial del hormigón. Se constatará experimentalmente esta consideración con la aplicación de cargas en la prensa, Por lo tanto, los parámetros a determinar son:

- Momento ultimo experimental
- Tipo de falla provocada.

6.7.1.2.2 VIGAS DE HORMIGÓN SIMPLE REFORZADAS CON FIBRA DE CARBONO

Posterior a la elaboración de las 6 vigas, a los 15 días de curado en 3 de ellas se coloca reforzamiento CFRP con una lámina de longitud 100cm ancho 8cm, el

sistema epóxico requiere de 48 horas para el fraguado; el reforzamiento nos permitirá corroborar si existe un incremento en la capacidad de carga.



Ensayo de viga de hormigón simple (20x15x100 cm) con reforzamiento CFRP en las fibras tensionadas. Esta viga tendrá un comportamiento dúctil con un momento de rotura mayor al 10% de la resistencia inicial del hormigón respecto de los ensayos anteriores. Se constatará experimentalmente el incremento de rigidez a igual carga, se evidenciará esta consideración con la aplicación de cargas en la prensa, Por lo tanto, los parámetros a determinar son:

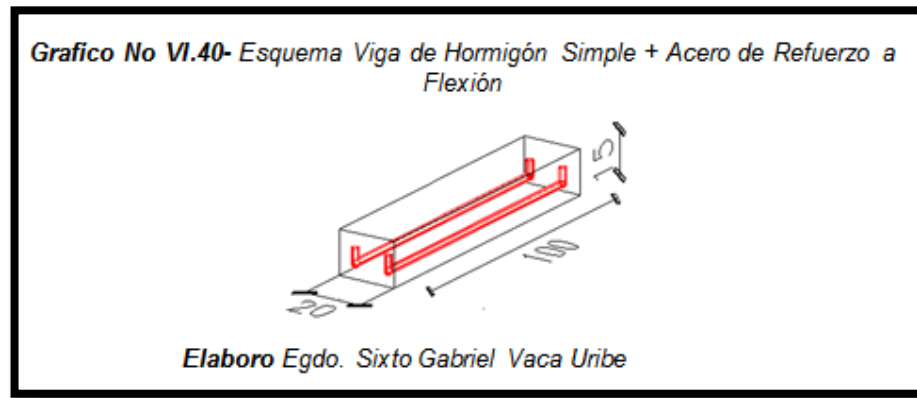
- Momento último experimental
- Tipo de falla del elemento provocada

6.7.1.2.3 VIGAS DE HORMIGÓN SIMPLE + ACERO DE REFUERZO A FLEXION

Se elaboran 6 vigas de hormigón simple con armadura de refuerzo en las fibras traccionadas desde el punto de aplicación de la carga, las dimensiones de las vigas son de 20x15x100 cm.

Determinar el Mu_{real} y el $Mu_{confiable}$ de la viga de hormigón más el acero de refuerzo, teniendo en cuenta las consideraciones presentadas por el ACI.

Estas dimensiones se adecuan perfectamente a las limitaciones de espacio en la elaboración, el curado y el tratamiento para el posterior refuerzo. La armadura longitudinal es de 1.58 cm^2 .



Calculo Momento Confiable de la Viga con las siguientes características:

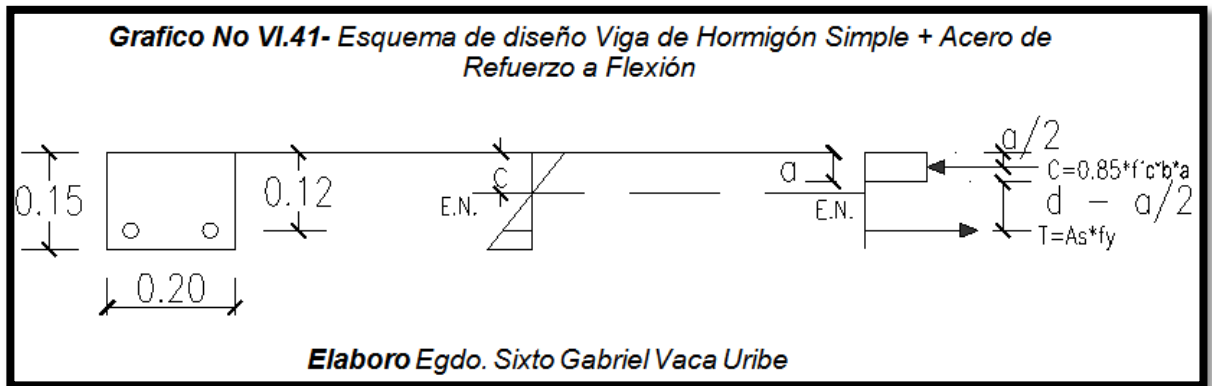
$b = 20\text{cm}$	base
$H = 15\text{cm}$	altura
$f'c = 450 \text{ Kg/cm}^2$	resistencia compresión
$fy = 4200 \text{ Kg/cm}^2$	límite de fluencia acero
$r = 3\text{cm}$	recubrimiento
$\beta_1 = 0.73$	Factor de reducción bloque rectangular equivalente
$p_{\text{mín}} = 0.003357$	porcentaje mínimo de acero
$p_b = 0.03988$	porcentaje balanceado de acero
$p_{\text{máx}} = 0.01994$	porcentaje máximo de acero
$p_{\text{REAL}} = 0.00658$	Porcentaje real de acero
$2\text{Ø}10\text{mm}$	

Área Acero

$$1\text{Ø}10\text{mm} = 0.79 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 2\text{Ø}10\text{mm}$$

$$A_s = 1.58 \text{ cm}^2$$



Momento Ideal

$$C = T$$

$$0.85f'c * a * b = As * fy$$

$$a = \frac{As * fy}{0.85 * f'c * b}$$

$$a = \frac{1,58cm^2 * 4200Kg/cm^2}{0.85(450Kg/cm^2) * 20cm}$$

$$a = 0.87cm$$

Momento Calculado

$$Mo = C \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$Mo = 0.85 * f'c * a * b \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$Mo = 0.85 * (450Kg/cm^2) * 0.87cm * 20cm \left(12cm - \frac{0.87cm}{2} \right)$$

$$Mo = 76970.86 cm - Kg$$

$$Mo = 0.77 m - Ton$$

$$Mo = 7.60 m - KN$$

Momento Confiable

$$Mu = \phi Mo$$

$$Mu = 0.9 * 7.60 m - KN$$

$$Mu = 6.84 m - KN$$

Tipo de Falla

$$\beta_1 = 1.05 - \frac{f'c}{1400}$$

$$\beta_1 = 1.05 - \frac{450}{1400}$$

$$\beta_1 = 0.73$$

Distancia Fibra más comprimida al Eje Neutro

$$c = \frac{a}{\beta_1}$$

$$c = \frac{0.87cm}{0.73}$$

$$c = 1.92cm$$

$$c = 19.2mm$$

Esfuerzos de Deformación - Acero Tensión

$$\xi_s = \frac{\xi_c(d - c)}{c}$$

$$\xi_s = \frac{0.003(12 - 1.92)}{1.92}$$

$$\xi_s = 0.01575$$

$$f_y = E_s * \xi_y$$

$$\xi_y = f_y / E_s$$

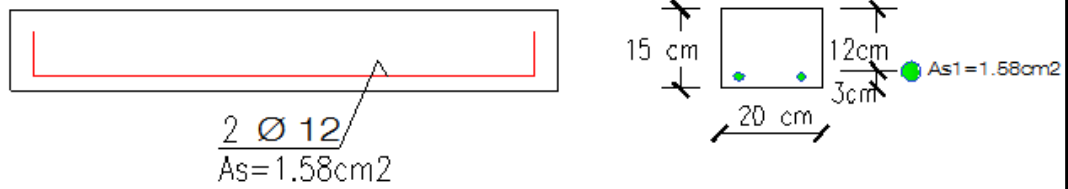
$$\xi_y = 4200 / 2.1 \times 10^6$$

$$\xi_y = 0.002$$

$$\xi_s > \xi_y$$

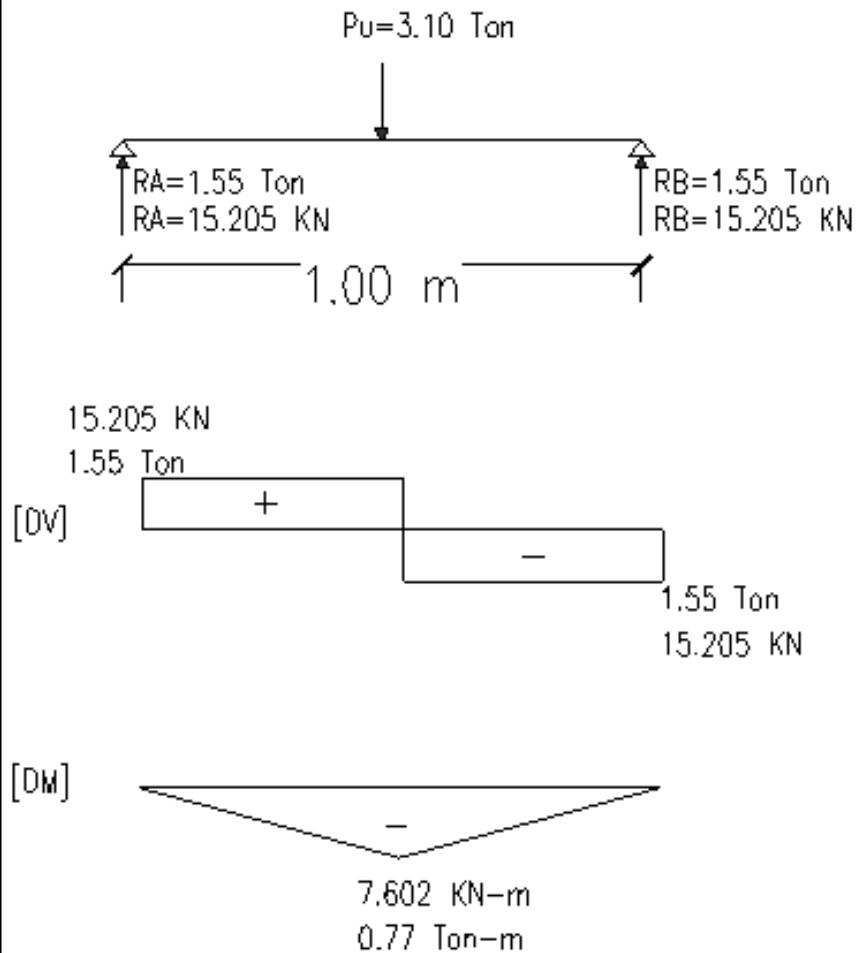
$f_s > f_y$ Es una falla dúctil

Grafico No VI.42- Esquema de diseño Viga de Hormigón Simple + Acero de Refuerzo a Flexión



Elaboro Egdo. Sixto Gabriel Vaca Uribe

Grafico No VI.43- Diagrama de Corte y Momento



Elaboro Egdo. Sixto Gabriel Vaca Uribe

Momento de Fisuración

$$M_{cr} = \frac{f_r * I_g}{y_t}$$

para concreto peso normal: $f_r = 2 \lambda \sqrt{f'c} \rightarrow \lambda = 1$

$$f_r = 2 * 1 * \sqrt{450 \text{Kg/cm}^2}$$

$$f_r = 42.43 \text{ Kg/cm}^2$$

Inercia

$$I_g = \frac{b * h^3}{12}$$

$$I_g = \frac{20 * 15^3}{12}$$

$$I_g = 5625 \text{cm}^4$$

Distancia al Eje neutro fisurado

$$y_t = h - c$$

$$y_t = 15 \text{cm} - 1.92 \text{cm}$$

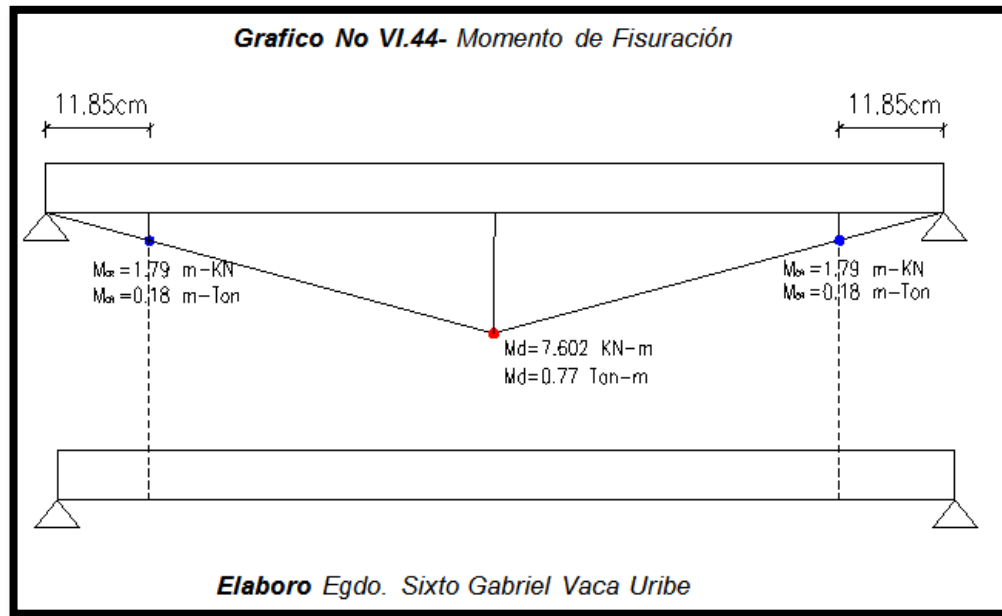
$$y_t = 13.08 \text{ cm}$$

$$M_{cr} = \frac{42.43 * 5625}{13.08}$$

$$M_{cr} = 18246.84 \text{ cm} - \text{Kg}$$

$$M_{cr} = 0.18 \text{ m} - \text{Ton}$$

$$M_{cr} = 1.79 \text{ m} - \text{KN}$$



Ya determinados los parámetros iniciales de la viga con reforzamiento de acero a flexión, el ensayo de las vigas de hormigón simple (20x15x100 cm) con un área de acero de 1.58 cm². Esta viga tendrá un comportamiento dúctil con un momento confiable de 6.84 m-KN.

