



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

AUTOR: CEVALLOS OÑA, DIEGO PAÚL

**TEMA: REFORZAMIENTO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS CON FIBRA DE
VIDRIO**

DIRECTOR: DR. ING AGUIAR, ROBERTO

CODIRECTOR: DR. ING. CAIZA, PABLO

SANGOLQUÍ, FEBRERO 2014

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr. **DIEGO PAÚL CEVALLOS OÑA** como requerimiento parcial a la obtención del título de INGENIERO CIVIL

Sangolquí, febrero del 2014

Dr. Ing. Roberto Aguiar Falconí

Director De Tesis

Dr. Ing. Pablo Caiza Sánchez

Codirector De Tesis

REVISADO POR

Dr. Ing. Pablo Caiza Sánchez

Director de La Carrera de Ingeniería Civil

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

DIEGO PAÚL CEVALLOS OÑA

Declaro que:

El proyecto de grado denominado **“REFORZAMIENTO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS CON FIBRA DE VIDRIO”**, ha sido desarrollado en base a una investigación adecuada, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las referencias que constan en las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención parcial a la obtención del título de Ingeniero Civil.

Sangolquí, febrero de 2014

DIEGO PAÚL CEVALLOS OÑA

AUTORIZACIÓN

Yo, DIEGO PAÚL CEVALLOS OÑA

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución, del trabajo “REFORZAMIENTO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS CON FIBRA DE VIDRIO”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, febrero de 2014

DIEGO PAÚL CEVALLOS OÑA

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo, a mis padres Luis Cevallos y Fabiana Oña, quienes siempre me han apoyado a lo largo de mi vida; ellos nunca perdieron la fe en mí, son un ejemplo de trabajo y lucha constante, ellos significan todo en mi vida. A mis hermanas Tatiana y Jhoanna, las cuales siempre han sido un apoyo incondicional, a lo largo de mi carrera. A mis sobrinos Jeremmy y Paula que con su cariño me dan la fuerza necesaria para seguir incansablemente hacia mi meta. A mis abuelitos que gracias a sus bendiciones y consejos dirigieron mi esfuerzo por el camino correcto.

DIEGO PAÚL CEVALLOS OÑA

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi Dios y a la Virgen, por llevarme por el camino correcto hasta donde he llegado hoy, por guiarme siempre hacia las mejores decisiones. A mis padres por darme todo sin pedir nada a cambio, a mis hermanas por cuidarme siempre, a mi familia que de una u otra manera siempre me han dado su apoyo, a mis cuñados a los cuales los considero mis hermanos.

De manera muy especial agradezco a mis Directores de tesis, al Dr. Roberto Aguiar y al Dr. Pablo Caiza, gracias por brindarme su guía cuando la necesitaba, por siempre estar ayudándome con consejos y por ser un ejemplo a seguir; por sembrar la semilla del saber durante mi carrera

A mis amigos, Dayana gracias por estar siempre conmigo, por ser una verdadera amiga, gracias por ayudarme en esta tesis, gracias por estar en todo momento como amiga incondicional desde que entramos a la ESPE hasta el día de hoy, a Jonattan gracias por toda la ayuda, sin ustedes esta tesis no hubiese sido posible, a Fabián mi hermano gracias por los consejos. Gracias al Ing. Hugo Bonifaz por las facilidades en el uso del Laboratorio de suelos.

DIEGO PAÚL CEVALLOS OÑA

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	i
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
LISTADO DE TABLAS	xi
LISTADO DE FIGURAS	xiv
RESUMEN	xix
ABSTRACT	xx
CAPÍTULO 1	1
GENERALIDADES	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Justificación del Proyecto.....	2
1.3 Objetivo General del Proyecto	2
1.4 Objetivos Específicos del Proyecto	3
CAPÍTULO 2	4
MATERIALES COMPUESTOS: FRP (FIBER REINFORCED POLYMERS) .	4
2.1 Introducción.....	4

2.2	Clases de materiales.....	5
2.2.1	Fibra de Carbono (CFRP)	5
2.2.2	Fibra de vidrio	6
2.2.3	Fibra de Aramida.....	8
2.2.4	Curva esfuerzo deformación de los distintos tipos de materiales.....	9
2.3	Reforzamientos realizados en América.....	10
2.3.1	Refuerzo de muros de corte en un edificio ubicado en Cali	10
2.3.2	Reforzamiento del techo de un estadio con FRP	13
2.3.3	Reforzamiento de columnas en edificio de apartamentos.....	14
2.3.4	Simulación numérica de un pórtico de hormigón armado bajo acción dinámica reforzado con fibra de vidrio	15
2.4	Reforzamientos realizados en el Ecuador.....	19
2.4.1	Reforzamiento de la Catedral de Cuenca	20
2.4.2	Reforzamiento del puente La Saquea	24
2.4.3	Reforzamiento del puente La Asunción.....	28
	CAPÍTULO 3.....	32
	FIBRA DE VIDRIO.....	32
3.1	Introducción.....	32
3.2	Características mecánicas de la fibra de vidrio estructural	33
3.2.1	Resistencia.....	34
3.2.2	Resistencia específica.....	36

3.2.3	Capacidad de deformación	36
3.2.4	Módulo de elasticidad o módulo de deformación	37
3.2.5	Módulo específico de elasticidad.	38
3.2.6	Densidad	39
3.2.7	Coeficiente de Poisson.....	39
3.2.8	Coeficiente de dilatación térmica	39
3.2.9	Fluencia.....	40
3.2.10	Relajación	41
3.2.11	Tenacidad	41
3.2.12	Propiedades de la fibra de vidrio SikaWrap 100 G.....	42
3.3	Fibra de vidrio tradicional	43
3.3.1	Clasificación de la fibra de vidrio tradicional.....	44
3.3.2	Sistemas de resina.....	45
3.3.3	Propiedades típicas de las resinas.....	48
3.4	Procedimiento de instalación de la fibra de vidrio estructural y tradicional	48
3.4.1	Instalación de Sika Wrap hex 100G	48
3.4.2	Instalación de fibra de vidrio tradicional	57
	CAPÍTULO 4.....	60
	MODELOS MATEMÁTICOS DEL HORMIGÓN CONFINADO A COMPRESIÓN CON FIBRA DE VIDRIO GFRP	60

4.1	Introducción.....	60
4.2	Modelo de Teng <i>et al.</i> para columnas circulares.....	61
4.3	Modelo de Al-Salloum para columnas rectangulares.....	65
4.4	Modelo de Mander.....	68
4.5	Modelo ACI 440.2R-08.....	73
4.6	Ventajas del confinamiento con fibra de vidrio estructural GFRP ...	78
CAPÍTULO 5.....		84
ENSAYOS A COMPRESIÓN REALIZADOS.....		84
5.1	Introducción.....	84
5.2	Dosificación del hormigón.....	85
5.2.1	Granulometría de los agregados.....	85
5.2.2	Contenido de humedad.....	86
5.2.3	Densidad aparente suelta y compactada.....	87
5.2.4	Peso específico y absorción de los agregados.....	87
5.2.5	Procedimiento para la dosificación del hormigón.....	90
5.3	Construcción de los cilindros de hormigón.....	92
5.4	Ensayos a compresión de hormigón sin fibra.....	94
5.4.1	Resultados de los ensayos del hormigón sin confinar.....	99
5.5	Ensayos a compresión de hormigón con fibra de vidrio estructural GFRP.....	99

5.5.1	Resultados de los ensayos hormigón confinado con una capa de GFRP SikaWrap 100G Hex	102
5.6	Ensayos a compresión de hormigón con fibra de vidrio tradicional	103
5.6.1	Resultados de los ensayos a hormigón confinado con una capa de fibra de vidrio tradicional	104
5.6.2	Resultados de los ensayos a hormigón confinado con dos capas de fibra de vidrio tradicional.....	106
5.6.3	Resultados de los ensayos a hormigón confinado con tres capas de fibra de vidrio tradicional.....	108
	CAPÍTULO 6.....	112
	COMPARACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PARA LA CURVA ESFUERZO–DEFORMACIÓN DEL ACI 440 CON LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES	112
6.1	Introducción.....	112
6.2	Módulo de elasticidad del hormigón (sin confinar y confinado)	113
6.2.1	Módulo de elasticidad del hormigón sin confinar.....	115
6.2.2	Módulo de elasticidad del hormigón confinado con fibra de vidrio SikaWrap Hex 100G	117
6.2.3	Módulo de elasticidad del hormigón confinado con fibra de vidrio tradicional	119

6.3	Análisis de las curvas esfuerzo deformación con fibra de vidrio estructural GFRP y comparación con modelo ACI 440.2R-08.....	121
6.3.1	Cálculo de factores de la curva ACI 440.2R-08	121
6.3.2	Comparación de curva ACI 440.2R-08 y teórica	124
6.4	Análisis de curvas esfuerzo deformación con fibra de vidrio tradicional comparación con modelo ACI 440.2R-08.....	125
6.4.1	Comparación de curva la curva esfuerzo deformación del ACI 440.2R-08 con la curva teórica para cilindros con una capa de fibra de vidrio tradicional	126
6.4.2	Comparación de curva la curva esfuerzo deformación del ACI 440.2R-08 con la curva teórica para cilindros con dos capas de fibra de vidrio tradicional.....	130
6.5	Comparación del comportamiento de las fibras de vidrio GFRP y tradicional	132
	CAPÍTULO 7.....	135
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	135
7.1	Conclusiones.....	135
7.2	Recomendaciones.....	140
7.3	Bibliografía	142

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades de la fibra de carbono	6
---------------------------------------------------	---

Tabla 2: Propiedades de la fibra de vidrio.....	7
Tabla 3: Propiedades de la fibra de aramida	9
Tabla 4: Parámetros dinámicos del pórtico determinados experimentalmente.	17
Tabla 5: Valores típicos de los módulos de elasticidad de un laminado unidireccional.....	37
Tabla 6: Coeficientes de dilatación térmica comunes para diferentes materiales	40
Tabla 7: Datos técnicos de la fibra de vidrio SikaWrap 100G	43
Tabla 8: Propiedades de la resinas.....	48
Tabla 9: Dosificación de la resina	58
Tabla 10: Valores de CE	72
Tabla 11: Dosificación del hormigón	91
Tabla 12: Valores obtenidos en cilindros confinados con una capa de fibra SikaWrap Hex 100G	103
Tabla 13: Valores obtenidos en cilindros confinados con una capa de fibra de vidrio tradicional	105
Tabla 14: Valores obtenidos en cilindros confinados con dos capas de fibra de vidrio tradicional	107
Tabla 15: Valores obtenidos en cilindros confinados con tres capas de fibra de vidrio tradicional	110
Tabla 16: Módulos de elasticidad de agregados, E_a	115
Tabla 17: Datos para obtener el módulo de elasticidad en cilindros de hormigón sin confinar.....	116

Tabla 18: Valores del Módulo de Elasticidad del Hormigón sin confinar....	116
Tabla 19: Datos para obtener el módulo de elasticidad del hormigón confinado con una capa de GFRP	118
Tabla 20: Valores del Módulo de Elasticidad del Hormigón confinado con una capa de GFRP	119
Tabla 21: Datos para obtener el módulo de elasticidad en cilindros confinados con fibra de vidrio tradicional	120
Tabla 22: Valores del Módulo de Elasticidad del Hormigón confinado con una capa de GFRP	120
Tabla 23: Comparación de valores prácticos con analíticos	124
Tabla 24: Resumen de datos de cilindros confinados con fibra de vidrio tradicional	125
Tabla 25: Módulos de elasticidad de la fibra de vidrio tradicional Modelo ACI	126
Tabla 26: Valores para hormigón confinado con una capa de fibra de vidrio tradicional	127
Tabla 27: Módulos de elasticidad de la fibra de vidrio tradicional Modelo de Mander	128
Tabla 28: Valores obtenidos usando las ecuaciones de Mander en comparación con valores de laboratorio	129
Tabla 29: Valores para hormigón confinado con dos capas de fibra de vidrio tradicional	130
Tabla 30: Valores obtenidos usando las ecuaciones de Mander en comparación con valores de laboratorio	131

Tabla 31: Valores obtenidos en laboratorio de los ensayos a hormigón confinado y sin confinar	133
Tabla 32: Valores típicos de las propiedades de las fibras	135

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Comportamiento de σ - ϵ de varios materiales reforzados con fibras	9
Figura 2 : Muros de corte reforzados con fibra de carbono	11
Figura 3: Corbatines SikaWrap	12
Figura 4: Reforzamiento de nudos con SikaWrap.....	12
Figura 5: Colocación de platinas en vigas del techo del estadio.....	13
Figura 6: Reforzamiento por cortante en vigas	14
Figura 7: Colocación de SikaWrap 300C	15
Figura 8: Pórtico antes de reforzar.....	16
Figura 9: Rehabilitación de las bases de las columnas del pórtico	18
Figura 10: Refuerzo del pórtico con fibra de vidrio.....	19
Figura 11: Fisura en la Cúpula de la Catedral de Cuenca	20
Figura 12: Modelo en SAP con elementos tipo Shell	21
Figura 13: Arco trabajando a compresión	22
Figura 14: Modelo de refuerzo con fibra de carbono	22
Figura 15: Modelo de la cúpula sin refuerzo y con refuerzo	23
Figura 16: Colocación y presentación final del reforzamiento.....	24
Figura 17: Puente La Saquea	25
Figura 18: Levantamiento topográfico del Puente La Saquea	26

Figura 19: Modelo en SAP del puente La Saquea	27
Figura 20: Colocación de platinas Sika Carbodur	28
Figura 21: Fisuras en la base de las columnas.....	29
Figura 22: Reducción de las columnas	30
Figura 23: Colocación de fibra de carbono	31
Figura 24: Configuraciones de la fibra de vidrio.....	32
Figura 25: Módulos en función de la orientación de las fibras	38
Figura 26: SikaWrap Hex 100G	48
Figura 27: Limpieza de la superficie	49
Figura 28: Colocación de cinta adhesiva	50
Figura 29: Manejo de la fibra de vidrio.....	51
Figura 30: Componentes del epóxico Sikadur 301	52
Figura 31: Componente A.....	53
Figura 32: Mezcla de componentes A y B	54
Figura 33: Aplicación de la resina.....	55
Figura 34: Aplicación de la fibra de vidrio SikaWrap Hex 100G.....	56
Figura 35: Resultado final de la instalación de la fibra de vidrio SikaWrap Hex 100G.....	56
Figura 36: Resina pasado los 90 minutos	57
Figura 37: Fibra de vidrio tradicional tipo manta	58
Figura 38: Colocación de la fibra de vidrio, resina y secado.....	59
Figura 39: Acción del confinamiento del compuesto FRP	62
Figura 40: Dimensiones de las secciones confinadas	66
Figura 41: k_e frente a r/b para los especímenes considerados el estudio .	67

Figura 42: Modelo Mander et al	69
Figura 43: Modelo de ACI 440.2R-08 para hormigón confinado con FRP ...	73
Figura 44: Curva Esfuerzo – deformación de la fibra de vidrio	75
Figura 45: Sección equivalente.....	77
Figura 46: Encamisado de columnas.....	78
Figura 47: Encamisado con acero	79
Figura 48: Expansión del hormigón a falta de confinamiento.	82
Figura 49: Falla por cizallamiento en columna, Terremoto de Northridge (1994)	83
Figura 50: Tamices para realizar granulometría de los agregados	86
Figura 51: Eliminación de vacíos en el picnómetro.....	89
Figura 52: Cilindros de hormigón	94
Figura 53: Máquina de ensayo.....	95
Figura 54: Lectura de deformaciones	96
Figura 55: Colocación del compresómetro	97
Figura 56: Iteraciones para obtener la curva esfuerzo deformación del hormigón sin confinar.....	98
Figura 57: Curvas Esfuerzo – deformación del hormigón sin fibra.....	99
Figura 58: Ensayo curva esfuerzo deformación del hormigón confinado con SikaWrap Hex 100G	100
Figura 59: Falla del cilindro con FRP	101
Figura 60: Grietas en hormigón confinado con fibra de vidrio FRP.....	102
Figura 61: Curvas Esfuerzo – deformación del hormigón confinado con SikaWrap 100G.....	103

Figura 62: Ensayo curva esfuerzo deformación del hormigón confinado con fibra de vidrio tradicional.....	104
Figura 63: Plano de falla y grietas en hormigón confinado con una capa de fibra de vidrio tradicional	105
Figura 64: Curvas Esfuerzo – deformación del hormigón confinado con una capa de fibra de vidrio tradicional	106
Figura 65: Plano de falla y grietas en hormigón confinado con dos capas de fibra de vidrio tradicional.....	107
Figura 66: Curvas Esfuerzo – deformación del hormigón confinado con dos capas de fibra de vidrio tradicional.....	108
Figura 67: Ensayo curva esfuerzo deformación del hormigón confinado con tres capas de fibra de vidrio tradicional.....	109
Figura 68: Plano de falla y grietas en hormigón confinado con tres capas de fibra de vidrio tradicional.....	109
Figura 69: Falla en cilindros confinados con tres capas de fibra de vidrio tradicional	110
Figura 70: Curvas Esfuerzo – deformación del hormigón confinado con tres capas de fibra de vidrio tradicional.....	111
Figura 71: Método de la cuerda del Gráfico Esfuerzo – Deformación.....	118
Figura 72: Curva Esfuerzo – deformación analítica del Modelo ACI 440.2R-08 con datos de proveedor.....	123
Figura 73: Curvas Esfuerzo – deformación Modelo ACI y experimental	125
Figura 74: Curvas esfuerzo – deformación del hormigón confinado con una capa de fibra de vidrio tradicional	127

Figura 75: Curvas esfuerzo – deformación del hormigón confinado con una capa de fibra de vidrio tradicional	129
Figura 76: Curvas esfuerzo – deformación del hormigón confinado con dos capas de fibra de vidrio tradicional	131
Figura 77: Curvas esfuerzo – deformación del hormigón confinado con una capa de fibra de vidrio tradicional.....	132
Figura 78: Curvas esfuerzo – deformación obtenidas en laboratorio.....	133
Figura 79: Modelado del comportamiento de hormigón confinado con acero y con FRP (CFRP y GFRP)	136

RESUMEN

Una opción para reforzar estructuras es mediante el empleo de FRP (Fiber Reinforced Polymer) ya que se mantiene la arquitectura de la estructura original, no se incrementa peso y el reforzamiento es bastante limpio y rápido. Por este motivo es que ha tenido gran desarrollo en los últimos años y es así como en el Ecuador desde hace algún tiempo se vende la fibra de carbono CFRP y últimamente ya se encuentra en el mercado la fibra de vidrio GFRP. Precisamente con este último material se realiza la investigación en este trabajo. En esta tesis se presenta el comportamiento de cilindros de hormigón sin y con reforzamiento con fibra de vidrio SikaWrap Hex 100G y con la fibra de vidrio tradicional, se presentan las curvas esfuerzo-deformación para estos tres casos y se comparan los parámetros principales de esta curva, encontrados en el laboratorio, con los modelos de cálculo recomendados por el ACI-440.

Palabras claves: Fibra de Carbono;

Fibra de Vidrio;

SikaWrap;

Fibra de vidrio tradicional;

FRP.

ABSTRACT

An option for structural reinforcement is the use of fiber reinforced polymers (FRP) since they do not change the geometry of the structure, they do not increase weight and their installation is clean and fast. For these reasons their use has been widely extended in recent years. In Ecuador, the carbon reinforced polymers (CFRP) has been sold for some years, and recently the glass fiber reinforced polymers (GFRP) can also be found. This last material is precisely the material employed in this research. In this Thesis is presented the behavior of concrete cylinder with and without SikaWrap Hex 100G, glass fiber reinforced and with conventional glass fiber, is presented. The stress – strain curves for these three cases are presented, and the main experimental (ACI 440) curve parameters, are also compared.

Key words: Carbon fiber reinforced polymers;
Glass fiber reinforced polymers;
SikaWrap;
Conventional glass fiber;
FRP.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 Introducción

El término FRP viene de Fiber Reinforced Polymer, es decir, “material polimérico fibroreforzado”. En los compuestos de matriz polimérica FRP la matriz está generalmente constituida por una resina epoxídica mientras que los refuerzos están constituidos por fibras de carbono, vidrio, etc.

Los FRP son materiales que han sido utilizados desde hace muchos años, en sectores naval aeronáutico, astronáutico y militar, donde se explotan por su inigualable resistencia específica. La notable reducción de los costos, en particular de las fibras de carbono, debida a su mayor difusión y a una optimización de los procesos productivos, ha permitido recientemente la introducción de los FRP también en el sector de la construcción por su facilidad de uso y relativo peso bajo parecido a una tela. El uso del FRP en la construcción está relacionado, esencialmente, con el sector de la restauración de las estructuras deterioradas o dañadas y con el del refuerzo, en particular, en el campo sismo resistente.

En cuanto a los beneficios estructurales se ha comprobado su alta resistencia a la tensión; es resistente a la corrosión finalmente su bajo costo de instalación y rápida puesta en servicio hace de este tipo de material una nueva alternativa de refuerzo. Existen varias clases de materiales de FRP, entre las que se destacan las siguientes: Fibra de Carbono (CFRP); Fibra

de Vidrio (GFRP) y fibra orgánica aramida, los cuales se diferencian en sus propiedades mecánicas. Existe también en el mercado la fibra de vidrio tradicional, la cual se usa para distintos usos como aislante térmico, manualidades y fabricación de piezas en el parque automotor.

1.2 Justificación del Proyecto

En la actualidad, existen numerosas estructuras que están en la necesidad de alguna rehabilitación debido al deterioro, microsismos entre otros. En tal sentido, la necesidad de reparar o reforzar se ha incrementado significativamente. En respuesta a esto, han surgido nuevas tecnologías de refuerzo que incluyen la utilización de fibras, normalmente con polímeros reforzados con fibras (**FRP**) o tejidos de fibras sintéticas, los cuales en gran medida son de un costo relativamente bajo a comparación con otros tipos de refuerzo. Existen modelos matemáticos de hormigón confinado los cuales se pretenden cotejar con resultados prácticos. El beneficio con el refuerzo de GFRP a compresión es elevar la resistencia a compresión axial, f'_c obteniendo un nuevo esfuerzo llamado f'_{cc} por el código ACI 440.

1.3 Objetivo General del Proyecto

Presentar modelos de hormigón confinado con fibra de vidrio GFRP, comparar los resultados teóricos con los resultados obtenidos en el laboratorio.

1.4 Objetivos Específicos del Proyecto

- Conocer los distintos tipos de FRP, los refuerzos que se han hecho con este material y cuál es su forma de instalación.
- Presentar distintos modelos matemáticos de hormigón confinado a compresión con fibra de vidrio estructural con FRP
- Realizar ensayos de compresión de cilindros de hormigón sin confinar y confinados con fibra de vidrio estructural GFRP y tradicional.
- Comparar el modelo matemático para la curva esfuerzo – deformación proporcionada por el ACI 440 con los resultados experimentales obtenidos con fibras de vidrio GFRP y tradicional

CAPÍTULO 2

MATERIALES COMPUESTOS: FRP (FIBER REINFORCED POLYMERS)

2.1 Introducción

En este capítulo se presenta distintas clases de materiales, sus propiedades, usos además se diferencia cada uno de estos, se muestran refuerzos realizados en Ecuador, y en Latinoamérica.

Los FRP presentan un comportamiento elástico y lineal hasta la rotura, lo que les confiere un comportamiento frágil. Esta falta de aviso previo a la rotura se refleja en los coeficientes de seguridad. Las reglas de cálculo dependerán de las características de las FRP y el medio en que estará, como es: su rigidez, deformabilidad, forma de unión, las características del ambiente en que va a estar, etc. En general, los fabricantes de los productos proponen criterios de cálculo.

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.

Una de las fases es usualmente discontinua, conocida regularmente como fibra la cual es un material rígido y otra fase débil en continuo que es llamada matriz. (Pons, 2007)

2.2 Clases de materiales

Existen varias clases de materiales de FRP, entre las que se destacan las siguientes: Fibra de Carbono (CFRP); Fibra de Vidrio (GFRP) y fibra orgánica aramida, los cuales se diferencian en sus propiedades mecánicas. Existe también en el mercado la fibra de vidrio tradicional, la cual se usa para distintos usos como aislante térmico, manualidades y fabricación de piezas en el parque automotor.

2.2.1 Fibra de Carbono (CFRP)

Se denomina fibra de carbono a un compuesto no metálico de tipo polimérico, integrado por una fase dispersante que da forma a la pieza que se quiere fabricar, normalmente alguna resina, y una fase dispersa, un refuerzo hecho de fibras, en este caso, de carbono y cuya materia prima normalmente es el PAN (poliacrilonitrilo). (Águila, 2010)

Las fibras de carbono de alta resistencia y alto módulo tienen un diámetro de 7 a 8 μ m y constan de pequeñas cristalitas de grafito “turbostrático” una de las formas alotrópicas del carbono. 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. (Pons, 2007)

2.2.1.1 Propiedades de la fibra de carbono

Las altas características mecánicas de las fibras de carbono son debidas al alto grado de orientación de los cristales a lo largo de los ejes de las

fibras. Dependiendo del proceso de fabricación se obtienen fibras de bajo módulo, alta resistencia y alargamiento a la rotura o fibras de alto módulo de gran aplicación en el campo aeroespacial, en la Tabla 1 se pueden observar las propiedades de la fibra de carbono.

Tabla 1: Propiedades de la fibra de carbono

Propiedades típica	Resistencia a tensión alta	Módulo alto	Módulo ultra alto
Densidad [g/cm ³]	1.8	1.9	2.0 - 2.1
Módulo de Young [GPa]	230	370	520 - 620
Tensión admisible [GPa]	2.48	1.79	1.03 - 1.31
Tensión de alargamiento [%]	1.1	0.5	0.2

Fuente: (Tang, 1997)

Debido a las propiedades descritas en la Tabla anterior, las fibras de carbono tienen la característica de poseer una gran resistencia a la tracción, respecto a los distintos tipos de fibras. Esto permite su uso en diferentes formas, como telas flexibles o láminas rígidas para recuperar o reparar diferentes elementos estructurales, principalmente sometidos a flexión. (Funes, 2007)

2.2.2 Fibra de vidrio

La fibra de vidrio es un material fibroso obtenido al hacer fluir vidrio fundido a través de una pieza de agujeros muy finos (espinerette) que al solidificarse tiene suficiente flexibilidad como para ser usado como fibra. (Águila, 2010)

Los materiales compuestos reforzados con fibras de vidrio tienen las siguientes características favorables: buena relación resistencia/peso; buena estabilidad dimensional; buena resistencia al calor, al frío, a la humedad y a la corrosión y buenas propiedades aislantes eléctricas. (Pons, 2007)

Las tres clases más importantes de vidrio utilizados para fabricar fibras para materiales compuestos son los vidrios E para usos eléctricos, los vidrios S para refuerzos extremos y los C para resistencia a la corrosión (Tang, 1997), en la Tabla 2 se pueden ver las propiedades de la fibra de vidrio.

2.2.2.1 Propiedades de la fibra de vidrio

Tabla 2: Propiedades de la fibra de vidrio

Propiedades típicas	E-Glass	S-Glass
Densidad [g/cm ³]	2.60	2.50
Módulo de Young [GPa]	72	87
Tensión admisible [GPa]	1.72	2.53
Tensión de alargamiento [%]	2.4	2.9

Fuente: (Tang, 1997)

Las fibras de vidrio, desarrolladas en la forma de tejidos de distintos tamaños, permiten que, unido a la alta resistencia a la tracción de este material y la posibilidad de adaptarse a distintas formas arquitectónicas junto al desarrollo de resinas epóxicas como puente de adherencia y elemento de terminación y protección, se puedan resolver numerosos problemas de daños con increíble facilidad y eficiencia. (Funes, 2007).

