

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



TÍTULO

**“COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DE COLUMNAS
CORTAS CON REFUERZO EXTERNO”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER EN
INGENIERIA CIVIL**

AUTOR

Carlos Antonio Cornejo Quispe

ASESOR

Ing. Daniel Roberto Quiun Wong

Septiembre, 2019

DEDICATORIA

A mis padres Lila y Oscar, pilares fundamentales en mi vida.

A mi amada esposa Mayra Silva por ser mi compañera inseparable de cada día, por su apoyo, ánimo y ese optimismo que siempre me impulso a seguir adelante.

A mis hijos; Elena Jhanett y Carlos Santiago, quienes con su existencia iluminan la mía y llenan de alegría cada día de mi vida.

A la memoria de mis hermanos Liz Jhanett y Héctor David, quienes viven por siempre en nuestros corazones.

Carlos Cornejo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente a aquellas personas que compartieron sus conocimientos conmigo para hacer posible la realización de esta tesis. Especialmente agradezco a mi asesor Ing. Daniel Quiun Wong, por todo su apoyo incondicional para la realización de la presente tesis.

A la memoria de mi asesor Ing. Ángel San Bartolomé Ramos, artífice original de la idea del proyecto de tesis.

Al Ing. William Baca y a la empresa Top Consult Ingeniería SAC, quienes brindaron su apoyo donando tanto las fibras como los pegamentos, así también el preparado y colocado que fue realizado por su personal.

A mis profesores a quienes debo gran parte de mis conocimientos, gracias por prepararnos para un futuro competitivo.

A mis amigos y a todos los que de una u otra manera contribuyeron a la realización de la presente tesis.

Carlos A. Cornejo Quispe

RESUMEN

La presente tesis se ha realizado con el objetivo de estudiar el comportamiento mecánico de una columna corta, reforzada con bandas de fibra de carbono (CFRP) y con bandas de fibra de vidrio (GFRP), ante carga lateral cíclica. Para ello se construyeron tres especímenes que representarían el comportamiento de la columna corta; el primer espécimen no tuvo refuerzo externo, el segundo espécimen fue reforzado con dos bandas de fibra de carbono de 7.5 cm cada una, el tercer espécimen fue reforzado con tres bandas de fibras de vidrio de 7.5 cm cada una. Los tres especímenes fueron ensayados mediante carga lateral cíclica con el actuador dinámico del Laboratorio de Estructuras de la PUCP.

Los resultados obtenidos muestran un incremento en la resistencia ante cargas laterales de los especímenes reforzados con FRP (polímero reforzado con fibras de carbono o fibras de vidrio), en comparación con el espécimen de control. También se aprecia que los refuerzos con FRP controlaron el grosor de las grietas diagonales que se formaron en el espécimen de control.

ABSTRACT

The present thesis was carried out with the objective of studying the mechanical behavior of a short column, reinforced with carbon fiber bands (CFRP) and with fiberglass bands (GFRP), under cyclic lateral loading. For this, three specimens were constructed to represent the behavior of the short column; the first specimen had no external reinforcement, the second specimen was reinforced with two 7.5 cm carbon fiber bands each, the third specimen was reinforced with three bands of 7.5 cm glass fibers each. The three specimens were tested by cyclic lateral loading with the dynamic actuator of the PUCP Structures Laboratory.

The results show an increase in the lateral load resistance of the FRP (fiber reinforced polymers both carbon fiber and glass fibers) reinforced specimens, as compared to the control specimen. It was also seen that the reinforcement with FRP controlled the thickness of the diagonal cracks that appeared in the control specimen.

INDICE

INTRODUCCION.	1
CAPITULO 1.- GENERALIDADES.	3
1.1.- Descripción del proyecto.	3
1.2.- Formación del efecto de columna corta.	4
1.3.-Antecedentes y justificaciones.	6
1.4.- Objetivo.	6
1.5.- Hipótesis.	7
1.6.- Metodología.	7
CAPITULO 2.- REVISION DE LITERATURA.	8
2.1.-Investigaciones que se han realizado sobre las columnas cortas.	8
2.2.-Investigaciones que se han realizado sobre el uso de FRP.	10
CAPÍTULO 3: CARACTERISTICAS Y ANÁLISIS TEÓRICOS DE LOS MODELOS ENSAYADOS.	12
3.1.-Característica del concreto.	12
3.2.- Característica del acero de refuerzo.	14
3.3.- Característica del compuesto FRP.	16
3.4.- Cálculo de la contribución de refuerzo FRP a la resistencia por cortante.	19
3.4.1.- Contribución del refuerzo CFRP a la resistencia por cortante.	20
3.4.2.- Contribución del refuerzo GFRP a la resistencia por cortante.	24

3.5.-Análisis teórico de los especímenes.	25
3.5.1.- Rigidez lateral .	25
3.5.2.- Fisuración En Tracción Por Flexión.	26
3.5.3.- Momento Flector Máximo.	26
3.5.4.- Agrietamiento Diagonal Teórico.	27
3.5.5.- Tipo de Falla Esperada.	27
3.6.- Resistencia nominal a cortante.	28

CAPÍTULO 4.-CONSTRUCCION DE LOS MODELOS DE ENSAYO.

4.1.-Características de los especímenes.	31
4.1.1.- Características Geométricas de los especímenes.	31
4.1.2.- Peso del espécimen.	32
4.2.-Construcción de los especímenes.	33
4.3.-Reforzamiento estructural de los especímenes con FRP.	37

CAPÍTULO 5.- ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA.

5.1.- Actividades previas .	41
5.2.- Instrumentación.	42
5.3.- Función e importancia de cada sensor de desplazamiento (LVDT).	43
5.4.- Ensayo de Carga Lateral Cíclica.	43
5.5.- Descripción del comportamiento de los especímenes.	44

CAPÍTULO 6.- INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS.	54
6.1.- Diagramas Histeréticos Fuerza Cortante vs. Desplazamiento Lateral.	54
6.2.- Envolvente Fuerza Cortante vs. Desplazamiento Lateral.	56
6.3.- Desplazamiento lateral permisible.	59
6.4.- Rigidez lateral inicial.	60
6.5.- Resistencia a la tracción por flexión.	64
6.6.- Resistencia ultima de los especímenes con refuerzos externos.	64
CAPÍTULO 7.- CONCLUSIONES.	65
BIBLIOGRAFIA	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. N° 1.1.- Especímenes de columna corta.	3
Fig. N° 1.2.- Deformación de doble curvatura y curvatura simple.	5
Fig. N° 2.1.- Columna corta reforzado por ensanchamiento.	8
Fig. N° 2.2.- Columna corta en pórtico plano.	9
Fig. N° 2.3.- Columna corta con aislador elastomérico.	10
Fig. N° 2.4.- Muro ensayado con bandas de CFRP.	10
Fig. N° 2.5.-Diagrama V-D del Muro ensayado con bandas de CFRP.	11
Fig. N° 2.6.-Viga ensayada con refuerzo de CFRP.	11
Fig. N° 3.1.-Tejido de Fibra de carbono.	17
Fig. N° 3.2.-Tejido de Fibra de vidrio.	18
Fig. N° 3.3.- Diagrama Momento – Carga.	29
Fig. N° 3.4.- Diagrama Momento – Curvatura, incorporando los efectos por corte.	30
Fig. N° 3.5.- Diagrama Momento – Curvatura (incluyendo la degradación de la resistencia a corte)	30
Fig. N° 4.1.-Secciones de las vigas y columna del espécimen.	31
Fig. N° 4.2.-Detalle del refuerzo del espécimen.	32
Fig. N° 4.3.-Vista tridimensional del espécimen.	32
Fig. N° 4.4.-Armado de la viga de cimentación.	33
Fig. N° 4.5.-Ensamblado del espécimen.	33
Fig. N° 4.6.-Presentación de las tapas del encofrado.	34
Fig. N° 4.7.-Encofrado del espécimen.	34
Fig. N° 4.8.-Vaciado del concreto en el espécimen.	35
Fig. N° 4.9.-Obtención de Probetas cilíndricas de concreto.	36
Fig. N° 4.10.-Obtención de Probetas cilíndricas de concreto.	36
Fig. N° 4.11.-Especímen de columna corta.	37
Fig. N° 4.12.-Redondeando las aristas.	38
Fig. N° 4.13.-Aplicando la 1ra capa del epoxico tyfo.	38

Fig. N° 4.14.-Aplicando Saturador tyfo.	39
Fig. N° 4.15.-Aplicando capa final de epoxico tyfo espeso.	39
Fig. N° 5.1.-Deformación de doble curvatura y curvatura simple.	40
Fig. N° 5.2.- Esquema de ensayo.	41
Fig. N° 5. 3.-Ensayo del espécimen sin refuerzo externo	42
Fig. N° 5.4.-Instrumentación	42
Fig. N° 5.5.-Ensayo de Carga Lateral Cíclica	43
Fig. N° 5.6.-Fisuras en el espécimen C1 - fase 1 del ensayo	45
Fig. N° 5.7.-Fisuras en el espécimen C2 - fase 1 del ensayo.	45
Fig. N° 5.8.-Fisuras en el espécimen C3 - fase 1 del ensayo.	46
Fig. N° 5.9.-Fisuras en el espécimen C1 - fase 2 del ensayo.	47
Fig. N° 5.10.-Fisuras en el espécimen C2 - fase 2 del ensayo.	47
Fig. N° 5.11.-Fisuras en el espécimen C3 - fase 2 del ensayo.	48
Fig. N° 5.12.-Fisuras en el espécimen C1 - fase 3 del ensayo	49
Fig. N° 5.13.-Fisuras en el espécimen C1. Después del ensayo.	49
Fig. N° 5.14.-Falla del ensayo en la fase 3 (C1).	50
Fig. N° 5.15.-Fisuras en el espécimen C2 - fase 3 del ensayo.	50
Fig. N° 5.16.-Fisuras en el espécimen C3 - fase 3 del ensayo.	51
Fig. N° 5.17.-Fisuras en el espécimen C2 - fase 4 del ensayo	52
Fig. N° 5.18.-Falla del ensayo en la fase 4 (C2).	52
Fig. N° 5.19.-Fisuras en el espécimen C3 - fase 4 del ensayo.	53
Fig. N° 5.20.-Falla del ensayo en la fase 4 (C3).	53
Fig. N° 6.1.- Diagrama de lazos histereticos para el espécimen C1.	55
Fig. N° 6.2.- Diagrama de lazos histereticos para el espécimen C2.	55
Fig. N° 6.3.- Diagrama de lazos histereticos para el espécimen C3.	56
Fig. N° 6.4.- Valores máximos de fuerzas cortantes vs desplazamiento.	58
Fig. N° 6.5.- Lazo histérico para el espécimen C1.	61
Fig. N° 6.6.- 	61
Fig. N° 6.7.- Lazo histérico para el espécimen C2.	62
Fig. N° 6.8.- 	62
Fig. N° 6.9.- Lazo histérico para el espécimen C3.	63
Fig. N° 6.10.- 	63

INDICE DE TABLAS

Tabla N.º 1.1.- Comparación de rigidez en función de la altura.	4
Tabla N.º 3.1.- Propiedades de la fibra de carbono.	18
Tabla N.º 3.2.- Propiedades de la fibra de vidrio.	19
Tabla N.º 3.3.- Datos de la fibra de carbono usada.	20
Tabla N.º 3.4.- Características de las bandas de CFRP a usar.	20
Tabla N.º 3.5.- Factor de reducción (CE) por exposición al medio ambiente.	20
Tabla N.º 3.6.- Datos de la fibra de vidrio usada.	24
Tabla N.º 3.7.- Características de la banda de GFRP a usar.	24
Tabla N.º 3.8.- Datos geométricos de la sección.	25
Tabla N.º 3.9.- Factor adicional de reducción recomendado para refuerzo a cortante.	28
Tabla N.º 5.1.- Desplazamiento Lateral en cada fase.	44
Tabla N.º 6.1.- σ_{f1} vs σ_{f2} para $\sigma_{f1} < \sigma_{f2}$ y $\sigma_{f1} > \sigma_{f2}$	56
Tabla N.º 6.2.- σ_{f1} vs σ_{f2} para $\sigma_{f1} < \sigma_{f2}$ y $\sigma_{f1} > \sigma_{f2}$	57
Tabla N.º 6.3.- σ_{f1} vs σ_{f2} para $\sigma_{f1} < \sigma_{f2}$ y $\sigma_{f1} > \sigma_{f2}$	57
Tabla N.º 6.4.- σ_{f1} vs σ_{f2} para $\sigma_{f1} < \sigma_{f2}$ y $\sigma_{f1} > \sigma_{f2}$	58
Tabla N.º 6.5.- σ_{f1} vs σ_{f2} para $\sigma_{f1} < \sigma_{f2}$ y $\sigma_{f1} > \sigma_{f2}$	60
Tabla N.º 6.6.- σ_{f1} vs σ_{f2} para $\sigma_{f1} < \sigma_{f2}$ y $\sigma_{f1} > \sigma_{f2}$	60

INTRODUCCION

La costa peruana se encuentra expuesta a una gran actividad sísmica debido a que está en la zona de contacto entre la placa de nazca y la placa Sudamericana. En los últimos sismos ocurridos en el sur del Perú, se evidencia que una de las fallas más frecuentes es el llamado efecto de columnas cortas, este efecto se produce cuando las columnas están confinadas hasta cierta altura con muros, los cuales disminuyen la longitud con la que fue calculada la columna originalmente, incrementándose la rigidez y por lo tanto absorbiendo mayor fuerza cortante. En este trabajo de investigación se estudia una técnica de reforzamiento, para las edificaciones que presenten el problema del efecto de columna corta, que consiste en reforzar externamente las columnas cortas con bandas de fibra de carbono y bandas de fibra de vidrio.