El Momento de fisuración M_{cr} calculado es de 1.79 m-KN.

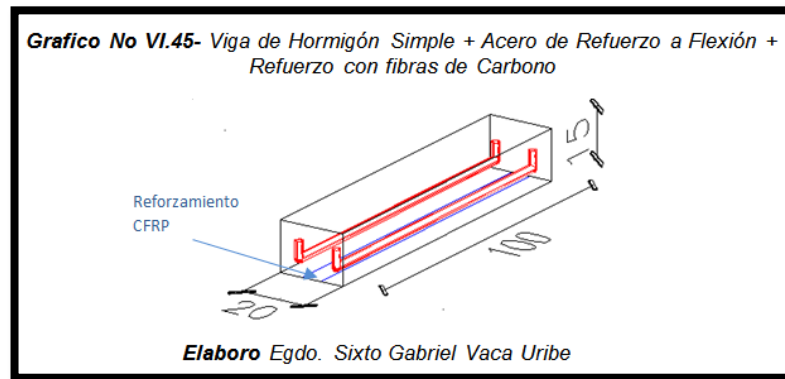
Se constatará experimentalmente los cálculos puestos en consideración mediante la aplicación de cargas en la prensa, por lo tanto, los parámetros a determinar son:

- Momento de Fisuración
- Momento ultimo experimental
- Tipo de falla provocada

6.7.1.2.4 VIGAS DE HORMIGÓN SIMPLE + ACERO DE REFUERZO A FLEXION REFORZADAS CON FIBRA DE CARBONO

Posterior a la elaboración de las 6 vigas, a los 15 días de curado en 3 de ellas se coloca reforzamiento CFRP con una lámina de longitud 100cm ancho 8cm, el

sistema epóxico requiere de 48 horas para el fraguado; el reforzamiento nos permitirá corroborar si existe un incremento en la capacidad de carga.



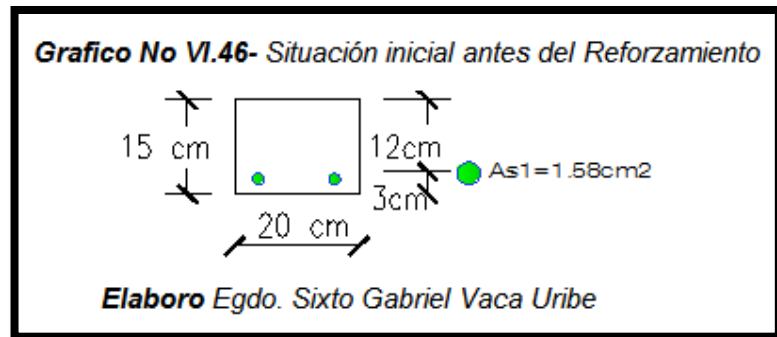
Calculo del Momento resistente con el reforzamiento CFRP

Tabla No VI.22- Resumen de Cargas y Momentos Mayorados

RESUMEN DE CARGAS Y MOMENTOS			
Cargas/Momentos	Cargas Existentes	Cargas Previstas	Unidades
Cargas Permanentes (WDL)	9.81	9.81	KN
Cargas Variables (WLL)	9.81	14.72	
Cargas sin Mayorar (WDL+WLL)	19.62	24.53	
Límite de Carga sin Reforzar (1.2 WDL+0,85 WLL)		24.28	KN
Cargas Mayoradas (1.4 WDL+1.7 WLL)	30.41	38.75	
Momento de Cargas Permanentes (MDL=P*L / 4)	2.45	2.45	KN-m
Momento de Cargas Variables (MLL=P*L / 4)	2.45	3.68	
Momento de Servicio (Ms= MDL+MLL)	4.91	6.13	
Momento Limite sin Reforzar (1.2 MDL+0,85 MLL)		6.07	
Momento Mayorado (1.4 MDL+1.7MLL)	7.60	9.69	

Elaboro Egdo. Sixto Gabriel Vaca Uribe

Situación Inicial



$$l = 1 m$$

$$w = 20 cm$$

$$d = 12 cm$$

$$w = 20 cm$$

$$h = 15 cm$$

$$\phi Mn(\text{sin refuerzo}) = 7.60 m - KN$$

$$\text{Barras} = 2\phi 12 mm$$

$$f'c = 44.13 MPa$$

$$fy = 411.89 MPa$$

Se propone reforzar la viga existente de hormigón armado mediante laminado de fibra de carbono (CFRP) adherido en la fibra traccionada, mediante un laminado de 80mm de ancho cuyas propiedades son indicadas por el distribuidor.

-Espesor (t_f): 0.50mm; ancho (w): 80mm; sección (A_f): 40mm²

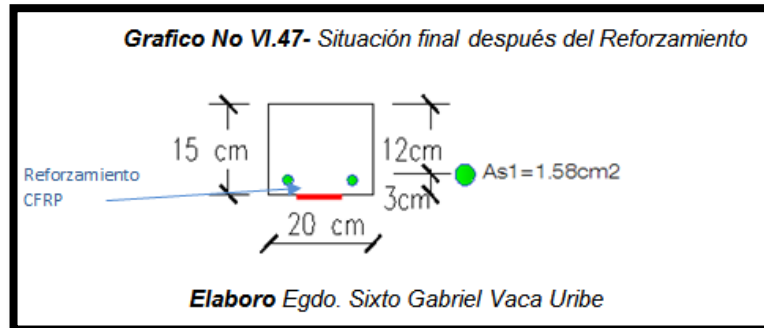
- Resistencia Ultima a Tracción (f^*_{fu}): 3.79 KN/mm²

- Deformación de Rotura (ξ^*_{fu}): 0.018 96

- Modulo de Elasticidad (E_f) 230 KN/mm²

La guía ACI 440 exige las comprobaciones iniciales de resistencia y resistencia al fugo del elemento estructural que va a ser reforzada y debe satisfacer antes de la colocación del refuerzo.

Situación Final



Resistencia

$$\phi M_n(\text{sin refuerzo}) \geq (1.2 \cdot M_{DL} + 0.85 \cdot M_{LL})_{\text{Nuevas}}$$

Formula ACI 440.2R-02 Eq. (8-1)

El segundo término se encuentra en la Tabla No. VI.21 descrita anteriormente. Se toman los valores de las cargas con el incremento posterior al cambio de uso.

$$\text{Momento Limite sin Reforzar } (1.2 M_{DL} + 0.85 M_{LL}) = 6.07 \text{ KN-m}$$

Momento resistente nominal:

$$\phi M_n(\text{sin refuerzo}) = \phi \cdot A_s \cdot f_y \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right)$$

Formula <http://publiespe.espe.edu.ec/academicas/hormigon/hormigon04-a.htm>

Donde:

$\phi =$	0.9	(Coeficiente Flexión, ACI 318)
$\beta_1 =$	0.73	(HA = 450 MPa, ACI 318)
$c = 0.20 d$	24 mm	(estimación ACI 440)
$A_s =$	158 mm ²	
$f_y =$	411.89 N/mm ²	
$d =$	120 mm	

$$\phi M_{n \text{ sin refuerzo}} = 0.90 * 158 \text{ mm}^2 * 411.89 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * \left(120 - \frac{0.73 * 24}{2} \right)$$

$$\phi M_{n \text{ sin refuerzo}} = 6.52 \text{ KN} - \text{m}$$

De modo que:

$$6.52 \text{ m} - \text{KN} > 6.07 \text{ m} - \text{KN} \quad \text{Cumple}$$

Resistencia al Fuego

$$(M_{n\theta})_{\text{Existente}} \geq M_{DL} + M_{LL}$$

Los valores del segundo término los tenemos en la Tabla No. VI.21 descrita anteriormente. En este caso también debe cumplir el valor de las cargas posteriores al cambio de uso.

$$(MDL+MLL) = 6.13 \text{ KN} - \text{m}$$

De la guía ACI 216R y los siguientes datos:

Viga simplemente apoyada de (1 vano)

Fuego en la cara inferior

Tiempo de incendio (estimación): 180 min

Obtenemos la fórmula de momento nominal limitado por el fuego:

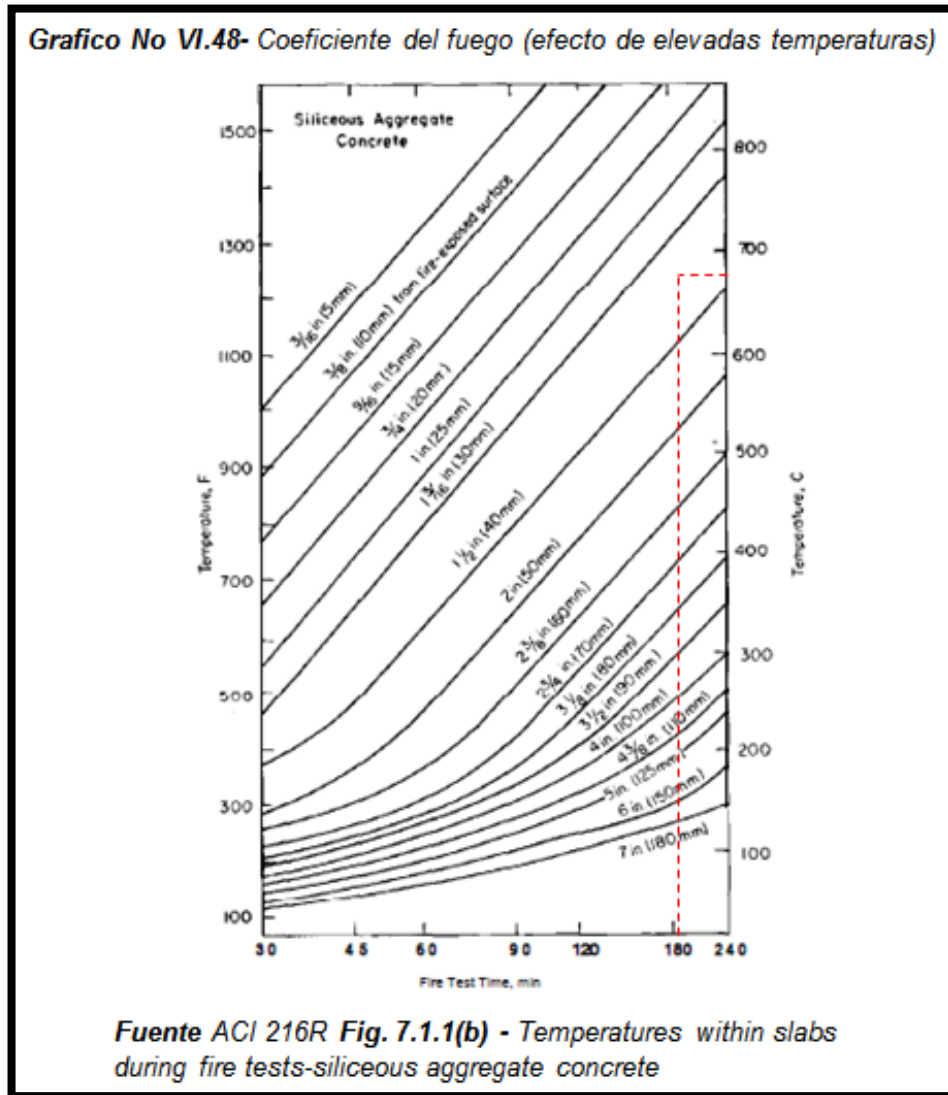
$$M_{n\theta} = A_s \cdot f_{y\theta} \cdot \left(d - \frac{a_{\theta}}{2} \right)$$

Formula ACI 216R Eq. (2-3)

Dónde:

- Θ = Coeficiente del fuego (efecto de elevadas temperaturas)
- A_s = 158 mm²
- d = 120 mm
- $f_y\Theta$ = Limite elástico del acero a temperaturas elevadas
- $\alpha\Theta$ = Profundidad del diagrama de tensiones equivalentes