2.2.3 Fibra de Aramida

El concepto de fibras orgánicas está basado teóricamente en la creación de fibras con alta resistencia y alto módulo de elasticidad a través de una perfecta alineación de polímeros. Largas cadenas de polietileno que constan de cadenas unidas directamente en zizag de carbono a carbono completamente alineadas y agrupadas estrechamente. (Miravete, 2007)

Las fibras orgánicas más comunes en el mercado son las fibras de Aramida, el cual es el nombre genérico de fibras de poliamida aromática. Las fibras de aramida fueron introducidas comercialmente en 1972 por Du Pont bajo el nombre comercial de Kevlar® y en la actualidad hay dos tipos comerciales: Kevlar® 29 y Kevlar® 49. El Kevlar® 29 tiene una densidad baja y alta resistencia aportada por las fibras de aramida, y está diseñado para aplicaciones como protección balística, cuerdas y cables. (Pons, 2007)

2.2.3.1 Propiedades de la fibra de aramida

Este tipo de fibra tiene elevada resistencia específica a la tracción debido a su alto grado de cristalinidad, es 5 veces más resistente que el acero, alto módulo de elasticidad y baja elongación a la rotura baja resistencia a compresión y flexión a diferencia del resto de las fibras que tienen valores similares para resistencias a la tracción y a compresión. (Águila, 2010), se puede observar sus propiedades en la Tabla 3.

Tabla 3: Propiedades de la fibra de aramida

Typical Properties	Kevlar 29	Kevlar 49	Acero
Densidad [g/cm ³]	1.44	1.44	7.8
Módulo de Young [GPa]	83/100	124	-
Tensión admisible [GPa]	2.27	2.27	0.2-0.6
Tensión de alargamiento [%]	2.8	1.8	25

Fuente: (Tang, 1997)

2.2.4 Curva esfuerzo deformación de los distintos tipos de materiales

En la Figura 1 se comparan los diagramas de ϵ - σ de varios materiales reforzados con fibras, incluyendo las fibras anteriormente mencionadas.

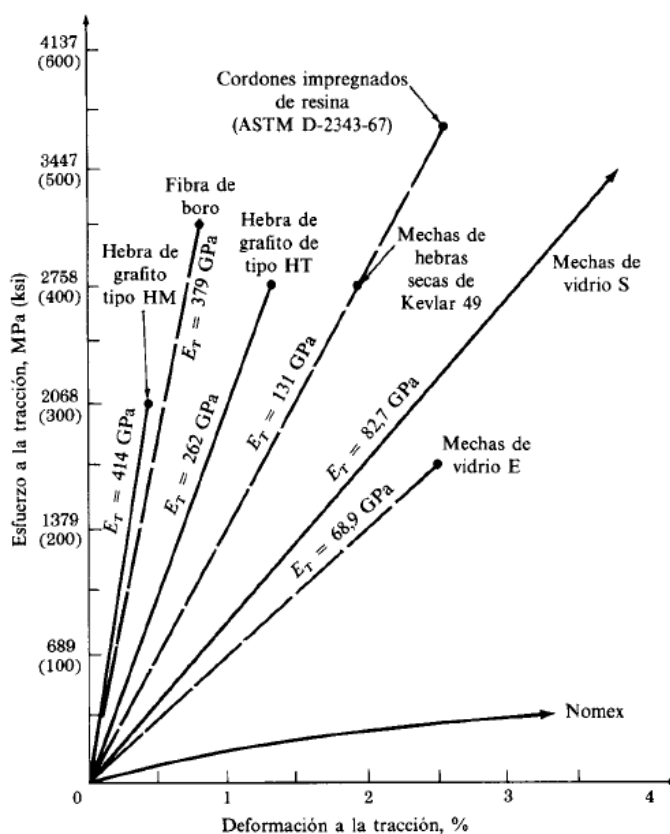


Figura 1: Comportamiento de σ - ϵ de varios materiales reforzados con fibras
Fuente: (Funes, 2007)

Las fibras de carbono presentan la mejor combinación de alta resistencia, alta rigidez y baja densidad pero tienen poca elongación lo que significa que no se pueden deformar mucho.

Las fibras de kevlar49® tienen alto módulo (pero no tanto como las de carbono) y mayores elongaciones lo que significa mayor resistencia al impacto (pueden absorber mayor energía antes de romperse). (Funes, 2007)

2.3 Reforzamientos realizados en América

Se detalla algunos refuerzos realizados en América Latina, el distinto uso que se le puede dar a los FRP, y las razones por la cual se debe reforzar dichas estructuras. La información que se detalla fue recopilada en el Seminario Internacional “Sistemas de Reforzamiento de Estructuras con Materiales Compuestos” llevado a cabo por el Ing. Jorge Rendón y el Ing. Bernardo García.

2.3.1 Refuerzo de muros de corte en un edificio ubicado en Cali

El edificio se encuentra ubicado en la ciudad de Cali, Colombia, este se encuentra construido en hormigón armado, compuesto por muros de corte se decidió reforzar los muros con FRP por motivos sísmicos, o sea para mejorar la capacidad de soportar esfuerzos de corte como puede ser carga en el plano y tensión vertical en los extremos.



Figura 2 : Muros de corte reforzados con fibra de carbono
Fuente: (Rendón & García, 2013)

Las platinas Sika CarboDur S1012 (10cm de ancho y 1.2mm de espesor) se colocaron en los extremos en el sentido vertical. Para soportar los esfuerzos de corte se colocó el tejido de fibra de carbono SikaWrap 600C (espesor 0.34mm) con la fibra en el sentido horizontal, por ambos lados de los muros como se puede observar en la Figura 2.

Se usaron corbatines hechos del mismo SikaWrap 600C colocados en las intersecciones de los muros, para anclar al SikaWrap 600C al concreto (para evitar que se despegue en ese sitio durante un sismo), como se puede observar en la Figura 3. También se decidió confinar los nudos de las columnas, con el mismo propósito del reforzamiento, por motivos sísmicos, como se observa en la Figura 4.



Figura 3: Corbatines SikaWrap
Fuente: (Rendón & García, 2013)



Figura 4: Reforzamiento de nudos con SikaWrap
Fuente: (Rendón & García, 2013)

2.3.2 Reforzamiento del techo de un estadio con FRP

El estadio techado se encuentra ubicado en la ciudad de Bogotá, se decidió reforzar las vigas del estadio por motivos sísmicos ya que si ocurriera este evento, las vigas se desplazarían verticalmente. Se decidió usar FRP por el peso liviano de este material, además de la facilidad de uso y los tiempos de colocación son relativamente menores a comparación con otros tipos de refuerzo.

Antes de reforzar las vigas con FRP, estas se repararon con un mortero acrílico. En este caso se usó platinas de FRP para el reforzamiento de las vigas del techo del estadio, con el propósito de reforzar la flexión de estas en un eventual sismo, como se puede ver en la Figura 5.



Figura 5: Colocación de platinas en vigas del techo del estadio
Fuente: (Rendón & García, 2013)

También se decidió reforzar las vigas por cortante pero para estas se usó tejidos de fibra de carbono SikaWrap 600C complementado con platinas de carbono como se puede observar en la Figura 6.



Figura 6: Reforzamiento por cortante en vigas
Fuente: (Rendón & García, 2013)

2.3.3 Reforzamiento de columnas en edificio de apartamentos

El edificio se encuentra en la Ciudad de Barranquilla, Colombia, la razón por la cual se decide realizar el refuerzo con FRP es para restituir la capacidad de compresión de algunas columnas de dicho edificio, además por la facilidad del uso de este material como se puede ver en la Figura 7, ya que no se pierde área en cada apartamento y además es una forma fácil de reforzar como ya se explicó anteriormente.



Figura 7: Colocación de SikaWrap 300C
Fuente: (Rendón & García, 2013)

2.3.4 Simulación numérica de un pórtico de hormigón armado bajo acción dinámica reforzado con fibra de vidrio

El ensayo se realizó en la Universidad Tecnológica Nacional, en Mendoza, Argentina; el motivo de esta simulación es comparar los modelos matemáticos con los ensayos experimentales. Así también se considera importante que en estructuras sismo resistentes diseñadas con reglamentos antiguos puede ser necesario implementar estrategias de rehabilitación,

entre las estrategias disponibles se encuentra el refuerzo mediante la aplicación de materiales compuestos, tal como las fibras de vidrio.

En este país se disponen de guías para diseñar este tipo de refuerzos, y de programas computacionales para simular el comportamiento de estructuras reforzadas de esta manera, entonces se considera necesario evaluar el nivel de aproximación que puede obtenerse con los modelos numéricos. Como estructura se considera un pórtico de hormigón armado, como se puede ver en la Figura 8, consta de un nivel y un vano en cada dirección. Sus dimensiones geométricas se fijaron de acuerdo a las limitaciones del equipamiento para el estudio experimental, el peso total de la estructura y sobrecarga (masa de hormigón de 18.0 kN) es de 31.81 kN.



Figura 8: Pórtico antes de reforzar
Fuente: (Palazzo & Martín, 2012)

El diseño de los elementos de este pórtico se basa en el reglamento sismo resistente antiguo de la Provincia de Mendoza (Código de construcciones antisísmicas de Mendoza, 1970). La estructura sin refuerzo fue excitada en una mesa vibradora, según su dirección longitudinal. Se aplicaron 6 inputs con picos de aceleración máxima variable, hasta llegar a una demanda aproximadamente igual a la capacidad de la estructura, el período para el primer modo longitudinal (medido experimentalmente) fue de 0.36 s (2.75 Hz). En distintas etapas de los ensayos se realizaron mediciones experimentales de los parámetros dinámicos de la estructura, cuyos valores se presentan en la Tabla 4. Para realizar la identificación del sistema, la estructura fue excitada con bajos niveles de aceleración. Dada la flexibilidad de la estructura, es posible que el procedimiento de obtención de frecuencias para el pórtico sin refuerzo antes de los ensayos, haya provocado cierto nivel de daño. Por lo tanto, la frecuencia medida no correspondería a la estructura original sin degradación de la rigidez.

Tabla 4: Parámetros dinámicos del pórtico determinados experimentalmente.

Medición		Frecuencia natural [Hz]	Amortiguamiento [% del crítico]
Pórtico sin refuerzo	Antes de los ensayos	2.75	4
	Al final de los ensayos	1.5	8.8
Pórtico con refuerzo	Antes de los ensayos	2.25	7
	Al final de los ensayos	2.1	6.8

Fuente: (Palazzo & Martín, 2012)

Luego de aplicar la serie de inputs dinámicos previstos para la estructura original, se procedió a realizar el refuerzo del pórtico en dos fases las cuales se detallan a continuación.

En la primera fase se realizó la reparación del hormigón en pie de columnas, ya que durante los ensayos del pórtico sin refuerzo se observaron fisuras en esa zona. Para ello se picó el hormigón de recubrimiento en esa zona, y se aplicó un adhesivo epoxídico para adherir el hormigón nuevo a otro existente. Luego se colocó un mortero tixotrópico de aplicación recomendada para reparaciones en hormigón. En la Figura 9 se muestra la base de la columna reforzada



Figura 9: Rehabilitación de las bases de las columnas del pórtico

Fuente: (Palazzo & Martín, 2012).

La segunda fase correspondió al refuerzo de los extremos de las vigas y columnas con fibra de vidrio. Para ello se limpió con amoladora la superficie de hormigón donde se ubicará el tejido, se coloca una capa de imprimación de adhesivo, luego la fibra de vidrio, y una capa final de adhesivo. Como

fibra de vidrio se empleó SikaWrap Hex 100G, y como adhesivo Sikadur 300.

El resultado final se puede ver en la Figura 10



Figura 10: Refuerzo del pórtico con fibra de vidrio
Fuente: (Palazzo & Martín, 2012)

Para las simulaciones numéricas del pórtico ensayado se empleó el programa computacional SeismoStruct, que es de acceso libre para fines académicos. Fue elegido este software ya que permite considerar modelos constitutivos para elementos de hormigón armado reforzados con fibras y excitados bajo acciones dinámicas (Palazzo & Martín, 2012).

2.4 Reforzamientos realizados en el Ecuador

Se va a detallar los refuerzos que se han realizado en el país con FRP, se explicarán las razones por las cuales es necesario reforzar las estructuras y se mostrarán fotos, explicando los detalles del reforzamiento. Toda la información que se va a detallar fue recopilada en el Seminario Internacional “Sistemas de Reforzamiento de Estructuras con Materiales Compuestos” llevado a cabo por el Ing. Jorge Rendón y el Ing. Bernardo García.

2.4.1 Reforzamiento de la Catedral de Cuenca

La Catedral presentaba grietas en la cúpula, estas grietas estaban activas en proceso de crecimiento, las cuales generaban humedad y aumento del agrietamiento, como se puede ver en la Figura 11, en un principio como refuerzo se inyectó lechada de cal, el cual es un material rígido compatible con el material que conforma la cúpula, para de esta manera cerrar las fisuras, también se hizo una especie de cocido con barillas de acero; las fisuras fueron monitoreadas y al cabo de tres años regresaron los mismos problemas de humedad, daño de la pintura mural, etc,



Figura 11: Fisura en la Cúpula de la Catedral de Cuenca
Fuente: (Rendón & García, 2013)

Es aquí cuando el Municipio de Cuenca toma en cuenta el estudio realizado por el Dr. Fernando Zalamea, el cual realizó un modelo en SAP con elementos finitos y con elementos tipo Shell el cual da una lectura más rápida de las tensiones que se producen en los elementos, como se muestra en la Figura 12.

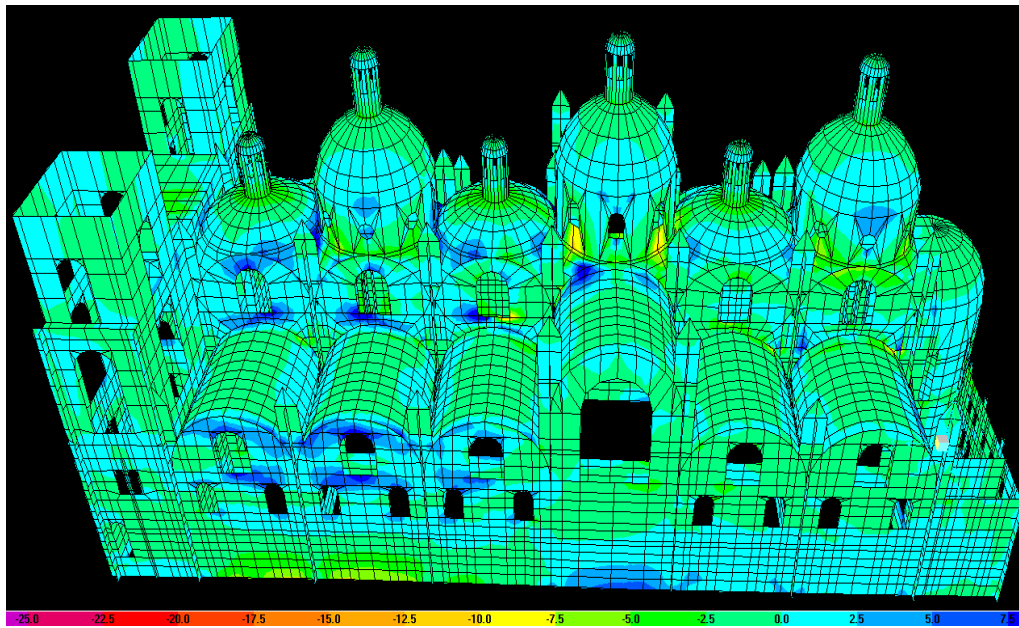


Figura 12: Modelo en SAP con elementos tipo Shell

Fuente: (Rendón & García, 2013)

Mediante este estudio se identificaron los problemas estructurales, se observaron las tensiones S11, asociadas a las fisuras verticales, son tensiones que los mampuestos no son capaces de absorber, esta reflejado entonces, que donde se muestran tensiones en el modelo, en la realidad se encuentran fisuras.

En el caso de la cúpula se hace una analogía con un arco, el cual funciona bien si existe un correcto empotramiento, como se muestra en la primera parte de la Figura 13 , si uno de los elementos empieza a moverse va a producirse una fisuración, como se muestra en la segunda parte de la Figura 13.

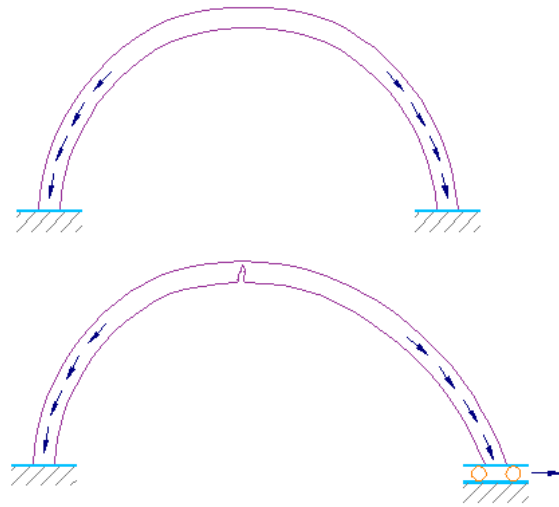


Figura 13: Arco trabajando a compresión
Fuente: (Rendón & García, 2013)

En el caso de la cúpula se encuentra una fisura la cual indica que hay un desplazamiento, el cual se debe controlar. Como propuesta para solucionar esta grieta se propuso la colocación de dos anillos de fibra de carbono SikaWrap 530 C, como se muestra en la Figura 14, la función de estos elementos es estabilizar las tensiones bajo carga de peso propio y absorber esfuerzos adicionales en caso de un sismo moderado.

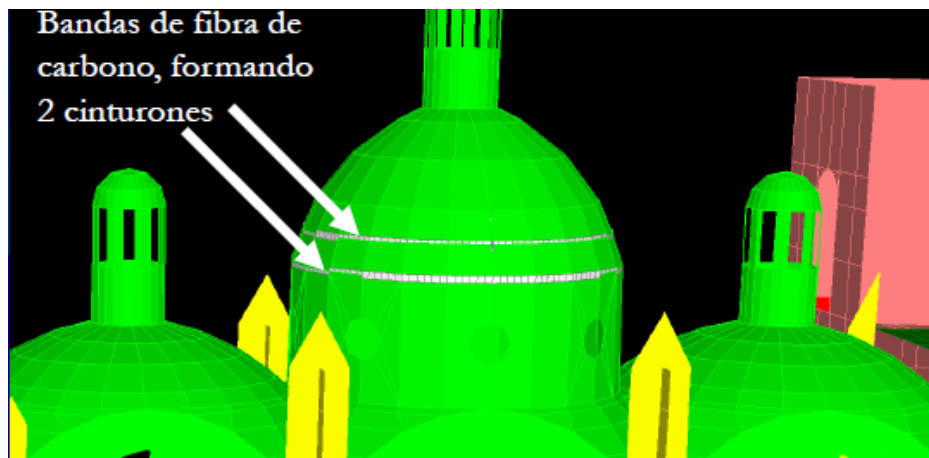


Figura 14: Modelo de refuerzo con fibra de carbono
Fuente: (Rendón & García, 2013)

Se realizó el modelo de la fibra en SAP, se presenta el resultado de este modelo sin refuerzo y con refuerzo, los cuales se pueden ver en la figuras 15.

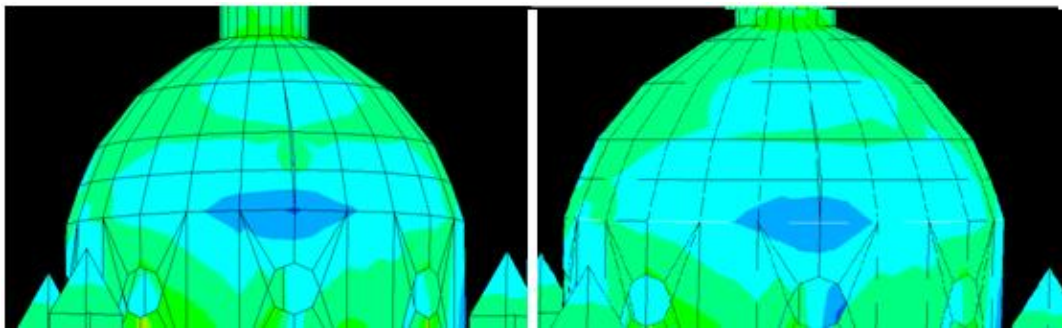


Figura 15: Modelo de la cúpula sin refuerzo y con refuerzo
Fuente: (Rendón & García, 2013)

Se puede notar que cuando no se tiene el refuerzo, las tensiones de tracción se concentran al final de la grieta, esto implica que la grieta sigue creciendo; en cambio en el modelo con refuerzo, se puede notar que las tensiones se limitan y que mientras la grieta aumente empieza a trabajar la fibra de carbono.

Al trabajar con este tipo de material se tienen varias ventajas, no altera la forma de la cúpula, se puede mimetizar, es una solución efectiva y reversible, el material es duradero en el tiempo, tiene bajo peso y es relativamente económico y fácil de realizar.

En la Figura 16 se presenta la colocación y presentación final del refuerzo, quedando claro que el CFRP es un material que ayuda a mantener la arquitectura de la estructura y su colocación no es tan complicada.



Figura 16: Colocación y presentación final del reforzamiento
Fuente: (Rendón & García, 2013)

2.4.2 Reforzamiento del puente La Saquea

Este puente se encuentra ubicado en la Provincia de Zamora Chinchipe sobre el río Yacuambi, tiene 90m de luz, fue inaugurado en 1975 diseñado por el reconocido Ing. Naranjo, por su geometría y concepto estructural es considerado una obra de arte de la ingeniería.

Es un puente de arco invertido de hormigón armado como se puede ver en la Figura 17, tiene esa forma porque fue construido en un río muy caudaloso, primero se construyeron los estribos y en los estribos se extendieron cables que no eran de preesfuerzo, en los cuales se colgó el cofre, en donde se fundió la losa.

El puente mostraba fisuras, esto debido a la sobrecarga que pasa por el puente, el cual posiblemente fue diseñado para soportar cargas menores a las cuales ha soportado a lo largo de los años ya que es la única entrada para varios cantones del sur.



Figura 17: Puente La Saquea

Fuente: (Rendón & García, 2013)

Por su ubicación geográfica también han transitado desde los vehículos militares en los conflictos bélicos, hasta equipo caminero para el arreglo de vías, además diariamente pasan pesados camiones con arena de sílice que se dirigen a Guayaquil.

Antes de la rehabilitación del puente el problema se agravó apareciendo grietas en la vereda, lo cual incrementó la vibración del puente durante el paso de vehículos pesados. Incluso se formó un agujero en la losa. Posteriormente se colocó una capa de rodadura que cubrió dichas fisuras.

Esta patología presentada por el puente es generada por la rotura de algunos de los cables que se encuentran embebidos en la losa y que sustentan a la estructura.

Se realizó el levantamiento del puente, ya que no se contaba con los planos originales como se observa en la Figura 18.

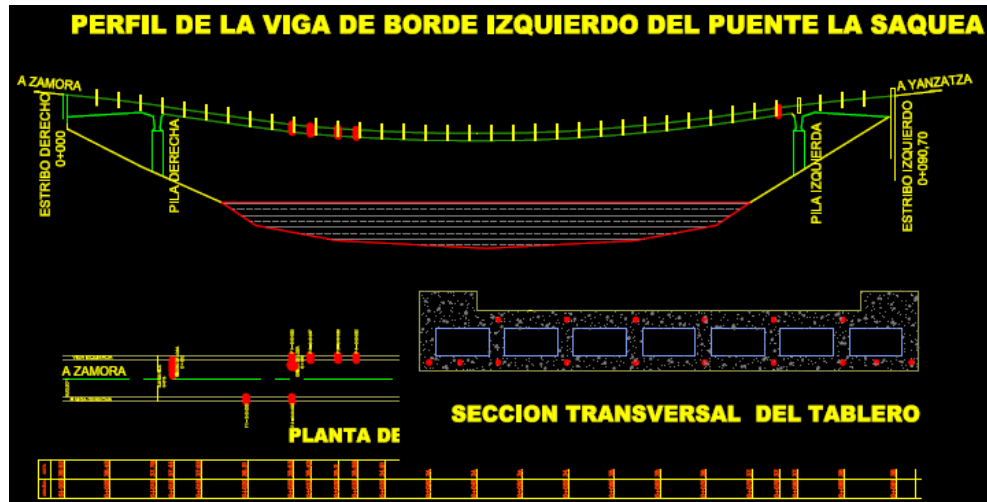


Figura 18: Levantamiento topográfico del Puente La Saquea
Fuente: (Rendón & García, 2013)

Se localizó la armadura y se realizó pruebas de resistencia mediante esclerómetro, para obtener un modelo en el programa SAP como se muestra en la Figura 19, con estos datos y una carga conocida, una volqueta con material, se cargo en el programa, para comprobar que el modelo era correcto se hizo pasar dicha volqueta y mediante una estación total se midió la deflexión y si este valor era similar al valor que obtiene el SAP, el modelo es correcto, lo cual se comprobó, entonces el modelo estaba bien concebido.

Para restituir la capacidad soportante del puente se utilizó cables de acero de preesfuerzo y fibras de carbono Sika Carbodur, adheridas con epóxico Sikadur 30.



Figura 19: Modelo en SAP del puente La Saquea
Fuente: (Rendón & García, 2013)

Los cables de acero de preesfuerzo irían sobre y bajo las veredas. Para anclar los cables de preesfuerzo se construyó pantallas a cada lado del puente. Parte de los cables anclados en las pantallas irían por encima de las veredas, mientras que otros deberían cruzar por debajo del tablero. El resto de los cables van por debajo del tablero y se anclan en las columnas. (Rendón & García, 2013).

Para dar un reforzamiento adicional se utilizó platinas de fibras de carbono Sika Carbodur como se muestra en la Figura 20 en la parte inferior del tablero en las vigas y en la parte superior. Al igual que el acero pasivo, estas platinas de fibras de carbono trabajan solo cuando el hormigón sufra pequeñas fisuras por tracción. Se colocó al menos 70 m de las platinas, lo cual no se podría hacer con el acero convencional, ya que la fibra viene en rollos de 100m.



Figura 20: Colocación de platinas Sika Carbodur
Fuente: (Rendón & García, 2013)

2.4.3 Reforzamiento del puente La Asunción

El puente se encuentra ubicado en la ciudad de Cuenca, durante la construcción, se rediseña uno de los estribos, puesto que se encuentra un suelo inapropiado en el lado de la Universidad del Azuay. Se excava hasta una arenisca de consistencia muy dura, se construye un pedraplén, sobre este una losa de hormigón armado y finalmente el bloque macizo del estribo.

En los siguientes años la zona es afectada por un macro deslizamiento, se generan fisuras en las columnas del lado donde el terreno es inestable. Como solución provisional el Municipio decide construir una fosa cerca del puente con el propósito de estabilizar el empuje del suelo sobre el estribo. Se mantiene el tráfico por algunos años, vigilando la evolución de las anomalías generadas en el puente. En el 2006, la municipalidad decide emprender la reparación del puente, las fisuras presentan una progresión muy lenta, por lo que se piensa que la profundización de los enrocados van a estabilizarlas completamente, paralelamente se programa la reparación del muro posterior, se rellenarán las fisuras, pero se decide descubrir

previamente las bases de las columnas. Al realizar esta labor se encuentra que estas fisuras presentan un estado mucho más crítico de lo esperado, como se muestra en la Figura 21.