El objetivo de este trabajo de investigación es estudiar el comportamiento mecánico de una columna corta reforzada externamente, ante carga lateral cíclica, Es decir es determinar el efecto del refuerzo con fibra de carbono y vidrio en las propiedades mecánicas de la columna corta de concreto armado bajo la acción de carga cíclica.

Se piensa que una técnica de reforzamiento sencilla y poco invasiva, podría ser el uso de bandas de FRP, que funcionarían como ligaduras o zunchos de confinamiento que tratan de incrementar la resistencia, la rigidez a cortante y a flexo compresión y controlar el agrietamiento diagonal del concreto, atenuando la pérdida de rigidez lateral de la columna corta. Con ello se podría evitar la falla por aplastamiento que produce la carga vertical (efecto $P-\Delta$). Es decir, se estaría mejorando el confinamiento y en consecuencia aumentando la resistencia y rigidez.

La presente tesis está desarrollada en 7 capítulos:

Capítulo 1 sería la introducción de la tesis, donde estaría la descripción del proyecto, su objetivo, hipótesis y metodología usada.

En el capítulo 2 se presentan los principales aportes realizados por diferentes autores en lo relacionado con las investigaciones realizadas sobre columnas cortas y las investigaciones realizadas sobre el uso de la fibra de carbono.

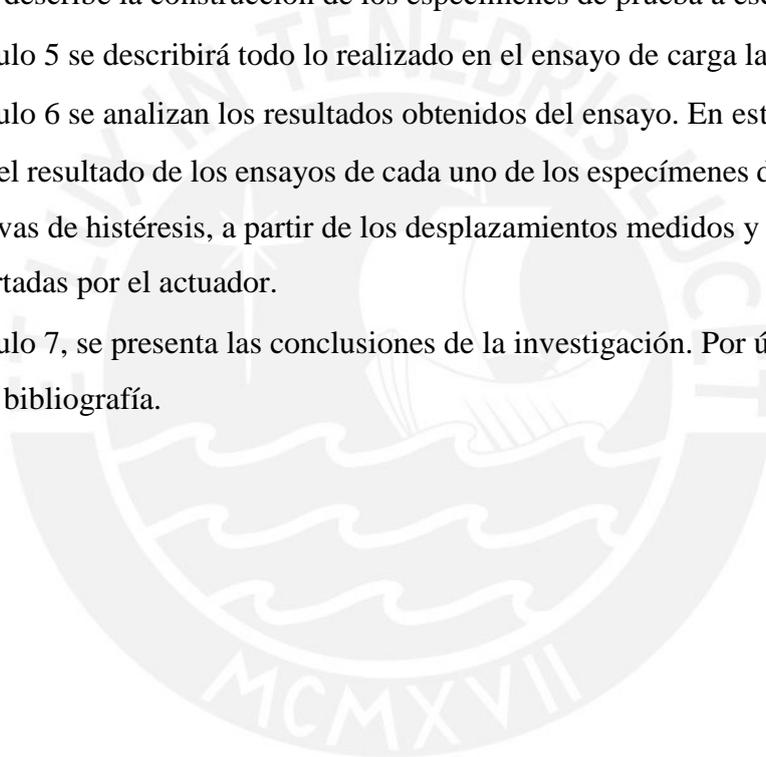
En el capítulo 3 se presenta una descripción de las propiedades mecánicas de los materiales que se utilizaron en la presente investigación. También se hace un análisis teórico del modelo.

En el capítulo 4 se describe las características geométricas del espécimen, así como también se describe la construcción de los especímenes de prueba a escala real.

En el capítulo 5 se describirá todo lo realizado en el ensayo de carga lateral cíclica.

En el capítulo 6 se analizan los resultados obtenidos del ensayo. En este capítulo se presentará el resultado de los ensayos de cada uno de los especímenes de prueba junto con las curvas de histéresis, a partir de los desplazamientos medidos y las lecturas de carga reportadas por el actuador.

En el capítulo 7, se presenta las conclusiones de la investigación. Por último, se presenta la bibliografía.



CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1.-Descripción del proyecto

En este trabajo de investigación se evalúa el comportamiento experimental de columnas cortas reforzadas externamente con CFRP y GFRP. Esta técnica de reforzamiento ante cargas sísmicas horizontales es sencilla y no invasiva, funcionaría como ligaduras o zunchos de confinamiento que tratan de controlar el agrietamiento diagonal del concreto, atenuando la pérdida de rigidez lateral de la columna corta.

Con esa finalidad se construyeron tres especímenes que representan el comportamiento de la columna corta, tal como se muestra en la figura N° 1.1

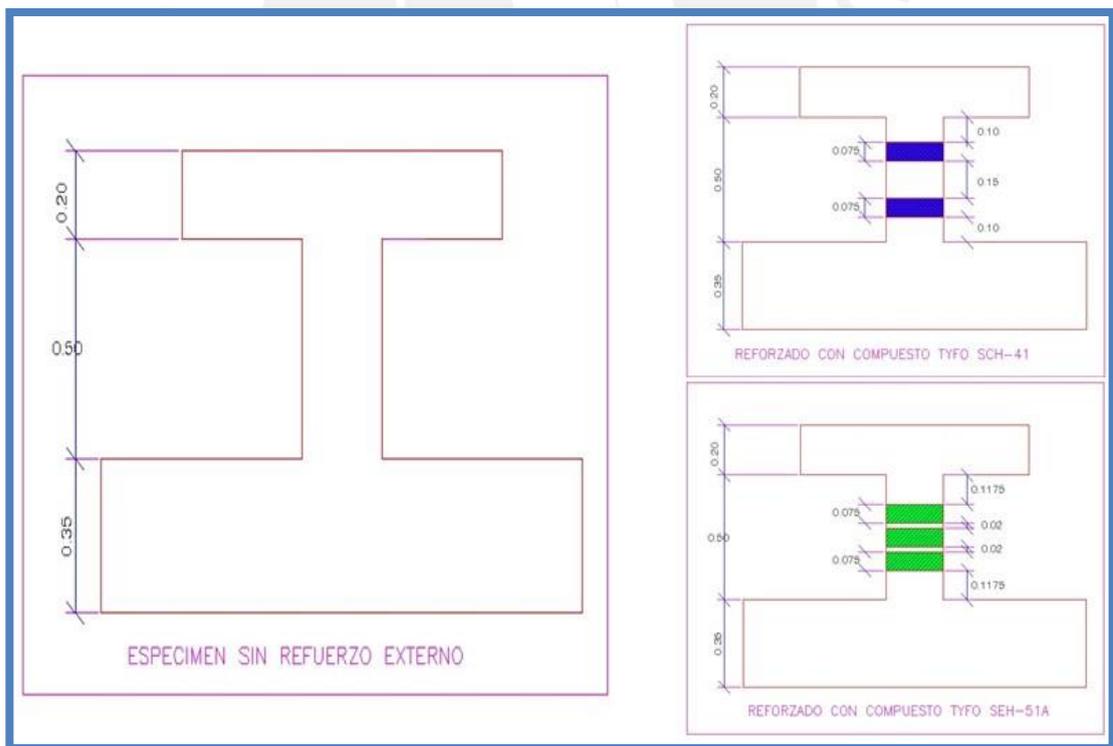


Fig. N° 1.1: Especímenes de columna corta

El primer espécimen no tiene refuerzo externo, el segundo espécimen está reforzado con dos bandas de fibra de carbono de 7.5 cm de ancho cada una, el tercer espécimen está reforzado con tres bandas de fibras de vidrio de 7.5 cm de ancho cada una. En los tres casos, el refuerzo interno es el mismo. Los tres especímenes se ensayaron mediante carga lateral cíclica con el actuador dinámico del Laboratorio de Estructuras de la PUCP. Con la información procesada se generarán curvas de capacidad de esfuerzo cortante vs deformación lateral.

Los resultados obtenidos sirven para determinar si los especímenes reforzados muestran un incremento en la resistencia, rigidez y ductilidad ante las cargas laterales y en qué medida mejoran el comportamiento sísmico de la columna corta.

1.2.-Formación del efecto de columna corta

Las columnas cortas son elementos estructurales con baja esbeltez, mayormente se forman en columnas de los locales educativos. La configuración arquitectónica sería de tener unas ventanas altas con un alfeizar de albañilería no aislados de la columna, integrándose a la columna.

En la tabla N° 1.1 se puede observar que conforme se reduce la altura de la columna, la rigidez lateral (K) se incrementa considerablemente (se considera un modelo en volado con efectos de flexión y cortante). Por ejemplo, para una columna de 0.60 m de altura, la rigidez se incrementa en más de 66 veces comparándola con la rigidez de una columna típica de altura 2.50 m

Tabla N° 1.1: Comparación de rigidez en función de la altura

luz libre h (cm)	Rigidez Lateral (Ton/mm)	% K	Razon Ki/K1
250	0.057	100%	1
200	0.111	195%	1.9
150	0.261	458%	4.6
100	0.865	1518%	15.18
60	3.777	6631%	66.31

Las columnas cortas que se encuentran restringidas de desplazarse en ambos extremos (debido a la rigidez lateral del muro) presentan una deformación de doble curvatura, mientras que en las columnas cortas que se forman en el último nivel de una edificación, se presenta una deformación de curvatura simple. Esto es debido a que en la parte inferior de la columna corta se tiene muros que incrementan la rigidez y proporciona un mecanismo de empotramiento en el extremo inferior de la columna, tal como se puede apreciar en la fig. N° 1.2.

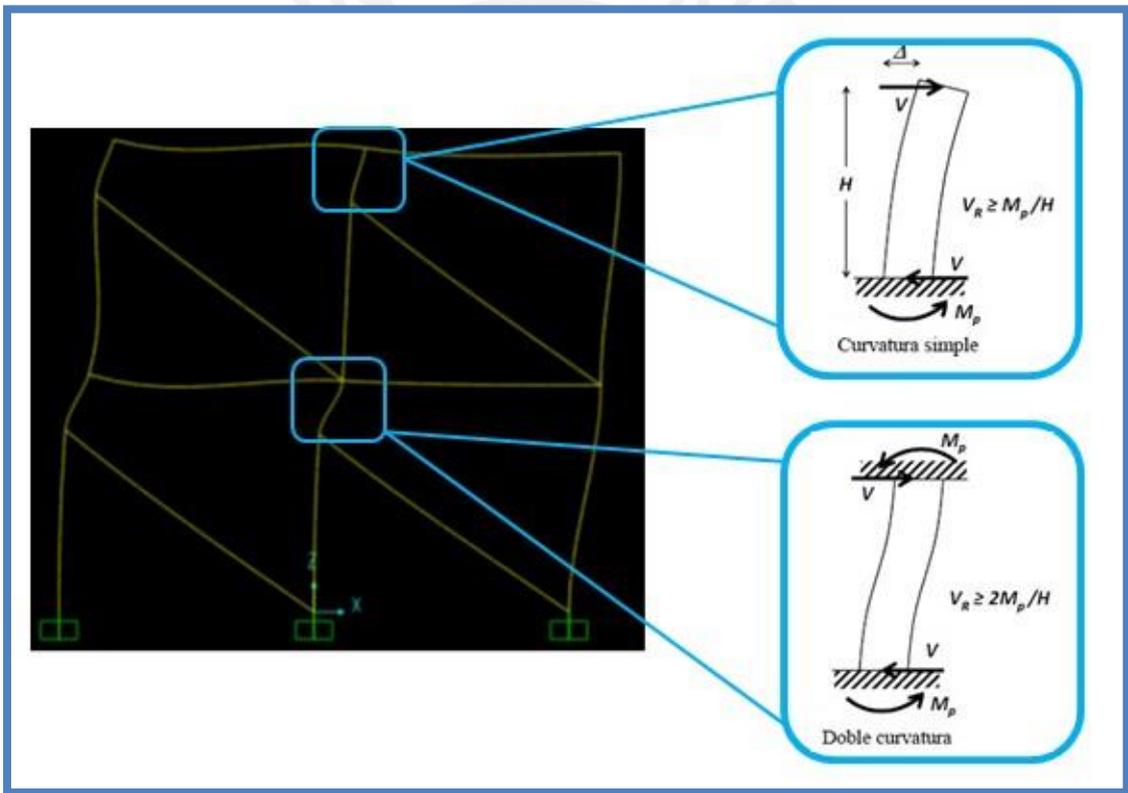


Fig. N° 1.2: deformación de doble curvatura (inferior) y de curvatura simple (superior).