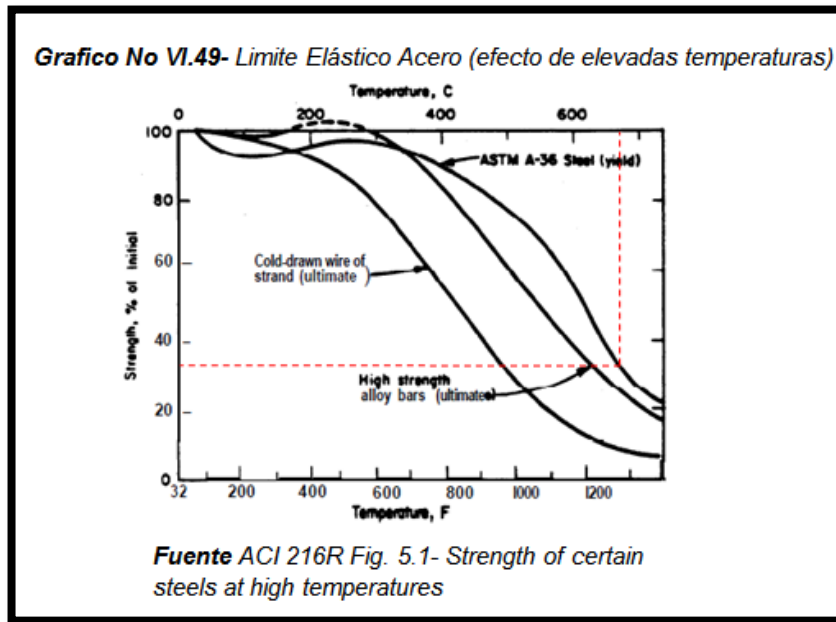
Para hallar el valor de Θ necesitamos conocer los valores de n y t , e introducirlos en la Fig. 7.1.1.b (ACI 216R):



$$n = \text{recubrimiento} + 1/2 \cdot \phi$$

$$\left. \begin{array}{l} n: \text{Recubrimiento efectivo promedio} \quad n = 30\text{mm} + 1/2 * 12 \\ t: 180 \text{ min} \quad n = 36\text{mm} \end{array} \right\} \Theta: 680^\circ\text{C}$$

A continuación, calculamos el límite elástico del acero $f_{y\Theta}$, introduciendo el valor de $\Theta: 680^\circ\text{C}$ en la Fig. 5.1 (ACI 216R):



$$\frac{f_{y\Theta}}{f_y} = 0.37 \rightarrow f_{y\Theta} = 152.39 \text{ MPa}$$

Por último, introducimos los datos para hallar el valor de a_Θ (el valor de $f'_c = f'_{c\Theta}$ dado que no se reduce significativamente en la capa de compresión):

$$a_\Theta = \frac{A_s * f_{y\Theta}}{0.85 * f'_{c\Theta} * b} = \frac{158\text{mm}^2 * 152.39\text{N/mm}^2}{0.85 * \frac{44.13\text{N}}{\text{mm}^2} * 200\text{mm}} = 3.21 \text{ mm}$$

Calculamos el momento limitado por el fuego:

$$M_{n\theta} = 158\text{mm}^2 * \frac{144.16\text{N}}{\text{mm}^2} * \left(120 - \frac{3.21\text{ mm}}{2}\right)$$

$$M_{n\theta} = 2.70\text{ KN} - m$$

De modo que:

$$2.70\text{ KN} - m > 6.13\text{ KN} - m \quad \text{No Cumple}$$

La viga cumple satisfactoriamente con la primera condición inicial previa al refuerzo que exige el ACI 440, mientras que no cumple el momento limitado por el fuego de modo que no satisface las condiciones de seguridad para situaciones accidentales; por tratarse de una investigación y al no ser un elemento que forma parte de una estructura va a ser reforzada mediante un sistema FRP.

Empezamos el diseño del refuerzo que verifique la validez del sistema propuesto en primer lugar:

Paso 1

Calcular las propiedades del sistema de refuerzo FRP de diseño en nuestro caso: Tabla 8.1 ACI 440 Obtenemos un coeficiente reductor CE de ambiente para Exposiciones Exteriores = 0.85

Grafico No VI.50- Coeficiente reductor de Ambiente

Exposure conditions	Fiber and resin type	Enviromental - reduction factor CE
Interior exposure	Carbon/epoxy	0,95
	Glass/epoxy	0,75
	Aramide/epoxy	0,85
Exterior exposure (bridges, piers, and unenclosed parking garages)	Carbon/epoxy	0,85
	Glass/epoxy	0,65
	Aramide/epoxy	0,75
Aggressive environment (chemical plants and waste water treatment plants)	Carbon/epoxy	0,85
	Glass/epoxy	0,50
	Aramide/epoxy	0,70

Fuente ACI 440.2R-02 Table 8.1 – Environmental-reduction factor for various FRP systems and exposure conditions

CE:	0.85
Propiedades de la Fibra	
Resistencia ultima Tracción (f*fu):	3.79 KN/mm ² ó 3790 N/mm ²
Deformación de Rotura (ξ*fu):	0.018

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

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

Formula ACI 440.2R-02 Eq. (8-3) - (8-4)

$$f_{fu} = 0.85 \cdot 3790$$

$$f_{fu} = 3221.5 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{fu} = 0.85 \cdot 0.018$$

$$\varepsilon_{fu} = 0.0153$$

Paso 2

Cálculos preliminares

$$\beta_1 = 0.73 \quad (\text{HA} = 450 \text{ MPa, ACI 318})$$

$$E_c = 15000 \sqrt{f'_c}$$

$$f'_c = 29.42 \text{ MPa}$$

$$f'_c = 300 \text{ Kg/cm}^2$$

$$E_c = 15000 \sqrt{300 \text{ Kg/cm}^2}$$

$$E_c = 259807.62 \text{ Kg/cm}^2$$

$$E_c = 25479.33 \text{ MPa}$$

Propiedades del Acero

$$\rho_s = \frac{A_s}{b \cdot d}$$

Formula TRABAJO FIN DE MÁSTER - MÁSTER EN EDIFICACIÓN.
ESPECIALIDAD TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN - Javier López Molina

$$\rho_s = \frac{1.58cm^2}{20cm * 12cm}$$

$$\rho_s = 0.00658$$

Propiedades del Refuerzo

$$A_f = n \cdot t_f \cdot w_f$$

Formula ACI 440.2R-02 Fig. 9.2

n=	1	Numero de laminados de refuerzo de FRP
t_f =	0,5	mm
w_f	80	mm
d=	120	mm
b=	200	mm

$$A_f = 1 * 0.50mm * 80mm$$

$$A_f = 40mm^2$$

$$\rho_s = \frac{A_f}{b \cdot d}$$

Formula TRABAJO FIN DE MÁSTER - MÁSTER EN EDIFICACIÓN.
ESPECIALIDAD TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN - Javier López Molina

$$\rho_s = \frac{40mm^2}{200 * 120}$$

$$\rho_s = 0.00166$$

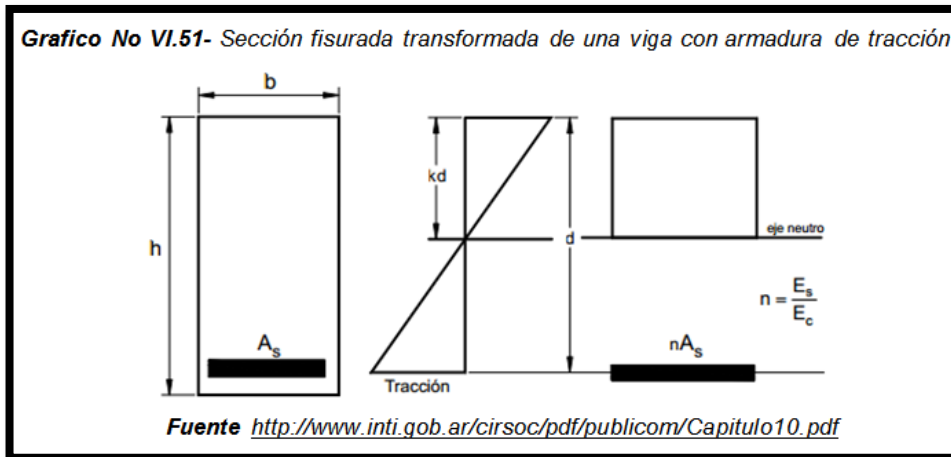
Paso 3

Determinar el Estado de deformación existente en la cara traccionada de la viga. La deformación existente se calcula asumiendo que la cara traccionada esta fisurada y que las únicas cargas que actúan en el momento de la instalación del refuerzo son las permanentes.

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(h - k \cdot d)}{I_{cr} \cdot E_c}$$

Formula ACI 440.2R-02 Sección 14.3 Step 3

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(h - k * d)}{I_{cr} * E_c}$$



Para una viga rectangular no fisurada se utiliza el momento de inercia de la sección bruta del hormigón:

$$I_g = \frac{b * h^3}{12}$$

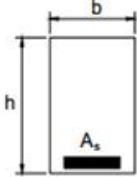
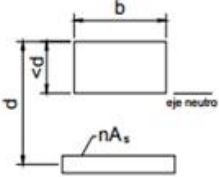
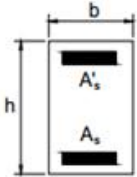
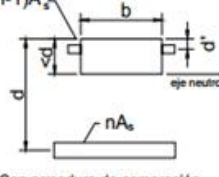
Formula TRABAJO FIN DE MÁSTER - MÁSTER EN EDIFICACIÓN.
ESPECIALIDAD TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN - Javier López Molina

El momento de inercia de una viga fisurada con armadura de tracción (I_{cr}) se calcula de la siguiente manera:

$$I_{cr} = \frac{b(kd)^3}{3} + nA_s(d - kd)^2$$

Formula <http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/Capitulo10.pdf>

Grafico No VI.52- Inercia de una viga fisurada sin armadura de compresión y con armadura de compresión

Sección bruta	Sección fisurada transformada	Momento de inercia de la sección bruta y de la sección fisurada
	 <p>Sin armadura de compresión</p>	$n = \frac{E_s}{E_c}$ $B = \frac{b}{(nA_s)}$ $I_g = \frac{bh^3}{12}$ Sin armadura de compresión: $kd = (\sqrt{2dB + 1} - 1)/B$ $I_{cr} = b(kd)^3/3 + nA_s(d - kd)^2$
	 <p>Con armadura de compresión</p>	Con armadura de compresión: $r = (n - 1)A'_s/(nA_s)$ $kd = [\sqrt{2dB + (1 + rd'/d) + (1 + r)^2} - (1 + r)]/B$ $I_{cr} = b(kd)^3/3 + nA_s(d - kd)^2 + (n - 1)A'_s(kd - d')^2$

Fuente <http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/Capitulo10.pdf>

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

Formula <http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/Capitulo10.pdf>

$$n = \frac{259607.82 \text{ Kg/cm}^2}{2100000 \text{ Kg/cm}^2}$$

$$n = 0.12362$$

$$B = \frac{b}{nA_s}$$

Formula <http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/Capitulo10.pdf>

$$B = \frac{200mm}{0.12362 * 158mm^2}$$

$$B = 10.24 mm$$

$$kd = \frac{\sqrt{2Bd+1}-1}{B}$$

Formula <http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/Capitulo10.pdf>

$$kd = \frac{\sqrt{2(10.24mm * 120mm) + 1} - 1}{10.24mm}$$

$$kd = 4.74mm$$

Inercia fisurada

$$I_{cr} = \frac{200mm * (4.74mm)^3}{3} + 0.12362 * 158mm^2(120mm - 4.74mm)^2$$

$$I_{cr} = 266579.26mm^4$$

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(h - k \cdot d)}{I_{cr} \cdot E_c}$$

Formula ACI 440.2R-02 Sección 14.3 Step 3

$$\varepsilon_{bi} = \frac{2.45KN - mm * (150 mm - 4.24 mm)}{266579.26 mm^4 * 25.47KN/mm^2}$$

$$\varepsilon_{bi} = 0.00003821$$

Paso 4

Determinar el coeficiente de dependencia del sistema CFRP. El coeficiente de dependencia del adhesivo para flexión k_m se calcula en función de un valor resultante de comparar:

$$\begin{aligned} n &= 1 \text{ Numero de laminados de refuerzo de FRP} \\ E_f &= 230000 \text{ N/mm}^2 \\ t_f &= 0,5 \text{ Mm} \end{aligned}$$

$$k_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{360,000} \right) \leq 0.90 & \text{for } nE_f t_f \leq 180,000 \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(\frac{90,000}{nE_f t_f} \right) \leq 0.90 & \text{for } nE_f t_f > 180,000 \end{cases} \quad (9-2) \text{ SI}$$