Figura 21: Fisuras en la base de las columnas
Fuente: (Rendón & García, 2013)

Se realiza un estudio de las patologías existentes, así mismo un modelo matemático en el programa SAP posteriormente se efectúa un Estudio de Prospección Geofísica en base a la sísmica de refracción, con el propósito de determinar las características de los estratos donde se encuentra cimentado el puente e identificar la profundidad del plano de falla. Después del análisis al modelo en SAP se tiene que el puente está en estado crítico ya que en una columna los momentos generados son del doble de la capacidad resistente de la sección, además el comportamiento de rótula plástica ha disipado la energía, también se tiene que el cortante

está en el límite, pero considerando las grietas existentes el colapso puede producirse en cualquier momento.

En consecuencia, para salvar a la estructura fue necesario encontrar una forma de liberar los esfuerzos generados por los desplazamientos del estribo, La solución encontrada no es nada sencilla, ya que establece una reducción del tamaño de las columnas del lado afectado, como se muestra en la Figura 22.



Figura 22: Reducción de las columnas
Fuente: (Rendón & García, 2013)

Dicha reducción se realiza mediante el corte de las columnas, para ello se apuntala ambos lados del puente y se colocan ciertos refuerzos, con el corte de las columnas se conseguirá liberar los esfuerzos inducidos por el desplazamiento del cimiento, dicho corte representa una reducción de las columnas, entre 4 a 6 cm dependiendo la ubicación del pórtico.

Puesto que se cortan los hierros, se pierde la continuidad de los mismos, en consecuencia se cambia la condición del apoyo y el comportamiento del puente. Posteriormente se reparó fisuras y grietas con inyección epóxica. Se

realizó el reforzamiento del puente, ya que el corte de las bases de las columnas implica un cambio de comportamiento de la estructura.

Este reforzamiento se realizó mediante la colocación de tejidos de fibras de carbono, como se puede ver en la Figura 23 en los lugares donde se determinó los esfuerzos máximos de corte y confinamiento para lograr mayor ductilidad.



Figura 23: Colocación de fibra de carbono
Fuente: (Rendón & García, 2013)

CAPÍTULO 3

FIBRA DE VIDRIO

3.1 Introducción

En este capítulo se presenta las características de la fibra de vidrio estructural además se realiza un análisis sobre la fibra tradicional finalmente se explica el proceso de instalación de ambos tipos de fibras.

En el capítulo dos se explican los tipos de fibra de vidrio y sus propiedades, en lo que se refiere a construcciones civiles, el tipo más usado de fibra de vidrio E, el cual se produce de borosilicato de calcio y de aluminio que se obtiene fácilmente debido a la abundancia de materias primas como la arena, de esta manera estos materiales son los más utilizados en la fabricación de fibras continuas. (Funes, 2007)

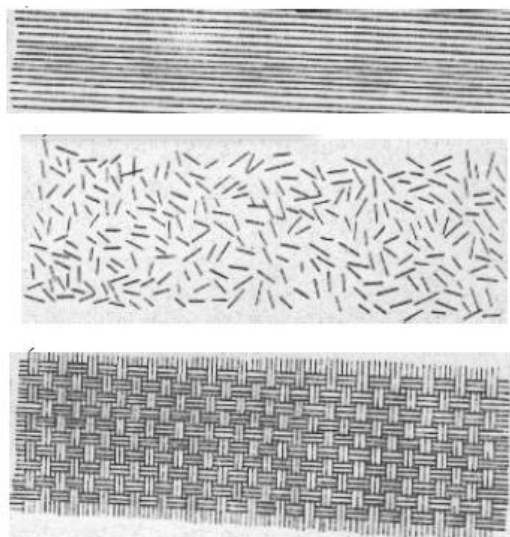


Figura 24: Configuraciones de la fibra de vidrio

Fuente: (Morales, 2008)

En la Figura 24 se ilustran tres configuraciones de fibra de vidrio comunes. La primera y segunda parte muestran el uso de fibras continuas y discretas cortadas, respectivamente. La tercera parte muestra la configuración de tela tejida la cual se coloca en capas sobre la matriz de polímero para formar un laminado.

Se hace notar que la resistencia óptima se logra mediante un refuerzo de fibras continuas y alineadas. Sin embargo, es necesario tener cuidado, porque es máxima sólo en la dirección paralela a los ejes de la fibra. En otras palabras, la resistencia es altamente anisotrópica.

3.2 Características mecánicas de la fibra de vidrio estructural

Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos se determinan a través de modelos matemáticos, debido principalmente a la incertidumbre que se genera en sus procedimientos de fabricación, para lo cual es necesario apoyarse en las siguientes hipótesis (Funes, 2007):

- La matriz y la fibra se comportan como materiales elásticos.
- El material cercano a la fibra tiene las mismas propiedades que el material en forma bruta.
- Las fibras están ordenadas en una disposición repetitiva o regular.

Las propiedades de la fibra de vidrio adicionada con la resina son las siguientes:

3.2.1 Resistencia

Cuando se combina fibras con resina, existen dos parámetros adicionales que afectan significativamente la resistencia del material compuesto. El primero es el porcentaje del volumen de fibras, el segundo es la orientación de las fibras. El porcentaje volumétrico de fibras, es el porcentaje del volumen del material compuesto que es ocupado por las fibras.

3.2.1.1 Resistencia a la tracción

La resistencia longitudinal a tracción es de 30 a 40 veces mayor que la resistencia transversal a tracción, debido a que en el sentido transversal el material compuesto puede fallar sin presentar rotura de fibras. Su resistencia en esta dirección se determina principalmente por la resistencia aportada por la resina. (Alarcón, 2003)

3.2.1.2 Resistencia a la compresión

La resina por si sola es más resistente a compresión que a tracción, en cuanto a las fibras ellas pueden suministrar resistencia significativa a cargas transversales de tracción. La resistencia a compresión transversal es también menor que la resistencia longitudinal a compresión.

3.2.1.3 Efecto de la orientación de las fibras

La mayoría de las fibras no son unidireccionales, tienen gran variedad de orientaciones por ejemplo en un laminado que es unidireccional, la

resistencia será la máxima posible en una dirección, pero en la dirección transversal tendrá la resistencia mínima, lo que podría ocasionar la falla prematura en caso de que alguna carga sea aplicada fuera del eje longitudinal del laminado. Por el contrario, en los laminados que se presentan las dos orientaciones puede ser que rompan algunas fibras sin llegar a la rotura del laminado.

3.2.1.4 Resistencia a la flexión

La resistencia a flexión está ligada tanto con la capacidad portante a tracción como a compresión del material compuesto. Esto es debido a que si se somete a flexión el material compuesto una parte de este estará sometida a esfuerzos de compresión.

Durante la carga a flexión los esfuerzos de tracción se originan a partir de la flexión del miembro reforzado en lugar de una carga a tracción directa. Aunque los niveles de resistencia a flexión y a tracción quizá sean los mismos, los mecanismos de falla pueden ser muy diferentes (Alarcón, 2003).

3.2.1.5 Resistencia a cortante

Como explica (Alarcón, 2003) la resistencia a cortante de un laminado unidireccional es muy baja. Esto debido a que las fibras no pueden resistir la deformación en la dirección del cortante máximo. La resistencia a cortante puede incrementarse significativamente si hay algunas capas en donde las fibras están orientadas a $\pm 45^\circ$ con respecto a la carga aplicada.

En resumen, si la resistencia a tracción es prioritaria, entonces se deben colocar algunas capas a $\pm 45^\circ$ para incrementar la resistencia a cortante.

3.2.2 Resistencia específica

La resistencia específica es una medida que muestra la habilidad de un material en este caso el material compuesto, para sostener una carga conocida teniendo una masa, a diferencia de la resistencia que es la medida que muestra la habilidad para resistir una carga conocida un área dada.

Los valores de la resistencia específica varían con el contenido de fibras y la orientación de éstas en la misma forma en que lo hace la resistencia. Si la capacidad de carga de una estructura es el parámetro a controlar, los materiales compuestos con mayor resistencia específica serán los más ligeros.

Ya que la resistencia específica considera la capacidad de carga de una masa conocida de un material, el laminado más ligero posiblemente no sea el de sección transversal menor (Alarcón, 2003).

3.2.3 Capacidad de deformación

La capacidad de deformación de los polímeros reforzados con fibras normalmente es baja. (Engineered Materials Handbook, 1987). La capacidad de deformación es la deformación a rotura medida en el ensayo a tracción. La fibra de vidrio se considera como muy dúctil, en el orden del 4% al 6%, a comparación con las fibras aramidas las cuales tienen una ductilidad de 2% a 4%.

Las resinas epóxicas tienen una ductilidad baja, menores al 1%, las resinas termoplásticas comúnmente usadas en los materiales compuestos pueden tener capacidades de deformación hasta del 10%.

En contraste con esto, el acero ASTM A36 tiene un mínimo de ductilidad del 20%. El acero estructural común por consiguiente es mucho más dúctil que las fibras o las resinas en este tipo de FRP (Engineered Materials Handbook, 1987).

3.2.4 Módulo de elasticidad o módulo de deformación

El módulo de elasticidad es afectado por el tipo de fibras que están involucradas. En la Tabla 5 se muestran ejemplos de tres tipos de materiales compuestos.

Tabla 5: Valores típicos de los módulos de elasticidad de un laminado unidireccional

Material	Longitudinal GPa	Transversal Gpa	Cortante Gpa	Coefficiente de Poisson
Carbono/Epoxi	181	10.4	7.17	0.3
Vidrio/Poliéster	54.1	14.05	5.44	0.25
Aramida/Epoxi	75.86	5.45	2.28	0.34

Fuente: (ETL 1110-2-548, 1997)

La fibra de carbono entre los materiales mostrados en la Tabla 5 es la más rígida, mientras que la fibra de vidrio tiene una resistencia al cortante superior, en cambio la fibra de aramida es la más desfavorable en lo que se refiere a cargas trasversales en el sentido de las fibras. El porcentaje

volumétrico de fibras tiene un efecto significativo sobre el módulo de elasticidad.

La orientación de las fibras es un parámetro importante en la rigidez del material compuesto. La Figura 25 muestra cómo los módulos longitudinales y transversales varían con la orientación. Como se puede observar, el compuesto es más rígido cuando es cargado en la dirección de las fibras y menos rígido cuando la carga es perpendicular a las fibras.

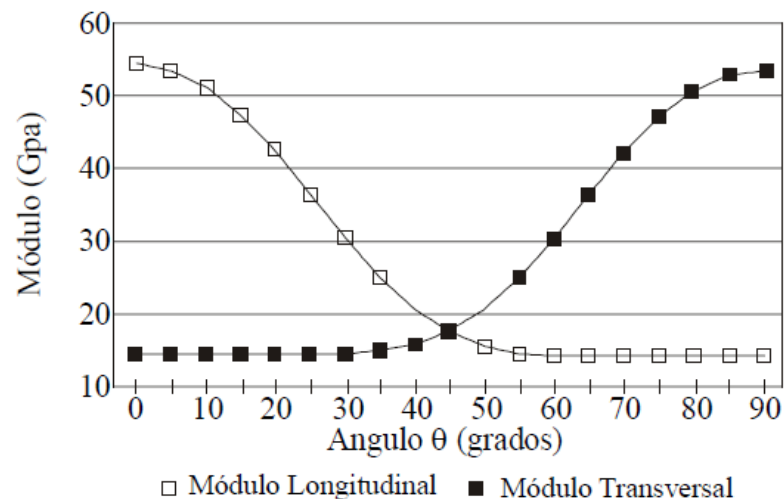


Figura 25: Módulos en función de la orientación de las fibras
Fuente: (ETL 1110-2-548, 1997)

3.2.5 Módulo específico de elasticidad.

El módulo específico de elasticidad es la medida de la capacidad de los materiales para resistir deformación con una masa dada. En cambio el módulo de elasticidad es la medida de la capacidad de un material de resistir deformación con un área dada. El módulo específico de un material es su módulo dividido por su densidad. Los valores del módulo específico variarán

de acuerdo al contenido y orientación de las fibras, de manera semejante a como lo hace el módulo de elasticidad.

Si el parámetro que rige a una estructura es la rigidez, entonces el material compuesto con el módulo específico más alto será el más ligero (Alarcón, 2003).

3.2.6 Densidad

La mayoría de los materiales compuestos tienen densidades entre 1.5 y 2.5g/cm³, en contraste con la densidad del acero, la cual es de 7.87g/cm³. La baja densidad de los FRP en comparación con la del acero es lo que les proporciona altos valores de módulos específicos y resistencia específica.

3.2.7 Coeficiente de Poisson.

El coeficiente de Poisson para un material compuesto puede variar significativamente en relación a la orientación de las fibras. Cuando las fibras están a 0° en relación a la carga aplicada, el coeficiente de poisson con frecuencia es similar a la mayoría de los metales, dentro de un rango de 0.25 a 0.35. Sin embargo, cuando se presentan otras orientaciones de fibras, el coeficiente de poisson puede variar. (Alarcón, 2003)

3.2.8 Coeficiente de dilatación térmica

Como el resto de las propiedades de las cuales se han descrito hasta ahora, los coeficientes de dilatación térmica también son afectados por la orientación de las fibras. En la Tabla 6 se muestran las propiedades de

algunos laminados unidireccionales. También se muestran los valores para el acero y el aluminio. Se puede observar que en muchos casos los materiales compuestos unidireccionales presentan un valor negativo para la dilatación térmica en la dirección de la fibra, esto debido a que las fibras resisten la dilatación térmica de la resina en dirección de la fibra. En la dirección perpendicular a las fibras, la resina puede expandirse bastante porque las fibras no resisten la dilatación.

Tabla 6: Coeficientes de dilatación térmica comunes para diferentes materiales

Materiales compuestos reforzados con fibras	Paralelo a las fibras [mm/mm] °C x 10E-6	Perpendicular a las fibras [mm/mm] °C x10E-6
Carbono/Epoxi	-0.30	28.10
Vidrio/Epoxi	8.60	22.10
Kevlar 49/Epoxi	-4.00	79.00
Materiales isótropos	[mm/mm] °C x 10E-6	
Resina epóxica	54.00	
Acero	11.80	
Aluminio	23.6	

Fuente: (ETL 1110-2-548, 1997)

3.2.9 Fluencia

La fluencia puede ocurrir a temperatura ambiente para muchos materiales compuestos. La parte que sufre la fluencia en el compuesto generalmente es la resina. Las fibras de carbono y de vidrio no fluyen significativamente a temperatura ambiente (Alarcón, 2003).

La orientación de las fibras es un parámetro importante porque mientras más fibras estén alineadas en dirección de la carga, la tensión será menor en la resina y cuanto más alta es la concentración de fibras en cualquier orientación, más bajo será la proporción de fluencia, esto debido a que hay menos resina disponible a deformar. Una resina dúctil fluirá más que una más frágil.

3.2.10 Relajación

Para que un material tenga relajación, primero debe haberse deformado. La cantidad de relajación está en relación con la tensión inicial aplicada, la orientación de las fibras, el porcentaje volumétrico de fibras y la ductilidad de la resina. Una tensión inicial más alta permite que después se presente más relajación en el material. Más fibras orientadas en la dirección de la carga disminuirán la fluencia y la relajación potencial. Una resina dúctil se deformará más que una frágil y por tanto habrá más relajación (Alarcón, 2003).

3.2.11 Tenacidad

Tenacidad es la capacidad de los materiales para absorber energía antes de romper. La tenacidad de un material compuesto está en relación al tipo de fibras, al tipo de resina y al porcentaje volumétrico de fibras. La secuencia de capas en el laminado no parece afectar su tenacidad (Alarcón, 2003).

3.2.11.1 Tenacidad de delaminación

La delaminación es la separación de un material compuesto en sus capas originales. El mecanismo de falla de delaminación es común para este tipo de polímeros. Esto puede ocurrir debido a la vinculación relativamente débil entre capas, por lo que se deberá diseñar el material compuesto de tal forma que se evite esto.

La tenacidad de delaminación está en función del tipo de resina y del porcentaje volumétrico de resina. La secuencia de las capas en el laminado no parece afectar a la tenacidad de delaminación.

Cuanto más dúctil sea la resina, más alta será su tenacidad, sin embargo, no es una relación lineal, ya que también influye la interfaz resina/fibra. La presencia de fibras también puede influir disminuyendo la zona plástica de la resina disminuyendo la tenacidad del material compuesto. (Alarcón, 2003)

3.2.12 Propiedades de la fibra de vidrio SikaWrap 100 G

El proveedor tiene la obligación de dar al cliente una ficha técnica con las propiedades del material, ya que estos son requisitos indispensables para el diseño con este tipo de materiales en la Tabla 7 se muestra los datos.

Tabla 7: Datos técnicos de la fibra de vidrio SikaWrap 100G

Propiedades de las láminas curadas	Valor
Resistencia a la tracción	600 Mpa
Módulo de Elasticidad	26.130 Mpa
Alargamiento a la rotura	2.24%
Espesor	1 mm
Dirección de la fibra	0° unidireccional
Peso por metro cuadrado	910 gr.
Resistencia por cm de ancho	610 kg.
Propiedades de la fibra	Valor
Resistencia a la tracción	2.276 MPa
Módulo de tracción	72.40 Mpa
Alargamiento	4%
Densidad	2.94 gr/cc

Fuente: (Sika Group, 2013)

3.3 Fibra de vidrio tradicional

Es un material en forma de fibras, las cuales son obtenidas del vidrio por distintos procedimientos, algunos de los procesos más usados son:

- Estirado del vidrio por centrifugación, al caer éste sobre un disco dotado de un movimiento muy rápido de rotación, se obtiene la fibra llamada lana de vidrio.
- Estirado mecánico del vidrio fundido por hileras de diámetro variable y su enrollamiento sobre tambores que giran a gran velocidad, se obtiene seda de vidrio.

La fibra de vidrio ha constituido una auténtica revolución en la técnica del aislamiento térmico. Aparte de sus propiedades de aislamiento es

incombustible e imputrescible, de fácil colocación y de poco peso (Morales, 2008).

3.3.1 Clasificación de la fibra de vidrio tradicional

La fibra de vidrio se puede encontrar clasificada de acuerdo al espaciamiento y la orientación de las fibras.

3.3.1.1 Mat (Mantas)

Son hilos cortados, entrelazados desordenadamente, aglomerados y prensados, constituyendo una manta que tiene muy buen poder de absorción de las resinas de poliéster. Se suministra en rollos de 1 m a 1.25 m de ancho y en diferentes pesos (200 gr/m², 300 gr/m², 450 gr/m² ó 600 gr/m²). 1 Kg. de MAT, consume aproximadamente 3 Kg. de resina de poliéster. (Morales, 2008)

Hay que puntualizar que este tipo de fibra de vidrio se adapta mejor a las formas complicadas pero tienen el inconveniente de que son menos resistentes que los tejidos. Se enfatiza que la resistencia que ofrecen estas fibras cortadas al azar es igual en todas las direcciones. (García, 2011).

3.3.1.2 Tejidos

Cabos, más o menos gruesos, de un número elevado de hilos que se entrecruzan perpendicularmente. Se emplea como material de mayor refuerzo y se coloca entre dos capas de MAT. Su consumo aproximado es de 1Kg de resina por 1 Kg de Tejido.

3.3.1.3 Mechas

Son un conjunto de hilos muy largos y paralelos los cuales constituyen un cabo enrollado en forma de bobina, que se emplea para la construcción de cilindros, tuberías o depósitos, por enrollamiento sobre molde giratorio.

3.3.1.4 Vendas de tejido

De diferentes pesos y anchos entre los principales de 10-15-20 cm., las cuales se emplea en el recubrimiento de tuberías.

3.3.1.5 Hilos cortados

Este tipo de fibra tiene longitudes alrededor de 30 cm., la cual se emplea para la preparación de "premix" (mezcla de resina con hilos.) Se utilizan en la fabricación de piezas moldeadas mediante prensa en caliente.

3.3.2 Sistemas de resina

La resina es un componente importante en los compuestos plásticos existen dos tipos de resinas entre la cuales se tiene: las termoplásticas y las termoestables. Una resina termoplástica es la cual se mantiene sólida a temperatura ambiente esta se funde cuando es calentada y se solidifica cuando es refrescada. Por el otro lado, una resina termoestable curará permanentemente por un cruce irreversible a temperaturas elevadas.

Esta característica hace que los compuestos de resina termoestables sean muy deseables para aplicaciones estructurales. Las resinas más comunes utilizadas en compuestos son los poliésteres no saturados, los

epóxicos, y el vinilo Ester; los menos comunes son el poliuretano y los fenólicos. (Prams, 2006)

A continuación se describe los sistemas de resinas:

3.3.2.1 Poliésteres Insaturados

Un 75 % de todo el poliéster utilizado en EEUU, corresponde a poliéster no saturado, Las ventajas citadas en el poliéster no saturado son su estabilidad dimensional y el costo económico. Otras ventajas incluyen la comodidad en el manejo, en procesamiento, y en su fabricación. Parte de las formulaciones especiales es su alta resistencia a la corrosión y al retardo del fuego (Tang, 1997).

3.3.2.2 Epóxicos

Las propiedades materiales y de curado se pueden formular para cumplir con el desempeño requerido. Los epóxicos se encuentran generalmente en aplicaciones tales como navales, automotrices, eléctricas y de aparatos domésticos.

La alta viscosidad de las resinas epóxicas limitan su uso debido a ciertos procesos tales como el moldeo y el enrollado de filamentos. Aunque los epóxicos puedan resultar costosos, puede asumirse cuando se requieren altos desempeños. (Prams, 2006)

3.3.2.3 Vinilo Ester

Las resinas del vinilo Ester se desarrollaron para aprovechar la viabilidad de las resinas epóxicas así como el curado rápido de los poliésteres. El vinilo Ester tiene propiedades físicas más altas que el poliéster se diferencia en menores costos que los epóxicos. Un producto compuesto que contenga resina vinilo Ester puede resistir una alta demanda de dureza y ofrecer una excelente resistencia a la corrosión (Prams, 2006).

3.3.2.4 Poliuretano

El Poliuretano es producido combinando polisocianato y poliol (resina hidroxilada) en un proceso de reacción de moldeo por inyección o en una reacción reforzada del proceso moldeo por inyección.

Estos son curados para formar materiales muy duros y de alta resistencia a la corrosión que se encuentran en muchas capas de pintura de alto desempeño.

3.3.2.5 Fenólicos

Las resinas fenólicas se hacen de fenoles y formaldehídos, y ellos son divididos en resinas de resol y novolac. El novolac se cura al reaccionar químicamente con grupos de metileno en la sustancia que sirve para endurecer. Los fenólicos se valoran mucho por su resistencia a altas temperaturas, una buena estabilidad térmica, y a una baja generación de humo. (Prams, 2006)

3.3.3 Propiedades típicas de las resinas

Tabla 8: Propiedades de la resinas

Tipo de resina	Resistencia a la Tensión [Mpa]	Módulo de Tensión [Gpa]	Elongación [%]
Resinas Epóxicas	103-172	4.83-6.21	<2.00
Resinas de Poliamidas	48-83	2.76-5.52	1.7-3.2
Resina de Vinilo Ester	21-83	2.76-4.14	1.4-4.0
Resinas Termoplásticas	76-103	2.21-4.83	5-10

Fuente: (Engineered Materials Handbook, 1987)

3.4 Procedimiento de instalación de la fibra de vidrio estructural y tradicional

3.4.1 Instalación de Sika Wrap hex 100G

3.4.1.1 SikaWrap Hex 100G

El SikaWrap Hex 100G es un tejido de fibras de vidrio unidireccionales, como se puede observar en la Figura 26.

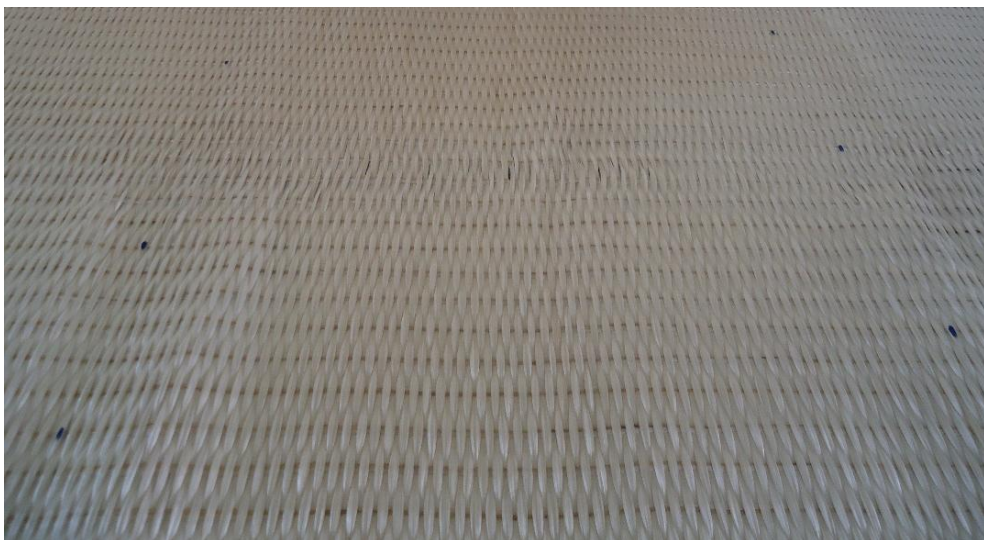


Figura 26: SikaWrap Hex 100G

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

Este material es saturado en obra usando el sistema epóxico Sikadur 301 para conformar un sistema de Fibras de Vidrio Reforzado con Polímeros (GFRP), usado para el reforzamiento de elementos estructurales (Sika Group, 2013).

3.4.1.2 Modo de empleo

La superficie debe estar limpia y sana. Esta puede estar seca o húmeda, pero sin agua libre, se debe remover polvo, grasa, compuestos curadores, impregnaciones, partículas extrañas, material suelto o cualquier otro elemento que impida la adherencia. Este proceso se lo realiza mediante limpieza mecánica de raspado, para lo cual se utilizan herramientas manuales tales como cepillos de bronce o acerados, como se indica en la Figura 27.



Figura 27: Limpieza de la superficie
Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

Para el proyecto de tesis se contaba con una viga y cilindros de hormigón, en el caso de la viga se procedió a limpiar todas las imperfecciones, bordear las esquinas y remover el polvo mientras que en el caso de los cilindros este proceso no se realizó ya que la superficie estaba lisa.

3.4.1.3 Corte del tejido

El tejido puede ser cortado a la longitud apropiada usando tijeras de tipo industrial o para trabajo pesado. Debe evitarse el uso de cualquier elemento de corte sin filo que pueda debilitar o deshilar la fibra, para evitar esto se debe colocar cinta adhesiva en los lugares donde se vaya a realizar el corte evitando de esta manera que las fibras se dispersen.

Este proceso se lo puede ver en la Figura 28.



Figura 28: Colocación de cinta adhesiva
Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

Los tejidos SikaWrap no son reactivos, sin embargo, debe tenerse precaución con el polvo de vidrio de la superficie, cuando se manipule el producto deben utilizarse guantes para evitar irritación de la piel.

Igualmente se debe proteger del polvo que se dispersa en el aire durante el proceso de cortado. Es recomendable utilizar máscaras de protección adecuadas para este caso como se muestra en la Figura 29.

También se debe tener precaución después del ensayo ya que este polvo se impregna en la ropa, y si llega a tener contacto con la piel, esta se irrita y se tiene picazón durante un tiempo.