1.3.-Antecedentes y Justificación

En la Pontificia Universidad Católica del Perú se realizó el “Estudio Experimental de una Técnica de Reforzamiento para Edificaciones Existentes con Problemas de Columna Corta – Proyecto SENCICO - PUCP” (San Bartolomé, 2000). La técnica estudiada consistió en ensanchar el peralte de la columna corta para aumentar su resistencia a fuerza cortante. Sin embargo, esta técnica obliga a reducir el tamaño de las ventanas. La técnica propuesta en base a FRP, es menos invasiva.

El problema de columna corta se presenta, generalmente, en edificaciones escolares con alféizares altos hechos de albañilería. Cuando ocurre un sismo, la losa de techo se desplaza horizontalmente y arrastra a la columna, que se ve restringida de desplazarse al entrar en contacto con la parte superior del alféizar (elemento rígido), generándose una gran distorsión angular en la parte libre de la columna (columna corta), que provoca la fractura diagonal (San Bartolomé, 2005).

El problema de columna corta merece un estudio más exhaustivo. En la última década han ocurrido eventos sísmicos importantes, especialmente en zona sur del Perú, que produjeron daños considerables en las estructuras con problemas de columna corta, sobre todo en edificaciones escolares. Con esta investigación se pretende analizar una técnica sencilla de reforzamiento en FRP que mejore el confinamiento y la resistencia de la columna corta. Es decir, si los resultados de la investigación son favorables, esta técnica permitiría controlar la fisuración, la degradación de rigidez lateral, y se evitaría o retardaría la falla final por aplastamiento.

1.4.- Objetivo

El objetivo es estudiar el comportamiento mecánico de una columna corta de concreto armado ante carga lateral cíclica, sin y con refuerzo externo.

Es decir se busca determinar el efecto del refuerzo con fibra de carbono y fibra de vidrio en las propiedades mecánicas de la columna corta ante carga cíclica.

1.5.- Hipótesis

Para desarrollar este proyecto de investigación, se considerarán las siguientes hipótesis de trabajo:

El reforzamiento con FRP mejora el confinamiento y aumenta la capacidad de desplazamiento de la columna corta. Se puede controlar el grosor de las grietas diagonales en las columnas cortas, con las bandas de FRP. Con lo cual se estaría disminuyendo la degradación de rigidez lateral y evitando o retardando la falla final por aplastamiento.

1.6.-Metodología

La lista siguiente indica las actividades del proyecto:

1. Revisión bibliográfica.
2. Construcción de los tres especímenes de ensayo: el primero sin reforzamiento externo, el segundo reforzado con dos bandas de fibra de carbono y el tercer espécimen se reforzó con tres bandas de fibras de vidrio.
3. Ensayos de laboratorio de los tres especímenes. Se realizaron ensayos de carga lateral cíclica con carga horizontal controlada.
4. Interpretación de los resultados.
5. Conclusiones.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LITERATURA

Este capítulo se ha dividido en dos partes. La primera presenta un resumen de las investigaciones que se han realizado sobre las columnas cortas. La segunda parte presenta las investigaciones que se han realizado sobre el uso de las fibras de carbono.

2.1.-Investigaciones que se han realizado sobre las columnas cortas.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UNA TÉCNICA DE REFORZAMIENTO PARA EDIFICACIONES EXISTENTES CON PROBLEMAS DE COLUMNA

CORTA. PROYECTO SENCICO – PUCP. - En esta investigación se estudió una técnica de reforzamiento para las edificaciones existentes que presenten problemas de “columna corta”. En este trabajo se busca alcanzar una solución económica que atenúe el problema de la columna corta. Además, se trata que todas las columnas que componen a la edificación absorban en forma significativa fuerza cortante para de este modo disminuir la demanda de las columnas cortas ante los terremotos. Se ensayaron dos módulos a escala reducida 1:2, uno fue adoptado como patrón de comparación y el otro fue similar al patrón, pero reforzado después de haberlo construido, es decir se ensanchó el peralte de las columnas en su zona superior. Ambos módulos fueron ensayados, lográndose mejoras sustanciales en el módulo reforzado. (Fig. N° 2.1) (San Bartolomé A., Rivera C., Duran M., Muñoz A., Quiun D. 2000).

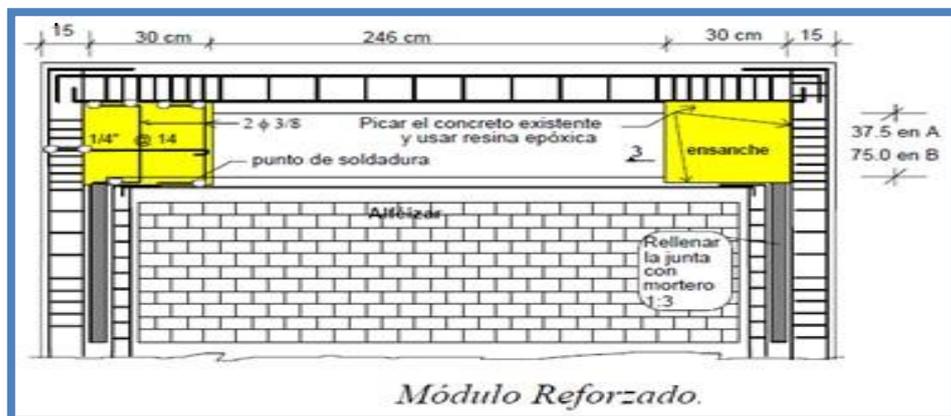


Fig. N° 2.1: Columna corta reforzada por ensanchamiento. [1]

AISLADORES ELASTOMÉRICOS EN ESTRUCTURAS CON COLUMNA

CORTA. - En esta investigación se hace referencia a las edificaciones que se construyen en forma clásica, se forman las denominadas columnas cortas, las cuales se crean generalmente por una disposición inapropiada de las paredes o por consideraciones erróneas tomadas durante el cálculo estructural. Este tipo de columnas presenta primero falla frágil por cortante antes que falla dúctil por flexo compresión. En este artículo se realiza el análisis sísmico de una estructura de un piso y un vano, a la cual se le colocó una pared de mampostería en primera instancia para posteriormente analizarla sin añadir dicha pared, emulando la forma de cálculo estructural clásico (Fig. N° 2.2). Se presenta además el análisis sísmico de la misma estructura añadiéndole aisladores de base, con el fin de comparar resultados y determinar las ventajas que ofrecen los aisladores de base en la solución del problema de columna corta. (Fig. N° 2.3) (Aguiar R., Garzón M., Miranda C., Sosa D., Trujillo R. 2010).

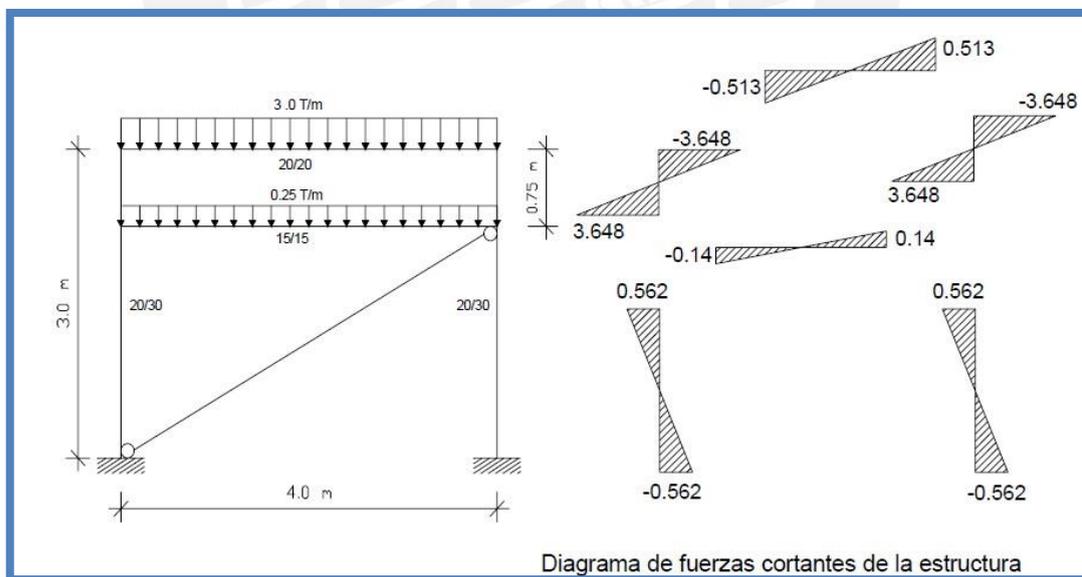


Fig. N° 2.2: Columna corta en pórtico plano. [2]

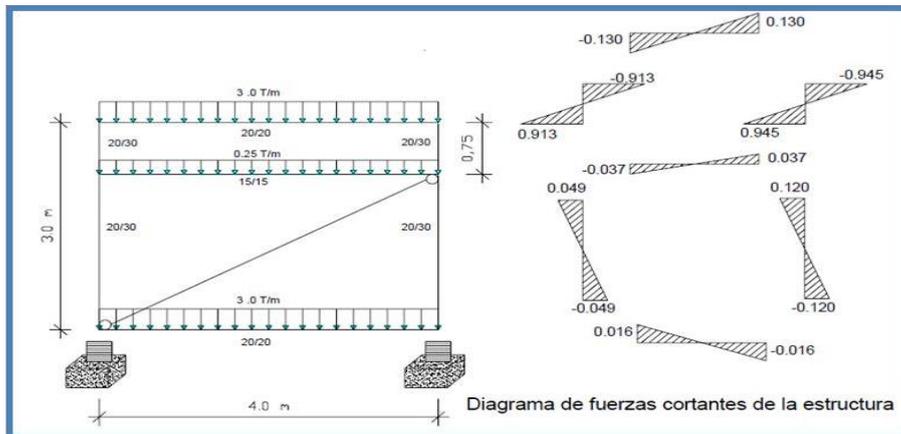


Fig. N° 2.3: Columna corta con aislador elastomérico. [2]

2.2.-Investigaciones que se han realizado sobre el uso de fibra de carbono.

REPARACIÓN Y REFORZAMIENTO DE UN MURO DE ALBAÑILERÍA CONFINADA MEDIANTE FIBRA DE CARBONO.

- Esta investigación se realizó con el propósito de analizar la efectividad de una técnica de reparación y reforzamiento, consistente en resanar y adicionar exteriormente fibras de carbono (Mbrace CF130) a un muro de albañilería confinada, que previamente había fallado por fuerza cortante en un experimento de carga lateral cíclica. Este proyecto se desarrolló en el Laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú, obteniéndose resultados relativamente satisfactorios después de someter al muro rehabilitado a la misma técnica de ensayo. (Fig. N° 2.4 y N° 2.5) (San Bartolomé A., Coronel C. 2008).



Fig. N° 2.4: Muro ensayado con bandas de CFRP. [3]

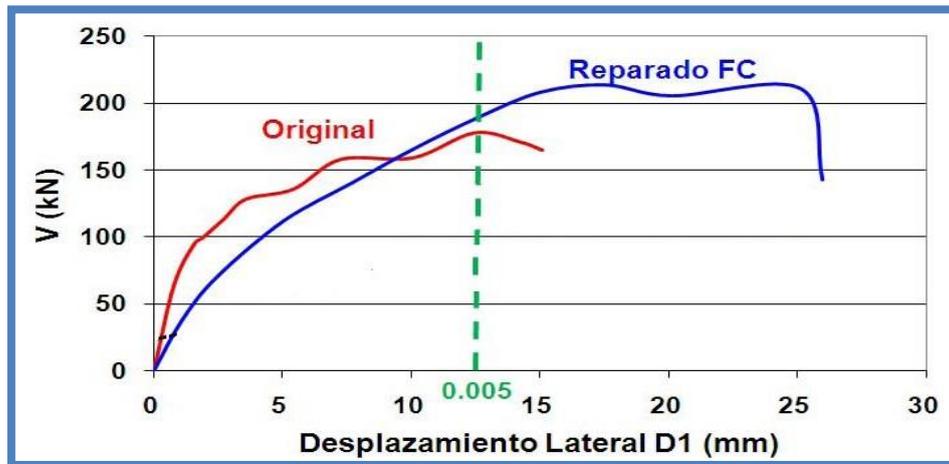


Fig. N°2.5: Diagrama V-D del Muro ensayado con bandas de CFRP. [3]

USO DE FIBRAS DE CARBONO COMO REFORZAMIENTO A CORTE EN VIGAS DE CONCRETO REFORZADO.