Formula ACI 440.2R-02 Eq. (9.2)

$$n * E_f * t_f \leq 180000$$

$$1 * 230000 * 0.5 \leq 180000$$

$$115000 \leq 180000 \frac{N}{\text{mm}^2} \quad \therefore \text{Cumple la primera condición}$$

De forma que aplicamos la siguiente expresión para hallar k_m :

$$k_m = \frac{1}{60 \cdot \varepsilon_{fu}} \cdot \left(\frac{90.000}{360.000} \right) \leq 0.90$$

Formula ACI 440.2R-02 Eq. (9.2)

$$k_m = \frac{1}{60 * 0.0153} * \left(\frac{90000}{360000} \right) \leq 0.90$$

$$k_m = 0.27 \leq 0.90$$

Paso 5

Estimar, la profundidad del eje neutro. Un valor razonable de c es $0.20 \cdot d$. El valor final se ajusta después de comprobar el equilibrio.

$$c = 0'20 \cdot d$$

Formula ACI 440.2R-02 Sección 14.3 Step 5

$$c = 0.20 \cdot 120 \text{ mm}$$

$$c = 24 \text{ mm}$$

Paso 6

Determinar el nivel eficaz de deformación en el refuerzo. Lo tenemos en la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{fe} = 0'003 \cdot \left(\frac{h - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \kappa_m \cdot \varepsilon_{fu}$$

Formula ACI 440.2R-02 Eq. 9.3

Destacar que para la profundidad del eje neutro seleccionada, el aplastamiento del hormigón sería el modo de fallo porque la primera ecuación controla. Si la segunda (límite) expresión gobierna, entonces el fallo FRP sería el modo de fallo.

$$0.003 \left(\frac{150 - 24}{24} \right) - 0.00003821 \leq 0.27 \cdot 0.0153$$
$$0.0157 \leq 0.0041 \quad \therefore \text{No es correcto}$$

De nuevo, el modo de fallo es el fallo del FRP y el resultado final, el valor límite de deformación.

$$\varepsilon_{fe} = 0.0041$$

Paso 7

Calcular el valor de la deformación en el armado existente.

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

Formula ACI 440.2R-02 Eq. 9.8

$$\varepsilon_s = (0.0041 + 0.00003821) \cdot \left(\frac{120 - 24}{150 - 24} \right)$$

$$\varepsilon_s = 0.00315$$

Paso 8

Calcular el nivel de tensión en el acero y en el refuerzo CFRP. Para ello aplicamos las siguientes ecuaciones:

Para el Acero

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \leq f_y$$

Formula ACI 440.2R-02 Eq. 9.9

$E_s =$	2100000 Kg/cm ²	205.9470041 KN/mm ²
$\varepsilon_s =$	0.00315	
$f_y =$	411,89 MPa	0.41189 KN/mm ²

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s$$

$$f_s = 205.94 \cdot 0.00315$$

$$f_s = 0.649 \frac{KN}{mm^2} < 0.41 \frac{KN}{mm^2} \quad \therefore \text{No es correcto}$$

La tensión en el acero está limitada a su límite elástico.

$$f_s = 0.41 \frac{KN}{mm^2}$$

En el caso del refuerzo, dado que hemos calculado el valor de su deformación eficaz para nuestro caso concreto, inferior a la denominación última, no existe limitación en la tensión porque en ningún caso alcanzaremos la máxima posible.

$$f_{fe} = f_{fe} \cdot \varepsilon_{fe}$$

Formula ACI 440.2R-02 Eq. 10.5

$$f_{fe} = 230 \text{ GPa} \quad 230 \text{ KN/mm}^2$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.01304348$$

$$f_{fe} = 230 * 0.0041$$

$$f_{fe} = 0.943 \text{ KN/mm}^2$$

Paso 9

Calcular las fuerzas internas resultantes y comprobar el equilibrio. El equilibrio de las fuerzas se verifica comprobando la estimación inicial de c con la siguiente expresión:

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

Formula ACI 440.2R-02 Sección 14.3 Step 9

Donde:

$\beta_1 = \gamma =$	0.73	(HA=450 MPa, ACI 318)
$A_s =$	158 mm ²	
$f_s =$	0.41 KN/mm ²	411.89 N/mm ²
$A_f =$	40 mm ²	
$f_{fe} =$	0.9430 KN/mm ²	3000 N/mm ²
$f'_c =$	29.4210006 N/mm ²	
$b =$	200 Mm	

$$c = \frac{158 \text{ mm}^2 * \frac{411.89 \text{ N}}{\text{mm}^2} + 40 \text{ mm}^2 * \frac{943 \text{ N}}{\text{mm}^2}}{0.73 * \frac{29.42 \text{ N}}{\text{mm}^2} * 0.73 * 200 \text{ mm}}$$

$$c = 32.78 \text{ mm} \neq 24 \text{ mm (estimado)}$$

Paso 10

Ajustar el valor de c para cumplir el equilibrio de fuerzas. Debemos repetir los pasos desde el 6 hasta el 9 varias veces con valores diferentes de c hasta alcanzar el equilibrio.

Paso 6

En este caso vamos a estimar la profundidad del eje neutro $c=59 \text{ mm}$

Calcularemos el nivel de deformación eficaz del refuerzo:

$$\varepsilon_{fe} = 0.003 \cdot \left(\frac{h - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \kappa_m \cdot \varepsilon_{fu}$$

Formula ACI 440.2R-02 Eq. 9.3

$$0.003 \left(\frac{150 - 32.78}{32.78} \right) - 0.00003821 \leq 0.27 * 0.0153$$

$$0.0107 \leq 0.0041 \quad \therefore \text{No es correcto}$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.0041$$

Paso 7

Calculamos la deformación del acero

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

Formula ACI 440.2R-02 Eq. 9.8

$$\varepsilon_s = (0.0041 + 0.00003821) * \left(\frac{120 - 32.78}{150 - 32.78} \right)$$

$$\varepsilon_s = 0.00307$$

Paso 8

Calculamos el nivel de tensión en el acero y en el refuerzo:

$$f_s = E_s \cdot \varepsilon_s \leq f_y$$

Formula ACI 440.2R-02 Eq. 9.9

$$f_s = 205.94 * 0.00307$$

$$f_s = 0.634 \frac{KN}{mm^2} < 0.41 \frac{KN}{mm^2} \quad \therefore \text{No es correcto}$$

Como en el primer caso, la tensión en el acero está limitada a su límite elástico:

$$f_s = 0.41 \frac{KN}{mm^2}$$

Deformación del refuerzo

$$f_{fe} = f_{fe} \cdot \varepsilon_{fe}$$

Formula ACI 440.2R-02 Eq. 10.5

$$f_{fe} = 230 * 0.0041$$

$$f_{fe} = 0.943 \text{ KN/mm}^2$$

Paso 9

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

Formula ACI 440.2R-02 Sección 14.3 Step 9

$$c = \frac{158 \text{ mm}^2 \cdot \frac{411.89 \text{ N}}{\text{mm}^2} + 40 \text{ mm}^2 \cdot \frac{943 \text{ N}}{\text{mm}^2}}{0.73 \cdot \frac{29.42 \text{ N}}{\text{mm}^2} \cdot 0.73 \cdot 200 \text{ mm}}$$

$$c = 32.78 \text{ mm} = 32.78 \text{ mm (estimado)}$$

En la iteración con $c = 32.78$ mm hemos hallado el equilibrio de las fuerzas. Obsérvese que los valores del paso 9, a pesar de darle mayor profundidad al eje neutro, no han variado de la primera estimación de c debido a las limitaciones en la deformación eficaz del refuerzo y tensión en acero. Hemos completado el **Paso 10**.

Paso 11

Calcular la resistencia a flexión de diseño de la sección. En este caso, hay que aplicar un coeficiente reductor adicional $\psi_f = 0.85$ a la contribución del CFRP. Por otro lado, en lo relativo a la ductilidad y debido a que $\epsilon_s = 0.00307 < 0.005$ el factor reductor de resistencia $\Phi = 0.90$ es el correcto.

$$\phi M_n = \phi \left[A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) + \psi_f \cdot A_f \cdot f_{fe} \cdot \left(h - \frac{\beta_1 \cdot c}{2} \right) \right]$$

Formula ACI 440.2R-02 Eq. (9-11)

$A_s =$	158 mm ²	
$f_s =$	0.41 KN/mm ²	411.89 N/mm ²
$d =$	120 mm	
$\beta_1 =$	0.73	(HA=450 MPa, ACI 318)
$c =$	32.78 Mm	
$\psi_f =$	0.85	
$A_f =$	40 mm ²	

$$f_{fe} = 1.71669 \text{ KN/mm}^2 \quad 1716.69 \text{ N/mm}^2$$

$$h = 150 \text{ Mm}$$

$$\phi M_n = 0.9 \left[158 \text{ mm}^2 * \frac{411.89 \text{ N}}{\text{mm}^2} * \left(120 \text{ mm} - \frac{0.73 * 32.78 \text{ mm}}{2} \right) + 0.85 \right. \\ \left. * 40 \text{ mm}^2 * \frac{1716.69 \text{ N}}{\text{mm}^2} * \left(150 \text{ mm} - \frac{0.73 * 32.78 \text{ mm}}{2} \right) \right]$$

$$\phi M_n = 13578802.28 \text{ mm} - \text{N}$$

$$\phi M_n = 13.58 \text{ m} - \text{KN}$$

En este punto hemos hallado el momento resistente de la sección de hormigón armado reforzada con un laminado de 80mm de ancho de fibra de carbono. Para dar validez del refuerzo, comparamos con el momento solicitante mayorado.

$$\phi M_n = 13.58 \text{ m} - \text{KN} > M_u = 9.69 \text{ m} - \text{KN}$$

La sección reforzada es capaz de soportar el nuevo momento requerido.

Paso 12

Comprobar las tensiones de servicio en el acero y en el refuerzo. Para ello calcularemos en primer lugar la profundidad elástica del eje neutro fisurado añadiendo el primer momento de las áreas de la sección transformada.

$$c = \left(\sqrt{2 * n * \rho_r + (n * \rho_r)^2} - n * \rho_r \right) * d$$

$$c = \left(\sqrt{(2 * 0.12362 * 0.00658) + (0.12362 * 0.00658)^2} - (0.12362 * 0.00658) \right) \\ * 120 \text{ mm}$$

$$c = 4.74 \text{ mm}$$

Podemos comprobar la profundidad elástica del eje neutro fisurado de la siguiente manera:

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

$$n = \frac{259607.82 \text{ Kg/cm}^2}{2100000 \text{ Kg/cm}^2}$$

$$n = 0.12362$$

$$B = \frac{b}{nA_s}$$

$$B = \frac{200 \text{ mm}}{0.12362 * 158 \text{ mm}^2}$$

$$B = 10.24 \text{ mm}$$

$$kd = \frac{\sqrt{2Bd+1}-1}{B}$$

$$kd = \frac{\sqrt{2(10.24 \text{ mm} * 120 \text{ mm}) + 1} - 1}{10.24 \text{ mm}}$$

$$kd = 4.74 \text{ mm}$$

Ya tenemos la profundidad del eje neutro en estado elástico. Ahora calculamos el nivel de tensión del armado mediante la ecuación planteada y verificamos si es menor al límite recomendado.

$$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} \cdot A_f \cdot E_f \cdot \left(h - \frac{k \cdot d}{3} \right) \right] \cdot (d - k \cdot d) \cdot E_s}{A_s \cdot E_s \cdot \left(d - \frac{k \cdot d}{3} \right) \cdot (d - k \cdot d) + A_f \cdot E_f \cdot \left(h - \frac{k \cdot d}{3} \right) \cdot (h - k \cdot d)}$$

Formula ACI 440.2R-02 Eq. (9-12)

Ms=	6.13	KN - m
ξ _{bi} =	0.00003821	
A _f =	40	mm ²
E _f =	230	KN/mm ²
h=	150	mm
kd=	4.74	mm
d=	120	mm
E _s =	205.94	KN/mm ²
A _s =	158	mm ²

$$f_{s,s} = \frac{\left[6.13 + 0.00003821 \cdot 40 \cdot 230 \cdot \left(150 - \frac{4.74}{3} \right) \right] \cdot (120 - 4.74) \cdot 205.94}{158 \cdot 205.94 \cdot \left(120 - \frac{4.74}{3} \right) \cdot (120 - 4.74) + 40 \cdot 230 \cdot \left(150 - \frac{4.74}{3} \right) \cdot (150 - 4.74)}$$

$$f_{s,s} = 0.0070496 \text{ KN/mm}^2$$

$$\begin{array}{lcl} f_{s,s} & < & 0,80 f_y \\ 0.007 & < & 0.41 \text{ KN/mm}^2 \quad \therefore \text{Cumple} \end{array}$$

El nivel de tensión del armado está dentro del límite recomendado.

El nivel de tensiones en el refuerzo CFRP no se ha verificado dado que su cálculo y limitaciones se realizan en base a elementos sometidos a cargas cíclicas.

Solape del Refuerzo

Como detalle del refuerzo mediante el sistema CFRP, cabe destacar que el laminado debe terminar a una distancia de solape igual a d, como mínimo, desde el punto donde se produce el momento de fisuración.