Figura 29: Manejo de la fibra de vidrio
Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

3.4.1.4 Preparación de la resina Sikadur301

La superficie donde se va a aplicar la resina debe estar limpia, sana, y libre de humedad, si existen impurezas tales como polvo, residuos de lechada, grasa, aceite, agentes curadores, impregnaciones, partículas extrañas, recubrimientos y materiales sueltos estas se deben remover por medios mecánicos. Para mejores resultados, la superficie donde se aplica la resina debe estar seca. Sin embargo, una superficie ligeramente húmeda es aceptable (Sika Group, 2013).

Esta resina consta de 2 componentes 100% sólidos, de alto módulo, alta resistencia y resistente a la humedad la presentación del material se indica en la Figura 30.



Figura 30: Componentes del epóxico Sikadur 301

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

El procedimiento de uso de la resina es el siguiente: Se empieza por mezclando el componente A, indicado en la Figura 31 mientras que el

componente B no requiere mezclado. Según el manual de uso de la resina se debe mezclar la unidad completa, no se pueden dividir en unidades.



Figura 31: Componente A

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

Posteriormente se debe verter el componente B en el A, se debe mezclar totalmente durante 5 minutos usando un mezclador mecánico de bajas revoluciones (400-600 rpm) hasta que la mezcla sea uniforme como se puede ver en la Figura 32.



Figura 32: Mezcla de componentes A y B
Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

Previamente a la impregnación de la resina se debe limpiar las impurezas como se mencionó anteriormente, con la ayuda de una brocha se procede a impregnar el elemento como se puede ver en la Figura 33 en el caso de una viga.

Cabe mencionar que se contaba con una viga de 10 cm x 10 cm y una longitud de 2.40m la cual sirvió para aplicar la fibra de vidrio actualmente esta se encuentra frente a los laboratorios de Química de la Universidad de las Fuerzas Armadas. ESPE.



Figura 33: Aplicación de la resina
Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

Finalmente se debe empapar la fibra de vidrio y pegarla en el elemento aplicando presión con la brocha, asegurándose que no haya vacíos entre las superficies como se muestra en la Figura 34. El procedimiento de instalación de la fibra de vidrio SikaWrap Hex 100G se puede ver en un video, el enlace se encuentra en la bibliografía.



Figura 34: Aplicación de la fibra de vidrio SikaWrap Hex 100G
Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

Similar proceso se realiza con los cilindros de hormigón, el resultado final se lo puede ver en la Figura 35.



Figura 35: Resultado final de la instalación de la fibra de vidrio SikaWrap Hex 100G
Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

3.4.1.5 Precauciones

Se debe tener en cuenta las recomendaciones del fabricante y tener todas las precauciones del caso, usar mascarilla y guantes. Se indica que el tiempo de contacto es de 90 minutos, pasado este tiempo la mezcla empieza a soltar un vapor también genera gran cantidad de temperatura y finalmente se vuelve una masa sólida como se muestra en la Figura 36.



Figura 36: Resina pasado los 90 minutos

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

3.4.2 Instalación de fibra de vidrio tradicional

Para el proyecto de tesis se usó el tipo de fibra de vidrio manta, con una longitud de 1.20 y un peso de 375gr/m^2 esta fibra tiene la particularidad de no tener una dirección establecida a diferencia de la fibra SikaWrap como se indica en la Figura 37.



Figura 37: Fibra de vidrio tradicional tipo manta

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

3.4.2.1 Resina

En similar forma con la fibra SikaWrap, se debe realizar una resina a diferencia de la anterior en la fibra tradicional hay 4 componentes con su respectiva dosificación. En la Tabla 9 se detalla la cantidad usada de resina que se usó para realizar los ensayos.

Tabla 9: Dosificación de la resina

Componente	Dosificación
Resina poliéster	50%
Monómero de estireno	30 %
Mp60 mek peróxido	10 %
CB60 Cobalto al 12%	10 %

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

Se debe recalcar que es una dosificación empírica la cual se usa para realizar piezas en el parque automotor, estos componentes fueron descritos en el capítulo 3 apartado 3.3.2.

3.4.2.2 Colocación de la fibra de vidrio tradicional

Se cubre el cilindro con la fibra dejando un traslape de 2cm a 3cm, después se coloca la resina mediante una brocha y se deja secar con el sol o con una lámpara como se indica en la Figura 38



Figura 38: Colocación de la fibra de vidrio, resina y secado.
Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

CAPÍTULO 4

MODELOS MATEMÁTICOS DEL HORMIGÓN CONFINADO A COMPRESIÓN CON FIBRA DE VIDRIO GFRP

4.1 Introducción

En este capítulo se detallan los principales modelos para hormigón confinado con FRP haciendo énfasis en el modelo del ACI 440.

Tanto el modelo del ACI 440 como el modelo de Al-Salloum, son basados en el Autor Teng, con otros autores, el primer modelo que se presenta, lo menciona el Dr. Roberto Aguiar en su publicación sobre refuerzo de estructuras, se menciona el modelo de Mander, ya que este fue el modelo de confinamiento en el anterior ACI 440 del año (2002).

El estudio del comportamiento de estructuras confinadas con polímeros reforzados con fibras FRP ha sido llevado a cabo por varios años así como por varios investigadores, de estos estudios tanto prácticos como teóricos se ha demostrado que el confinamiento lateral en columnas incrementa principalmente la resistencia y ductilidad, también se indica que la capacidad última del hormigón confinado, en relación a la resistencia a compresión y a la máxima deformación axial, se afectan directamente con la presión lateral que es generada por el confinamiento .

El confinamiento del hormigón con FRP se basa en un mecanismo, cuando el hormigón está sometido a la compresión axial, se amplía

lateralmente. Esta extensión es resistida por la camisa de FRP, lo cual proporciona la presión que confina al hormigón. La falla eventual ocurre cuando rompe la camisa de FRP debido a la tensión de tracción en la dirección del aro, como resultado del confinamiento de FRP (Chambi, 2012).

4.2 Modelo de Teng *et al.* para columnas circulares

El modelo de Teng *et al.* del 2009 presenta los resultados de estudios que han tratado de perfeccionar y refinar el diseño orientado a determinar el modelo tensión deformación que originalmente presentaron Lam y Teng en el año 2003 y 2007 para hormigón confinado con FRP. En este nuevo modelo se proponen expresiones más precisas para el cálculo de la deformación axial última y la resistencia a compresión (Chambi, 2012).

Cuando una columna es confinada con FRP está sujeta a una carga axial de compresión, el hormigón se expande lateralmente y esta expansión es confinada por el FRP. La acción del confinamiento del FRP para una columna circular de hormigón se muestra en la Figura 39.

La presión de confinamiento viene dada por la siguiente expresión (Teng, Jiang, Lam, & Luo, 2009).

$$f_l = \frac{2E_{frp} \cdot \varepsilon_{h,rupt} \cdot t}{D} \quad (1)$$

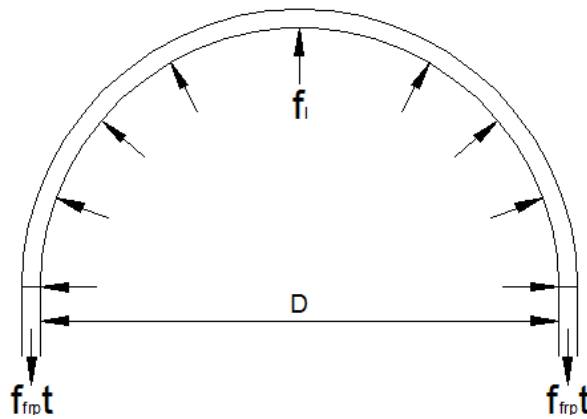


Figura 39: Acción del confinamiento del compuesto FRP
Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

A continuación se detalla las relaciones en las cuales se basa Teng para la formulación de la resistencia máxima del hormigón confinado.

La relación de confinamiento f_l/f_c' , la relación de la rigidez de confinamiento ρ_k , y la relación de deformación ρ_ε , las expresiones son las siguientes:

$$\frac{f_l}{f_c'} = \frac{2E_{frp} \cdot \varepsilon_{h,rupt} \cdot t}{f_c' \cdot D} = \rho_k \cdot \rho_\varepsilon \quad (2)$$

$$\rho_k = \frac{2E_{frp} \cdot t}{\left(\frac{f_c'}{\varepsilon_0}\right) \cdot D} \quad (3)$$

$$\rho_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{h,rupt}}{\varepsilon_0} \quad (4)$$

Donde:

f_l es la presión de confinamiento proveniente de la camisa de FRP cuando falla por rotura debido a las tensiones circunferenciales a tracción, f_c'

es la resistencia del hormigón no confinado, ε_0 es la deformación longitudinal del hormigón asociada a la resistencia de este, D es el diámetro del cilindro del hormigón confinado. E_{frp} es el módulo de elasticidad del FRP, t es el espesor del FRP, $\varepsilon_{h,rup}$ es la deformación circunferencial en rotura de la camisa de FRP la cual viene dada por la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{h,rup} = k_\varepsilon \varepsilon_{frp} \quad (5)$$

Donde k_ε es un factor de eficacia, que es función del material de FRP, un valor medio es $k_\varepsilon = 0.586$ para muestras circulares de hormigón confinado con FRP, ε_{frp} es la deformación última a tracción del material FRP viene dada por la siguiente expresión.

$$\varepsilon_{frp} = CE \cdot \varepsilon_{fu} \quad (6)$$

Donde CE es un factor de reducción por efectos ambientales, valores que se detallan en el capítulo 4 apartado 4.4, ε_{fu} es la deformación máxima de rotura a tracción valor que es dado por el fabricante del FRP.

La relación de confinamiento f_l/f_c' es un parámetro comúnmente usado en la literatura existente. La relación de la rigidez de confinamiento ρ_k representa la rigidez de la camisa de FRP relativa al núcleo de hormigón. La relación de deformación ρ_ε es una medida de la capacidad de deformación de la camisa. La relación de confinamiento f_l/f_c' es igual al producto de las otras dos relaciones. (Teng, Jiang, Lam, & Luo, 2009).

Teng se basa en la expresión matemática que Richard et al. (1928), explica la cual se puede escribir a continuación: (Chambi, 2012).

$$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = C_\sigma + F_\sigma(\rho_k) f_\sigma(\rho_\varepsilon) \quad (7)$$

Donde:

$F_\sigma(\rho_k)$ y $f_\sigma(\rho_\varepsilon)$ son funciones de relación de la rigidez de confinamiento y de capacidad de deformación, respectivamente, y C_σ es una constante (Teng, Jiang, Lam, & Luo, 2009).

La ecuación de resistencia a compresión del FRP fue basada en experimentos así también en forma analítica, los modelos experimentales de varios de ensayos muestran que las curvas esfuerzo - deformación exhiben una forma bilineal, con las dos partes suavemente conectadas por una zona de transición cercana a la resistencia no confinada del hormigón. Tanto la forma de la primera como de la segunda parte son muy cercanas a una línea recta (Chambi, 2012). La ecuación final es la siguiente:

$$\frac{f'_{cu}}{f'_c} = 1 + [3.2(\rho_k)^{0.9} - 0.06] \rho_\varepsilon \quad (8)$$

Al ser un inconveniente para su uso en el diseño por su no linealidad, se propuso una aproximación lineal, obteniendo la ecuación definitiva de Teng et al. 2009 para el cálculo de la resistencia a compresión de hormigón confinado. (Chambi, 2012)

$$\frac{f'_{cu}}{f'_c} = 1 + 3.5(\rho_k - 0.01)\rho_\varepsilon \quad (9)$$

De la ecuación (7) se nota que el esfuerzo corresponde a la deformación axial última, pero no la resistencia máxima a compresión f'_{cc} del hormigón confinado con FRP, aunque son las mismas a menos que la curva esfuerzo-deformación tenga una rama descendiente como el modelo de Lam y Teng, 2007. Por ello la expresión queda dividida en:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = 1 + 3.5(\rho_k - 0.01)\rho_\varepsilon \quad \text{si } \rho_k \geq 0.01 \quad (10)$$

$$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = 1 \quad \text{si } \rho_k < 0.01 \quad (11)$$

4.3 Modelo de Al-Salloum para columnas rectangulares

El modelo analítico propuesto por Al-Salloum (2006) es un modelo modificado de la expresión de Lam y Teng 2003 para predecir la resistencia a compresión de columnas de hormigón cuadradas y circulares confinadas con FRP.

En base a la ecuación (1) , la cual es la base para encontrar la presión de confinamiento del FRP, se basa el modelo de All-Salloum, en este caso para columnas cuadradas la expresión es la siguiente:

$$f_l = \frac{2f_{frp} \cdot t}{D} k_e \quad (12)$$

Donde:

f_{frp} es la resistencia a la tracción de FRP en la dirección del aro, t es el espesor del FRP, D es la longitud de la diagonal de la sección cuadrada si las esquinas son redondeadas, como se puede observar en la Figura 40, D puede escribirse con la siguiente expresión:

$$D = \sqrt{2}b - 2r(\sqrt{2} - 1) \quad (13)$$

r es el radio de curvatura de la columnas como se puede ver en la Figura 40, k_e es un factor de forma definido por Pessiki et al. se define como la relación del área confinada $A_{confinada}$ al área bruta de la sección transversal A_{bruta} y se puede escribir como:

$$k_e = \frac{A_{confinada}}{A_{bruta}} \quad (14)$$

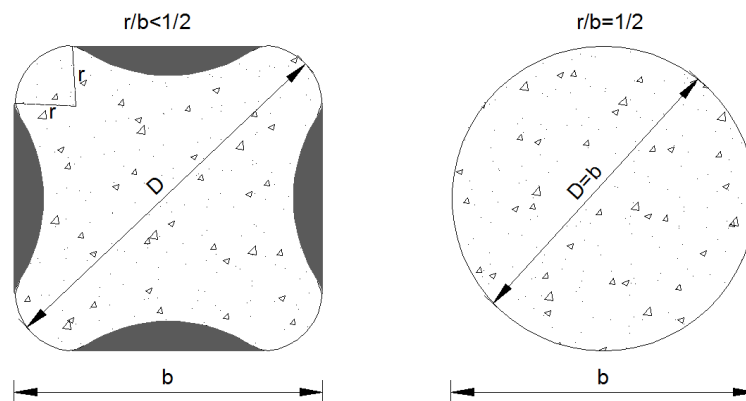


Figura 40: Dimensiones de las secciones confinadas
Fuente: (Al-Salloum, 2006)

En base a la expresión de Pessiki et al. para secciones cuadradas de hormigón k_e se puede expresar como una función de la sección de dimensión b y el radio de la esquina r como:

$$k_e = 1 - \frac{2}{3} \left[\frac{\left(1 - 2\frac{r}{b}\right)^2}{1 - (4 - \pi)\left(\frac{r}{b}\right)^2} \right] \quad (15)$$

Los valores k_e frente a r/b para los especímenes considerados en el estudio se representan en la Figura 41, el máximo valor para k_e es uno cuando la relación r/b es $1/2$, cuando se tiene una columna circular.

En general, la mayoría de los modelos de resistencia existentes para hormigón confinado-FRP tomar el siguiente modelo:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = 1 + k_1 \frac{f_l}{f'_c} \quad (16)$$

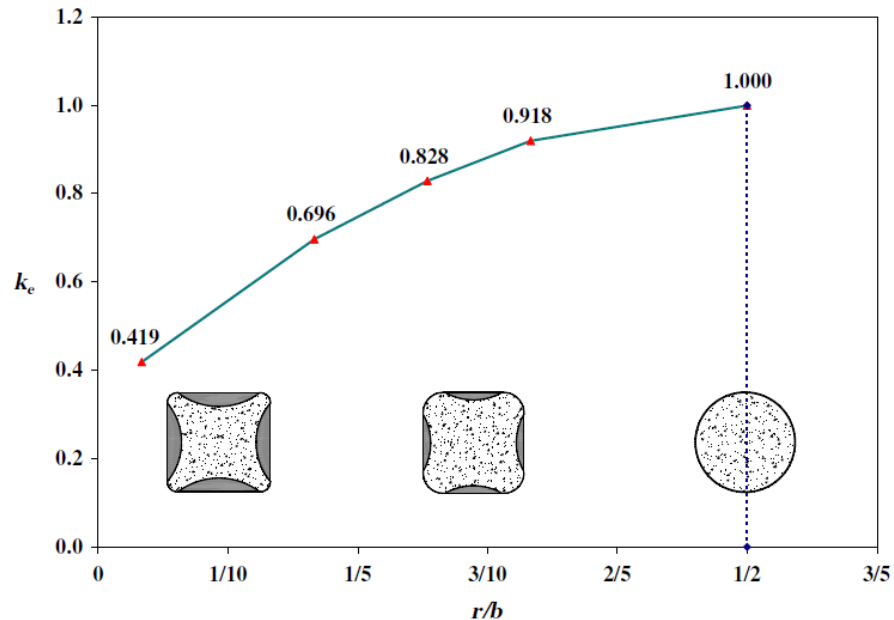


Figura 41: k_e frente a r/b para los especímenes considerados el estudio
Fuente: (Al-Salloum, 2006)

Por lo tanto, el modelo de la ecuación (15) se puede emplear como un modelo general para ambas secciones circulares y cuadradas confinadas

con FRP, en la que el valor de k_1 se puede utilizar como lo propuesto por los algunos investigadores para secciones circulares, por ejemplo Lam y Teng proponen el valor de k_1 como 3.3, mientras que Miyauchi et al. Proponen k_1 como 2.98, en función de sus resultados experimentales sobre cilindros de concreto confinados con FRP Al-Salloum considera k_1 como valor promedio de 3.14 para ser utilizado en su estudio, entonces el modelo se puede escribir como:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_c} = 1 + 3.14 \frac{b}{D} \frac{f_l}{f'_c} \quad (17)$$

4.4 Modelo de Mander

Mander y otros investigadores desarrollaron un modelo esfuerzo - deformación para hormigón sujeto a compresión uniaxial y confinado con refuerzo transversal en base de armaduras de acero. La sección de hormigón debe contener cualquier tipo de acero que confine este elemento.

En base a ensayos los investigadores mostraron que el confinamiento del hormigón con refuerzo transversal mediante una disposición adecuada resultaba un aumento significativo de resistencia y ductilidad del hormigón confinado. (Chambi, 2012)

El desarrollo del modelo de Mander que se va a presentar a continuación, es en base a refuerzo con acero, la ventaja de este modelo es su sencillez ya que se puede trabajar con modelos circulares como rectangulares, ya que sus expresiones son para el acero, por su versatilidad

se puede cambiar el valor de la presión de confinamiento lateral f_l , por una expresión que tenga en cuenta el confinamiento por el FRP, y aun así seguirá siendo aplicable. Basándose en esta afirmación el ACI 440.2R-02 (2002), utilizaba el modelo de Mander, a partir del 2008 el ACI.440.2R-08 (2008) sustituyó esta expresión por la de Lam y Teng (2003) (Chambi, 2012).

Mander et al. 1984 propusieron un modelo unificado aproximado para hormigón confinado que se aplica tanto a formas circulares como rectangulares con refuerzo transversal. El modelo esfuerzo – deformación, como se puede ver en la Figura 42, está basado en una ecuación propuesta por Popovics (1973). (Chambi, 2012)

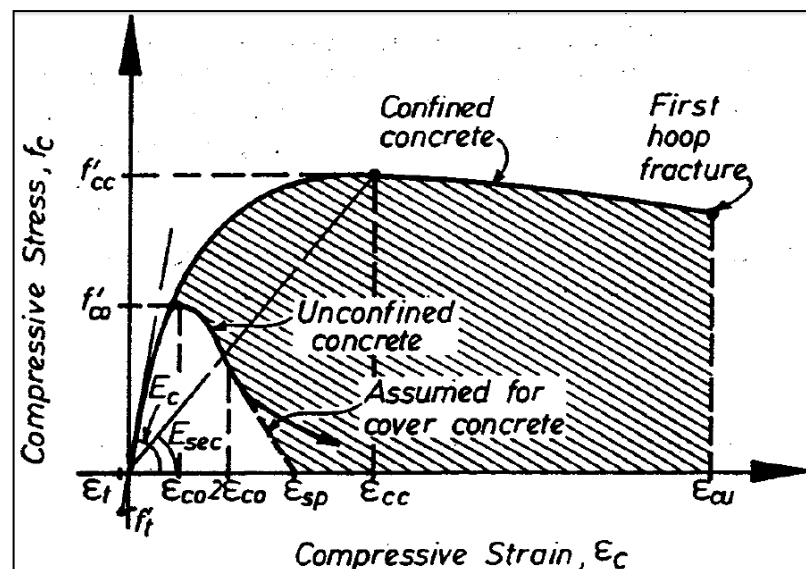


Figura 42: Modelo Mander et al
Fuente: (Mander, Priestley, & Park, 1988)

La tensión de compresión longitudinal en el hormigón f_c viene dada por las siguientes expresiones:

$$f_c = \frac{f'_{cc} \cdot x \cdot r}{r - 1 + x^r} \quad (18)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (19)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (20)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (21)$$

$$E_c = 5000 \sqrt{f'_{co}} \quad (22)$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (23)$$

Donde:

f_c es la tensión de compresión longitudinal del hormigón, f'_{cc} es la resistencia a compresión de hormigón confinado, x es Relación entre deformación en un instante determinado y la deformación en la resistencia f'_{cc} , ε_{cc} es la deformación correspondiente al esfuerzo f'_{cc} , ε_c es la deformación longitudinal del hormigón a compresión, f'_{co} es la resistencia del hormigón no confinado, ε_{co} es la deformación longitudinal del hormigón no confinado, generalmente se asume un valor de 0.002, r es la relación relativa entre módulo inicial y secante de elasticidad, E_c es el módulo de elasticidad tangente del hormigón viene dado en [Mpa], E_{sec} es el módulo secante de elasticidad del concreto en el esfuerzo máximo viene dado en [Mpa].

Para determinar la resistencia a compresión del hormigón confinado f'_{cc} se utiliza un modelo constitutivo que incluye una envolvente de resistencia última para tensiones a compresión multiaxiales. Se adopta la envolvente de fallo multiaxial de cinco parámetros que fue descrita por William y Warnke (1975), debido a que proporciona una excelente concordancia con los datos de las muestras. (Chambi, 2012)

La envolvente viene dada por la siguiente expresión:

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}} \right) \quad (24)$$

Según el ACI 440.2R-02 (2002), la expresión para la presión de confinamiento lateral con FRP viene dada por la siguiente expresión:

$$f_l = \frac{k_a \rho_f f_{fe}}{2} \quad (25)$$

$$\rho_f = \frac{4 \cdot n \cdot t_f}{D} \quad (26)$$

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f \quad (27)$$

$$\varepsilon_{fe} = \min[0.004; 0.75 \varepsilon_{fu}] \quad (28)$$

$$\varepsilon_{fu} = CE \cdot \varepsilon_{fu}^* \quad (29)$$

Donde:

k_a es un factor de forma en el caso de columnas circulares se toma el valor $k_a = 1$, ρ_f es la relación de refuerzo de FRP, f_{fe} tensión efectiva en el

FRP, E_f es el módulo de elasticidad del FRP, ε_{fe} es el nivel de deformación eficaz en el refuerzo con FRP, ε_{fu} es la tensión de rotura de diseño de refuerzo con FRP, n es el número de capas de FRP, t_f es el espesor del FRP, ε_{fu*} es la máxima tensión de ruptura del refuerzo FRP, CE es el factor de reducción por efectos ambientales, estos valores se indican en la Tabla 10.

Tabla 10: Valores de CE

Condiciones de exposición	Fibra y tipo de resina	Factor CE
Exposición Interior	Carbono/Epóxico	0.95
	Vidrio/Epóxico	0.75
	Aramida/Epóxico	0.85
Exposición exterior (puentes, muelles y ambientes no cerrados estacionamientos)	Carbono/Epóxico	0.85
	Vidrio/Epóxico	0.65
	Aramida/Epóxico	0.75
Entorno agresivo (fábricas de productos químicos y desechos plantas de tratamiento de agua)	Carbono/Epóxico	0.85
	Vidrio/Epóxico	0.50
	Aramida/Epóxico	0.70

Fuente: (ACI Committee 440, 2002)

En caso que la sección sea cuadrada se toma las siguientes expresiones:

$$k_a = 1 - \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{3bh(1-\rho_g)} \quad (30)$$

$$\rho_f = \frac{2 \cdot n \cdot t_f (b+h)}{bh} \quad (31)$$

Donde:

b es la base de la sección cuadrada h es la altura, r es el radio de curvatura de las columnas ρ_g es la cuantía de acero. Para que el efecto de confinamiento del FRP sea válido en columnas cuadradas la relación b/h debe ser superior a 1.5, o las dimensiones de b ó h , superior a 900 mm, a no ser que las pruebas hayan demostrado su eficacia (ACI Committee 440, 2002).

4.5 Modelo ACI 440.2R-08

En la Figura 43 se observa la curva esfuerzo deformación con línea continua del hormigón confinado con FRP que considera el ACI 440.2R-08. Este modelo de confinamiento es elaborado por Lam y Teng (2003). También, se puede ver la curva del hormigón no confinado con línea entre cortada, la cual tiene una resistencia f'_c asociada a una deformación unitaria ε_0 ; E_c es el módulo de elasticidad del hormigón sin confinar.

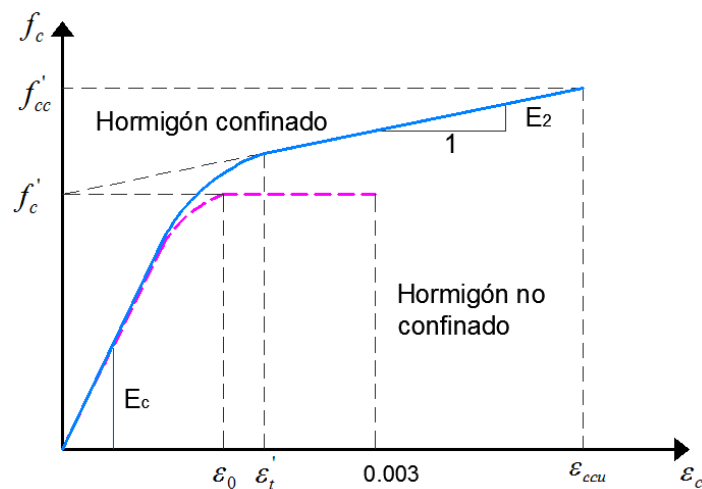


Figura 43: Modelo de ACI 440.2R-08 para hormigón confinado con FRP
Fuente: (ACI 440.2R-08, 2008)

La deformación última del hormigón confinado ε_{ccu} con FRP viene dado por las siguientes expresiones:

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_0 \left[1.5 + 12 \cdot k_b \cdot \frac{f_l}{f_c'} \cdot (\rho_e)^{0.45} \right] \quad (32)$$

$$f_l = \frac{2E_f \cdot n \cdot t_f \cdot \varepsilon_{fd}}{D} \quad (33)$$

$$\varepsilon_{fd} = k_\varepsilon \cdot \varepsilon_{fu} \leq 0.004 \quad (34)$$

$$\varepsilon_{fu} = CE \cdot \varepsilon_{fu}^* \quad (35)$$

$$\rho_e = \frac{\varepsilon_{fd}}{\varepsilon_0} \quad (36)$$

$$\frac{f_l}{f_c'} > 0.08 \quad (37)$$

Donde:

ε_0 es la deformación que viene asociada a f_c' ; k_b es un coeficiente de forma, en el caso de columnas circulares $k_b = 1$; f_l viene a ser la presión de confinamiento, para que el FRP sea efectivo se debe cumplir la ecuación (36), si la relación es menor se debe incrementar el valor de f_l viendo las variables que intervienen en este valor; E_f es el módulo de elasticidad del FRP, n es el número de capas; t_f viene a ser el espesor.