- Este proyecto tuvo por finalidad estudiar el aporte que brindan los materiales compuestos por fibras de carbono al disponerse en un elemento estructural, para ello se presenta una modelación de vigas en el desarrollo del proyecto para realizar el correspondiente estudio. El objeto del estudio es lograr entender el comportamiento de vigas reforzadas con fibras de carbono sometidas a corte. Este es un método de reforzamiento actualmente utilizado en estructuras con deficiencias en cortantes. (Fig. N° 2.6) (Contreras J. 2011).



Fig. N° 2.6: Viga ensayada con refuerzo de CFRP. [4]

CAPITULO 03: CARACTERISTICAS Y ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS MODELOS ENSAYADOS

En este capítulo se describen las principales características de los materiales empleados para la construcción del espécimen de columna corta. Estas son determinantes en el proceso constructivo y en el comportamiento estructural de los especímenes a ser ensayados.

3.1.-Características del concreto

En su forma más simple, el Concreto es un material compuesto constituido por un material cementante, agua y agregado. El cemento, normalmente tipo Portland, una vez hidratado genera la adhesión química entre los componentes. Por lo general el agregado representa entre el 60 al 75% del volumen total del concreto estructural, el cemento entre un 7 a 15% y el aire atrapado entre 1 al 3%. El concreto tiene una alta resistencia en compresión, pero su resistencia en tracción es baja, de hecho, en los cálculos se suele despreciar la resistencia en tracción (Ottazzi G. 2014: 23).

a). - Resistencia a la Compresión

El valor de f'_c (resistencia a la compresión) se utiliza generalmente como indicador de la calidad del concreto. Las Normas o Códigos relacionan muchas de las características mecánicas del concreto (módulo de elasticidad, resistencia a la tracción, resistencia al corte, adherencia, etc.) con el valor de f'_c . La resistencia a la compresión se determina a partir de ensayos de laboratorio en probetas estándar cargadas axialmente. Este ensayo se utiliza para monitorear la resistencia del concreto tanto para el control de la calidad como para la aceptación del concreto fabricado. La confección de las probetas y el ensayo están reguladas por las Normas (ASTM) (Ottazzi G. 2014: 24).

Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión a tres probetas, obteniendo como resistencia promedio: $f'c = 281 \text{ kg/cm}^2$

b). - Resistencia a la Tracción del Concreto

La resistencia en tracción directa o en tracción por flexión del concreto, es una magnitud muy variable. La resistencia a la tracción directa (f_t) del concreto varía entre el 8% y el 15% de la resistencia en compresión ($f'c$). La resistencia a la tracción del concreto es importante ya que la resistencia al corte del concreto, la adherencia entre el concreto y el acero y la fisuración por retracción y temperatura, dependen mucho de esta (Ottazzi G. 2014: 30).

La Norma Peruana E.060 define f_r como la resistencia del concreto a tracción por flexión (Módulo de Rotura), mediante la ecuación:

$$f_r = 0.62 \sqrt{f'c} \text{ (Mpa)}$$

$$f_r = 2 \sqrt{f'c} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$f_r = 33.53 \text{ kg/cm}^2$$

c). - Módulo de Elasticidad (E_c)

En general, es la capacidad del concreto de deformarse bajo carga, sin tener deformación permanente. El concreto no es un material elástico estrictamente hablando, ya que no tiene un comportamiento lineal en ningún tramo de su diagrama carga vs deformación en compresión, sin embargo, convencionalmente se acostumbra a definir un “módulo de elasticidad estático” del concreto mediante una recta tangente a la parte inicial del diagrama. (Pasquel E. 1992: 142).

Para Concretos de Peso específico Normal (aproximadamente $2,300 \text{ kg/m}^3$), la Norma Peruana permiten estimar E_c mediante:

$$E_c = 4,700 \sqrt{f'_c} \text{ (Mpa)}$$

$$E_c = 15,000 \sqrt{f'_c} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$E_c = 251,446 \text{ kg/cm}^2$$

d). - Módulo de Poisson del Concreto

Por debajo del esfuerzo crítico (75% a 80% de f'_c) el Módulo de Poisson - μ - varía entre 0.11 y 0.21. Normalmente está en el rango de 0.15 a 0.20 y permanece aproximadamente constante bajo cargas sostenidas. En la práctica se suele adoptar $\mu = 0.15$ (Ottazzi G. 2014: 35).

Módulo de Poisson del Concreto: $\mu = 0.15$,

Módulo de rigidez al esfuerzo cortante:

$$G_c = E_c / 2 (1 + \mu)$$

$$G_c = E_c / 2.3$$

$$G_c = 109,324 \text{ kg/cm}^2$$

3.2.-Características del acero de refuerzo

El concreto es un material débil en tracción, por lo tanto, se le usa junto con acero de refuerzo capaz de resistir los esfuerzos de tracción. Por ejemplo, en una viga sometida a flexión, el concreto se encarga de resistir las compresiones y las barras de acero longitudinal, colocadas cerca de la superficie en tracción, se encargan de resistir las tracciones originadas por la flexión. Adicionalmente se suele colocar refuerzo transversal, en la forma de estribos, que ayudan a resistir los esfuerzos de tracción diagonal en el concreto causados por las fuerzas cortantes. (Ottazzi G. 2014: 57).

Acero Corrugado ASTM A615-GRADO 60

La Norma A615 cubre los aceros de refuerzo que se utilizan con mayor frecuencia, en nuestro medio son prácticamente los únicos que utilizamos.

Denominación: Acero Corrugado ASTM A615-grado 60

Descripción: Barras de acero rectas de sección circular, con resaltes HI-bond de alta adherencia con el concreto.

Usos: se utilizan en la construcción de edificaciones de concreto armado de todo tipo.

Normas técnicas:

- ASTM A615 Grado 60.
- Norma Técnica Peruana 341.031 Grado 60.
- Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú.

Propiedades mecánicas del acero de refuerzo

- $\sigma_f \text{ min} = 4,280 \text{ kg/cm}^2$ (fluencia nominal, valor mínimo).
- $\sigma_u \text{ min} = 6,320 \text{ kg/cm}^2$ (esfuerzo máximo o último o resistencia a la tracción).
- $E_s \approx 2'000,000 \text{ kg/cm}^2$ (módulo de elasticidad).
- Deformación en el inicio de la fluencia $\epsilon_y = (f_y / E_s)$. ≈ 0.0021
- Longitud de la plataforma de fluencia = variable.
- Deformación de rotura \gg Deformación de fluencia (30 a 40 veces).
- Elongación a la rotura entre el 7% y 9% (Tabla 3-3).
- Coeficiente de dilatación $\approx 11 \times 10^{-6} \text{ 1/C}^\circ$. Valor muy parecido al del concreto el cual es $\approx 10 \times 10^{-6} \text{ 1/C}^\circ$. Ambos coeficientes de dilatación dependen de la temperatura.

3.3.-Características Del Compuesto FRP

Se entiende por materiales compuestos aquellos formados por dos o más materiales distintos sin que se produzca reacción química entre ellos.

En todo material compuesto se distinguen dos componentes: La MATRIZ, componente que se presenta en fase continua, actuando como ligante y El REFUERZO, en fase discontinua, que es el elemento resistente.

Los Compuestos de Polímero Reforzado con Fibras (FRP) se definen como una matriz termoplástica que contiene materiales de refuerzo como las fibras, que pueden ser de vidrio, carbono o aramida.

Los Compuestos FRP son anisotrópicos (las propiedades resistentes son distintas y varían según su orientación), a diferencia del acero o el aluminio, que son isotrópicos (las propiedades son uniformes en todas direcciones, independientemente de la aplicación de la carga).

Los Compuestos FRP presentan las siguientes ventajas sobre algunos materiales tradicionales:

- Livianos
- Relación resistencia/peso, mejor que el acero.
- Alta resistencia a la corrosión
- No son magnéticos
- Requieren bajo mantenimiento
- Poseen gran durabilidad
- Se les puede dar el acabado deseado
- Bajo peso, del orden de la cuarta parte en comparación con el acero.

Desventajas del FRP:

- Degradación y posterior colapso prematuro de las fibras al ser sujetas a temperaturas elevadas producto del fuego.
- Comportamiento lineal hasta la falla, sin deformaciones plásticas, lo que reduce la ductilidad de los elementos.

3.3.1.-Polimero Reforzado con Fibra de Carbono (CFRP)

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

En el caso particular de la fibra de carbono, básicamente se combina un tejido de hilos de carbono (refuerzo), el cual aporta flexibilidad y resistencia, con una resina termoestable (matriz), comúnmente de tipo epóxico, que se solidifica gracias a un agente endurecedor y actúa uniendo las fibras, protegiéndolas y transfiriendo la carga por todo el material; por su parte el agente de curado ayuda a convertir la resina en un plástico duro.

En este proyecto se utilizaron productos de fibra de carbono TYFO®, fabricados por la empresa americana FYFE Co.LLC: Mantas de fibra de carbono unidireccional TYFO®SCH-41, Resinas TYFO®S, Recubrimiento protector TYFO® RR. (Fig. N° 3.3)

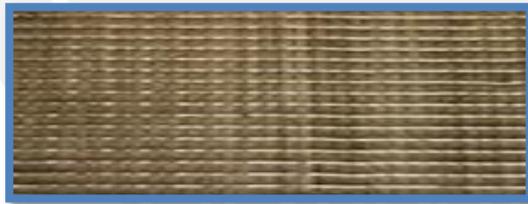


Fig. N° 3.1: Tejido de Fibra de carbono

Sistema Tyfo® SCH-41 [5].

Se compone del epóxico Tyfo® S y del tejido de Refuerzo Tyfo® SCH-41. Tyfo® SCH-41 es un tejido unidireccional de fibras de carbón con fibras de vidrio transversales para añadir estabilidad durante la instalación. Los filamentos de carbón se orientan en la dirección 0°. El epóxico Tyfo® S es una matriz de dos componentes. El sistema tiene certificación NSF. (Tabla. N° 3.1)

Tabla. N° 3.1: Propiedades de la fibra de carbono. [5]

COMPOSITE GROSS LAMINATE PROPERTIES			
PROPERTY	ASTM METHOD	TYPICAL TEST VALUE	DESIGN VALUE*
Ultimate Tensile Strength in Primary Fiber Direction	D3039	143,000 psi (986 MPa) (5.7 kip/in. width)	121,000 psi (834 MPa) (4.8 kip/in. width)
Elongation at Break	D3039	1.0%	0.85%
Tensile Modulus	D3039	13.9 x 10 ⁶ psi (95.8 GPa)	11.9 x 10 ⁶ psi (82 GPa)
Flexural Strength	D790	17,900 psi (123.4 MPa)	15,200 psi (104.8 MPa)
Flexural Modulus	D790	452,000 psi (3.12 GPa)	384,200 psi (2.65 GPa)
Longitudinal Compressive Strength	D3410	50,000 psi (344.8 MPa)	42,500 psi (293 MPa)
Longitudinal Compressive Modulus	D3410	11.2 x 10 ⁶ psi (77.2 GPa)	9.5 x 10 ⁶ psi (65.5 GPa)
Longitudinal Coefficient of Thermal Expansion	D696	3.6 ppm/°F	
Transverse Coefficient of Thermal Expansion	D696	20.3 ppm/°F	
Nominal Laminate Thickness		0.04 in. (1.0mm)	0.04 in. (1.0mm)

3.3.2-Polímero Reforzado con Fibra de Vidrio (GFRP)

El plástico reforzado con vidrio, también denominado con las siglas GFRP (Glass-Fiber Reinforced Plastic), es un material compuesto, formado por una matriz de plástico o resina reforzada con fibras de vidrio. Se le denomina informalmente a este material simplemente como "fibra de vidrio". (Fig. N° 3.4).



Fig. N° 3.2: Tejido de Fibra de vidrio

Sistema Tyfo® SEH-51^a [6].

Material listado en la ICC ESR-2103 compuesto del epóxico Tyfo® S y el tejido de refuerzo Tyfo® SEH-51A. La Tyfo®SEH-51A es un tejido unidireccional de fibra de vidrio con trenzado especial utilizado en el sistema de Tyfo® Fibrwrap. El material de vidrio se orienta en la dirección 0° con las fibras amarillas de vidrio cruzadas a 90°. El epóxico Tyfo® S es un material epóxico con matriz de dos componentes. (Tabla. N° 3.2).