Momento de Fisuración

$$M_{cr} = \frac{f_r * I_g}{y_t}$$

para concreto peso normal: $f_r = 2 \lambda \sqrt{f'_c} \rightarrow \lambda = 1$

$$f_r = 2 * 1 * \sqrt{450 \text{Kg/cm}^2}$$

$$f_r = 42.43 \text{ Kg/cm}^2$$

Inercia

$$I_g = \frac{b * h^3}{12}$$

$$I_g = \frac{20 * 15^3}{12}$$

$$I_g = 5625 \text{cm}^4$$

$$y_t = \frac{h}{2}$$

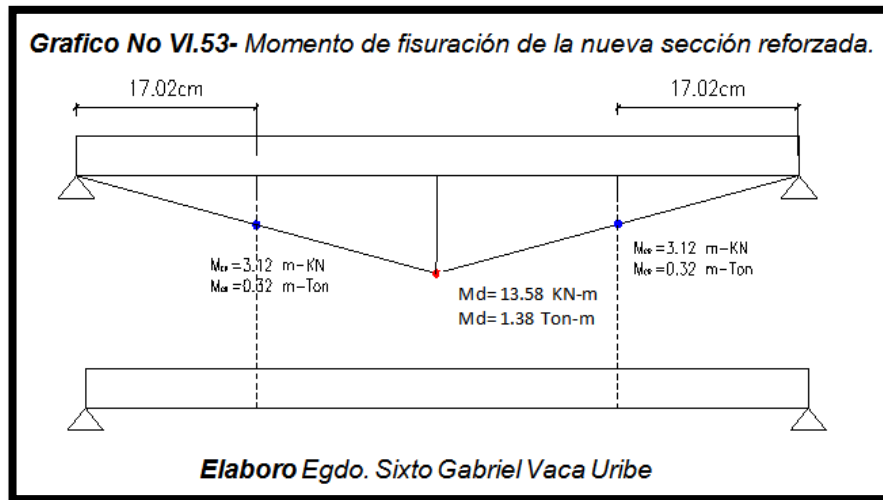
$$y_t = 7.5 \text{ cm}$$

$$M_{cr} = \frac{42.43 * 5625}{7.5}$$

$$M_{cr} = 31822.5 \text{ cm} - \text{Kg}$$

$$M_{cr} = 0.3182 \text{ m} - \text{Ton}$$

$$M_{cr} = 3.12 \text{ m} - \text{KN}$$



Ya determinados los parámetros de la viga con reforzamiento de acero a flexión, mas refuerzo con fibra de carbono el ensayo de las vigas de hormigón (20x15x100 cm) con un área de acero de 1.58 cm^2 . Esta viga tendrá un comportamiento dúctil con un momento confiable de 13.58 m-KN.

El Momento de fisuración M_{cr} calculado es de 3.12 m-KN.

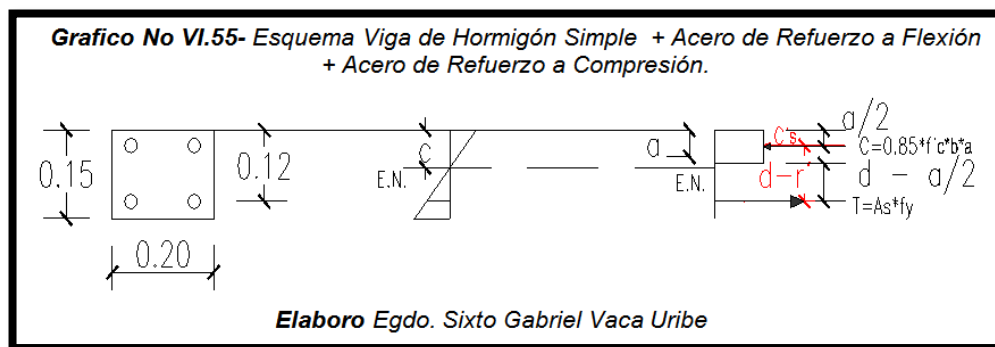
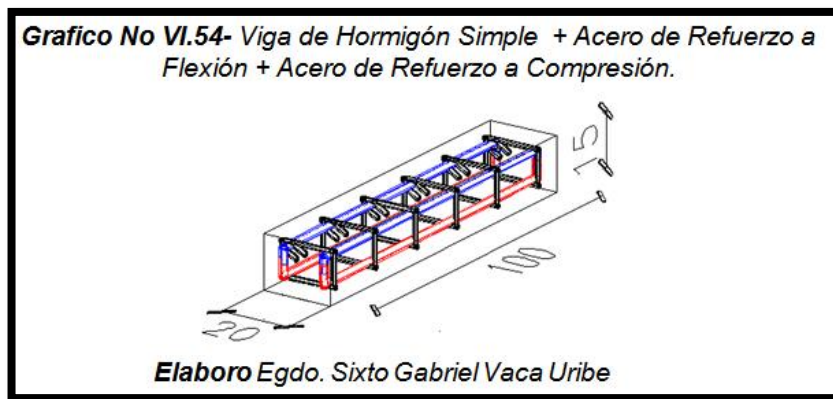
El Solape del Refuerzo debe colocarse a 17.02 cm de la cara del apoyo.

Se constatará experimentalmente los cálculos puestos en consideración mediante la aplicación de cargas en la prensa, por lo tanto, los parámetros a determinar son:

- Momento de Fisuración
- Momento ultimo experimental
- Tipo de falla provocada

6.7.1.2.5 VIGAS DE HORMIGÓN SIMPLE + ACERO DE REFUERZO A FLEXION Y COMPRESION

Las dimensiones que se plantea para la sección de la viga es de 20x15x100 cm. Se elaboran 6 vigas de similares características. Estas dimensiones se adecuan perfectamente a las limitaciones de espacio en la elaboración, el curado y el tratamiento para el posterior refuerzo. La armadura longitudinal en la zona de tracción es 2Ø10mm con un $p = 0.00658$, el acero longitudinal en la zona de compresión es 2Ø10mm con un $p = 0.00658$, adicional se colocan 6 estribos cada 17 cm.



Posterior a la elaboración de las 6 vigas, a los 15 días de curado en 3 de ellas se coloca reforzamiento CFRP con una lámina transversal formando estribos a lo largo de la viga de longitud 90cm ancho 8cm, distribuidas a lo largo de la misma, el

sistema epóxico requiere de 48 horas para el fraguado; el reforzamiento nos permitirá corroborar si existe un incremento en la capacidad de carga.

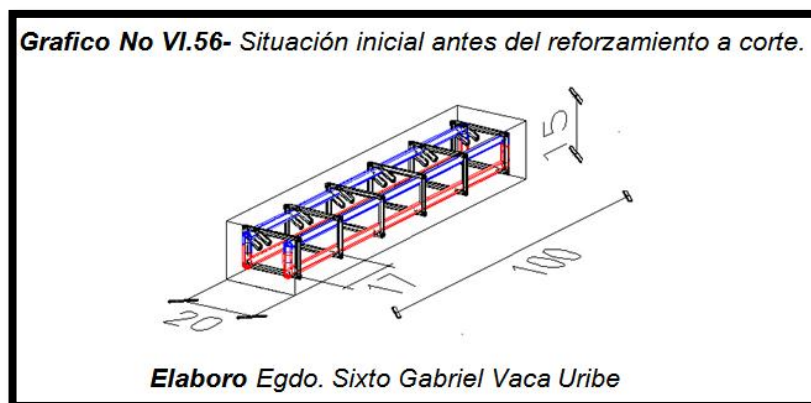
Laminados CFRP (polímeros reforzados con fibra de carbono). Carbowrap 300 CFRP con un peso de 300 gr., resistencia a la tensión de 38750 Kg/cm^2 , espesor de 5mm que servirá para reforzar 9 vigas de distintas características con la utilización de un ligante Epofix 300.

Las especificaciones del laminado como del sistema epóxico ya fueron descritas anteriormente.

Finalmente el ensayo de cada una de las vigas con las características antes descrita nos permitirán evaluar y determinar en porcentajes si se ha producido un incremento en la capacidad de carga y cortante. Así obtendremos una idea más clara del comportamiento de un elemento de hormigón reforzado con un sistema CFRP.

6.7.1.2.6 VIGAS DE HORMIGÓN SIMPLE + ACERO DE REFUERZO A FLEXION Y COMPRESION REFORZADAS CON FIBRA DE CARBONO.

Calculo a Corte de las Vigas con Reforzamiento CFRP Según guía ACI 440.



Datos:

$$l = 1 \text{ m}$$

$$w = 20 \text{ cm}$$

$$d = 12 \text{ cm}$$

$$w = 20 \text{ cm}$$

$$h = 15 \text{ cm}$$

$$\text{Barras} = 4\phi 10 \text{ mm}$$

$$f'c = 44.13 \text{ MPa}$$

$$fy = 411.89 \text{ MPa}$$

$$Wu \text{ previstas} = 38.75 \text{ KN} - \text{m}$$

Calculo de la resistencia a cortante

Para la conformidad de la resistencia de la viga de esfuerzo cortante se debe cumplir que:

$$\phi V_n = \phi V_c + \phi V_s \geq V_u$$

Formula ACI 440.2R-02 Eq. (10-2)

Dónde:

ϕ : 0.75 (coef. Cortante, ACI 318)

V_c : Resistencia a cortante del hormigón

V_n : Resistencia nominal a cortante

V_s : Resistencia a cortante del acero

V_u : Fuerza cortante mayorada

Paso 1

Calculo de la fuerza cortante mayorada. Es importante destacar que la fuerza cortante de cálculo, ACI-318 la toma a una distancia d (canto útil) desde el apoyo, siendo este valor el que se mantiene.

$$V_u = w_u \cdot L/2$$

*Formula TRABAJO FIN DE MÁSTER - MÁSTER EN EDIFICACIÓN.
ESPECIALIDAD TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN - Javier López Molina*

$$V_u = Wu \cdot L/2$$

$$V_u = (38.75 \text{ KN} - \text{m} \cdot 1 \text{ m})/2$$

$$V_u = 19.38 \text{ KN en el apoyo}$$

A una distancia d desde el apoyo resulta

$$V_u = (w_u \cdot L/2) - w_u \cdot d$$

Formula TRABAJO FIN DE MÁSTER - MÁSTER EN EDIFICACIÓN.
ESPECIALIDAD TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN - Javier López Molina

$$V_u = W_u * \frac{L}{2} - W_u * d$$

$$V_u = \frac{38.75 \text{ KN} * 1}{2} - 38.75 * 0.12$$

$$V_u = 14.73 \text{ KN}$$

Este valor de cortante último es el que aplicaremos en el cálculo para la comprobación de resistencia.

Paso 2

Determinar la resistencia a corte a corte del hormigón.

$$V_c = 0.53 \sqrt{f'_c}$$

Formula TRABAJO FIN DE MÁSTER - MÁSTER EN EDIFICACIÓN.
ESPECIALIDAD TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN - Javier López Molina

$$V_c = 0.53 \sqrt{450 \text{ Kg/cm}^2}$$

$$V_c = 11.24 \text{ Kg/cm}^2$$

$$V_c = 1.10 \text{ MPa}$$

Paso 3

Determinar la resistencia del acero a cortante. La armadura está compuesta de de estribos $\emptyset 8\text{mm}$ tipo O separados $s=17\text{cm}$.

$$A_v = \emptyset 8\text{mm}$$

$$A_v = 2 (0.5\text{cm}^2)$$

$$A_v = 1.0 \text{ cm}^2$$

En primer lugar, comprobamos si la armadura de cortante existente en la viga cumple con los requerimientos de ACI-318, en nuestro caso se trata de estribos en dirección perpendicular al eje de la viga.

Separación mínima entre estribos

$$s \leq \frac{d}{2}$$

$s \leq 6cm$ No cumple

$$s \leq \frac{d}{4}$$

$s \leq 3cm$ No cumple

$8\phi_L$

$8.0cm$ No cumple

$24\phi_E$

$19.2cm$ Cumple

Área mínima de refuerzo

$$A_{v,min} = \frac{3.5b_w \cdot s}{F_y}$$

*Formula TRABAJO FIN DE MÁSTER - MÁSTER EN EDIFICACIÓN.
ESPECIALIDAD TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN - Javier López Molina*

$$Av_{min} = \frac{3.5 * 20 * 17}{4200}$$

$Av_{min} = 0.28cm^2 < 1.0cm^2$ Cumple

Calculamos la resistencia del Acero

$$V_s = V_u - V_c$$

$$V_s = 14.73KN - 10.79KN$$

$$V_s = 3.94KN$$

$$v_s \leq 2.12\sqrt{f'c}$$

**Formula TRABAJO FIN DE MÁSTER - MÁSTER EN EDIFICACIÓN.
ESPECIALIDAD TECNOLOGÍA DE LA EDIFICACIÓN - Javier López Molina**

$$3.94KN \leq 2.12\sqrt{450Kg/cm^2}$$

$$3.94KN \leq 43.34KN \text{ Cumple}$$

Paso 4

Comprobación de Resistencia

$$\phi V_n = \phi V_c + \phi V_s \geq V_u$$

$$\phi V_n = 0.75(10.79) + 0.75(3.94) \geq 14.73KN$$

$$\phi V_n = 11.05 KN \geq 14.73 KN \text{ No cumple}$$

La capacidad resistente a cortante del hormigón y acero es menor que la sollicitación a cortante, por lo que es necesario reforzar la viga.