ε_{fd} es la deformación a la rotura del FRP, el cual viene dado por diversos factores que son factores de seguridad como se muestran en la Figura 44, este valor debe menor o igual a 0.004 para asegurar la integridad del confinamiento del hormigón; k_ε es un factor de eficacia, el ACI 440.2R-08 considera $k_\varepsilon = 0.55$;

ε_{fu^*} es la Deformación máxima de rotura a tracción, valor que lo da el fabricante; ρ_ε es una relación entre las deformaciones a rotura del FRP con la deformación del hormigón.

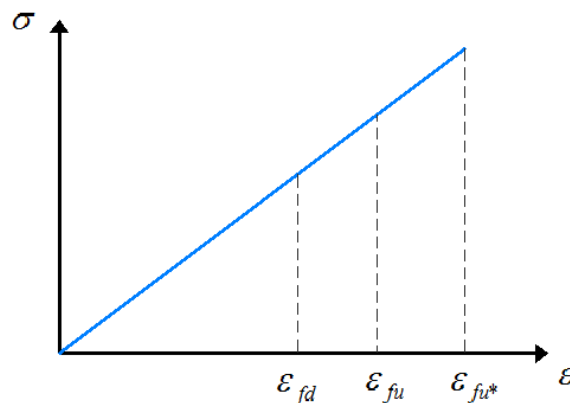


Figura 44: Curva Esfuerzo – deformación de la fibra de vidrio
Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

Las ecuaciones que definen la curva esfuerzo deformación que considera el ACI 440.2R-08 son las siguientes:

$$f_c = \begin{cases} E_c \cdot \varepsilon_c - \frac{(E_c - E_2)^2}{4f_c'} \cdot \varepsilon_c^2 & ; 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_t' \\ f_c' + E_2 \cdot \varepsilon_c & ; \varepsilon_t' \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ccu} \end{cases} \quad (38)$$

La exposición a diferentes condiciones ambientales reducen las propiedades de tensión, fractura y fatiga del FRP, por lo tanto dichas

propiedades deben ser limitadas con el factor CE el cual se detalla en la Tabla 10 basándose en las condiciones de exposición ambiental, es decir, de acuerdo al lugar donde se vaya a colocar el refuerzo.

La resistencia del hormigón confinado con FRP, en base a lo que considera el ACI 440, se obtiene con la siguiente ecuación:

$$f'_{cc} = f'_c + \varphi \cdot 3.3 \cdot k_a \cdot f_l \quad (39)$$

Donde:

$\varphi = 0.95$ es un factor de seguridad, $k_a = 1$ para columnas circulares.

De la Figura 43 falta por definir la pendiente post fluencia E_2 , también la variable ε'_t la cual es la deformación de transición.

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_c}{\varepsilon_{ccu}} \quad (40)$$

$$\varepsilon'_t = \frac{2f'_c}{E_c - E_2} \quad (41)$$

Si el valor de, $\varepsilon_{ccu} > 0.01$ entonces f'_{cc} se calcula con la siguiente expresión:

$$f'_{cc} = E_2 \cdot 0.01 + f'_c \quad (42)$$

En la cual el valor de E_2 se calcula con los anteriores valores de f'_{cc} y ε_{ccu} .

En el caso en que la sección sea cuadrada se usarán las siguientes expresiones:

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \frac{\left[\left(\frac{b}{h} \right) (h - 2r_c)^2 + \left(\frac{h}{b} \right) (b - 2r_c)^2 \right]}{3A_g} - \rho_g}{1 - \rho_g} \quad (43)$$

$$k_a = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h} \right)^2 \quad (44)$$

$$k_b = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{h}{b} \right)^{0.5} \quad (45)$$

$$D = \sqrt{b^2 + h^2} \quad (46)$$

Donde A_e es el área efectiva de confinamiento con FRP, la relación A_e/A_c se determina con la ecuación (43); h, b son las dimensiones de la columna, r_c es el radio de curvatura de las esquinas como se puede ver en la Figura 45; A_g es el área de la sección transversal, ρ_g es la cuantía de acero longitudinal. Si ρ_g es muy alto, el reforzamiento con FRP no es tan eficiente por eso se recomienda que ρ_g sea menor al 3 % (ACI 440.2R-08, 2008).

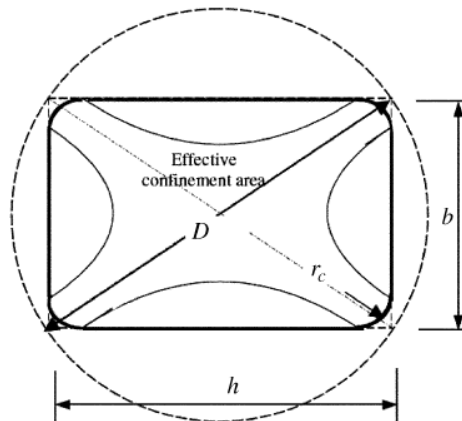


Figura 45: Sección equivalente
Fuente: (ACI 440.2R-08, 2008)

4.6 Ventajas del confinamiento con fibra de vidrio estructural GFRP

Existen varios casos por los cuales las estructuras necesitan ser reforzadas, tales como el aumento de cargas verticales, que la sección de los elementos estructurales sean insuficientes, un diseño mal realizado en las estructuras provocando así falta de acero estructural en ellas, así como también una baja resistencia a la compresión de las estructuras, el deterioro en el tiempo actualización de códigos entre otros aspectos.

Existen varios tipos de sistemas de reforzamientos para las estructuras, centrando el estudio en el confinamiento, podemos tener encamisado en concreto reforzado como se puede ver en la Figura 46.



Figura 46: Encamisado de columnas
Fuente: (Rendón & García, 2013)

Otro método que también es aplicable para confinar elementos con cargas axiales es el encamisado en acero como se puede observar en la Figura 47



Figura 47: Encamisado con acero
Fuente: (Rendón & García, 2013)

Entre otros tipos de refuerzos también se tiene el refuerzo con FRP, el cual es el motivo del proyecto de tesis. Todo material que pueda proporcionar confinamiento suficiente puede ser usado para contener o demorar la rotura instantánea del hormigón, el confinamiento restringe la fisuración por compresión y cortante, aumentando así la ductilidad del elemento estructural durante la rotura (Chambi, 2012).

Al mencionar este tipo de refuerzos, se quiere dar a conocer las ventajas del uso del FRP frente a estos, por ejemplo si se usa el encamisado con acero en pilares las investigaciones no han llegado a entender

completamente el confinamiento del núcleo de hormigón. Aunque es ampliamente usado en la práctica, se está buscando otras alternativas para mejorar el proceso de refuerzo de algunos puentes deficientes estructuralmente existentes (Untiveros, 2002).

Según (Untiveros, 2002) es favorable el uso del FRP frente a estos tipos de refuerzos por la facilidad de construcción, la reducción significativa de tiempo y por las propiedades sísmicas que nos da el aumento de ductilidad.

Otra de las ventajas de este tipo de refuerzo frente a los otros es la forma de adaptarse de este material, no tiene mucho peso a diferencia de los otros tipos de refuerzo.

Otra ventaja del refuerzo con FRP es la facilidad y la efectividad de esta técnica en el refuerzo de soportes circulares, ya que numerosos investigadores han publicados varios modelos de análisis y de diseño con este tipo de materiales.

Al respecto, de las investigaciones en tiempos recientes se ha incrementado el uso del FRP como elemento de confinamiento, debido a sus excelentes propiedades mecánicas y químicas de estos materiales. Algunos investigadores han mostrado que el confinamiento con FRP mejora el comportamiento de columnas sometidas a carga sísmica, y se han aplicado eficientemente en la rehabilitación sísmica de pilares de puentes en USA y Japón (Chambi, 2012).

El uso del FRP es eficaz para confinar concreto, aumentando de esta manera tanto la resistencia a la compresión y la deformación correspondiente. El aumento de la deformación aumenta la ductilidad del miembro estructural y de todo el sistema, por lo que se puede utilizar para mejorar el comportamiento sísmico. De hecho, la acomodación de columna para mejorar el rendimiento sísmico es una de las principales áreas de aplicación práctica del FRP (Balaguru, Nanni, & Giancaspro, 2009).

El aumento tanto en la compresión como en la resistencia y capacidad de deformación, traducido a la curvatura y la capacidad de rotación, son muy útiles para las columnas sometidas a cargas dinámicas (Restrepo & DeVino, 2006).

Los materiales compuestos de alta resistencia han sido muy eficaces en la adaptación de las columnas para mejorar resistencia a los sismos. Un gran número de investigaciones realizadas en el laboratorio y aplicaciones de campo en los edificios y puentes establecen la viabilidad de los materiales compuestos para mejorar el desempeño de los miembros cargados axialmente (ACI Committee 440, 2002).

Está bien establecido en base a las investigaciones que el hormigón confinado puede sostener mucho mayor resistencia a la compresión y la tensión que el concreto no confinado. El confinamiento impide la expansión de elementos uniaxialmente cargados, lo que contribuye a una mayor capacidad de carga. Lo que se quiere evitar con este tipo de confinamiento

es lo que pasa en los pies de pilares en algunos puentes como se puede observar en la Figura 48

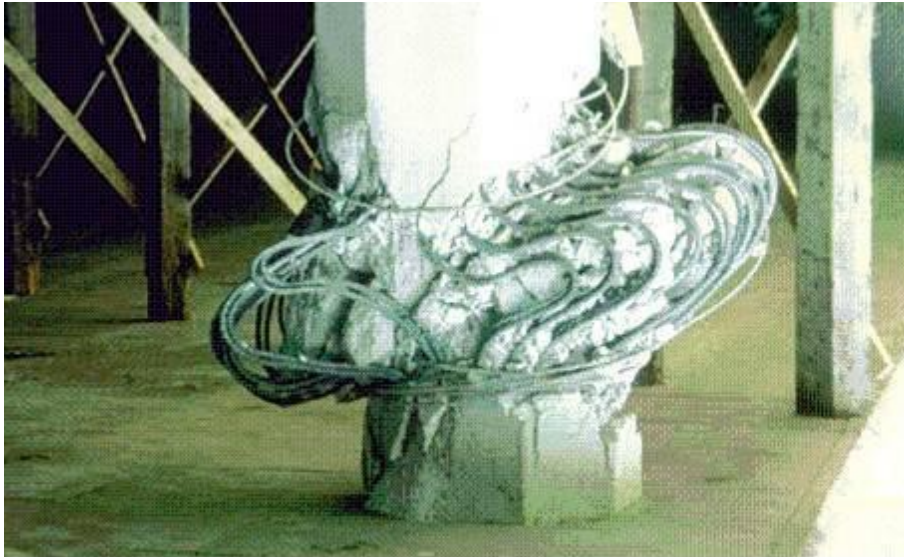


Figura 48: Expansión del hormigón a falta de confinamiento.

Fuente: (Rendón & García, 2013)

Sismos ocurridos en Asia, Europa y los EE.UU. han demostrado la vulnerabilidad de las columnas en ambos tanto en edificios y puentes. Los registros de diseño que lleva el Departamento de Transporte de California (EE.UU.) son de ayuda para identificar las deficiencias de diseño.

Por ejemplo, antes de 1971 previo al terremoto de San Fernando, el refuerzo transversal en la mayoría de las columnas consistieron en varillas # 4 (0,5 pulgadas de diámetro) espaciados cada 12 pulgadas. Se encontró que esta falta de refuerzo transversal era la causa principal para la mayor parte de los fallas de columna (Balaguru, Nanni, & Giancaspro, 2009).

El modo de fallo más crítico es la falla de corte de columna, que se muestra en la Figura 49, que se produce debido a un exceso de agrietamiento inclinado.

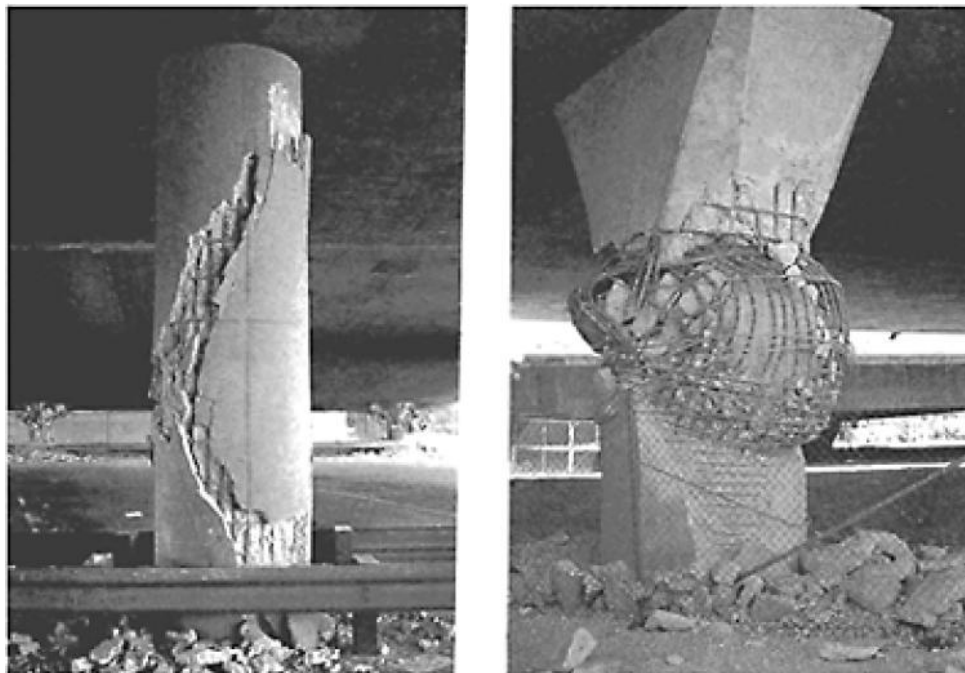


Figura 49: Falla por cizallamiento en columna, Terremoto de Northridge (1994)

Fuente: (Balaguru, Nanni, & Giancaspro, 2009)

Si hay refuerzo lateral insuficiente, estas grietas inclinadas se abren rápidamente, una vez que se pierde la cubierta, el refuerzo transversal se podría abrir o romperse, dando lugar al pandeo del refuerzo longitudinal y posterior falla del núcleo de hormigón. Una vez que las grietas son demasiado elevadas en el hormigón, las consecuencias puede ser la explosión de la columna. Por esta razón es importante el confinamiento lateral de las estructuras con un proceso que no demora mucho, es de bajo peso como el refuerzo con FRP.

CAPÍTULO 5

ENSAYOS A COMPRESIÓN REALIZADOS

5.1 Introducción

En este capítulo se desarrolla los ensayos realizados para llevar a cabo el objetivo de la tesis, en un inicio se realiza los ensayos del material usado para la elaboración de los cilindros mediante la norma ASTM, posteriormente se realiza la dosificación del hormigón mediante la norma ACI 211, y finalmente se encontrará la curva esfuerzo deformación de los cilindros sin confinar y confinados con GFRP y fibra de vidrio tradicional, mediante una variación a la norma ASTM C469 / C469M.

En el campo de la Ingeniería Civil, la Resistencia a la Compresión es una de las propiedades fundamentales que requiere el hormigón; su importancia dependerá del trabajo estructural al que esté destinado. En un proyecto deben, siempre, considerarse los estados de sollicitación a los que se somete el hormigón y es responsabilidad de cada profesional tomar en cuenta las propiedades mecánicas del mismo. (Herrería & Villegas, 2008)

Otro parámetro importante en el diseño de las estructuras es el módulo de elasticidad del hormigón de este depende en gran medida la rigidez de las estructuras, para obtener este parámetro es necesario obtener la curva Esfuerzo – deformación del hormigón el cual se puede obtener mediante la norma ASTM C469.

5.2 Dosificación del hormigón

Los requisitos para la dosificación del concreto se basan en la filosofía de que el concreto debe tener una adecuada durabilidad y resistencia. Los criterios para la aceptación del concreto se basan en la filosofía de que el reglamento pretende primordialmente proteger la seguridad pública (ACI Committee 318, 2004).

Para la dosificación del hormigón se usó el método recomendado por el ACI 211, en el cual se realiza los siguientes ensayos, previo a la dosificación.

5.2.1 Granulometría de los agregados

El ensayo de granulometría consiste en determinar la gradación de las partículas. (NTE INEN 696, 2011)

Procedimiento:

Se pone a secar una cantidad representativa de muestra de 18 a 24 horas a 110 °C, con el fin de que el contenido de humedad sea menor a 0.1% en masa. Se cuartea la muestra y se pesa aproximadamente un kilogramo. Se ordenan los tamices serie módulo de finura de Duff Abrams (No. 4, 8, 16, 30, 50, 100) de manera descendente y se colocan en la máquina tamizadora, como se muestra en la Figura 38, el tiempo de tamizado es el necesario para que no más del 1% en masa de material retenido en cualquier tamiz individual, pase el mismo durante 1 minuto de tamizado manual continuo. Se retiran los tamices de la máquina y se pesa el contenido de material retenido en cada uno de ellos.



Figura 50: Tamices para realizar granulometría de los agregados
Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

Los valores obtenidos para las probetas se muestran en el anexo A.1

5.2.2 Contenido de humedad

El contenido de humedad de un granulado es la cantidad de agua que necesita para pasar de un estado seco al horno a su estado de humedad natural. Generalmente se expresa en un porcentaje relacionado con la masa total de la muestra de agregados. Los valores obtenidos se muestran en el anexo A.2

5.2.3 Densidad aparente suelta y compactada

La Densidad Aparente es la relación que existe entre la masa del material sobre el volumen que ocupa, incluye los poros impermeables pero no incluye a los capilares o poros permeables. (NTE INEN 858, 2010). Los valores obtenidos se muestran en el anexo A.3

Procedimiento:

Se llena el molde con el agregado el cual se coloca de manera suelta, luego se enrasa y pesa. Para determinar la densidad compactada se llena el molde en tres capas, golpeando en cada capa un total de 25 veces con la varilla de compactación. Una vez lleno el molde se enrasa y pesa.

5.2.4 Peso específico y absorción de los agregados

El peso específico conocido también como Densidad en estado saturado con superficie seca (S.S.S), es la relación entre la masa y el volumen total de agregados completamente saturados y libres de humedad superficial. (NTE INEN 857, 2010).

Esta es la densidad más importante para calcular el hormigón del granulado especialmente cuando la dosificación del hormigón se realiza por el Método de ACI (American Concrete Institute), este valor depende de la densidad de los componentes minerales y su porosidad (Herrería & Villegas, 2008).

Se define como absorción de los agregados al proceso por el cual un líquido penetra y tiende a llenar los poros permeables de un cuerpo sólido

poroso; también es el incremento en masa de un cuerpo sólido poroso permeable. El contenido de humedad de un granulado se basa en su masa al ser horneado hasta secar, aunque es la humedad libre o superficial excedente a la absorción causante de la condición de saturación con superficie seca (NTE INEN 857, 2010). Los valores obtenidos se muestran en el anexo A.4

5.2.4.1 Proceso agregado grueso:

Procedimiento:

Se lavan las gravas para eliminar el material fino adherido en sus caras, luego se sumerge durante 24 horas en agua para lograr la saturación de las mismas. Se lavan las gravas para eliminar el material fino adherido en sus caras, luego se sumerge durante 24 horas en agua para lograr la saturación de las mismas. Se pesa la muestra de gravas en condición sss en el aire. Se pesa la canasta sumergida en agua. Se colocan dentro de la canasta las gravas y se toma el peso con la muestra sumergida. Se coloca la muestra en un recipiente y se secan durante 24 horas. Una vez transcurrido este tiempo se toma el peso de la muestra seca

5.2.4.2 Proceso agregado fino:

Procedimiento:

Se lava una muestra representativa de la arena para eliminar el polvo, limos, arcillas o partículas orgánicas que ésta pueda contener y se la sumerge en agua durante 24 horas. De la muestra ya saturada se toma una

cantidad mayor a 500 g, escurriendo el exceso de agua. Se coloca la muestra en una bandeja y se la introduce en el horno para acelerar el proceso de secado, o se la seca a temperatura ambiente. Para verificar que se ha alcanzado la condición de superficie saturada seca (sss), se coloca la muestra de forma suelta en un molde tronco cónico, compactándola de tal manera que al terminar de llenar el molde se completen 25 golpes con un pistillo, el cual se deja caer desde una altura de + 3,50 cm. Se enrasa y retira el material de la parte externa del molde, se comprueba que se ha alcanzado la condición sss, cuando al retirar el molde la arena se desmorona ligeramente. Si no se desmorona se le vuelve a introducir en el horno controlando el secado y si por el contrario el secado es excesivo se repite el ensayo. Se pesa aproximadamente 500 g de arena en condición SSS, se coloca en un picnómetro alrededor de 100 ml de agua y se introduce la arena en condición SSS, Se agita y se extrae el aire atrapado en el picnómetro usando la bomba de vacío como se puede ver en la Figura 51.



Figura 51: Eliminación de vacíos en el picnómetro

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

Se llena el picnómetro con agua hasta el aforo, evitando introducir aire por medio de burbujas. Se pesa el picnómetro con la muestra de arena y agua. Luego se vierte el contenido en un recipiente y se lo pone a secar durante 24 horas. Se obtiene el peso seco de la arena, los valores obtenidos se muestran en el anexo A.4

5.2.5 Procedimiento para la dosificación del hormigón.

Se determina una resistencia f'_c el cual es un valor impuesto por el calculista en este caso se usó el valor $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$, puesto que la resistencia especificada del hormigón debe determinarse en obra con un margen de variación propio de su condición de material heterogéneo y variable, se deben diseñar las mezclas en laboratorio para una resistencia mayorada que se conoce como “Resistencia a la Compresión Promedio Requerida” y se la representa como f'_{cr} valor que es calculado con la siguiente expresión:

$$f'_{cr} = f'_c + 1.33\sigma \quad (47)$$

El valor de la desviación σ se toma como $\sigma = 40$, es un valor usado en el Laboratorio de suelos del Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción.

Se escoge un asentamiento el cual es una medida de la fluidez de la mezcla, esta prueba es muy útil para determinar la consistencia y trabajabilidad del hormigón. Posteriormente se selecciona el tamaño máximo nominal del agregado grueso, después se selecciona el contenido

de agua y el contenido de aire atrapado en la mezcla, después de este paso se selecciona la relación agua cemento la cual es la relación entre el peso de agua y el peso de cemento, se considera el principal parámetro para determinar la resistencia mecánica del hormigón, posterior a esto se selecciona el contenido de cemento después se escoge el contenido de agregado grueso para calcular el contenido de agregado fino se suma los volúmenes absolutos de todos los materiales y se resta el valor de la unidad siendo el resultado el volumen del agregado fino.

Finalmente se calcula el peso en estado seco del agregado fino. Después se presentación del diseño en estado seco, posterior a este paso se realiza la corrección del diseño por el aporte de humedad de los agregados, por último se presenta el diseño en estado húmedo.

Todo el proceso que se menciona esta detallado en los anexos A.5 mediante la elaboración de una hoja de cálculo con base de datos las tablas que proporciona el ACI 211. En la Tabla 11, se muestra la dosificación del hormigón para la construcción de 15 cilindros de hormigón.

Tabla 11: Dosificación del hormigón

Material	Por peso p/1 m ³		R	Para	Para
	Seco	Húm.		0.08 [m3]	una bolsa de cemento
Cemento [kg]	382.580	382.580	1	32.18	50.0
Agua [lt]	192.63	166.28	0.43	13.99	21.7
Arena [kg]	705.26	778.05	2.03	65.44	101.7
Ripio [kg]	914.49	923.83	2.41	77.71	120.7

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

5.3 Construcción de los cilindros de hormigón

La mezcla de hormigón se realiza en una concreteira tratando que haya homogeneidad en la mezcla. Al empezar la mezcla se debe seguir cierto orden: primero se coloca el agregado grueso, después las tres cuartas partes del agua, para luego colocar el agregado fino y el cemento, para al final colocar un cuarto de agua restante.

Una vez colocado todos los materiales que componen el hormigón, se deberá mantener en funcionamiento la concreteira durante un tiempo mínimo de amasado de cinco minutos, esto se realiza para conseguir una mezcla íntima y homogénea de los distintos componentes (Herrería & Villegas, 2008).

Posterior al procedimiento anterior se debe verificar la consistencia del hormigón en base al ensayo Asentamiento en el Cono de Abrams, siguiendo el procedimiento indicado en la Norma NTE INEN 1578. La cual se detalla a continuación:

Se coloca una capa fina de aceite mineral o material desmoldante no reactivo en el cono. Se llena el cono en tres capas, en cada una de ellas se da 25 golpes con la varilla de compactación (16 mm de diámetro y 600 mm de longitud con punta redondeada). Se debe procurar que al compactar la mezcla, los golpes apenas lleguen a la capa inferior. En la capa final, se debe mantener la mezcla sobre el borde del cono hasta completar los 25 golpes, se enrasa el mismo rodando la varilla sobre el borde superior del molde. Se limpia la base del cono y se lo levanta cuidadosamente en

dirección vertical, para colocarlo junto a la muestra en posición inversa a la utilizada. Con la ayuda de un flexómetro se mide la diferencia de altura entre la parte superior del molde y el centro del hormigón asentado, siendo este valor el asentamiento (NTE INEN 1578, 2010).

Después de obtener el asentamiento requerido, se realiza el moldeo de los cilindros cuyo procedimiento se encuentra determinado en la norma NTE INEN 1576, el procedimiento se detalla a continuación:

Los moldes a ocuparse deben estar previamente ajustados y con una fina capa de aceite mineral o material desmoldante no reactivo. Se vierte el hormigón en los cilindros en tres capas, se compacta cada capa con 25 golpes distribuyéndolos de manera uniforme sobre la sección transversal, para este efecto se usa la varilla de compactación.

Luego de que cada capa ha sido compactada, se golpea el exterior del molde de 10 a 15 veces con un mazo (cabeza de caucho con una masa de $0,6 \text{ Kg} \pm 0,2 \text{ Kg}$). El propósito de estos golpes es cerrar los agujeros dejados por la varilla y eliminar el aire atrapado. Se enrasan los cilindros procurando que su terminado no presente depresiones o proyecciones mayores a 3 mm (NTE INEN 1576, 2011).

El resultado final de la elaboración de los cilindros se lo puede observar en la Figura 52.

Es importante realizar el moldeo de los cilindros cerca del lugar donde se los va a ubicar para su fraguado, al día siguiente se los desencofra,

identifica e instala en la cámara de curado de acuerdo a la norma (NTE INEN 2528, 2010).



Figura 52: Cilindros de hormigón

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

5.4 Ensayos a compresión de hormigón sin fibra

En base a la norma (ASTM C469, 2010) Método de ensayo. Determinación del módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson del concreto a compresión, se calcula la deformación del hormigón en el capítulo 6 sección 6.2 se detalla la obtención del módulo de Elasticidad del hormigón. Este método de ensayo proporciona un valor de la relación esfuerzo – deformación y una relación de la deformación transversal a la deformación longitudinal para hormigón duro a cualquier edad y condiciones que puedan haberse designado. Los equipos que se necesitan para la elaboración del ensayo son los siguientes:

Máquina de ensayos la cual se puede observar en la Figura 53, la cual provee la carga a los cilindros de hormigón.