Tabla. N° 3.2: Propiedades de la fibra de vidrio. [6]

COMPOSITE GROSS LAMINATE PROPERTIES			
PROPERTY	ASTM METHOD	TYPICAL TEST VALUE	DESIGN VALUE*
Ultimate tensile strength in primary fiber direction, psi	D3039	83,400 psi (575 MPa) (4.17 kip/in. width)	66,720 psi (460 MPa) (3.3 kip/in. width)
Elongation at break	D3039	2.2%	1.76%
Tensile Modulus, psi	D3039	3.79 x 10 ⁶ psi (26.1 GPa)	3.03 x 10 ⁶ psi (20.9 GPa)
Ultimate tensile strength 90 degrees to primary fiber, psi	D3039	3,750 psi (25.8 MPa)	3,000 psi (20.7 MPa)
Nominal Laminate Thickness		0.05 in. (1.3mm)	0.05 in. (1.3mm)

3.4.- Cálculo de la contribución de refuerzo FRP a la resistencia por cortante

El cálculo del valor de la resistencia al cortante usando el FRP (V_f), actualmente no se encuentra unificado, ya que existen dos métodos internacionalmente aprobados del cálculo para el diseño de la resistencia al corte aportado por estos materiales:

- **ACI 440.2R-08.** Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.
- Sika. Fib. CEB-FIP. Bulletin 14. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. July 2001.

El primero, expuesto por la American Concrete Institute, es el método más utilizado por los fabricantes en Latinoamérica. Se eligió trabajar con el método de diseño de la ACI.

3.4.1. Contribución de refuerzo CFRP a la resistencia por cortante

Realizamos los cálculos necesarios para determinar en cuanto la fibra de carbono aumenta la resistencia al cortante. Ver tablas N° 3.3, N° 3.4 y N° 3.5.

Tabla. N° 3.3: Datos de la fibra de carbono usada.

Resistencia a la tensión máxima (f_{fu}^*) =	10,054 kg/cm ²
Deformación última o de ruptura (ϵ_{fu}^*) =	0.017
Módulo de elasticidad (E_f) =	976,888 kg/cm ²
Factor de reducción ambiental (C_E) =	0.95

Tabla. N° 3.4: Características de las bandas de CFRP a usar.

n : Numero de capas de fibras	=	2
t_f : Espesor de una capa de fibra	=	0.1 cm
w_f : Ancho de las capas de los FRP	=	7.5 cm
d_{fv} : Sección de profundidad de columna paralela a la fuerza aplicada	=	25 cm
s_f : Separación de centro a centro del FRP	=	22.5 cm

Tabla n ° 3.5: Factor de reducción (C_E) por exposición al medio ambiente (ACI 440.2R-08)

Exposure conditions	Fiber type	Environmental reduction factor C_E
Exposición Interior	Carbon	0.95
	Glass	0.75
	Aramid	0.85
Exposición Exterior Puentes Pilares, Estacionamientos Ambientes No Cerrados	Carbon	0.85
	Glass	0.65
	Aramid	0.75
Ambientes Agresivos (Plantas Químicas)	Carbon	0.85
	Glass	0.50
	Aramid	0.70

Propiedades de los materiales en el diseño (del capítulo 9.4 del ACI 440.2R-08)

[7].

Normalmente, las propiedades del material suministradas por el proveedor, como la resistencia última a tracción, no consideran la exposición a largo plazo a las condiciones del entorno y deben ser consideradas como las propiedades iniciales. Debido a que la exposición a largo plazo y a varios tipos de entorno puede reducir las propiedades mecánicas y la resistencia a fatiga y fluencia de los laminados compuestos, las propiedades mecánicas aplicadas en las ecuaciones de diseño deben incluir el coeficiente reductor en función del entorno. Las ecuaciones proporcionan las propiedades mecánicas que deben ser utilizadas en todas las ecuaciones de cálculo. La resistencia última debe determinarse aplicando el coeficiente reductor de la tabla 9.1 del ACI 440.2R-08, para la fibra y la condición de exposición:

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad \text{Esfuerzo de Rotura}$$

$$f_{fu} = 9,552 \text{ kg/cm}^2$$

De igual forma, el factor deformación también debe reducirse en función de las condiciones del entorno:

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad \text{Deformación de Rotura}$$

$$\varepsilon_{fu} = 0.0103$$

Como todos los materiales compuestos son elásticos linealmente hasta la falla, el cálculo del módulo de elasticidad puede determinarse por la ley de Hooke. La expresión para el módulo de elasticidad reconoce que el módulo, normalmente, no es afectado por las condiciones del entorno. En este caso, el módulo tomado para esta ecuación tendrá el mismo valor que el inicial aportado por el proveedor:

$$E_f = f_{fu} / \varepsilon_{fu} \quad \text{Modulo de Elasticidad}$$

$$E_f = 928,043 \text{ kg/cm}^2$$

Deformación efectiva en laminados CFRP

La deformación efectiva máxima que puede alcanzarse en un sistema FRP en el último estado de carga, está gobernada por el modo de fallo del sistema FRP y del elemento reforzado de concreto. En el diseño se debe considerar todos los posibles modos de fallo y utilizar una deformación efectiva representativa del modo de fallo crítico.

a). - Elementos encamisados completamente

Se limita la deformación máxima de diseño del refuerzo FRP al 0.4%:

$$\epsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75 \epsilon_{fu}$$

$$0.75 \epsilon_{fu} = 0.008$$

Luego :

$\epsilon_{fe} = 0.004$

Esta limitación está basada en ensayos y experiencia. Deformaciones mayores no deben ser utilizadas para aplicaciones de refuerzo mediante FRP.

Contribución del sistema CFRP a cortante (del capítulo 11.4 del ACI 440.2R-08)

[7].

La contribución del sistema FRP a cortante se basa en la orientación de las fibras y un patrón asumido de grieta. El cortante proporcionado por el refuerzo FRP puede determinarse con el cálculo de la fuerza resultante de la tracción en el refuerzo a través de la grieta supuesta. Se muestra la ecuación:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{s_f} \quad A_{fv} = 2nt_f w_f$$

donde:

A_f: área de la fibra

N: número de capas de fibra

T_f: espesor de una capa de a fibra

W_f: ancho de la fibra

D_f: peralte efectivo de fibras

S_f: separación de fibras

El esfuerzo a tracción del refuerzo FRP a cortante en estado último es directamente proporcional a la deformación que puede desarrollarse en el refuerzo CFRP a cortante en estado último.

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

Puesto que las fibras se colocarán perpendiculares a la dirección del eje axial de la columna, la expresión anterior se reduce a:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} d_{fv}}{s_f}$$

Sustituimos el valor del área y el esfuerzo a tracción.

$$V_f = \frac{2nt_f w_f \varepsilon_{fe} E_f d_{fv}}{s_f}$$

Por lo tanto, dos capas de fibra de carbono aumentarán la resistencia al cortante de la columna:

$$V_f = \frac{2(2)(0.1 \text{ cm})(7.5 \text{ cm})(0.004)(928043 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2})(25 \text{ cm})}{22.5 \text{ cm}}$$

$$V_f = 12374 \text{ kg}$$

$$V_f = 12.37 \text{ tn}$$

3.4.2. Contribución del Refuerzo GFRP a la Resistencia por Cortante

Se determina en cuanto la fibra de vidrio aumenta la resistencia al cortante.

Tabla. N° 3.6: Datos de la fibra de vidrio usada.

Resistencia a la tensión máxima (f_{fu}^*) =	5,863 kg/cm ²
Deformación última o de ruptura (ϵ_{fu}^*) =	0.045
Módulo de elasticidad (E_f) =	266,464 kg/cm ²
Factor de reducción ambiental (C_E) =	0.75

Tabla. N° 3.7: Características de la banda de GFRP a usar.

n : número de capas de fibras =	3
t_f : Espesor de una capa de fibra =	0.13 cm
w_f : ancho de las capas de los FRP =	7.5 cm
d_{fv} : Sección de profundidad de columna paralela a la fuerza aplicada =	25 cm
s_f : separación de centro a centro del FRP =	9.5 cm

Propiedades de los materiales en el diseño (del capítulo 9.4 del ACI 440.2R-08)

- Resistencia última a la tracción.

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

$$f_{fu} = 4,398 \text{ kg/cm}^2$$

- Módulo Elástico.

$$E_f = C_E E_G$$

$$E_f = 199,848 \text{ kg/cm}^2$$

- Deformación última.

$$\epsilon_{fu} = f_{fu} / E_f$$

$$\epsilon_{fu} = 0.022$$

Calculo de la Contribución del sistema FRP a cortante (del capítulo 11.4 del ACI 440.2R-08).

$$V_f = 12.31 \text{ ton}$$

3.5.-Análisis Teórico De Los Especímenes

3.5.1.-Rigidez Lateral

El espécimen se comportará como una viga en voladizo, debido a que solo estará empotrado en su base inferior.

$$K = V / d = 3EI / [h^3 (1 + g/2)]$$

$$g = 1.38 \left(\frac{d}{L} \right)^2$$

Tabla. N° 3.8: Datos geométricos de la sección.

$f'_{c \text{ pr om}}$	=	281 Kg/cm ²
d	=	22.5 cm
b	=	25 cm
I	=	11,865 cm ⁴
E	=	251 ton/cm ²
G	=	109 ton/cm ²
EI	=	2,983,464 ton-cm ²
g	=	0.1941

$$K = \frac{3(251 \text{ ton/cm}^2)(11,865 \text{ cm}^4)}{(60^3)(1 + 0.1941/2)}$$

$$K = 37.77 \text{ ton/cm}$$

$$K = 3.77 \text{ ton/mm}$$

3.5.2 Fisuración En Tracción Por Flexión

Determinamos teóricamente la carga asociada a la primera fisura.

Momento de agrietamiento (Mcr). –

Para momentos actuantes no mayores que Mcr, la sección no está agrietada, se considera que el comportamiento corresponde al estado elástico.

$$M_{cr} = f_r I_g / Y_t$$

Módulo de rotura del concreto: $f_r = 2\sqrt{f_c} = 33.53 \text{ kg/cm}^2$

Momento de inercia de sección bruta no agrietada: $I_g = 35,889 \text{ cm}^4$

Distancia del centroide de la sección a la fibra extrema en tracción: $Y_t = 12.48 \text{ cm}$

$$M_{cr} = 96,127 \text{ kg-cm}$$

$$M_{cr} = 0.96 \text{ ton-m}$$

Carga necesaria para que se produzca el momento de agrietamiento:

$$L = 0.60 \text{ m}$$

Carga de agrietamiento : $V_{cr} = \frac{M_{cr}}{L} = 1.60 \text{ Tn}$

3.5.3. Momento Flector Máximo

Momento de fluencia (My). –

$$\rho = 0.009$$

$$k = 0.315$$

$$M_y = A_s f_y d(1-k/3) = 429,705 \text{ kg-cm}$$

$$M_y = 4.30 \text{ ton-m}$$

Momento ultimo (Mu). –

$$M_u = b d^2 f'_c \omega(1-0.59\omega)$$

$$\omega = \rho f_y / f'_c$$

$$\omega = 0.135$$

$$M_u = 441,828 \text{ kg-cm}$$

$$M_u = 4.42 \text{ ton-m}$$

Con los valores de los momentos, podemos calcular las fuerzas cortantes para cada punto, para la falla por flexión.

$$L = 0.60 \text{ m}$$

$$\text{Carga de fluencia} \quad V_y = \frac{M_y}{L} = 7.16 \text{ Tn}$$

$$\text{Carga última} \quad V_u = \frac{M_u}{L} = 7.36 \text{ Tn}$$

3.5.4. Agrietamiento diagonal teórico

Sabiendo que la capacidad por cortante está dada por la resistencia del concreto más la resistencia del acero, tenemos: $V_n = V_c + V_s$

La resistencia teórica al corte, asociada al primer agrietamiento diagonal, se evaluó con la siguiente fórmula:

$$V_n = V_c + V_s$$

$$V_c = 0.53 \sqrt{f'_c} b d = 5.00 \text{ ton}$$

$$V_s = A_v f_y d / s = 2.02 \text{ ton}$$

$$V_n = 7.02 \text{ ton}$$

$$\phi = 0.85$$

$$\phi V_n = 5.96 \text{ ton}$$

3.5.5. Tipo de Falla Esperada

Se define teóricamente el tipo de falla, comparando las resistencias V_n y V_y . Cuando V_n es menor que V_y , la columna falla por corte con una grieta diagonal. Como V_n es igual a 7.02 ton y V_y es igual a 7.16 ton entonces el elemento fallará por cortante.