Grafico No VI.57- Situación final después del reforzamiento a corte.



Elaboro Egd. Sixto Gabriel Vaca Uribe

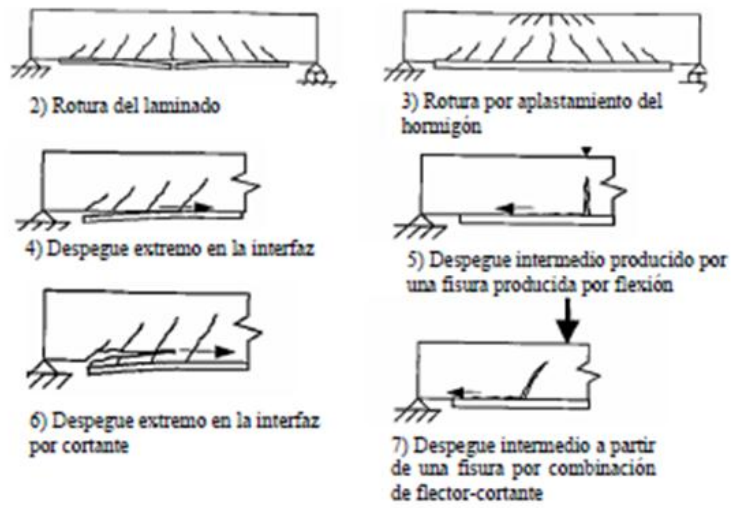
Para cumplir la condición de espaciamiento mínimo según el ACI-318 y que cumpla con el requerimiento a esfuerzo cortante colocamos reforzamiento CFRP con una lámina de 8cm de ancho a lo largo de la viga como estribos tipo O cada 10 cm con un espaciamiento $s = 6\text{cm}$.

Parámetro con el cual determinaremos si se produce un incremento en la capacidad cortante de la viga.

6.7.1.2.7 TIPO DE FALLAS ASOCIADAS A UN REFORZAMIENTO CON FIBRAS FRP

En la siguiente figura se aprecian los diversos modos de rotura que se pueden experimentar en diferentes elementos estructurales reforzados con materiales compuestos adheridos en zonas traccionadas (refuerzo a flexión).

Grafico No VI.58- Modos de fallo a flexión y cortante.



Fuente Teng JG, Chen JF, Smith ST, Lam L (2002), *FRP strengthened RC structures*. John Wiley and Sons.

6.7.3 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

6.7.3.1.- Determinación del Esfuerzo a la Compresión en Probetas Cilíndricas de Hormigón obtenidas en la fabricación vigas. Norma ASTM C31-84

Tabla No VI.23- Resultados Ensayo Compresión - Muestras Hormigón Vigas

Probeta No	1	2	3	4
Resistencia esperada a los 28 días MPa	44,1			
Fecha de Fabricación	30/08/2013			
Fecha de Rotura	07/09/2013		19/09/2013	
Edad (días)	7		20	
Altura (mm)	306,8	306,5	306,8	302
Diámetro 1 (mm)	153	153	153	152
Diámetro 2 (mm)	151	152	151	151
Diámetro Promedio (mm)	152	152,5	152	151,5
Relación H/D	2,0	2,0	2,0	2,0
Área (mm ²)	18145,82	18265,40	18145,82	18026,64
Volumen (mm ³)	5567138,75	5598345,29	5567138,75	5444045,21
Masa (gr)	12460	12460	12460	12580
Peso unitario (gr/cm ³)	2,24	2,23	2,24	2,31
Carga de Rotura (KN)	463,96	469,57	902	753
Resistencia (MPa)	26,56	26,2	49,7	41,8
Resistencia Promedio (MPa)	26,38		45,75	
Resistencia Promedio (Kg/cm ²)	269,076		466,65	

Elaboro Egd. Sixto Gabriel Vaca Uribe

Tabla No VI.24- Evolución del hormigón Portland normal

Evolución Hormigón Kg/cm ²		
Edad / Días	Porcentaje	Resistencia
3	0,40	180
7	0,65	292,5
28	1,00	450
90	1,20	540
360	1,35	607,5

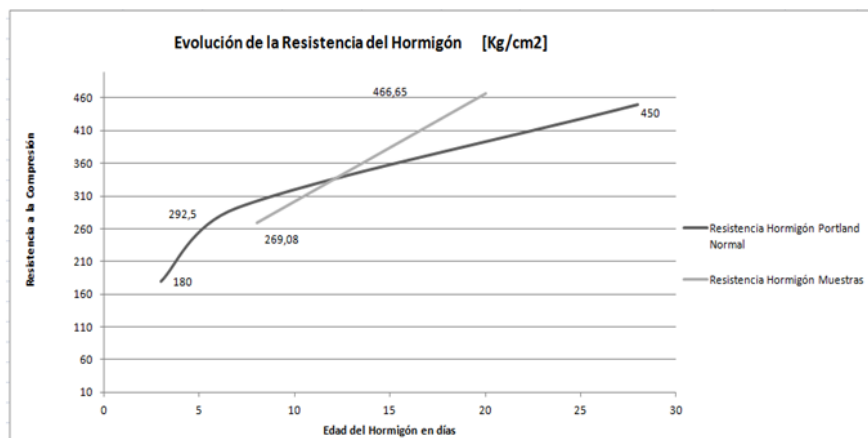
Elaboro Egd. Sixto Gabriel Vaca Uribe

Tabla No VI.25- Evolución del hormigón muestras

Evolución de las Muestras Kg/cm ²	
Edad / Días	Resistencia
8	269,08
20	466,65

Elaboro Egd. Sixto Gabriel Vaca Uribe

Grafico No VI.59.- Evolución de la Resistencia Hormigón vs. Resistencia Hormigón Muestras



Elaboro Egd. Sixto Gabriel Vaca Uribe

Se presenta una correcta Evolución de la Resistencia del Hormigón ya que se utilizó aditivo acelerante para obtener la resistencia, previa a la colocación de la fibra en las vigas.

La resistencia del hormigón para los ensayos en las vigas es de 466,65 Kg/cm², resistencia obtenida a los 20 días de edad, siendo un hormigón de alta resistencia el que nos servirá para realizar una comparación entre los elementos ensayados sin la colocación de la fibra y los elementos reforzados con la fibra.

6.7.3.2.- Resistencia a Flexión en Vigas de Hormigón con Carga en el Punto Medio. Norma ASTM C 293 - 79

Cálculo Modulo de Rotura - Norma ASTM C 293 - 79

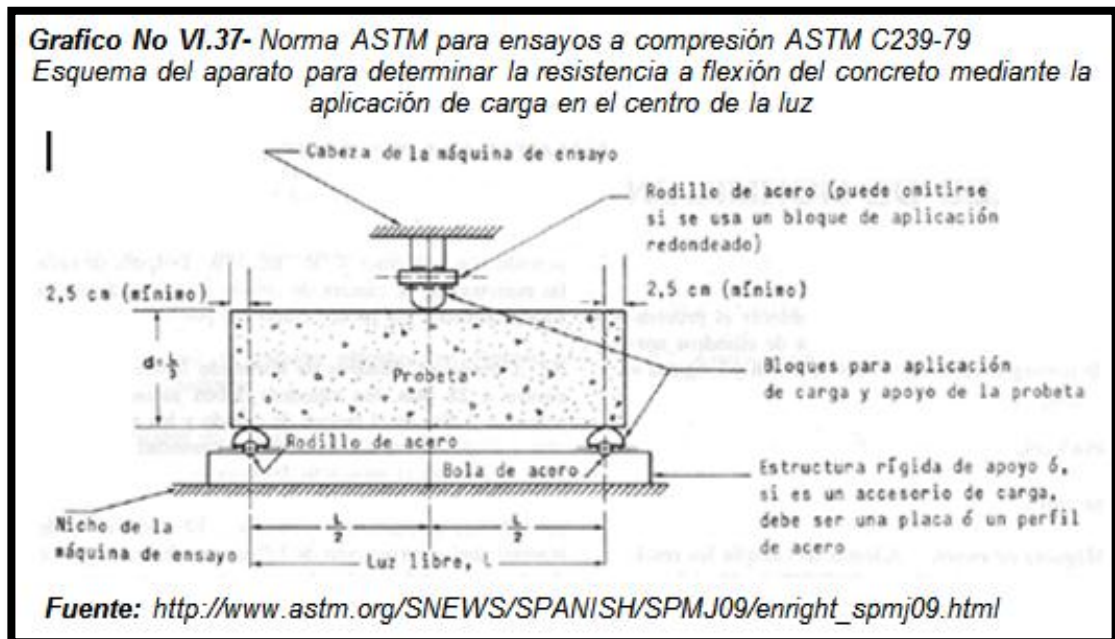
$$R = \frac{3Pl}{2bd^2} ; \text{ En donde: } R = \text{Modulo de Rotura, (MPa)}$$

P= Carga máxima aplicada (N)

l= Luz libre entre apoyos probeta (mm)

b= Ancho promedio de la probeta

d= Altura promedio de la probeta



6.7.3.3.- VIGAS DE HORMIGÓN SIMPLE - VIGAS HORMIGÓN SIMPLE REFORZADAS CON FIBRA DE CARBONO

La capacidad de carga promedio de las 3 muestras de las vigas de hormigón simple es de 13463,33 N.

La capacidad de carga promedio de las 3 muestras de las vigas de hormigón simple reforzadas con fibra de carbono es de 21650 N.

Las muestras identificadas con la nomenclatura H1, H2, H3; fueron elaboradas de Hormigón Simple, y de las 3 muestras elaboradas obtenemos un módulo de rotura promedio de 3,57 MPa (36,41Kg/cm²).

Las muestras identificadas con la nomenclatura H4, H5, H6; fueron elaboradas de Hormigón Simple reforzadas con una capa de Fibra de Carbono CARBOWRAP 300_{CFRP}, Resistencia a la Tensión 72,4 MPa de espesor $t_f=0,50$ mm, ancho $w_f=80$ mm, longitud $l=1000$ mm; de las 3 muestras elaboradas y reforzadas obtenemos un módulo de rotura promedio de 5,60 MPa (57,12Kg/cm²).

Se evidencia un incremento de un 56,87% en el módulo de rotura de las vigas reforzadas con fibra de carbono, respecto de las vigas de hormigón simple.

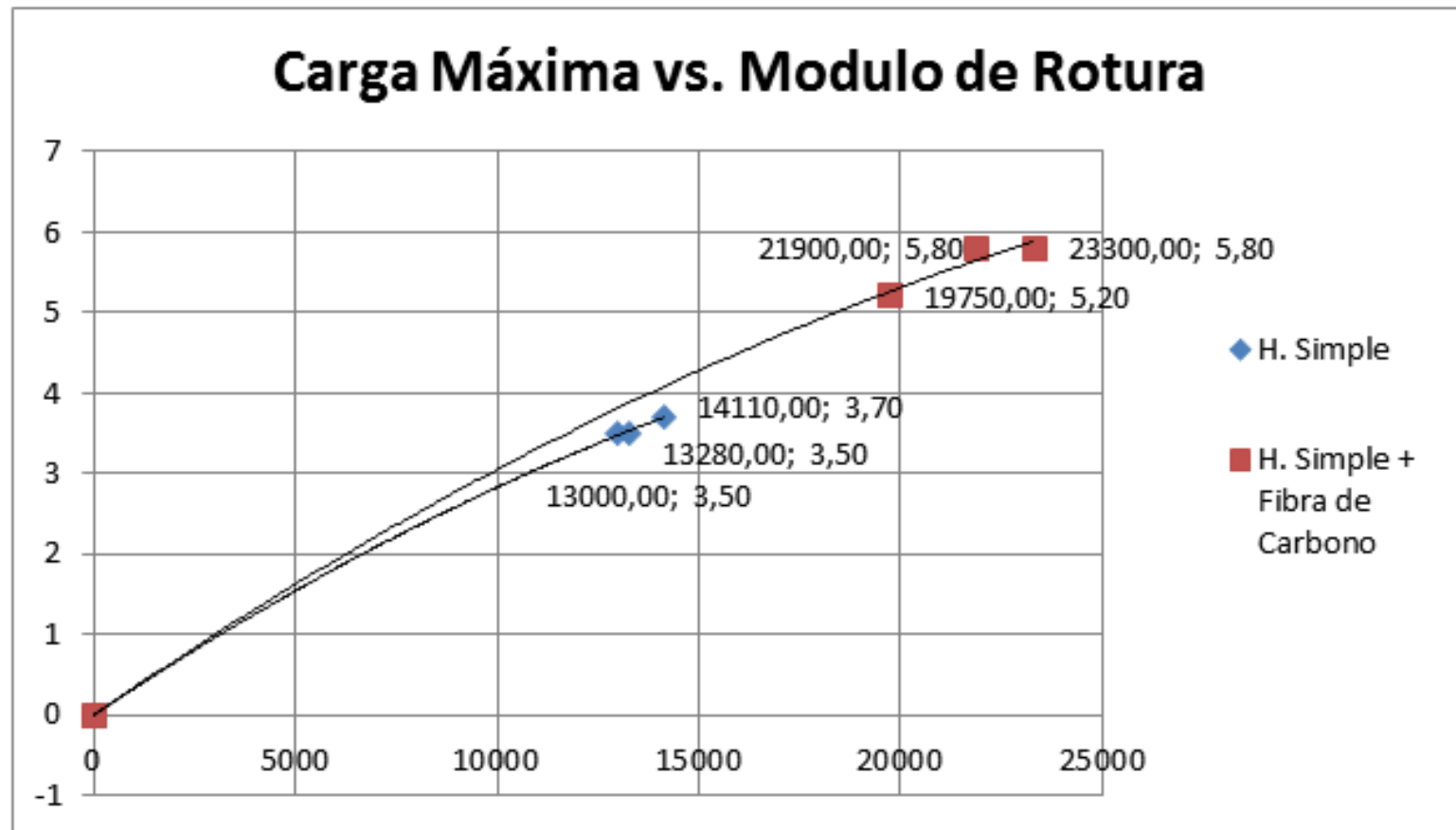
Obtenemos un incremento de la capacidad de carga del 60,81% de las vigas reforzadas con fibra de carbono, respecto de las vigas de hormigón simple.