Figura 53: Máquina de ensayo

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

En la Figura 53, también se puede observar el compresómetro el cual nos sirve para determinar las variaciones de deformación longitudinal que sufre el hormigón en intervalos simultáneos de carga, para dicho efecto se procede de la siguiente manera:

Para medir las variaciones de deformación por compresión, se acopla a la probeta estándar de hormigón un sistema que consta de dos anillos, uno superior y otro inferior los mismos que se aseguran a la probeta mediante tornillos sujetándose de punta cónica de manera que el anillo quede lo más centrado posible.

El anillo inferior permanece fijo, el anillo superior es el que gira en un eje conforme se comprime el hormigón. En un extremo de los dos anillos se

coloca un sistema de apoyo mientras que el otro extremo va acoplado el defórmetro o dial, el mismo que tienen una sensibilidad de 0.00254 mm.

Por efectos de montaje del aparato el dial de deformaciones da lecturas igual al doble de la deformación verdadera de la probeta, como se puede observar en la Figura 54 lo cual es ventajoso para mayor sensibilidad de las lecturas (Herrería & Villegas, 2008).

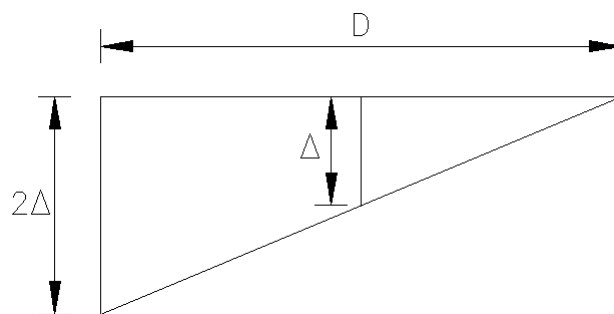


Figura 54: Lectura de deformaciones

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

Para obtener las deformaciones unitarias de los cilindros de hormigón se calcula con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{L} \quad (48)$$

Donde: ε es la deformación unitaria L longitud de medida, Δ es la deformación en el eje de la probeta su valor viene dado por:

$$\Delta = \frac{\text{Lectura}}{2} \quad (49)$$

Reemplazando la ecuación (49) en la ecuación (48) se tiene que la deformación unitaria viene dada por la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \frac{\text{Lectura}}{2L} \quad (50)$$

Para tener los datos que componen la curva Esfuerzo deformación, de debe realizar el siguiente proceso:

En el cilindro de hormigón debe estar colocado el compresómetro, de una manera simétrica, se mide la longitud del cilindro y se divide esta para tres, se marca estas divisiones y en las marcas se colocan los tornillos y se trata de ajustarlos la misma distancia en todos estos como se puede ver en la Figura 55.



Figura 55: Colocación del compresómetro
Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

Se coloca en la máquina de ensayos, el cilindro con el compresómetro se aplica carga mientras que se toma los valores de deformación en el mismo instante se debe tomar los valores de la carga para obtener los pares ordenados de la curva esfuerzo deformación.

Para tratar de obtener la mayor cantidad de datos en la curva esfuerzo – deformación en los cilindros sin fibra se da ciclos de carga y descarga en varias iteraciones hasta que finalmente el cilindro llegue a su falla. Mediante este proceso se obtiene un modelo más exacto de la curva esfuerzo deformación. Para llegar a este procedimiento se llevó a cabo varios intentos los cuales daban pocos valores para obtener dicha curva. En la Figura 56 se puede ver los ciclos de carga y descarga que se realizaron para obtener la curva esfuerzo – deformación, para obtener la curva envolvente, se toma los valores máximos de cada iteración.

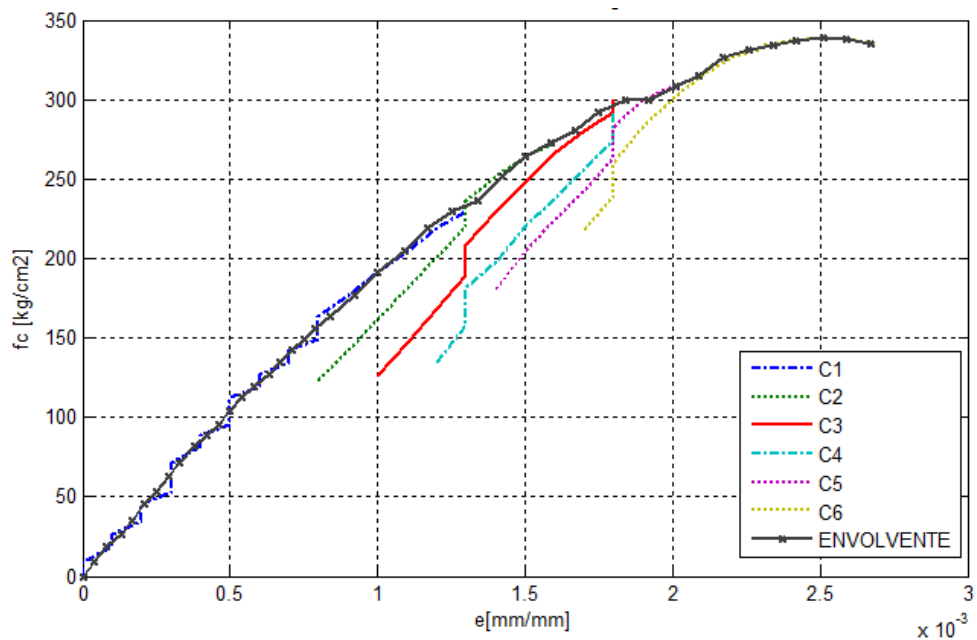


Figura 56: Iteraciones para obtener la curva esfuerzo deformación del hormigón sin confinar

Fuente: Elaborador por: Cevallos, Diego

5.4.1 Resultados de los ensayos del hormigón sin confinar

Para obtener la curva que se muestra en la Figura 57, se tuvo que realizar varias iteraciones como se indica en la Figura 56, el ensayo se hizo en dos cilindros de hormigón sin confinar, mediante el compresómetro conveniente, con los datos de cada cilindro se obtiene la curva envolvente y de las curvas envolventes se realiza un promedio. Los valores obtenidos de la curva promedio son los siguientes:

Resistencia a la compresión del hormigón sin fibra $f'_c = 336.24 \text{ kg/cm}^2$ a este valor se asocia una deformación unitaria $\varepsilon_0 = 0.0026073$

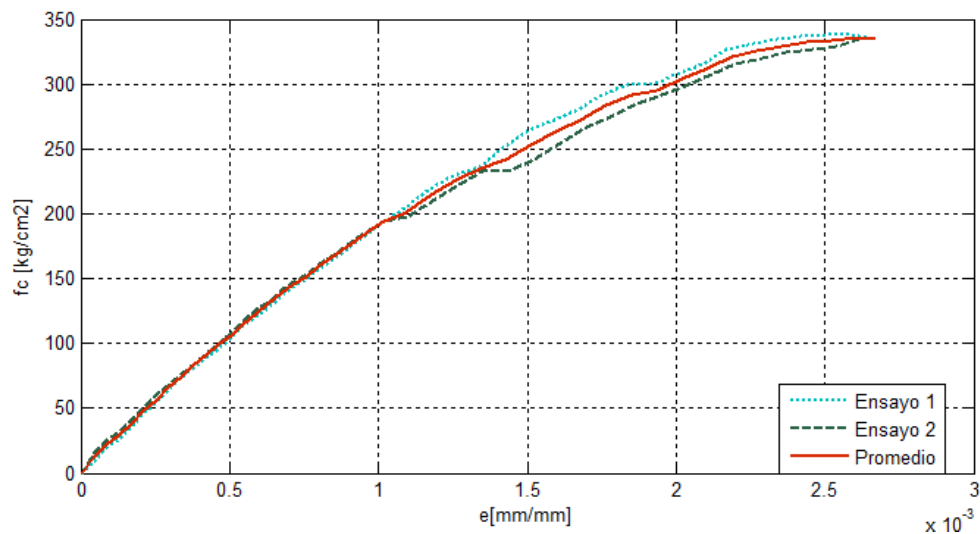


Figura 57: Curvas Esfuerzo – deformación del hormigón sin fibra
Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

5.5 Ensayos a compresión de hormigón con fibra de vidrio estructural GFRP

Para obtener la curva esfuerzo deformación de los cilindros confinados con fibra de vidrio SikaWrap Hex 100G se realiza similar proceso que con el

hormigón no confinado como se indica en la Figura 58, a diferencia del proceso que se realiza con los cilindros sin confinar, no se realiza iteraciones ya que el material es dúctil y se puede tener mucha más deformación que con el hormigón sin confinar.



Figura 58: Ensayo curva esfuerzo deformación del hormigón confinado con SikaWrap Hex 100G

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

El modo de falla se caracteriza por la rotura del FRP. Como se indica en la Figura 59. En general, la línea de rotura fue perpendicular a la fibra. Después de realizado el ensayo se retiró la capa de FRP para observar la forma en que quedó el cilindro después de haber sido aplicada la carga como se observa en la Figura 60.



Figura 59: Falla del cilindro con FRP
Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

La falla ocurrió por la formación de grietas paralelas a la dirección de la carga, como se muestra en la Figura 60 este modo es similar a aquellos hormigones sin confinar. Lo que se puede apreciar es como actúa el confinamiento puesto que las grietas son alrededor de todo el cilindro.

Otra característica del modo de rotura de los cilindros confinados con FRP es que existe una capa fina de hormigón que se encuentra adherida al FRP, lo que indica que la adherencia entre el hormigón y el FRP fue satisfactoria. La rotura del FRP se presentó lejos de la zona de traslape entre las capas de FRP.



Figura 60: Grietas en hormigón confinado con fibra de vidrio FRP
Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

5.5.1 Resultados de los ensayos hormigón confinado con una capa de GFRP SikaWrap 100G Hex

Este ensayo se realizó a dos cilindros de diámetro 15.3 cm confinados con una capa de SikaWrap, la curva esfuerzo - deformación obtenida se muestra en la Figura 61.

De esta curva se obtiene los siguientes datos promedio, $f_{c\max} = 406.86 \text{ kg/cm}^2$ y una deformación final $\epsilon_{ccu} = 0.009545752$ en la Tabla 12 se muestran los valores obtenidos en cada ensayo.

Tabla 12: Valores obtenidos en cilindros confinados con una capa de fibra SikaWrap Hex 100G

	Resistencia máxima a compresión	Deformación última del material
Cilindro 1	410.93 [kg/cm ²]	0.008550
Cilindro 2	406.86 [kg/cm ²]	0.0095458

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

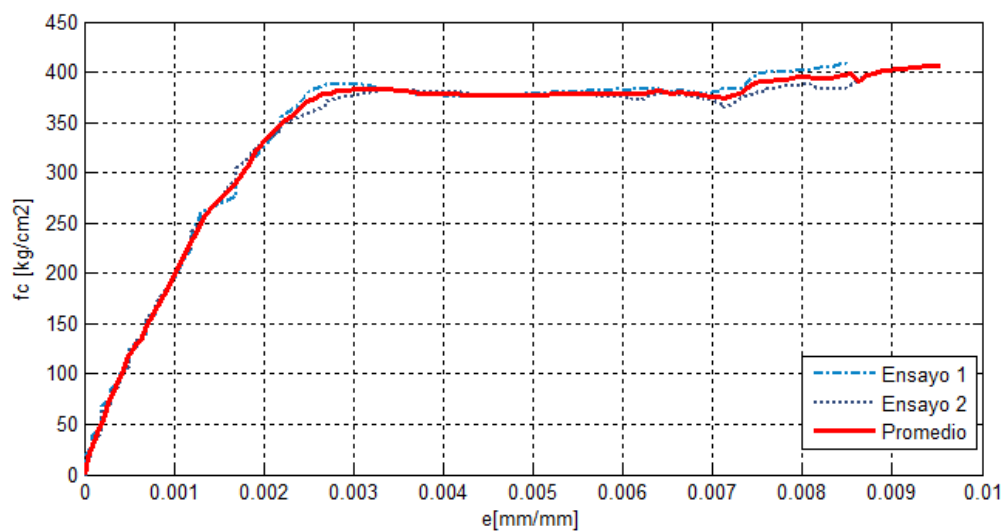


Figura 61: Curvas Esfuerzo – deformación del hormigón confinado con SikaWrap 100G

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

5.6 Ensayos a compresión de hormigón con fibra de vidrio tradicional

De similar manera se obtiene como en los anteriores casos, mediante el compresómetro los datos para la obtención de la curva esfuerzo - deformación, como se puede observar en la Figura 62. Para este tipo de fibra se contaba con suficiente material y se tiene resultados con cilindros confinados con hasta con tres capas.



Figura 62: Ensayo curva esfuerzo deformación del hormigón confinado con fibra de vidrio tradicional

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

5.6.1 Resultados de los ensayos a hormigón confinado con una capa de fibra de vidrio tradicional

Al finalizar el ensayo se despegó la capa de fibra de vidrio y se observa que el plano de falla es en el sentido de la carga, las grietas son similares a las del anterior confinamiento como se puede ver en la Figura 63. La falla del material es en sentido paralelo al de la carga, y se produce en la parte del traslape, además se puede observar como en el caso de los cilindros confinados con GFRP que existe una capa fina de hormigón que se encuentra adherida a la fibra de vidrio tradicional, esto indica que la adherencia entre el hormigón y la fibra de vidrio tradicional fue satisfactoria.



Figura 63: Plano de falla y grietas en hormigón confinado con una capa de fibra de vidrio tradicional

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

En la Figura 64 se puede observar la curva esfuerzo deformación que se obtuvo al ensayar dos cilindros con diámetro 15.2cm confinados con una capa de fibra de vidrio tradicional. En la Tabla 13 se puede observar el resumen de estos ensayos.

Tabla 13: Valores obtenidos en cilindros confinados con una capa de fibra de vidrio tradicional

	Resistencia máxima a compresión	Deformación última del material
Cilindro 1	356.56[kg/cm ²]	0.005347
Cilindro 2	358.95[kg/cm ²]	0.004565

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

De la Figura 64 se tiene que la curva promedio nos da un valor de resistencia a la compresión de $f_{c_{max}} = 357.50 \text{ kg/cm}^2$ y una deformación máxima $\varepsilon_{ccu} = 0.005347$.

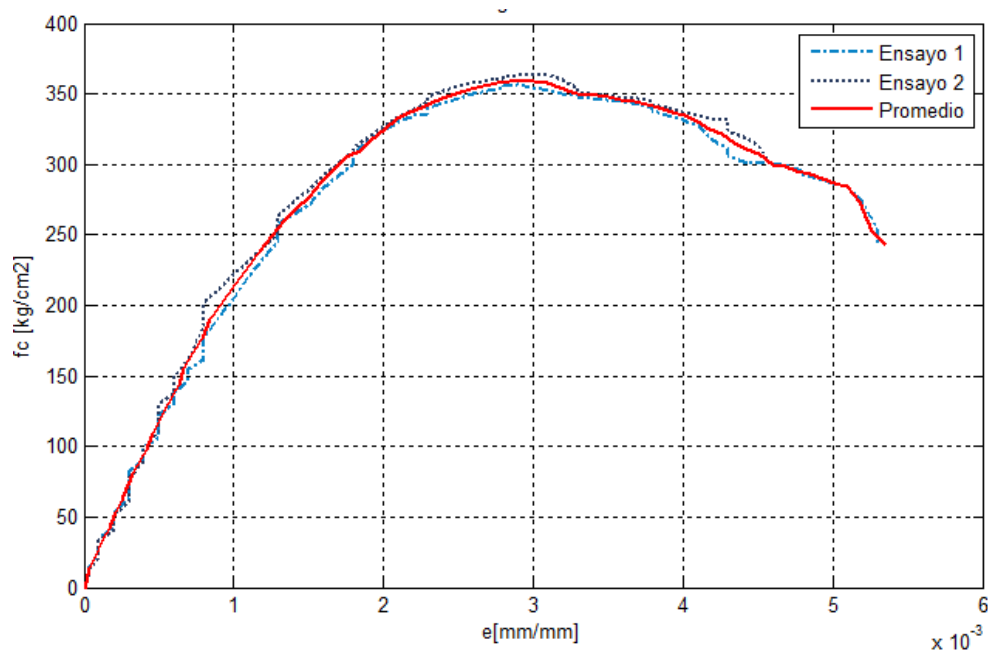


Figura 64: Curvas Esfuerzo – deformación del hormigón confinado con una capa de fibra de vidrio tradicional

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

5.6.2 Resultados de los ensayos a hormigón confinado con dos capas de fibra de vidrio tradicional

Como en el apartado 5.6.1 cuando el ensayo termina se despegó la capa de fibra de vidrio y en similar forma al anterior caso se observa que el plano de falla es en el sentido de la carga, como se puede ver en la Figura 65.



Figura 65: Plano de falla y grietas en hormigón confinado con dos capas de fibra de vidrio tradicional

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

La falla del material sigue siendo en sentido paralelo al de la carga, y se puede observar como en el caso de los cilindros confinados con GFRP que existe una capa de hormigón que se encuentra adherida a la fibra de vidrio tradicional, lo cual indica que la adherencia entre el hormigón y la fibra de vidrio tradicional es satisfactoria. En la Tabla 14 se puede observar el resumen de estos ensayos.

Tabla 14: Valores obtenidos en cilindros confinados con dos capas de fibra de vidrio tradicional

	Resistencia máxima a compresión	Deformación última del material
Cilindro 1	382.53 [kg/cm ²]	0.004097
Cilindro 2	344.47[kg/cm ²]	0.007461

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

Se obtienen los datos con ensayo a dos cilindros con diámetro 15.5cm confinados con dos capas de fibra de vidrio tradicional y se grafica la curva esfuerzo – deformación como se puede ver en la Figura 66.

De la Figura 66 se tiene que la curva promedio nos da un valor de resistencia a la compresión de $f_{c_{max}} = 362.62 \text{ kg/cm}^2$ y una deformación máxima $\epsilon_{ccu} = 0.00746125$.

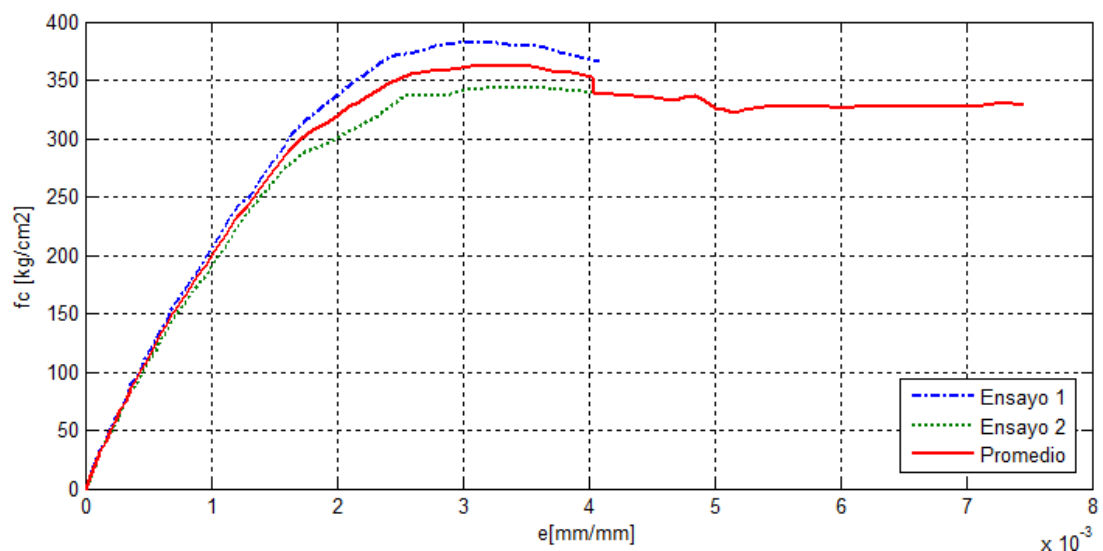


Figura 66: Curvas Esfuerzo – deformación del hormigón confinado con dos capas de fibra de vidrio tradicional

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

5.6.3 Resultados de los ensayos a hormigón confinado con tres capas de fibra de vidrio tradicional

Para realizar el ensayo con 3 capas de fibra de vidrio tradicional, se tuvo que utilizar tablas ya que por el grosor del cilindro no se pudo usar los soportes que se usan generalmente, el color de la fibra se torna más oscuro a comparación con las otras capas como se puede observar en la Figura 67



Figura 67: Ensayo curva esfuerzo deformación del hormigón confinado con tres capas de fibra de vidrio tradicional

Fuente: Elaborado por: Cevallos Diego

El plano de falla es en el sentido de la carga, al igual que en los casos anteriores como se puede ver en la Figura 68.



Figura 68: Plano de falla y grietas en hormigón confinado con tres capas de fibra de vidrio tradicional

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

En este caso al despegar la fibra de los cilindros se encuentra que el material de la parte superior es el más afectado como se observa en la Figura 69.



Figura 69: Falla en cilindros confinados con tres capas de fibra de vidrio tradicional

Figura: Cevallos, Diego

El ensayo se realizó a dos cilindros con diámetro 15.9cm confinados con tres capas de fibra de vidrio tradicional en base a estos datos se grafica la curva esfuerzo – deformación como se puede ver en la Figura 70. En la Tabla 15 se puede observar el resumen de estos ensayos.

Tabla 15: Valores obtenidos en cilindros confinados con tres capas de fibra de vidrio tradicional

	Resistencia máxima a compresión	Deformación última del material
Cilindro 1	350.19[kg/cm ²]	0.008601
Cilindro 2	350.03[kg/cm ²]	0.004473

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

Como se puede observar en la Figura 70 se tiene que la curva promedio nos da un valor de resistencia a la compresión de $f_{c_{max}} = 341.86 \text{ kg/cm}^2$ y una deformación máxima $\varepsilon_{ccu} = 0.008359494$.

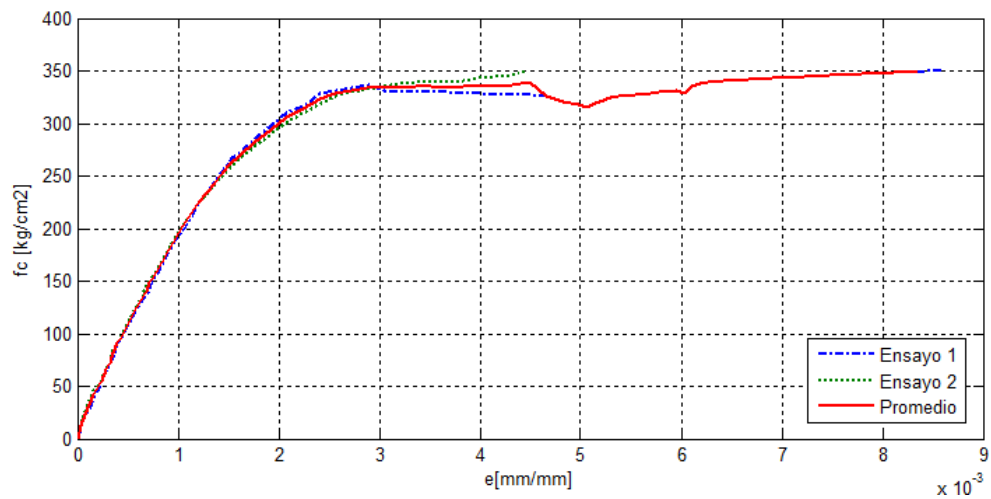


Figura 70: Curvas Esfuerzo – deformación del hormigón confinado con tres capas de fibra de vidrio tradicional

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

CAPÍTULO 6

COMPARACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PARA LA CURVA ESFUERZO-DEFORMACIÓN DEL ACI 440 CON LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

6.1 Introducción

El modelo de confinamiento para elementos de sección circular considerado en este apartado es el del ACI 440.2R-08, se aplican las ecuaciones de predicción de este modelo a los datos proporcionados por el proveedor de la fibra de vidrio SikaWrap Hex 100G, con estos resultados se realiza una comparación con los datos obtenidos en laboratorio, adicionalmente en base a las expresiones de dicho modelo y a los resultados obtenidos en laboratorio a los cilindros con fibra de vidrio tradicional, se obtiene las propiedades de la fibra de vidrio tradicional, cabe mencionar que para el cálculo de dichas propiedades, no se considera el aporte de los cilindros confinados con 3 capas puesto que el valor de resistencia a la compresión es un valor incluso más bajo que cuando se aplican 2 capas.

En este capítulo se detalla el cálculo del módulo de elasticidad de los cilindros sin confinar y confinados, también se calcula este módulo en base a las expresiones del Código Ecuatoriano de la Construcción NEC 2011 y en base a las expresiones del ACI Committee 318.

6.2 Módulo de elasticidad del hormigón (sin confinar y confinado)

Como se explica en el capítulo 5 sección 5.4, en base a la norma (ASTM C469, 2010), se obtiene los datos para poder calcular el módulo de elasticidad y se debe tomar en cuenta lo siguiente:

Los valores del módulo de elasticidad y la relación de Poisson, aplicables dentro del rango de esfuerzos de trabajo acostumbrados (0 a 40 % de la resistencia última del hormigón) pueden ser utilizados en el dimensionamiento de miembros estructurales reforzados y no reforzados, estableciendo la cantidad de refuerzo y computando el esfuerzo para las deformaciones observadas (ASTM C469, 2010).

En base al análisis de la curva esfuerzo - deformación del hormigón; para el cálculo del Módulo Estático de elasticidad. Se debe tomar en cuenta la siguiente expresión:

$$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.000050} \quad (51)$$

Donde E_c : módulo de elasticidad cuerda, σ_2 : esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última, viene dado en kg/cm^2 . σ_1 : Esfuerzo correspondiente a una deformación longitudinal, ε_1 de 50 millonésimos viene dado en kg/cm^2 . Finalmente ε_2 : deformación longitudinal producida por el esfuerzo σ_2 .

De los datos se detalla claramente dos puntos de la curva, correspondientes al 0.00005 de la deformación específica y el 40% del esfuerzo máximo de compresión a la rotura, estos datos se encuentran en los anexos A.6

Para obtener el módulo de elasticidad en base al NEC 2011 se debe tomar en cuenta las recomendaciones por esta Norma la cual expresa en el Capítulo Uno Sección 1.2.5.1:

“El módulo de elasticidad para el hormigón, E_c (GPa), se puede calcular como la raíz cubica del módulo de elasticidad del agregado E_a (GPa), por la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión del hormigón f'_c (MPa) y por el factor 1.15, así:

$$E_c = 1.15 \cdot \sqrt[3]{E_a} \cdot \sqrt{f'_c} \quad \text{(1-15)} \quad \text{(52)}$$

La ecuación (1-15) en el código provee una mejor estimación de E_c para los materiales del Ecuador y será usada para la estimación de deflexiones ante cargas estáticas y a niveles de servicio de elementos a flexión de hormigón armado o pretensado.

En la Tabla 16, se presentan valores típicos del módulo de elasticidad de los agregados E_a , que se encuentran en el Ecuador.