3.6. Resistencia Nominal a Cortante

La resistencia nominal a cortante de un miembro de concreto reforzado con FRP debe exceder la resistencia a cortante requerida. $\phi V_n \geq V_u$

La resistencia nominal a cortante de un elemento de concreto reforzado con FRP puede determinarse añadiendo las contribuciones del refuerzo a las propias del acero (estribos) y del concreto. $\phi V_n = \phi(V_c + V_s + \psi_f V_f)$

Un factor reductor adicional se aplica en la contribución del sistema FRP, según tabla N° 3.9

Tabla N°3.9 Factor adicional de reducción recomendado para refuerzo a cortante

$\psi_f=0.95$	Vigas con encamisado completo
$\psi_f=0.85$	Envoltura en forma de U o en caras laterales

Dónde:

$\psi_f = 0.95$ Factor de reducción (Tabla N°3.9).

$\phi = 0.85$ Factor de reducción de capacidad.

$V_{fCFRP} = 12.37$ ton. Resistencia aportada por los materiales CFRP.

$V_{fGFRP} = 12.31$ ton. Resistencia aportada por los materiales GFRP.

$V_c = 5.00$ ton. Resistencia nominal al cortante proporcionada por el concreto.

$V_s = 2.02$ ton. Resistencia nominal al cortante proporcionada por el refuerzo.

Resistencia Nominal con refuerzo de CFRP

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s + \psi_f V_f)$$

$$\phi V_n = 0.85(5.00 \text{ ton} + 2.02 \text{ ton} + 0.95 \times 12.37)$$

$$\phi V_n = 15.95 \text{ ton}$$

Resistencia Nominal con refuerzo de GFRP

$$\phi V_n = \phi(V_c + V_s + \psi_f V_f)$$

$$\phi V_n = 0.85(5.00 \text{ ton} + 2.02 \text{ ton} + 0.95 \times 12.31)$$

$$\phi V_n = 15.90 \text{ ton}$$

RESUMEN DE PREDICIONES TEORICAS:

- El momento de agrietamiento $M_{cr} = 0.96$ ton-m, se producirá con una carga de: $V_{cr} = 1.60$ ton.
- El momento de fluencia $M_y = 4.30$ ton-m, se producirá con una carga de: $V_y = 7.16$ ton.
- El momento último $M_u = 4.42$ ton-m, se producirá con una carga de: $V_u = 7.36$ ton.
- La fuerza cortante que resiste el elemento será de: $V_n = 7.02$ ton.
- Como la fuerza cortante es menor que la fuerza que producirá el momento de fluencia ($V_n < V_y$), entonces el elemento fallará por cortante.
- La resistencia nominal a cortante de un miembro de concreto reforzado con CFRP es: $\phi V_n = 15.95$ ton. y reforzado con GFRP es: $\phi V_n = 15.90$ ton.

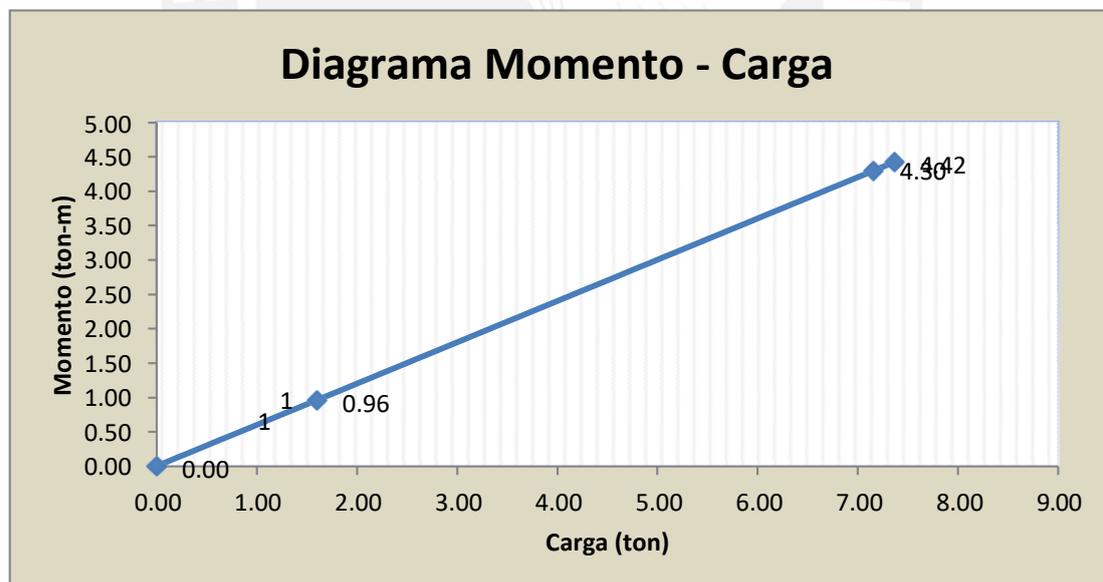
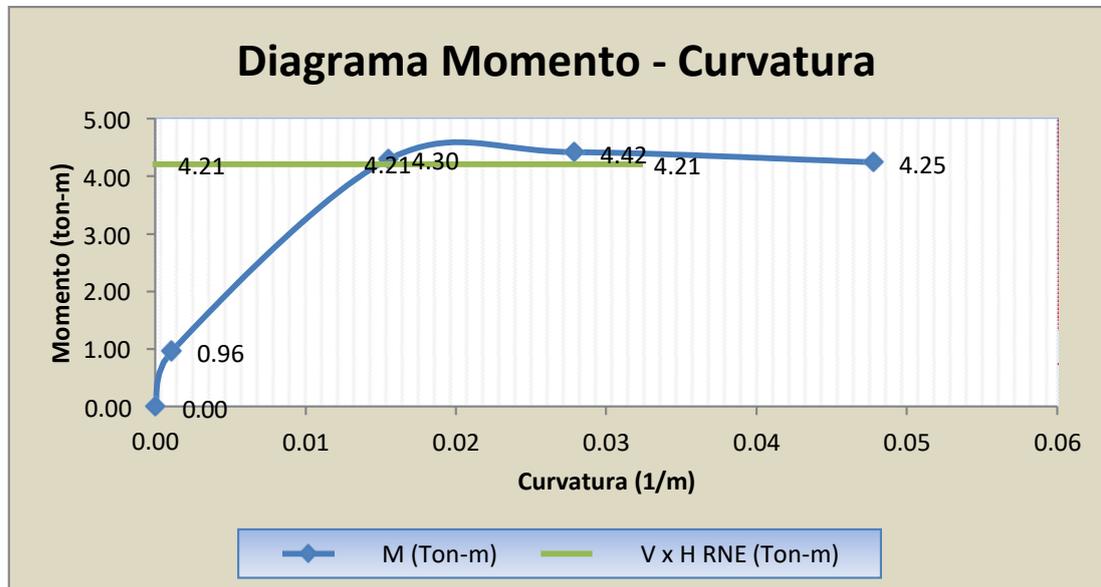


Fig. N° 3.3: Diagrama Momento – Carga (Fuerza).

- La sección falla por corte antes que, por flexión, por lo tanto es una falla frágil y explosiva, que se produce antes de que la sección llegue a la FLUENCIA.



- Fig. N° 3.4 : Diagrama Momento – Curvatura, incorporando los efectos por corte.
- La CALTRANS; plantea una ecuación que considera la degradación de la resistencia a corte del concreto, provocada por la creciente demanda de ductilidad.

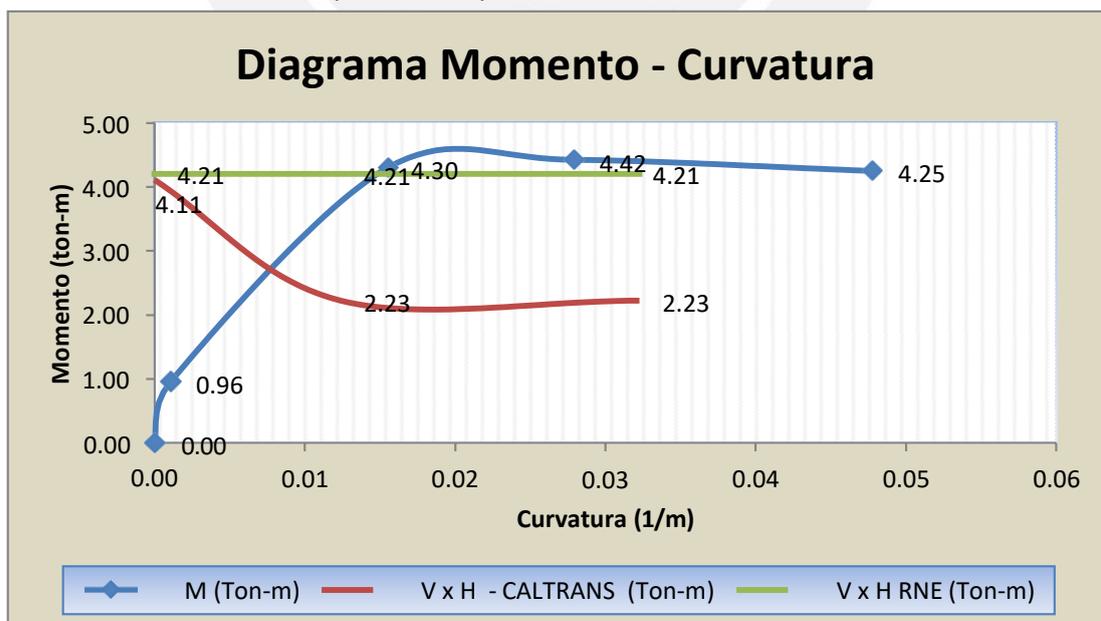


Fig. N° 3.5 : Diagrama Momento – Curvatura (incluyendo la degradación de la resistencia a corte)

CAPITULO 4: CONSTRUCCION DE LOS MODELOS DE ENSAYO.

Para analizar experimentalmente la efectividad del reforzamiento con banda de FRP, se construyeron tres especímenes a escala natural con las mismas características.

4.1 Características De Los Especímenes

4.1.1 Características geométricas de los especímenes

El espécimen está conformado por viga de cimentación, columna corta y viga superior. (Fig. 4.1 y Fig. 4.2)

- viga de cimentación de 0.30m x 0.35 x 1.50m, con 6 fierros longitudinales de 5/8" de diámetro, estribo de 3/8"; 1 @ 0.05 + 5 @ 0.10 c/extremo.
- columna corta de 0.25m x 0.25m x 0.50 m, con 4 fierros longitudinales de 1/2" de diámetro, estribo de 1/4"; 1 @ 0.05 + 3 @ 0.15
- viga superior de 0.30m x 0.20m x 1.00 m, con 4 fierros longitudinales de 3/8" de diámetro, estribo de 1/4"; 1 @ 0.05 + 3 @ 0.10 c/extremo.

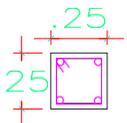
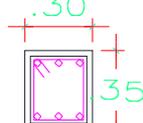
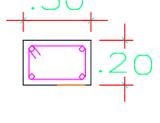
CUADRO DE COLUMNAS-VIGAS		
C-1	V-1	V-2
<p>C-1(.25X.25)</p>  <p>4ϕ 1/2" \square ϕ1/4", 1@0.05, 3@0.10 c/e</p>	<p>V-1(.30X.35)</p>  <p>6ϕ5/8" \square ϕ3/8", 1@0.05, 5@0.10, c/e</p>	<p>V-2(.30X.20)</p>  <p>4ϕ3/8" \square ϕ1/4", 1@0.05, 3@0.10, c/e</p>

Fig. 4.1.- Secciones de las vigas y columna del espécimen.

El concreto utilizado tiene una resistencia promedio a la compresión nominal f'_c de 281 kg/cm² y el acero un límite de fluencia nominal, f_y de 4200 kg/cm².

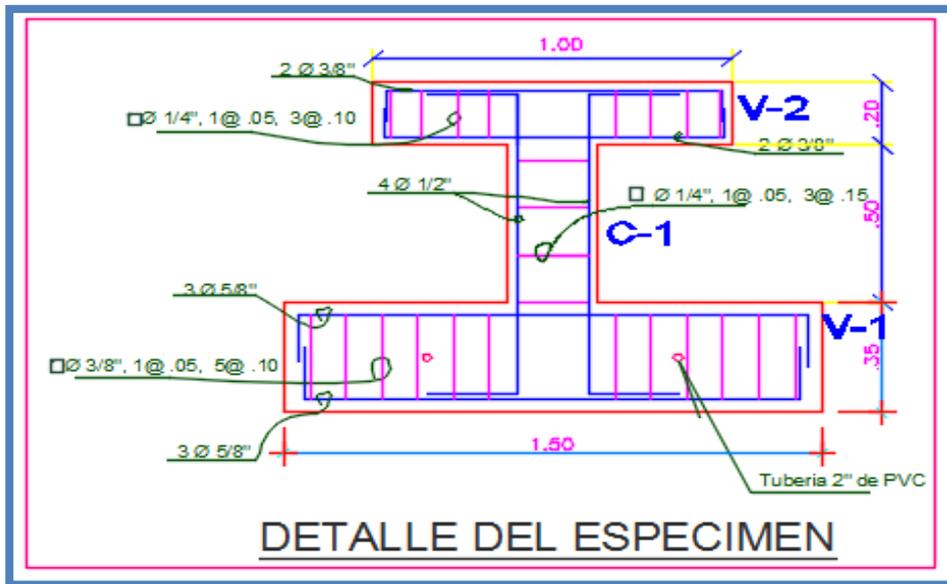


Fig. 4.2.- Detalle del refuerzo del espécimen.