Tabla No VI.26- Modulo Rotura Vigas de Hormigón Simple vs. Vigas de Hormigón Simple con Reforzamiento de Fibra de Carbono

Probeta N°	1	2	3	4	5	6
Identificación de la Probeta	H1	H2	H3	H4	H5	H6
Descripción	Hormigón Simple			Hormigón Simple con Reforzamiento de Fibra de Carbono		
Fecha de Fabricación	30/08/2013					
Fecha de Ensayo	19/09/2013					
Edad (días)	20					
Longitud (mm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Ancho (mm)	200	200	200	200	200	200
Altura (mm)	154	155	155	155	160	155
Volumen (mm ³)	30800000,00	31000000,00	31000000,00	31000000,00	32000000,00	31000000,00
Distancia entre apoyos (mm)	850	850	850	850	850	850
Carga Máxima (N)	13000,00	13280,00	14110,00	19750,00	23300,00	21900,00
Módulo de Rotura en (MPa)	3,50	3,50	3,70	5,20	5,80	5,80
Módulo de Rotura Promedio en (MPa)	3,57			5,60		

Elaboro Egd. Sixto Gabriel Vaca Uribe

Grafico No VI.60- INCREMENTO CAPACIDAD DE CARGA CON FIBRAS CFRP - CARGAS MAXIMAS Y MODULOS DE ROTURA PROMEDIO



Elaboro Egdo. Sixto Gabriel Vaca Uribe

6.7.3.4.- VIGAS DE HORMIGÓN SIMPLE + ACERO DE REFUERZO A FLEXION + REFORZADAS CON FIBRA DE CARBONO

La capacidad de carga promedio de las 3 muestras de las vigas de hormigón simple más acero de refuerzo a flexión es de 46116,67 N.

La capacidad de carga promedio de las 3 muestras de las vigas de hormigón simple más acero de refuerzo a flexión reforzadas con fibra de carbono es de 60266,67 N.

Las muestras identificadas con la nomenclatura F1, F2, F3; fueron elaboradas de Hormigón Simple más acero de refuerzo a flexión, y de las 3 muestras elaboradas obtenemos un módulo de rotura promedio de 12,23 MPa (124,75Kg/cm²).

Las muestras identificadas con la nomenclatura F4, F5, F6; fueron elaboradas de Hormigón Simple más acero de refuerzo a flexión reforzadas con una capa de Fibra de Carbono CARBOWRAP 300_{CFRP}, Resistencia a la Tensión 72,4 MPa de espesor $t_f=0,50$ mm, ancho $w_f=80$ mm, longitud $l=1000$ mm; de las 3 muestras elaboradas y reforzadas obtenemos un módulo de rotura promedio de 16,00 MPa (163,20Kg/cm²).

Se evidencia un incremento de un 30,83% en el módulo de rotura de las vigas reforzadas con fibra de carbono, respecto de las vigas de hormigón simple más acero de refuerzo a flexión.

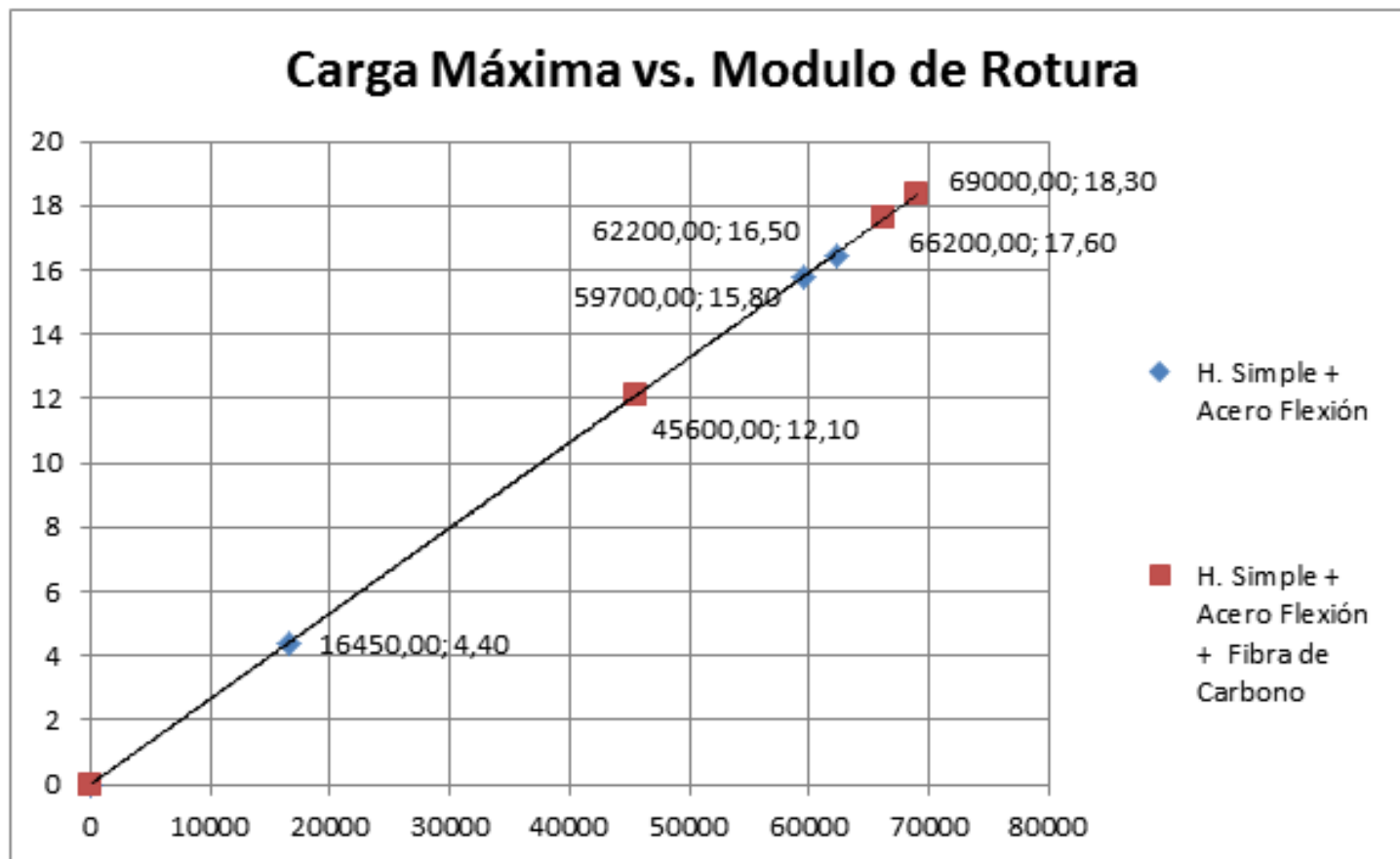
Obtenemos un incremento de la capacidad de carga del 30,68% de las vigas reforzadas con fibra de carbono, respecto de las vigas de hormigón simple más acero de refuerzo a flexión.

Tabla No VI.27- Modulo Rotura Vigas de Hormigón Simple + Acero de Refuerzo a Flexión vs. Vigas de Hormigón Simple + Acero de Refuerzo a Flexión con Reforzamiento de Fibra de Carbono

Probeta N°	7	8	9	10	11	12
Identificación de la Probeta	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Descripción	Hormigón Simple + Acero de Refuerzo a Flexión			Hormigón Simple + Acero de Refuerzo a Flexión con Reforzamiento de Fibra de Carbono		
Fecha de Fabricación	30/08/2013					
Fecha de Ensayo	19/09/2013					
Edad (días)	20					
Longitud (mm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Ancho (mm)	200	200	200	200	200	200
Altura (mm)	155	155	155	155	155	155
Volumen (mm ³)	31000000,00	31000000,00	31000000,00	31000000,00	31000000,00	31000000,00
Distancia entre apoyos (mm)	850	850	850	850	850	850
Carga Máxima (N)	62200,00	59700,00	16450,00	45600,00	69000,00	66200,00
Módulo de Rotura en (MPa)	16,50	15,80	4,40	12,10	18,30	17,60
Módulo de Rotura Promedio en (MPa)	12,23			16,00		

Elaboro Egdo. Sixto Gabriel Vaca Uribe

Grafico No VI.61- INCREMENTO CAPACIDAD DE CARGA CON FIBRAS CFRP - CARGAS MAXIMAS Y MODULOS DE ROTURA PROMEDIO



Elaboro Eqdo. Sixto Gabriel Vaca Uribe

6.7.3.5.- VIGAS DE HORMIGÓN SIMPLE + ACERO DE REFUERZO A FLEXION, COMPRESION Y CORTE - VIGAS HORMIGÓN SIMPLE + ACERO DE REFUERZO A FLEXION Y COMPRESION REFORZADAS CON FIBRA DE CARBONO

La capacidad de carga promedio de las 3 muestras de las vigas de hormigón simple más acero de refuerzo a flexión, compresión y corte es de 58233,33 N.

La capacidad de carga promedio de las 3 muestras de las vigas de hormigón simple más acero de refuerzo a flexión reforzadas con fibra de carbono es de 64133,33 N.

Las muestras identificadas con la nomenclatura C1, C2, C3; fueron elaboradas de Hormigón Simple más acero de refuerzo a flexión, compresión y corte; de las 3 muestras elaboradas obtenemos un módulo de rotura promedio de 15,43 MPa (157,39Kg/cm²).

Las muestras identificadas con la nomenclatura C4, C5, C6; fueron elaboradas de Hormigón Simple más acero de refuerzo a flexión, compresión y corte; reforzadas con una capa de Fibra de Carbono CARBOWRAP 300_{CFRP}, Resistencia a la Tensión 72,4 MPa de espesor $t_f=0,50$ mm, ancho $w_f=80$ mm, longitud $l=900$ mm dispuestas como estribos a lo largo de la viga cada 100mm; de las 3 muestras elaboradas y reforzadas obtenemos un módulo de rotura promedio de 16,67 MPa (170,03Kg/cm²).

Se evidencia un incremento de un 8,04% en el módulo de rotura de las vigas reforzadas con fibra de carbono, respecto de las vigas de hormigón simple más acero de refuerzo a flexión, compresión y corte.

Obtenemos un incremento de la capacidad de carga de 10,13% de las vigas reforzadas con fibra de carbono, respecto de las vigas de hormigón simple más acero de refuerzo a flexión, compresión y corte.