Tabla 16: Módulos de elasticidad de agregados, E_a

Tipo	Procedencia	Ea [GPa]
Caliza (Fmc. San Eduardo)	Guayaquil - Guayas	67.9
Chert (Fmc. Guayaquil)	Guayaquil - Guayas	15.8
Diabasa (Fmc. Piñón)	Chivería - Guayas	89.3
Tonalita	Pascuales - Guayas	74.9
Basalto (Fmc. Piñón)	Picoazá - Manabí	52.5
Basalto	Pifo - Pichincha	27.2
Ígnea (Andesitas, basaltos, Granodioritas)	Río Jubones - El Oro	110.5
Volcánica	La península - Tungurahua	17.5

Fuente: (NEC 11, 2011)

En los modelos elásticos de estructuras que se diseñan para acciones sísmicas, de acuerdo a los métodos del Capítulo 2 de la norma NEC-11, el módulo de elasticidad del hormigón E_c (GPa), será calculado con la ecuación (1-16) para hormigones de densidad normal”:

$$E_c = 4.7 * \sqrt{f'_c} \quad \text{(1-16)} \quad \text{(53)}$$

Para obtener el módulo de elasticidad según el (ACI Committee 318, 2004) se usa la siguiente expresión en la cual el valor de f'_c viene dado en kg/cm^2 :

$$E = 15000\sqrt{f'_c} \quad \text{(54)}$$

6.2.1 Módulo de elasticidad del hormigón sin confinar

Con los datos obtenidos en los ensayos realizados a cilindros sin confinar se calcula el módulo de elasticidad en base a la ecuación (51). En la Tabla 17 se muestran los datos necesarios para el cálculo. La Tabla completa se encuentra en los Anexos A.6.1

Tabla 17: Datos para obtener el módulo de elasticidad en cilindros de hormigón sin confinar

Def [mm/mm]	Esf. [Kg/cm ²]
0	0
4.20548E-05	12.04
0.000672877	138.52

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

En la Tabla 18 se muestran los tres módulos de elasticidad calculados con sus respectivas fórmulas. Para el caso de la ecuación proporcionada por el NEC 11, se realiza el cálculo con las unidades que requiere la ecuación (52) y posterior a éste se, cambia, las unidades para tener concordancia con las demás ecuaciones. También se usa el valor de E_a en base a la Tabla 16 para la provincia de Pichincha. El valor de $f'_c = 336.24 \text{ kg/cm}^2$ se utiliza en las ecuaciones para el cálculo del módulo de elasticidad, este valor es un promedio de dos cilindros sin confinar. Cabe recalcar que solo se tiene dos cilindros como base para este ensayo puesto que los varios cilindros fueron utilizados para obtener una manera más acertada de obtener la curva esfuerzo deformación del hormigón sin confinar.

Tabla 18: Valores del Módulo de Elasticidad del Hormigón sin confinar

Ecuación	Valor Calculado [Kg/cm ²]
$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.000050}$	203056
$E_c = 1.15 \cdot \sqrt[3]{E_a} \cdot \sqrt{f'_c}$	202508
$E_c = 15000 \sqrt{f'_c}$	275052

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

En la Tabla 18 se observa que el valor del módulo de elasticidad obtenido en el laboratorio se asemeja al valor obtenido con la ecuación (52) de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC- 2011). También se observa que el módulo de elasticidad obtenido por la ecuación de (ACI Committee 318, 2004) da un valor lejano, entonces como aporte de esta investigación se encuentra un factor que se afecta a esta ecuación para obtener valores similares.

A la ecuación (54) se la afecta por un coeficiente k

$$E = 15000 \cdot k \sqrt{f'_c} \quad (55)$$

De la ecuación (55) se conoce como dato la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad se toma un promedio entre los resultados obtenidos en el laboratorio y de forma analítica con la ecuación del NEC- 11, entonces se despeja el valor de k ; el valor obtenido es $k = 0.7373$ finalmente se obtiene la ecuación que se ajusta a este trabajo de investigación.

$$E = 11060 \sqrt{f'_c} \quad (56)$$

6.2.2 Módulo de elasticidad del hormigón confinado con fibra de vidrio SikaWrap Hex 100G

De similar manera al anterior caso se calcula el Módulo de Elasticidad del hormigón confinado con una capa de GFRP, aplicando las mismas ecuaciones, en este caso para el módulo de elasticidad con los datos teóricos de manera gráfica en base la curva esfuerzo deformación se toman

los datos que se ajustan a la parte recta de esta curva la cual viene a ser la parte elástica en la cual se calcula el módulo de Elasticidad.

Siguiendo los criterios de la norma (ASTM C469, 2010), que consiste en la obtención de la pendiente a la cuerda del gráfico Esfuerzo – Deformación, según se explica en la Figura 71.

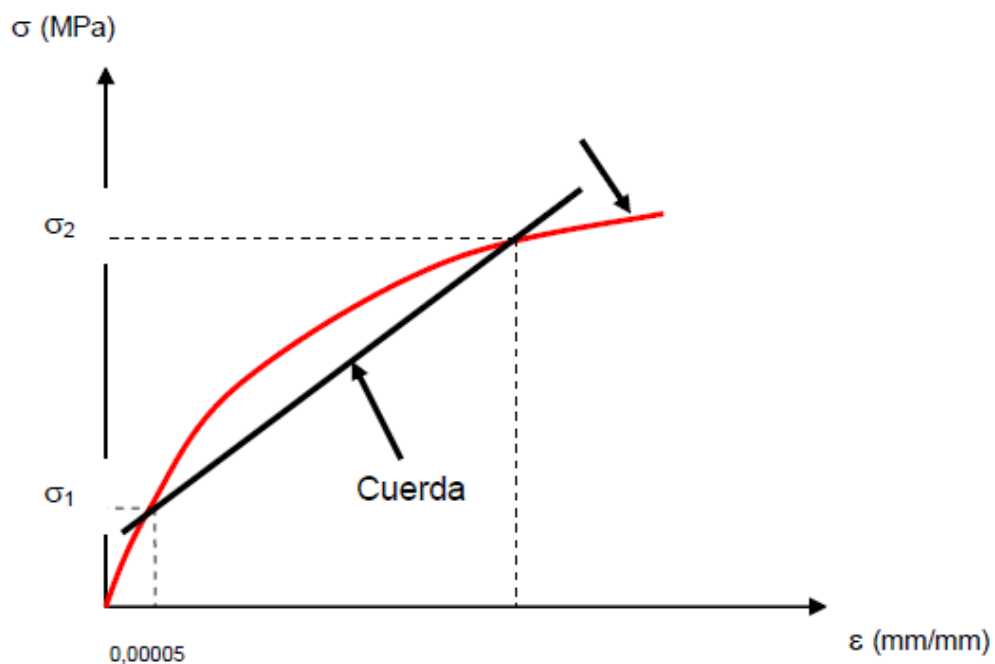


Figura 71: Método de la cuerda del Gráfico Esfuerzo – Deformación
Fuente: (Herrería & Villegas, 2008)

En la Tabla 19 se observa los datos para obtener el módulo de elasticidad en base a la ecuación 51, los datos completos se encuentran en el Anexo A.6.2.

Tabla 19: Datos para obtener el módulo de elasticidad del hormigón confinado con una capa de GFRP

Def. [mm/mm]	Esf. [Kg/cm ²]
0	0
4.15033E-05	16.04
0.000581046	130.07

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

En la Tabla 20 se muestran los 3 Módulos de elasticidad con sus respectivas ecuaciones, para esta Tabla ya se toma en cuenta la ecuación (56), el valor de la resistencia a la compresión utilizado es $f'_c = 336.24 \text{ kg/cm}^2$.

Tabla 20: Valores del Módulo de Elasticidad del Hormigón confinado con una capa de GFRP

Fórmula	Valor Calculado [Kg/cm2]
$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.000050}$	214729
$E_c = 1.15 \cdot \sqrt[3]{E_a} \cdot \sqrt{f'_c}$	202508
$E_c = 11060 \sqrt{f'_c}$	202805

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

6.2.3 Módulo de elasticidad del hormigón confinado con fibra de vidrio tradicional

De la misma manera que en los anteriores casos se encuentra el módulo de elasticidad para los cilindros de hormigón confinados con una hasta tres capas.

Con los datos obtenidos en los ensayos realizados a los cilindros confinados con una hasta tres capas se calcula el módulo de elasticidad en base a la ecuación (51), en la Tabla 21 se muestran los datos necesarios para el cálculo, las tablas completa se encuentra en los Anexos A.6.3 hasta en anexo A.6.5

Tabla 21: Datos para obtener el módulo de elasticidad en cilindros confinados con fibra de vidrio tradicional

Def [mm/mm]	Esf. [Kg/cm ²]
Datos para una capa	
0	0
0.00004	13.76
0.00062	143.20
Datos para dos capas	
0	0
4.03276E-05	11.33
0.000645242	140.31
Datos para tres capas	
0	0
4.00635E-05	13.06
0.000681079	140.87

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

En la Tabla 20 se muestran los 3 Módulos de elasticidad con sus respectivas ecuaciones, El valor de $f_c = 357.50 \text{ kg/cm}^2$ es el valor de resistencia a la compresión promedio para cilindros de hormigón confinados con una capa de fibra de vidrio tradicional, $f_c = 362.62 \text{ kg/cm}^2$ es el valor de resistencia a la compresión confinado con dos capas de fibra de vidrio tradicional y $f_c = 341.86 \text{ kg/cm}^2$ es el valor de resistencia a la compresión para cilindros confinados con tres capas de fibra de vidrio tradicional.

Tabla 22: Valores del Módulo de Elasticidad del Hormigón confinado con una capa de GFRP

	Una capa	Dos capas	Tres capas
$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.000050}$	225275	216682	202512

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

6.3 Análisis de las curvas esfuerzo deformación con fibra de vidrio estructural GFRP y comparación con modelo ACI 440.2R-08

6.3.1 Cálculo de factores de la curva ACI 440.2R-08

Usando las ecuaciones proporcionadas por el ACI .2R-08, para hormigón confinado con FRP y con los datos entregados por el proveedor de fibra de vidrio SikaWrap Hex 100G se tiene lo siguiente:

$$\text{Datos: } E_f = 240716 \text{ kg/cm}^2 \quad t_f = 0.10160 \text{ cm} \quad \varepsilon_{fu^*} = 0.0212$$

De los cuales, E_f es el módulo de elasticidad que entrega el proveedor, este módulo es el de la fibra mas la resina, t_f es el espesor de la fibra con resina, ε_{fu^*} es la deformación máxima a la rotura, valor que también lo entrega el proveedor. Se considera un factor ambiental $CE=1$, ya que los ensayos fueron realizados en el laboratorio.; el ACI 440.2R-08 recomienda un valor de eficacia a la deformación $k_\varepsilon = 0.55$.

En base a la ecuación (35) la cual se muestra a continuación se calcula:

$$\varepsilon_{fu} = CE \cdot \varepsilon_{fu^*} \quad \varepsilon_{fu} = \varepsilon_{fu^*} = 0.0212$$

Se debe verificar la igualdad (34) que se muestra a continuación:

$$\varepsilon_{fd} = k_\varepsilon \cdot \varepsilon_{fu} \leq 0.004$$

$$\varepsilon_{fd} = 0.55 \cdot 0.0212 = 0.01166$$

Al no cumplir la condición se toma $\varepsilon_{fd} = 0.004$

En base a la ecuación (33) se calcula la presión lateral de confinamiento

$$f_l = \frac{2E_f \cdot n \cdot t_f \cdot \varepsilon_{fd}}{D}$$

$$f_l = \frac{2(240715.82) \cdot 1 \cdot (0.1016) \cdot (0.004)}{15.3}$$

$$f_l = 12.79 \text{ kg/cm}^2$$

Se debe comprobar: la ecuación (37) $f_l/f_c' > 0.08$ en este caso $f_l/f_c' = 0.04$, no cumple la condición pero se toma este valor ya que se está trabajando con datos experimentales. Si se tratara de un proyecto de refuerzo se debe variar los factores que contiene la ecuación de presión lateral, para que el refuerzo sea efectivo.

Finalmente se calcula la resistencia del hormigón confinado en base a la ecuación (39) que se muestra a continuación, se usa el valor del coeficiente de seguridad $\varphi = 0.95$. Y como se trata de una sección circular el valor de $k_a = 1$, el valor de la resistencia a la compresión es el valor del hormigón sin confinar $f_c' = 336.24 \text{ kg/cm}^2$

$$f_{cc}' = f_c' + \varphi \cdot 3.3 \cdot k_a \cdot f_l$$

$$f_{cc}' = 336.24 + (0.95) \cdot 3.3 \cdot (1) \cdot (12.79)$$

$$f_{cc}' = 376.33 \text{ kg/cm}^2$$

Para el cálculo de la deformación última se utiliza la ecuación (32) que se muestra a continuación, el valor de ε_0 es la deformación asociada al valor de f_c' el cual se toma de los ensayos realizados al hormigón sin confinar.

Previamente se calcula el valor de ρ_e , en base a la ecuación (36).

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_0 \left[1.5 + 12 \cdot k_b \cdot \frac{f_l}{f_c'} \cdot (\rho_e)^{0.45} \right]$$

$$\varepsilon_{ccu} = 0.002607399 \left[1.5 + 12 \cdot (1) \cdot (0.04) \cdot (1.53)^{0.45} \right]$$

$$\varepsilon_{ccu} = 0.005354$$

Como se explica en el Capítulo 4 sección 4.5 el valor de $\varepsilon_{ccu} > 0.01$ como se cumple esta condición entonces no se debe recalcular f'_{cc}

Para el cálculo de la pendiente post fluencia se usa la ecuación (40)

$$E_2 = \frac{f'_{cc} - f'_c}{\varepsilon_{ccu}} \quad E_2 = 7488.13 \text{ kg/cm}^2$$

Para el cálculo de la deformación de transición se usa la ecuación (41)

$$\varepsilon'_t = \frac{2f'_c}{E_c - E_2} \quad \varepsilon'_t = 0.0034$$

Según las ecuaciones (38) que definen la gráfica de la curva esfuerzo deformación y con los datos del proveedor se tiene la curva esfuerzo – deformación analítica como se puede ver en la Figura 72:

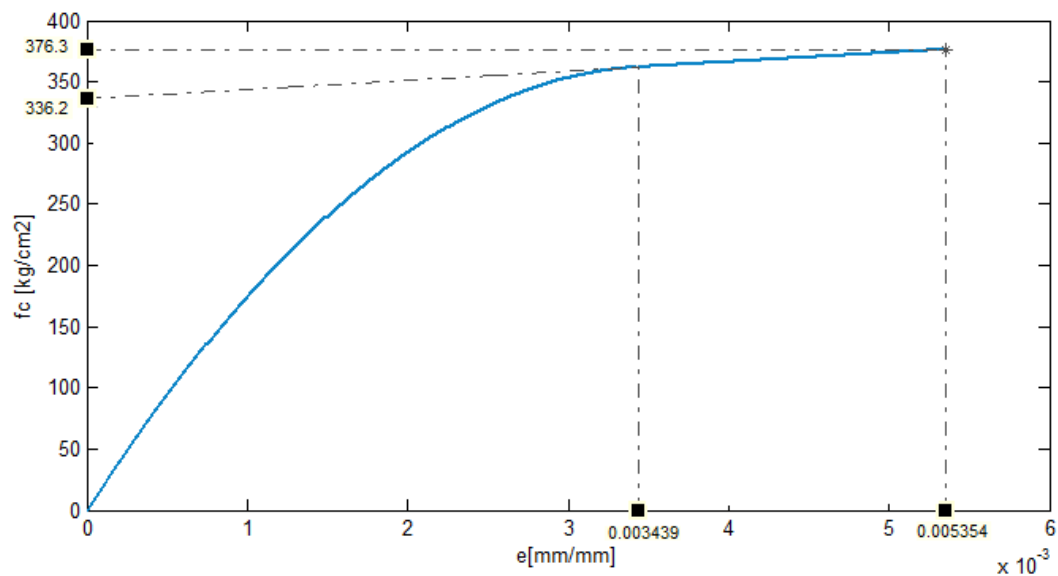


Figura 72: Curva Esfuerzo – deformación analítica del Modelo ACI 440.2R-08 con datos de proveedor

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

6.3.2 Comparación de curva ACI 440.2R-08 y teórica

En la Tabla 23 se compara los valores obtenidos por las ecuaciones del ACI 4402R-08 con respecto a los valores obtenidos en los ensayos se aprecia que el valor de la resistencia a compresión f_c' sin confinar aumenta 11.92 % en relación al análisis analítico, mientras que con respecto al valor obtenido en laboratorio aumenta en 21%, el valor de la carga aplicada aumenta 24.73% en relación al hormigón sin confinar.

Tabla 23: Comparación de valores prácticos con analíticos

	Sin conf.	1 GFRP	Incremento [%]
fc max [kg/cm²]	336	406.86	21.00%
P max [Kg]	60272	75177	24.73%
f'cc ACI [kg/cm²]	-	376.3	11.92%

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

Al comparar las curvas obtenidas analíticamente como la que se obtuvo mediante los ensayos como se puede ver en la Figura 73. En el diagrama esfuerzo deformación obtenido mediante los ensayos se puede observar que la deformación unitaria aumenta y tiende a seguir creciendo el valor de $\varepsilon_{ccu} = 0.009545752$ fue el último valor registrado; en comparación con el valor obtenido analíticamente $\varepsilon_{ccu} = 0.005354$. Al comparar las curvas teórica y práctica se tiene lo siguiente:

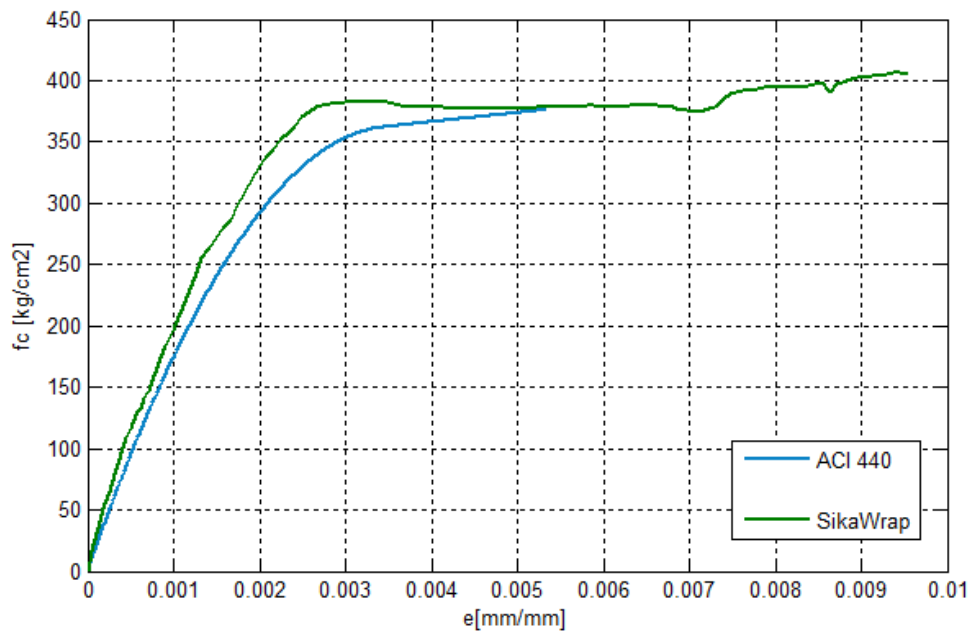


Figura 73: Curvas Esfuerzo – deformación Modelo ACI y experimental
Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

6.4 Análisis de curvas esfuerzo deformación con fibra de vidrio tradicional comparación con modelo ACI 440.2R-08

Para este tipo de material no se tiene datos de fábrica como en el caso de la fibra SikaWrap Hex 100G. Por lo que se requiere obtener los datos que se necesitan ingresar en las expresiones del ACI 440.2R-08, entonces mediante sistema de ecuaciones, en base a los datos que se muestran en la Tabla 24 se realizan los cálculos correspondientes.

Tabla 24: Resumen de datos de cilindros confinados con fibra de vidrio tradicional

	1 capa	2 capas
f'_{cc} [kg/cm ²]	357.50	362.62
D [cm]	15.2	15.7

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

El espesor de la fibra de vidrio tradicional es 0.10 cm, se toma un valor de coeficiente de seguridad $\varphi = 0.95$ y $K_a = 1$ tratándose de una sección circular. Para asegurar la integridad del confinamiento del hormigón; se toma $\varepsilon_{fd} = 0.004$, con este valor, en base a las ecuaciones (33) y (39) se tiene:

$$E_f = \frac{f_l \cdot D}{2 \cdot n \cdot t_f \cdot 0.004} \quad (57)$$

$$f_l = \frac{f'_{cc} - f'_c}{\varphi \cdot 3.3 \cdot k_a} \quad (58)$$

Del sistema de ecuaciones y en base a los datos obtenidos en los cilindros confinados con una y dos capas se tiene un resumen en la Tabla 25:

Tabla 25: Módulos de elasticidad de la fibra de vidrio tradicional Modelo ACI

	Una capa	Dos capas
E_f	128859	82589

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

En base al valor obtenido para el cálculo del módulo de elasticidad de la fibra de vidrio tradicional con dos capas de confinamiento, se compara las curvas obtenidas en el laboratorio con las curvas analíticas del ACI 440.2R-08.

6.4.1 Comparación de curva la curva esfuerzo deformación del ACI 440.2R-08 con la curva teórica para cilindros con una capa de fibra de vidrio tradicional

En base al módulo de elasticidad de la fibra de vidrio tradicional obtenido en el anterior apartado, se calcula los parámetros de las ecuaciones del ACI

440.2R-08 para hormigón confinado. En la Tabla 26 se muestran los resultados obtenidos analíticamente y en el laboratorio.

Tabla 26: Valores para hormigón confinado con una capa de fibra de vidrio tradicional

	Ecuaciones ACI 440.2R-08	Ensayos de laboratorio
$f'_{cc} =$	349.87	357.50
$\varepsilon_{ccu} =$	0.00440149	0.005347

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

En el caso del hormigón confinado con una capa de fibra de vidrio tradicional, se puede observar que el valor de $f'_c = 336 \text{ kg/cm}^2$ aumenta un 6.32% en relación al f'_{cc} obtenido en el laboratorio. Al relacionar el valor de la resistencia a compresión sin confinar con los resultados obtenidos mediante las ecuaciones del ACI 440 observa un aumento del 4.03%. En la Figura 74 se puede ver las curvas, analítica y la obtenida en el laboratorio.

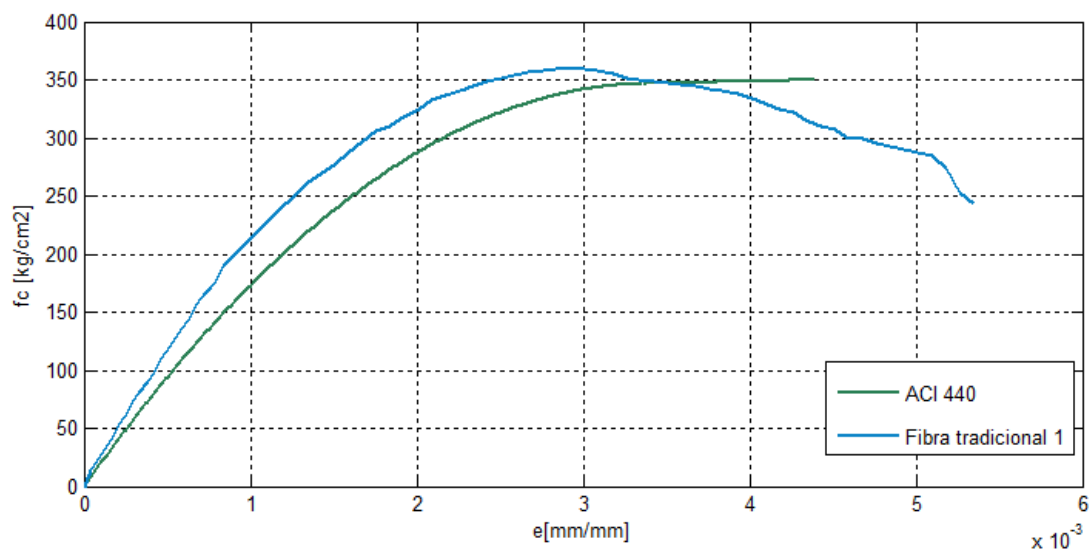


Figura 74: Curvas esfuerzo – deformación del hormigón confinado con una capa de fibra de vidrio tradicional

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

Como se puede observar en la Figura 74, no se encuentra mucha similitud entre las curvas, se propone el modelo de Mander el cual se vio en el capítulo 4, para este modelo se utilizan las ecuaciones descritas para este en el apartado 4.4, mediante iteraciones y usando la ecuación (24) se calcula la presión lateral de confinamiento, con los datos obtenidos en el laboratorio, de la siguiente manera:

$$357.50 = 336.24 \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{336.24}} - 2 \frac{f'_l}{336.24} \right) \quad (59)$$

Posteriormente en base a la ecuación (56) se tiene una presión lateral $f'_l = 3.917 \text{ kg/cm}$ en base a las ecuaciones (25) (26) y (27) con un valor de $\varepsilon_{fe} = 0.004$ se encuentra el valor del Módulo de elasticidad de la fibra de vidrio tradicional, los resultados se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27: Módulos de elasticidad de la fibra de vidrio tradicional Modelo de Mander

	Una capa	Dos capas
E_f	59660	38436

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

Cabe recalcar que se usó la información para hormigón confinado con una y dos capas ya que como se explica anteriormente se omiten los valores para tres capas ya que sus valores no satisfacen lo que se esperaba puesto que el valor de resistencia a la compresión es menor que el obtenido con dos capas.

Se toma el menor de los 2 valores puesto que este valor satisface las dos condiciones de confinamiento, con una y con dos capas. En la Tabla 28 se muestran los valores obtenidos.

Tabla 28: Valores obtenidos usando las ecuaciones de Mander en comparación con valores de laboratorio

	Ecuaciones Mander	Ensayos de laboratorio
$f'_{cc} =$	350.05	357.50

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

En la Figura 75 se muestra las curvas esfuerzo – deformación, del modelo de Mander y la obtenida en el laboratorio. Se puede observar la similitud de las curvas, de esta manera se puede concluir que el modelo más exacto para la fibra de vidrio tradicional es el de Mander.

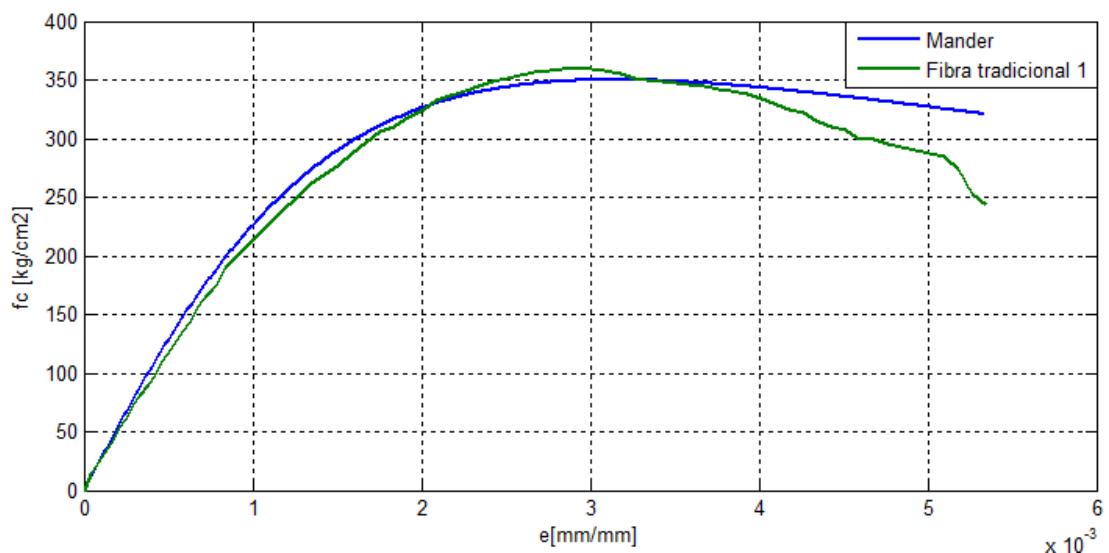


Figura 75: Curvas esfuerzo – deformación del hormigón confinado con una capa de fibra de vidrio tradicional

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

6.4.2 Comparación de curva la curva esfuerzo deformación del ACI 440.2R-08 con la curva teórica para cilindros con dos capas de fibra de vidrio tradicional

En base al módulo de Elasticidad calculado en el Capítulo 6, apartado 6.4, se procede al cálculo de los parámetros de la curva esfuerzo – deformación del ACI 440.2R-08, en la Tabla 28 se puede observar los valores obtenidos analíticamente y los valores que se obtuvieron en laboratorio.