4.1.2.-Peso del espécimen

Para determinar el peso del espécimen, se utilizó un peso volumétrico del concreto armado de 2400 kg/m³.

$$\text{Peso de la viga V-1} : 0.30\text{m} \times 0.35\text{m} \times 1.50\text{m} \times 2400 \text{ kg/m}^3 = 378 \text{ kg}$$

$$\text{Peso de la viga V-2} : 0.30\text{m} \times 0.20\text{m} \times 1.00\text{m} \times 2400 \text{ kg/m}^3 = 144 \text{ kg}$$

$$\text{Peso de columna C-1} : 0.25\text{m} \times 0.25\text{m} \times 0.50\text{m} \times 2400 \text{ kg/m}^3 = 75 \text{ kg}$$

597kg

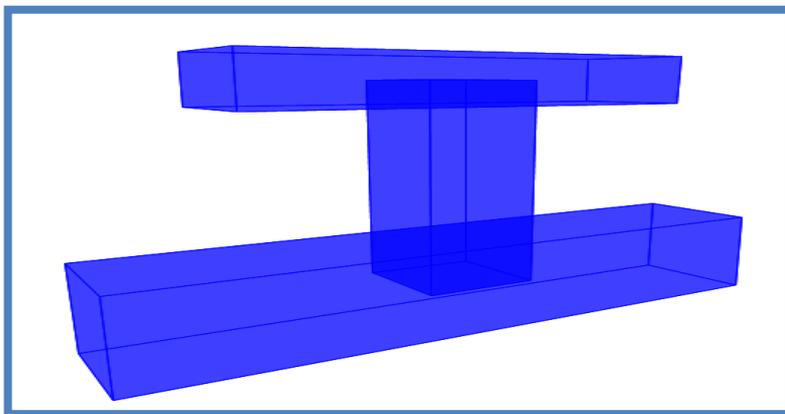


Fig. 4.3.- Vista tridimensional del espécimen.

4.2.- CONSTRUCCIÓN DE LOS ESPECÍMENES

Para la construcción de los especímenes; primero se habilitó el acero, se armó la viga de cimentación, luego la viga superior y por último la columna corta se ensambló. (Fig. 4.4 y Fig. 4.5)



Fig. 4.4.- Armado de la viga de cimentación.



Fig. 4.5.- Ensamblado del espécimen.

Luego de tener la armadura se procedió con el encofrado. En el fondo se usó triplay de 8 mm como base, para los lados se usó triplay fenólico de 12mm y cortado a 30 cm de alto para la viga de cimentación y viga superior y de 0,25cm de alto para la columna. (Fig. 4.6 y Fig. 4.7)



Fig. 4.6.- Presentación de las tapas del encofrado.



Fig. 4.7.- Encofrado del espécimen.

Se hicieron unos "dados" de mortero de dos centímetros y medio de espesor, los cuales se colocaron dentro del encofrado para darle el espesor que requería el recubrimiento de la armadura de acero.

Luego se procedió a colocar, de manera transversal a la viga, los tubos PVC de 2" a 30 cm de los extremos de la viga de cimentación. La función de estos tubos es simplemente servir como puntos de fijación para el izaje y traslado del muro.

Luego de terminar con el encofrado se procedió a preparar el concreto, empleando la mezcladora. El concreto fue vaciado y vibrado con un vibrador eléctrico (Fig. 4.8 y Fig. 4.9), que eliminaba el contenido de aire en la mezcla y así evitar una posible reducción de la resistencia del concreto. Se usó concreto de resistencia 281 Kg/cm². Al día siguiente del vaciado se procedió a desencofrar el espécimen y se le curó por siete días.



Fig. 4.8.- Vaciado del concreto en el espécimen.



Fig. 4.9.- Obtención de Probetas cilíndricas de concreto.



Fig. 4.10.- Acabado del vaciado de concreto.



Fig. 4.11.- Desencofrado del espécimen de columna corta.

4.3.- Reforzamiento Estructural de los Especímenes con FRP.

El material de refuerzo consistió en tejidos de FRP adheridos a la superficie externa de las columnas cortas, mediante un adhesivo epóxico. Para ello primero se alisaron con un esmeril las zonas a reforzar con el FRP. (fig. 4.12). Seguidamente, se delineó la zona donde se colocó las bandas de FRP, luego utilizando un rodillo se aplicó una primera capa del epóxico Tyfo, (fig. 4.13) sobre la superficie seca y limpia donde van las bandas. Usando una espátula se sellaron las imperfecciones con la pasta Tyfo, luego se coloca la banda de FRP (la cual previamente fue recortada en su dirección longitudinal con una tijera, obteniendo dos bandas de 7.5 cm en el caso de las fibras de carbono y tres bandas de 7.5 cm en el caso de la fibra de vidrio.

A todas las bandas de FRP se le aplicó con un rodillo el saturador Tyfo. (fig. 4.14) Finalmente se colocó la capa final de epóxico Tyfo espeso, para que la fibra quede encapsulada. (fig. 4.15)



Fig. N° 4.12.-Redondeando las aristas.



Fig. 4.13.-Aplicando la 1ra capa del epóxico tyfo.



Fig. N° 4.14.-Aplicando Saturador tyfo.



Fig. 4.15.-Aplicando capa final de epóxico tyfo espeso.

CAPITULO 5: ENSAYO DE CARGA LATERAL CICLICA

Para alcanzar el desarrollo de los objetivos propuestos y cubrir el alcance de la presente investigación, fue necesario desarrollar un programa experimental que consistió en la elaboración de especímenes de prueba que fueron ensayados en el laboratorio y permitieron conocer el comportamiento, ante carga cíclica, de la columna corta cuando es reforzada con FRP.

Se consideraron dos aspectos importantes que rigieron la forma y el tipo de especímenes que se ensayaron en la presente tesis; primero contar con un elemento que pudiera representar un modelo de columna corta, y en segundo, contar con las dimensiones y cuantías de acero suficientes para obtener una falla por cortantes antes que la falla por flexión.

El modelo seleccionado es representativo del caso de columnas cortas observadas en el último nivel de una institución educativa. En la parte inferior de la columna corta se tiene muros de albañilería que restringen el desplazamiento y por ello es que incrementan la rigidez y proporciona un mecanismo de empotramiento en el extremo inferior de la columna. Este modelo de Columna corta tiene un comportamiento teórico similar al de la viga en voladizo. (fig. 5.1)

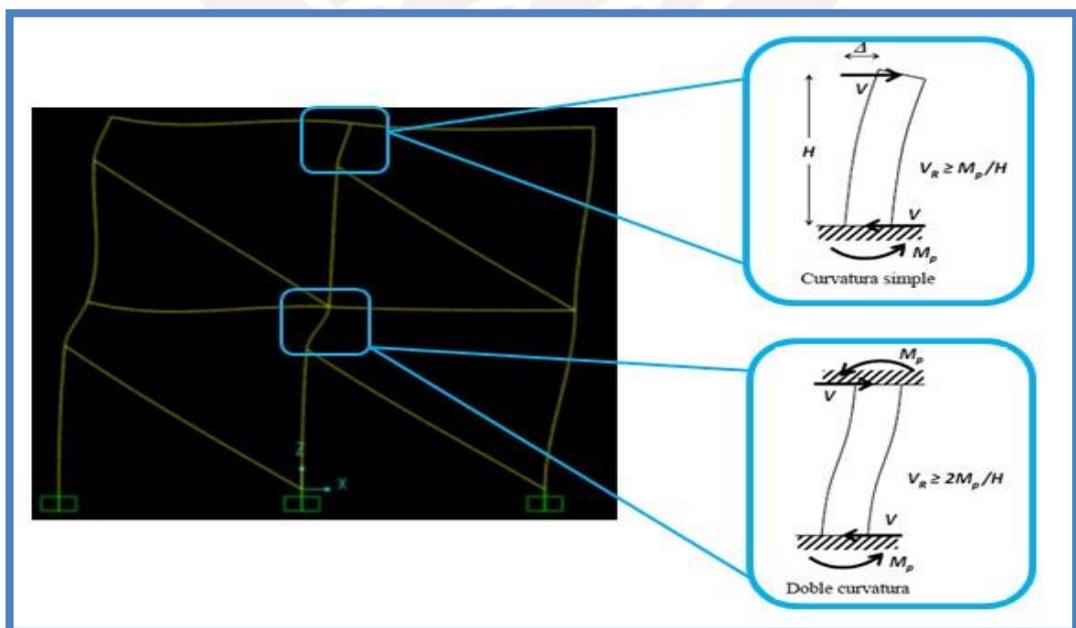


Fig. N° 5.1: deformación de doble curvatura y curvatura simple

5.1 : Actividades Previas

Realizada la preparación del equipo y estructuras necesarias para el ensayo de carga lateral cíclica, por parte del personal del Laboratorio de Estructuras de la PUCP, y cumplido el periodo de curado de los tres especímenes, se procedió a transportar los especímenes a la zona de ensayo usando el puente grúa del laboratorio,

Se utilizó un actuador dinámico estructural de 50 tonf de capacidad, que reaccionaba sobre un pórtico metálico para la aplicación de la carga cíclica horizontal. La fijación de cada espécimen hacia la losa de ensayos fue utilizando mecanos sobre la viga de cimentación, (función: evitar el volcamiento del espécimen), y una fuerza horizontal de 30 ton f en un extremo de la viga de cimentación (función: evitar el deslizamiento del espécimen) como se muestran a continuación en las figuras N°5.2 y N°5.3

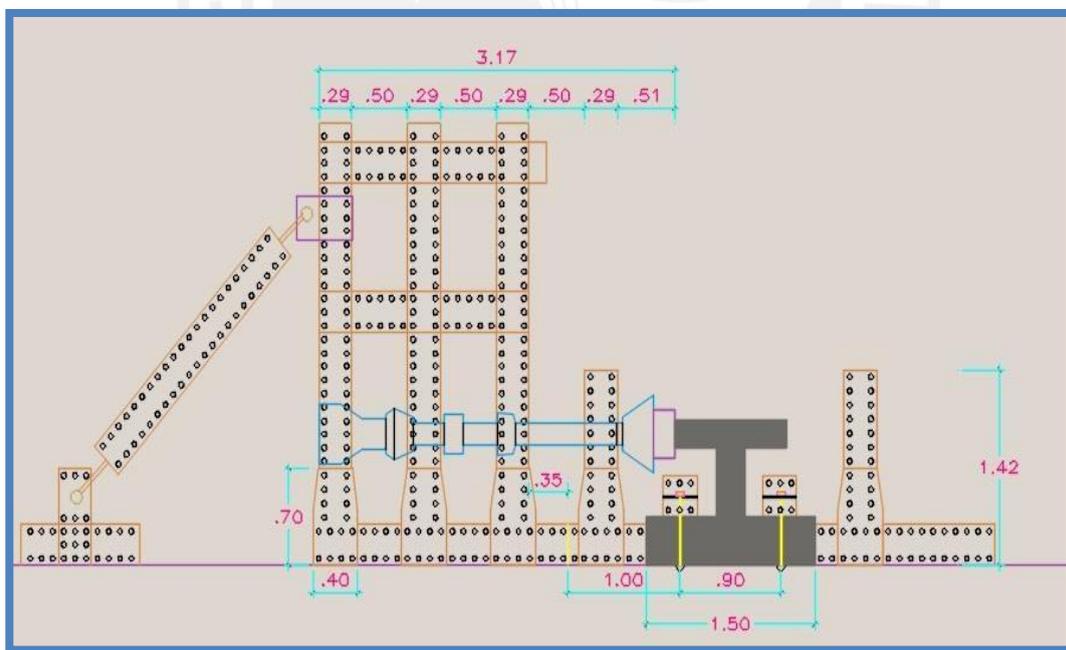


Fig. 5.2.-esquema del ensayo.