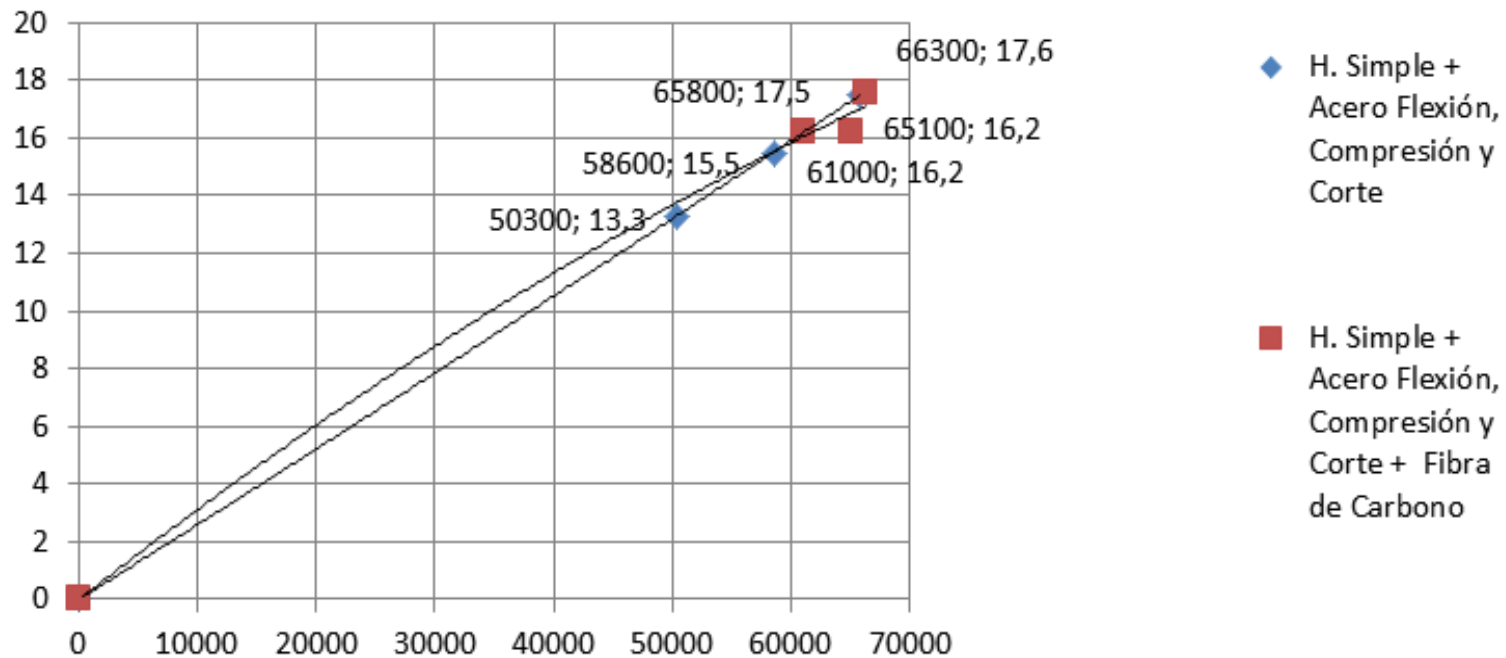
Tabla No VI.28- Modulo Rotura Vigas de Hormigón Simple + Acero de Refuerzo a Flexión, Compresión y Corte vs. Vigas de Hormigón Simple + Acero de Refuerzo a Flexión, Compresión y Corte con Reforzamiento de Fibra de Carbono

Probeta N°	13	14	15	16	17	18
Identificación de la Probeta	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Descripción	Hormigón Simple + Acero de Refuerzo a Flexión, Compresión y Corte			Hormigón Simple + Acero de Refuerzo a Flexión, Compresión y Corte con Reforzamiento de Fibra de Carbono		
Fecha de Fabricación	30/08/2013					
Fecha de Ensayo	19/09/2013					
Edad (días)	20					
Longitud (mm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Ancho (mm)	200	200	200	200	200	200
Altura (mm)	155	155	160	155	155	155
Volumen (mm ³)	31000000,00	31000000,00	32000000,00	31000000,00	31000000,00	31000000,00
Distancia entre apoyos (mm)	850	850	850	850	850	850
Carga Máxima (N)	65800,00	58600,00	50300,00	61000,00	66300,00	65100,00
Módulo de Rotura en (MPa)	17,50	15,50	13,30	16,20	17,60	16,20
Módulo de Rotura Promedio en (MPa)	15,43			16,67		

Elaboro Egdo. Sixto Gabriel Vaca Uribe

Grafico No VI.62- INCREMENTO CAPACIDAD DE CARGA CON FIBRAS CFRP - CARGAS MAXIMAS Y MODULOS DE ROTURA PROMEDIO

Carga Máxima vs. Modulo de Rotura



Elaboro Egdo. Sixto Gabriel Vaca Uribe

6.7.4.- INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

En las vigas de hormigón simple reforzadas con fibras de carbono se produce un incremento del 60,81% en la capacidad de carga, respecto de las vigas sin reforzamiento.

Las vigas de hormigón simple que no tienen reforzamiento CFRP se produce una falla a la rotura de 90°.



Las vigas de hormigón simple que tienen reforzamiento CFRP se produce fisuramiento a 45° por la ausencia de reforzamiento a corte, no se evidencia una falla a la rotura del elemento por el reforzamiento de fibra colocado.



En las vigas de hormigón simple más acero de refuerzo a flexión reforzadas con fibras de carbono se produce un incremento del 30,68% en la capacidad de carga, respecto de las vigas sin reforzamiento.

Las vigas de hormigón simple más acero de refuerzo a flexión que no tienen reforzamiento CFRP se produce fisuramiento a 225° y 315° del punto de aplicación de la carga.



Las vigas de hormigón simple más acero de refuerzo a flexión que tienen reforzamiento CFRP se produce fisuramiento a 315° por la ausencia de reforzamiento a corte, por la colocación del reforzamiento disminuye la fisuración y aparece el agrietamiento del hormigón.

La viga se muestra más flexible con reforzamiento de fibra de carbono.

Grafico No VI.69- Ensayo Viga Hormigón Simple mas Acero de Refuerzo a Flexión con Reforzamiento de Fibra de Carbono



Elaboro Egdo. Sixto Gabriel Vaca Uribe

Grafico No VI.70- Falla Viga Hormigón Simple mas Acero de Refuerzo a Flexión con Reforzamiento de Fibra de Carbono



Elaboro Egdo. Sixto Gabriel Vaca Uribe

En las vigas de hormigón simple más acero de refuerzo a flexión, compresión y corte; reforzadas con fibras de carbono se produce un incremento del 10,13% en la capacidad de carga, respecto de las vigas sin reforzamiento.

Las vigas de hormigón simple más acero de refuerzo a flexión, compresión y corte; que no tienen reforzamiento CFRP se reducen notablemente la presencia de fisuras.



Las vigas de hormigón simple más acero de refuerzo a flexión, compresión y corte; que tienen reforzamiento CFRP falla por des laminación de la fibra por este efecto reduce notablemente el incremento en la capacidad de carga, debiendo tenerse en

cuenta el procedimiento de colocación de la fibra y que en este caso no se realizó la protección de la fibra, como se enuncia en el proceso adecuado de colocación.

Además se observa fisuración a 90° adyacente a la banda de reforzamiento de fibra de carbono.

Grafico No VI.73- Ensayo Viga Hormigón Simple mas Acero de Refuerzo a Flexión, Compresión y Corte



Elaboro Egdo. Sixto Gabriel Vaca Uribe

Grafico No VI.74- Falla Viga Hormigón Simple mas Acero de Refuerzo a Flexión, Compresión y Corte



Elaboro Egdo. Sixto Gabriel Vaca Uribe

6.7.5.- CONCLUSIONES

1. Las fallas producidas se presentan por rotura del aplastamiento del hormigón.
2. La fibra de Carbono no presenta ningún tipo de falla.
3. La fibra presenta un alto desempeño como material de reforzamiento sometido a flexión.
4. La guía ACI introduce en su procedimiento el cálculo de la deformación eficaz del CFRP. Esta deformación está condicionada por el coeficiente de dependencia del adhesivo y el objeto de su aplicación es prevenir el despegue del laminado CFRP del sustrato de hormigón o desprendimiento del recubrimiento de hormigón puesto que las tensiones en el refuerzo pueden ser superiores a las soportadas por el hormigón.
5. La fibra de Carbono presenta un comportamiento lineal durante el ensayo.
6. Para realizar un análisis de reforzamiento con fibras CFRP es necesario determinar las características del elemento que va a ser intervenido, por lo cual la cantidad de fibra a utilizarse será la que se determine en el cálculo.
7. El incremento de la capacidad de carga en elementos estructurales con más vulnerabilidad, reforzados con fibras CFRP presentan incrementos considerablemente elevados.
8. Es importante mitigar en las nuevas ventajas que presenta un reforzamiento con materiales ligeros ya que no incrementa considerablemente su peso.
9. Los materiales en manos del ingeniero, no compiten, sino que aportan diferentes cualidades y, lejos de llevarse mal, se complementan.
10. Cada material tiene su etopeya y para eso está el ingeniero, para saber explotar sus recursos resistentes y expresivos.

6.7.6.- RECOMENDACIONES

1. El profesional debe analizar minuciosamente cada paso para obtener el resultado acertado del refuerzo y obtener éxito en el proceso de intervención.

2. Para el reforzamiento con fibras CFRP se ha demostrado que se debe estudiar cada caso de forma individual y tener en cuenta las características del material.
3. Las fibras CFRP son recomendables para reforzamientos en elementos sometidos a flexión.
4. El éxito de una reparación con un material compuesto dependerá de la selección del tipo y de la aplicación.
5. Realizar un análisis del elemento sometido a estudio para su posterior reforzamiento.
6. Determinar el nuevo tipo de cargas así como el nuevo uso que se dará en la estructura a Reforzar.

6.8.- ADMINISTRACIÓN

La Administración de esta investigación servirá para futuras investigaciones en el campo del reforzamiento de Estructuras con materiales compuestos.

Permitirá la indagación de los beneficios de nuevas técnicas constructivas en el campo aplicado a la Ingeniería Civil, así como el interés por conocer los múltiples campos de aplicación con este sistema.

6.9.- PREVISIÓN DE LA EVALUACIÓN

Se espera la aplicación de este sistema como método de reforzamiento en estructuras que así lo permitan siguiendo cada uno de los pasos ya mencionados permitiéndonos tener estructuras seguras con elevadas resistencias sin incrementar el peso propio de las mismas.

La normativa a seguir se basa en las publicaciones emitidas por el Código ACI-440.

BIBLIOGRAFÍA

1. "Patologías de hormigón armado y pretensado" J. Calavera.
2. Strengthening of structures with CFRP strips. W Steiner, AG, Tuffenwies
CH-8048 Zurich, Switzerland
3. ACI 318S, Capitulo 10, FLEXION Y CARGAS AXIALES.
4. NEC 2011, Normas Ecuatorianas de la Construcción.
5. Reglamento ACI 318S y Comentarios. Introducción.
6. Reglamento ACI 318S y Comentarios. Capitulo 1 Requisitos Generales
7. ACI 318S, Capitulo 10, Flexión y Cargas Axiales.
8. "Notas para una historia del Hormigón Estructural " UD HORMIGÓN
ESTRUCTURAL JLG. ED. 02 Prof. Meseguer, García.
9. L´ Hermite: "Reinforcement des ouvragues en béton et en maconnerie par collage."
Annales ITBTP 349
10. LRichardson & Lokensgard "*Industria del plástico*". Madrid. Editorial Paraninfo,
2002, pág. 122.
11. Design Manual No.4 (2001), Strengthening reinforced concrete structures with
externally-bonded fibre reinforced polymers, Isis Canada, The Canadian Network of
Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures.
12. Teng JG, Chen JF, Smith ST, Lam L (2002), *FRP strengthened RCstructures*. John
Wiley and Sons.

INTERNET

- <http://blog.pucp.edu.pe/media/688>
- <http://www.ai.org/cntractdocs/IAS077630>
- www.normaconstrucion.ec
- http://sigar.chacao.gob.ve/EDURIESGO/documentos/vulnerabilidad_archivos/04_patologias_en_las_edificaciones.pdf

ANEXO 1: PROCESO DE LA METODOLOGIA

6.7.1.2 VIGAS DE HORMIGÓN







MUESTRAS PARA ENSAYOS DE RESISTENCIA DEL HORMIGÓN



CURADO DE LOS CILINDROS DE HORMIGÓN



IDENTIFICACIÓN DE LAS VIGAS



PREPARACIÓN DE LA RESINA, SATURACIÓN DE A FIBRA Y COLOCACIÓN DEL REFORZAMIENTO CFRP



COLOCACIÓN DEL REFORZAMIENTO CFRP, PROCESO DE FRAGUADO DE LA RESINA



ENSAYO DE LAS MUESTRAS

ANEXO 2: ENCUESTA

UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA
CARRERA INGENIERIA CIVIL

**PROYECTO: “ANÁLISIS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES QUE
TRABAJAN A FLEXIÓN CON FIBRAS DE CARBONO”**

Ocupación o Cargo:

Edad:

PREGUNTA	RESPUESTA	
	SI	NO
1. Conoce algún tipo de Reforzamiento Estructural.		
2. Conoce acerca de la Fibras de Carbono.		
3. Sabía que la Fibra de Carbono sirve como elementos de Reforzamiento Estructural para la construcción.		
4. Al ser la Fibra de Carbono un material con altas prestaciones mecánicas, la usaría como un sistema de Reforzamiento.		
5. Tiene conocimiento de las empresas que brindan de estos sistemas de reforzamiento.		
6. Está de acuerdo de que se realicen investigaciones sobre nuevos materiales para la construcción, aplicada a diferentes tipos de solicitaciones que puedan presentarse.		