Tabla 29: Valores para hormigón confinado con dos capas de fibra de vidrio tradicional

	Ecuaciones ACI 440.2R-08	Ensayos de laboratorio
$f'_{cc} =$	362.62	362.62
$\varepsilon_{ccu} =$	0.00486065	0.00746125

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

Para el hormigón confinado con dos capas de fibra de vidrio tradicional, se puede observar que el valor de $f'_c = 336 \text{ kg/cm}^2$ aumenta un 7.85% en relación al f'_{cc} obtenido en el laboratorio, este mismo porcentaje se refleja usando las ecuaciones del ACI 440.

En la Figura 76 se puede ver las curvas, analítica y la obtenida en el laboratorio.

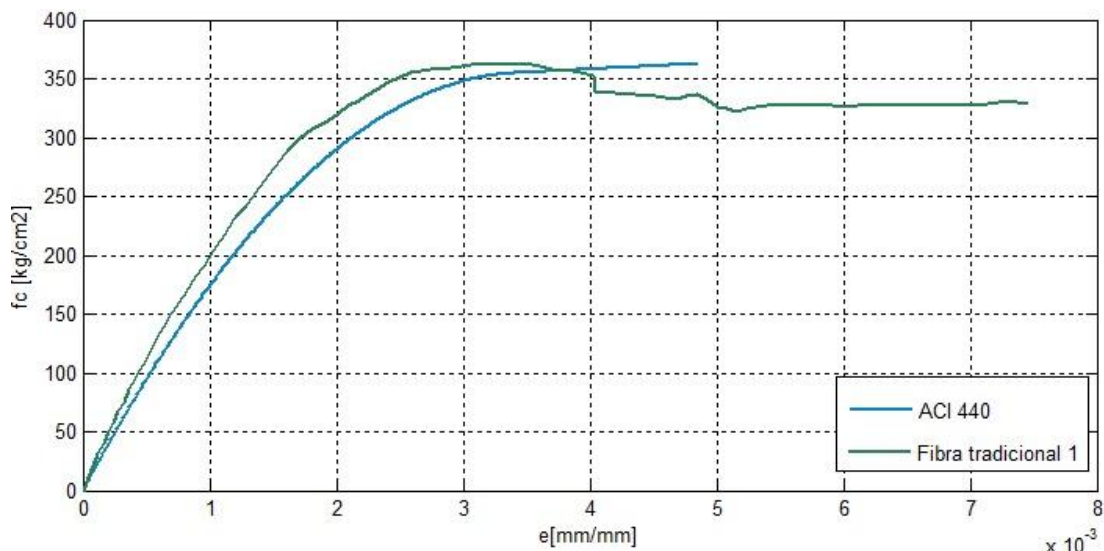


Figura 76: Curvas esfuerzo – deformación del hormigón confinado con dos capas de fibra de vidrio tradicional

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

De manera similar al caso del hormigón confinado con una capa de fibra de vidrio tradicional las curvas no se asemejan en su comportamiento. De igual manera se procede al cálculo de los parámetros de las ecuaciones de Mander, usando el módulo de elasticidad obtenido para dos capas que se encuentra en la Tabla 27.

Se muestran los valores obtenidos en la Tabla 30.

Tabla 30: Valores obtenidos usando las ecuaciones de Mander en comparación con valores de laboratorio

	Ecuaciones Mander	Ensayos de laboratorio
$f'_{cc} =$	362.6195	362.624798

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

En la Figura 77 se muestra las curvas esfuerzo – deformación del modelo de Mander y la que se obtuvo en el laboratorio. Se puede observar

que las curvas se ajustan de mejor manera, a diferencia de la curva del modelo del ACI 440.

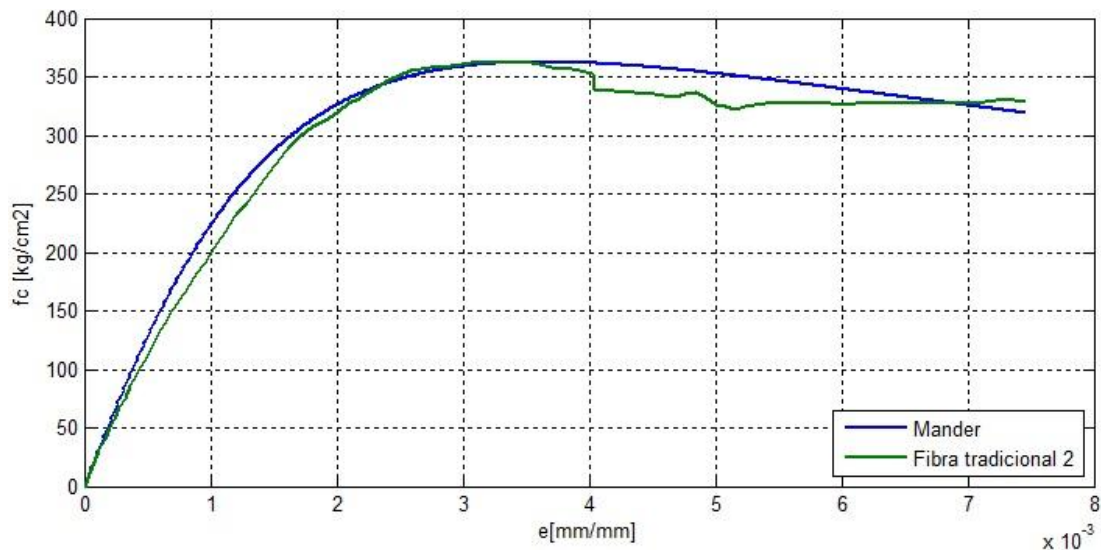


Figura 77: Curvas esfuerzo – deformación del hormigón confinado con una capa de fibra de vidrio tradicional

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

6.5 Comparación del comportamiento de las fibras de vidrio GFRP y tradicional

En cuanto a los valores obtenidos en laboratorio se puede ver en la Tabla 31, el resumen final de todos los ensayos realizados, tanto en carga como en resistencia a la compresión. Se observa claramente que el hormigón confinado con una sola capa de FRP, aumenta la resistencia a la compresión en un 21% en relación al hormigón confinado, y es el mayor valor obtenido en todos los ensayos. En cuanto a la fibra de vidrio tradicional su mayor aporte se obtiene con el hormigón confinado con dos capas aumentando el valor de la resistencia a la compresión en 7.85%, lamentablemente, el hormigón confinado con tres capas no nos da mucha

resistencia, sin embargo nos da gran ductilidad. En cuanto a la deformación obtenida de manera similar se puede decir que la fibra de vidrio SikaWrap Hex 100G es la que mayores valores entrega, en comparación con la fibra de vidrio tradicional.

Tabla 31: Valores obtenidos en laboratorio de los ensayos a hormigón confinado y sin confinar

	Carga	Esfuerzo	ε_{ccu}	% Incremento Carga	% Incremento Esfuerzo
SC	60272	336.24	-	-	-
1 FRP	75177	406.86	0.009546	24.73%	21.00%
1 FT	65348	357.50	0.005347	8.42%	6.32%
2 FT	70721	362.62	0.007461	17.34%	7.85%
3 FT	69080	341.86	0.008359	14.61%	1.67%

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

Como se puede observar en la Figura 78, la fibra de vidrio SikaWrap tiene mayores valores de resistencia y de deformación a comparación con el hormigón sin confinar y confinado con fibra tradicional.

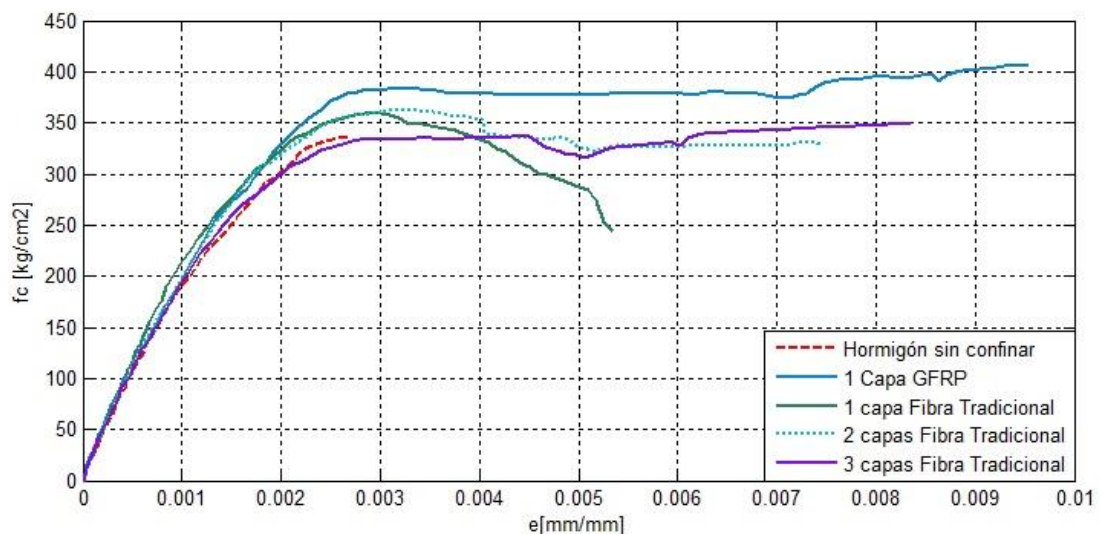


Figura 78: Curvas esfuerzo – deformación obtenidas en laboratorio

Fuente: Elaborado por: Cevallos, Diego

Las curvas para hormigón confinado con fibra de vidrio tradicional, dos y tres capas se comportan de manera similar, siendo la de tres capas la que más aporte nos da en cuanto a deformación, pero menor valor en cuanto a resistencia.

Como conclusión final de este capítulo se puede decir que la fibra de vidrio SikaWrap Hex 100G ha sido la que nos ha dado valores mucho más altos en comparación con la fibra de vidrio tradicional, tanto en resistencia a la compresión como en deformación unitaria, lo cual implica mayor ductilidad, lo cual es una ventaja en el diseño sismo resistente además su curva esfuerzo – deformación es la que se ajusta al modelo del ACI 440.2R-08.

La fibra de vidrio tradicional, nos ha dado valores relativamente bajos en comparación a la otra fibra sin embargo es un avance haber realizado esta investigación, ya que se da un nuevo material para reforzamiento sísmico, el cual puede servir para casos en los que no se requiera aumentar tanto la resistencia a la compresión, sino aumentar la ductilidad que como se ha explicado este valor es importante en el diseño sismo resistente.

Queda claro que el modelo de confinamiento que más se ajusta a la fibra de vidrio tradicional es el modelo de Mander. Como se pudo ver en las curvas la similitud es más cercana que al modelo del ACI 440.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- En cuanto a los distintos tipos de fibras y sus usos se puede ver en la Tabla 32 que las fibras de carbono tienen el módulo de elasticidad más alto, pero tanto las fibras de vidrio como las fibras de aramida tienen una resistencia a tracción mayor.
- Las fibras de carbono tienen una deformación a rotura muy baja, por esto no deben usarse en aplicaciones en las cuales se requiera una ductilidad importante por ejemplo refuerzo sísmico. Debido a esto, se decidió trabajar con fibra de vidrio en el proyecto de Tesis por el comportamiento que tiene esta fibra.

Tabla 32: Valores típicos de las propiedades de las fibras

Tipos de fibra	E tracción [Gpa]	Resistencia a tracción [Mpa]	Deformación axial máxima en rotura [%]	Densidad [g/cm ³]
Carbono (Módulo bajo)	170	1380	0.90	1.90
Carbono (Módulo alto)	380	1720	0.40	2.00
Carbono (Módulo muy alto)	760	2210	0.30	2.15
Vidrio tipo "E"	81	3450	4.88	2.60
Vidrio tipo "S"	89	4590	5.70	2.48
Aramida (Alta tenacidad)	83	3620	4.00	1.44
Aramida (Módulo alto)	131	3620-4140	2.80	1.44
Aramida (Módulo muy alto)	186	3450	2.00	1.47

- **Fuente:** (Alarcón, 2003)

- Al comparar el refuerzo con otros materiales como en el caso del refuerzo con acero, éste al llegar a una cierta resistencia a compresión del hormigón confinado f'_{cc} el acero sigue deformándose con un descenso progresivo de su resistencia hasta llegar a una resistencia última. En cambio en el FRP, la resistencia f'_{cc} sigue aumentando a la vez que lo hace su deformación, hasta que rompe por rotura frágil del FRP. Se puede hacer esta afirmación en base a estudios realizados por (Spoelstra & Monti, 1999) Su estudio se puede observar en la Figura 79.

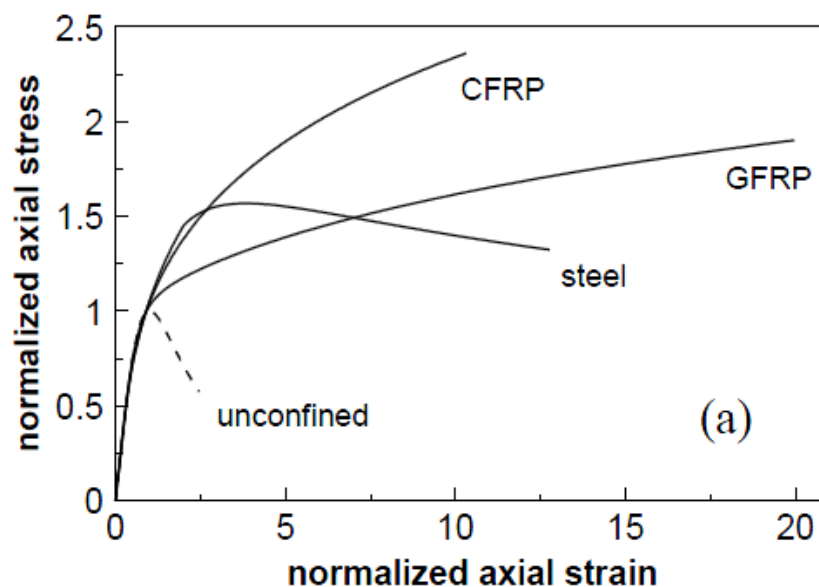


Figura 79: Modelado del comportamiento de hormigón confinado con acero y con FRP (CFRP y GFRP)

Fuente: (Spoelstra & Monti, 1999)

- En cuanto al uso de materiales compuestos FPR no limita su campo de refuerzo únicamente a estructuras de hormigón armado sino que también se puede usar en monumentos históricos como se explicó en el Capítulo 2, Sección 2.4.1.

- Los encamisados SikaWrap proporcionan confinamiento de tipo pasivo; es decir el esfuerzo o presión de confinamiento lateral es activado solo cuando el elemento a compresión comienza a expandirse lateralmente por la compresión y agrietamiento vertical en la cara de tensión del elemento, lo cual extiende el dispositivo de confinamiento.
- Los datos obtenidos en el laboratorio para cilindros confinados con SikaWrap Hex 100G son mayores a los que se calcula de manera analítica con las ecuaciones del ACI 440.2R-08, esto se puede deber a los factores de reducción que considera el ACI en sus ecuaciones, entonces esto nos da aún más seguridad, para poder utilizar este tipo de materiales.
- Como se ha visto en los ensayos la deformación de los cilindros confinados es mucho mayor que la de los cilindros sin confinar el aumento de deformación corresponde a el aumento de ductilidad el cual es necesario en las estructuras; ya que es una ayuda para soportar fuerzas sísmicas, aumento de carga en las estructuras, además tiene una gran capacidad de almacenamiento de energía.
- Los modelos matemáticos se acercan en gran medida a los valores reales, dando al usuario confianza al momento de usar estas ecuaciones; la diferencia de valores puede deberse en gran medida a que los parámetros dados por el ACI 440, son ensayados con distintos tipos de materiales a los que se tiene en nuestro país, también puede darse al método de obtención de la curva esfuerzo deformación, ya que el método

usado en este caso, es una variante de la norma ASTM sin embargo los datos son bastante precisos y son de gran ayuda ya que anteriormente no se han obtenido este tipo de curvas.

- Cabe mencionar que se realizó varios cilindros de hormigón para la realización del proyecto de tesis, sin embargo para obtener la curva esfuerzo, deformación hubo que romper varios de estos buscando una curva completa, la cual no se pudo obtener.
- Como un aporte a futuras investigaciones se ha llegado a obtener un valor del módulo de elasticidad de la fibra de vidrio tradicional, además se ha comprobado que el modelo de Mander genera resultados confiables puesto que fue el que más se ajustó a los resultados obtenidos con cilindros confinados con fibra de vidrio tradicional.
- En el cálculo del módulo de elasticidad del hormigón sin confinar el cual se observa en el Capítulo 6 apartado 6.2.1, en la Tabla 18 al comparar los resultados obtenidos en el laboratorio con la ecuación proporcionada por el NEC 11 se encuentra que estos valores son similares con una diferencia del 0.27%, comprobando de esta manera que el uso de la ecuación para el cálculo del módulo de elasticidad del NEC – 11 es muy confiable.
- Como aporte de esta investigación se ha hallado un valor que modifica a la ecuación del (ACI Committee 318, 2004) para el cálculo del módulo de elasticidad, en base al uso de materiales de la Provincia de Pichincha. Los resultados se pueden ver en el Capítulo 6 apartado 6.2.1 ecuación (54).

- Como se explicó anteriormente se omite los resultados obtenidos con los cilindros confiados con tres capas puesto que estos valores no van acorde con lo que se esperaba, puesto que se suponía que la resistencia a la compresión iba a aumentar considerablemente lo cual no ocurrió los resultados se los puede observar en el Capítulo 5 Sección 5.6.3.
- Como una posible causa de los resultados a los cilindros confinados con tres capas de fibra de vidrio tradicional se puede observar en la Tabla 22 el módulo de elasticidad obtenido a los ensayos realizados a los cilindros confinados con tres capas de fibra de vidrio tradicional es similar al módulo obtenido a los cilindros sin confinar entonces, se presume que no hubo el suficiente confinamiento y que por esta razón no se llegó a obtener los resultados que se esperaban.
- En el presente trabajo de investigación se pretende comprobar que la resistencia a la compresión y las deformaciones del hormigón confinado son mayores que las del hormigón sin confinar. La cual es la idea básica que se tiene en el reforzamiento con FRP, al confinar con este material un elemento estructural se eleva la resistencia a compresión axial del mismo, se incrementa la capacidad al corte y la ductilidad; todo esto debido al incremento de la resistencia del hormigón por el confinamiento.

7.2 Recomendaciones

- En cuanto al uso de este tipo de materiales, y en especial el refuerzo que se realiza, se recomienda que haya una mayor difusión, pues como se ha demostrado en este trabajo se comprueba los modelos matemáticos con los resultados obtenidos en laboratorio dando una seguridad al momento de usar los FRP.
- Al momento de usar este tipo de materiales se ha recomendado precauciones, y se espera que en base a esta experiencia se tomen en cuenta estas recomendaciones, al trabajar con la resina para que no ocurra lo que pasó en este trabajo se recomienda que después de mezclar la resina se la tenga en un ambiente frío, bajo sombra y si es posible, con cubetas de hielo para de esta manera prolongar el tiempo de uso, se hace esta recomendación puesto que en el Seminario Internacional “Sistemas de Reforzamiento de Estructuras con Materiales Compuestos”, se habló del tema y en base a experiencias recomiendan tomar estas acciones.
- Para el uso de la fibra de vidrio tradicional se recomienda un traslape mucho mayor a 3cm puesto que como se ha explicado la rotura de los cilindros confinados con esta fibra se halla en la parte del traslape.
- Para llevar a cabo los ensayos para obtener la curva esfuerzo – deformación del hormigón se buscó en varios sitios, es lamentable que el Laboratorio de Ensayo de Materiales del Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción no tenga los equipos necesarios como los tienes en otras instituciones, como se ha explicado el ensayo fue totalmente

manual, se recomienda que el Laboratorio tenga un equipo más acorde a las necesidades de hoy en día. Para llevar a cabo este tipo de investigaciones es necesario una máquina universal de capacidad de 3000KN a compresión la cual debe tener medidores de deformación horizontales y verticales, esto debe ser automatizado con un software el cual envíe los datos directamente a un ordenador.

7.3 Bibliografía

- ACI 211.1-91. (2002). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete (Reapproved 2002). American Concrete Institute.
- ACI 440.2R-08. (2008). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. Detroit.
- ACI Committee 318. (2004). Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-05) y Comentario (ACI 318SR-05).
- ACI Committee 440. (2002). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.
- Águila Higuero, V. (2010). Características físicas y mecánicas de hormigones reforzados con fibras de: Vidrio, carbono y aramida. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Alarcón, A. (2003). Estudio teórico-experimental sobre la reparación y refuerzo de puentes de dovelas con fibras de carbono. *Tesis Doctoral*. Cataluña, España: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Al-Salloum, Y. A. (2006). Influence of edge sharpness on the strength of square concrete columns confined with FRP composite laminates. *Composites Part B: Engineering*, vol. 38, nº 5-6, 640-650.
- ASTM C469. (2010). Método de ensayo. Determinación del módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson del concreto a compresión. ASTM International.
- Balaguru, P., Nanni, A., & Giancaspro, J. (2009). *FRP Composites for Reinforced and Prestressed Concrete Structures*. New York: Taylor & Francis.
- Cevallos, D. (2013, 07 17). *YouTube*. Retrieved from <http://www.youtube.com/watch?v=iRAqgmKXxlU&feature=youtu.be>
- Chambi Chuquichambi, J. L. (2012, Septiembre). Caracterización estadística de los modelos de confinamiento y determinación de coeficientes parciales de seguridad para el refuerzo de pilas de puentes de hormigón mediante materiales compuestos (CFRP). Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Engineered Materials Handbook. (1987). *Engineers Guide to Composite Materials*.
- ETL 1110-2-548. (1997). Engineer Technical Letter. *Engineering and Design Composite materiales for Civil Engineering Structures*. Washington, The United States of America.

- Funes Rivera, J. N. (2007). Refuerzo y reparación de vigas de Hormigón Armado mediante uso de fibra de vidrio (PRFV) y resinas epoxicas. Chile: Universidad Austral de Chile Facultad de Ciencias de la Ingeniería.
- García Diez, S. (2011). Fibras y materiales de refuerzo: Los poliésteres reforzados aplicados a la realización de piezas en 3D. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 272-282.
- Herrería, S., & Villegas, F. (2008, Febrero). Módulos de Elasticidad y Curvas de Esfuerzo Deformación, en Base a la Compresión del Hormigón a 21, 28, 35 Mpa. Sangolquí, Pichincha, Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército.
- Mander, J. B., Priestley, M. J., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *ASCE Journal of Structural Engineering*, vol. 114, nº 8, 1804-1826.
- Miravete, A. (2007). *Materiales Compuestos I*. Barcelona, España: Reverté S.A.
- Morales Ortuño, S. A. (2008). Fibra de Vidrio Pruebas. México D.F., México: Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
- NEC 11. (2011). Capítulo 1 CARGAS Y MATERIALES. Ecuador.
- NTE INEN 1576. (2011). Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- NTE INEN 1578. (2010). Determinación del asentamiento. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- NTE INEN 2528. (2010). Cámaras de curado. Gabinetes húmedos, tanques para almacenamiento en agua y cuartos para elaborar mezclas, utilizados en ensayos de cemento hidráulico y hormigón. Requisitos. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- NTE INEN 696. (2011). Análisis granulométrico en los áridos fino y grueso. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- NTE INEN 857. (2010). Determinación de la densidad, relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- NTE INEN 858. (2010). Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Palazzo, G., & Martín, P. (2012). Simulación numérica de un pórtico de hormigón armado bajo acción dinámica reforzado con fibra de vidrio. *Mecánica Computacional Vol XXXI*, 1285-1309.
- Pons Gabarrón, J. (2007). Diseño y ejecución de refuerzos de estructuras de hormigón aplicando laminados compuestos. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya.

- Prams Levín, M. E. (2006). Refuerzo y reparación de muros de hormigón armado con malla de fibra de vidrio reforzada y resinas epóxicas. Chile: Universidad Austral de Chile.
- Rendón, J., & García, B. (2013, 09 13). Seminario Internacional: Sistemas de Reforzamiento de Estructuras con Materiales Compuestos. Quito, Ecuador: Sika .
- Restrepo, J., & DeVino, B. (2006). Enhancement of the axial load-carrying capacity of reinforced concrete columns by means of fiberglass epoxy jackets . *Proceedings of the Advanced Composite Materials in Bridges and Structures II*, 547–553.
- Sika Group. (2013, 09 25). *Sika Ecuatoriana*. Retrieved from http://ecu.sika.com/es/solutions_products/our_projects/ReforzamientoCatedralCuenca.html
- Spoelstra, M. R., & Monti, G. (1999). FRP-Confined concrete model. *ASCE Journal of Composites for Construction*, vol. 3, nº 3, 143-150.
- Tang, B. (1997). *U.S. Department of Transportation*. Retrieved from <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/frp/frp197.cfm>
- Teng, J. G., Jiang, T., Lam, L., & Luo, Y. Z. (2009). Refinement of a Design-Oriented Stress– Strain Model for FRP-Confined Concrete. *ASCE Journal of Composites for Construction*, vol. 13, nº 4, 269-278.
- Untiveros, C. A. (2002, Septiembre). Estudio experimental del comportamiento del hormigón confinado sometido a compresión. Barcelona, España: Universitat Politècnica de Catalunya.

BIOGRAFÍA

DATOS PERSONALES

Nombres y Apellidos: Diego Paúl Cevallos Oña

Cédula de identidad: 171533949-3

Lugar y Fecha de nacimiento: Quito, 10 de junio de 1986

Nacionalidad: ecuatoriana

Estado Civil: Soltero

Dirección: Turubamba Bajo, Sp. Mz. "D" Mz. "1" Casa Oe2-341

Teléfono: 0995382090 - 022672460

Mail: diego.pauldc@gmail.com

FORMACIÓN ACADÉMICA

Secundaria: Colegio Experimental "Juan Pío Montúfar" (Quito)

Bachiller en Ciencias especialización Físico Matemático (2006)

Superior: Escuela Politécnica del Ejército

Carrera de Ingeniería Civil egresado (2013)

CAPACITACIÓN:

Colegio de Ingenieros Civiles de Pichincha:

- "Matlab aplicado a la Ingeniería Civil" 2010
30 horas
- "SAP 2000 Básico" 2010
40 horas

ESPE

- Segundo encuentro académico "Puentes Siglo XXI"
30 horas

Escuela Politécnica Nacional

- III jornadas de ingeniería civil y ambiental
20 horas

IDIOMAS

- Español
- Inglés Suficiencia del idioma Inglés (ESPE)
Advanced two aprobado (CEC)

HOJA DE LEGALIZACIÓN DE FIRMAS

ELABORADO POR:

Diego Paúl Cevallos Oña

DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Dr. Ing. Pablo Caiza Sánchez

DIRECTOR DE LA UNIDAD DE ADMISIÓN Y REGISTRO

Abg. Carlos Orozco Bravo. MSc.

Lugar y fecha: Sangolquí, febrero del 2014