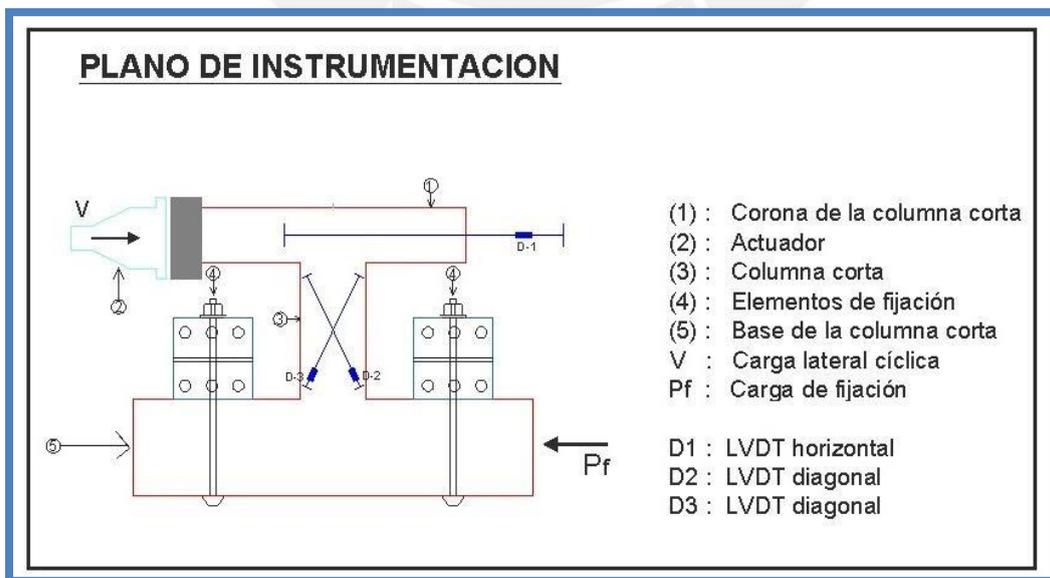


Fig. 5.3.-ensayo del espécimen sin refuerzo externo.

5.2: Instrumentación:

Para el estudio del comportamiento de los especímenes ante las cargas aplicadas, se utilizaron tres LVDT en cada espécimen. Su ubicación se muestra en la figura 5.4.

Fig. 5.4.-plano de instrumentación.



5.3: Función e importancia de cada LVDT

LVDT D1: Registra los desplazamientos a la altura de la viga superior. Es importante porque en esta viga se encuentra el actuador dinámico que aplica la carga lateral. Con la información de este LVDT se puede calcular el desplazamiento lateral del espécimen y a partir de este la rigidez del espécimen. Asimismo, permite controlar los desplazamientos realizados en cada fase del ensayo.

LVDT D2 y D3: Ubicados en las diagonales del espécimen, permiten conocer los desplazamientos diagonales. También permiten estudiar el grado de agrietamiento por corte.

5.4: Ensayo de Carga Lateral Cíclica

La carga se aplicó mediante un actuador hidráulico, el cual se controló usando carga incremental en cada fase.



Fig. 5.5.- Ensayo de Carga Lateral Cíclica.

El ensayo de carga lateral cíclica fue un ensayo de cuatro fases, controlándolo mediante carga lateral incremental.

El ensayo del espécimen C1 (sin refuerzo), se terminó en la fase 3.

Las fases se muestran en la tabla 5.1

Tabla 5.1: Carga Lateral en cada fase.

Fases	N° de ciclos	Carga (KN)	Carga (Ton)
1	1	34	3.46
2	2	50	5.0
3	3	75	7.5
4	3	100	10.0

5.5: DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LOS ESPECÍMENES

Se muestra el comportamiento de los especímenes cada fase de ensayo. Las fisuras se midieron con la lámina graduada.

Fase 1 (F=3.46 ton), Fig. 5.6

Especímen control (C-1)

Se presentaron 3 fisuras, la primera fue horizontal cerca de la unión de la columna con la base, la segunda fisura está a 15 cm de la base en forma diagonal, la tercera por encima de la segunda fisura apenas formándose. El ancho de las fisuras es de 0.1 mm, 0.3 mm y 0.01 mm respectivamente.

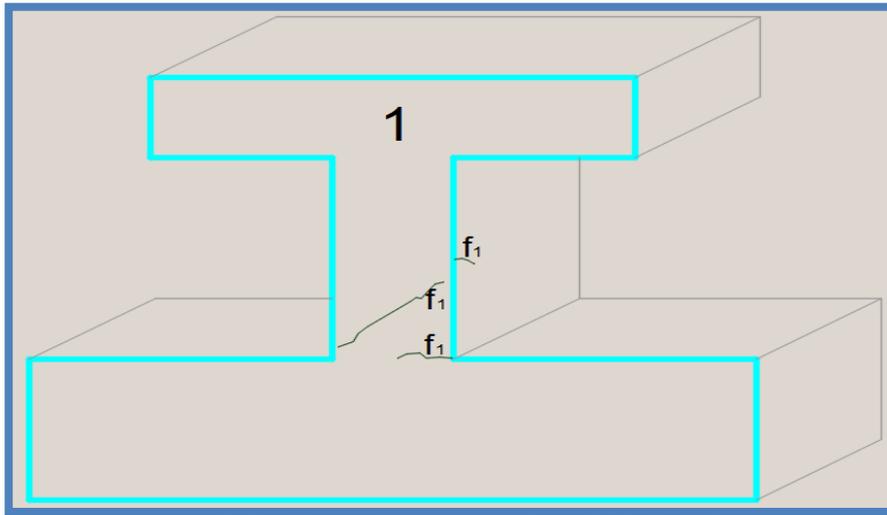


Fig. 5.6.- fisuras en el espécimen C1 - fase 1 del ensayo.

Espécimen reforzado con CFRP (C-2). Fig. 5.7

Se presentaron 2 fisuras, una cerca de la unión de la columna con la base, la segunda fisura está a 22 cm de la base. El ancho de las fisuras es de 0.05 mm y 0.1 mm respectivamente.

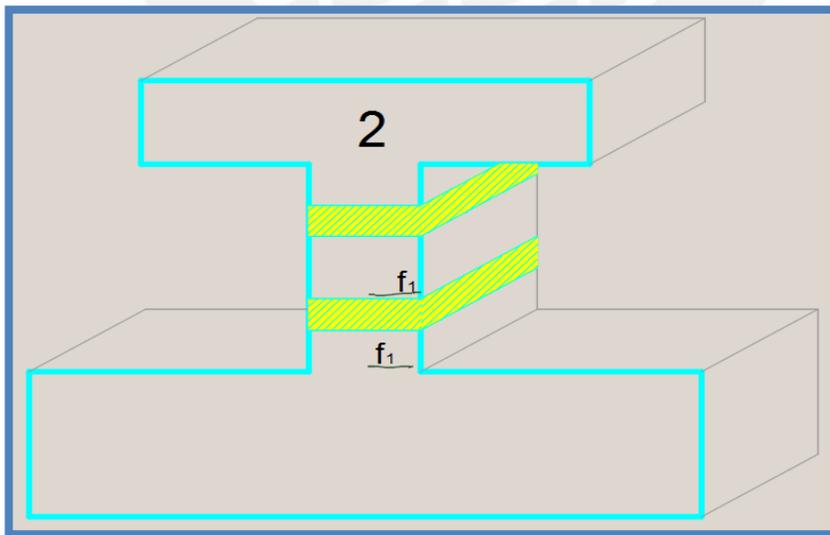


Fig.5.7.- fisuras en el espécimen C2 - fase 1 del ensayo.

Espécimen reforzado con GFRP (C-3). Fig. 5.8

Se presentó una fisura, cerca de la unión de la columna con la base. El ancho de la fisura es de 0.05 mm.

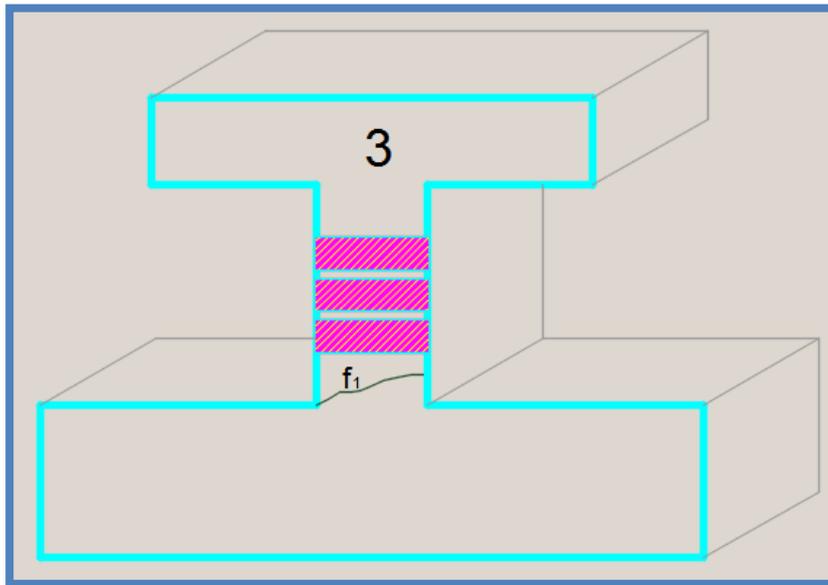


Fig. 5.8.- Fisuras en el espécimen C3 - fase 1 del ensayo.

Fase 2 (F = 5 ton)

Espécimen control (C-1). Fig. 5.9

En esta fase la fisura que se formó a 15 cm de la base en forma diagonal aumentó el espesor de la grieta y se extendió hacia la esquina opuesta de la base, formando un ángulo aproximado de 45°, otra fisura se produjo al lado derecho tal como se muestra en la Fig. 5.9. Luego aparecen más fisuras de 0.1mm tal como aparece en la Fig. 5.9.

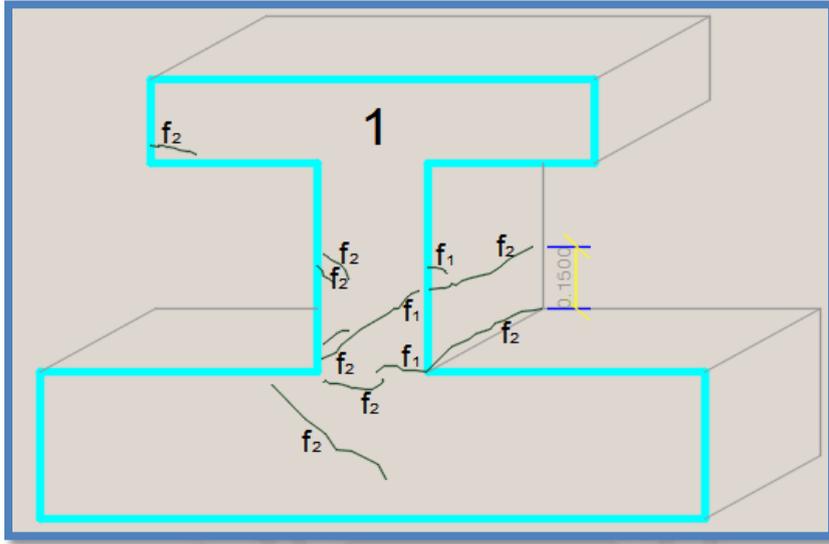


Fig.5.9.- Fisuras en el espécimen C1 - fase 2 del ensayo.

Especimen reforzado con CFRP (C-2) Fig. 5.10

En esta fase aparecieron tres fisuras más de 0.01 mm y la fisura que apareció en la unión columna-base en la primera fase aumentó su espesor a 0.3 mm. La fisura que se formó a 22 cm de la base se mantuvo en 0.01 mm de espesor.

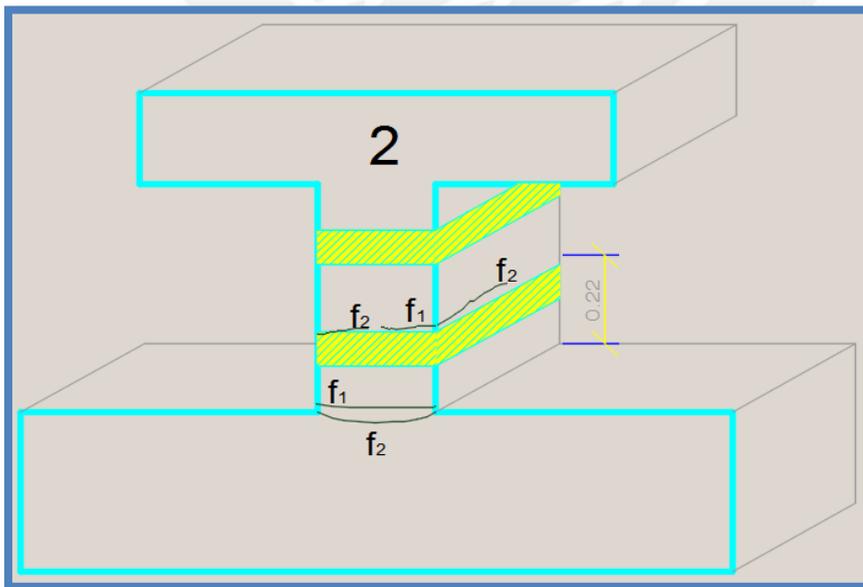


Fig.-5.10.- Fisuras en el espécimen C2 - fase 2 del ensayo.

Espécimen reforzado con GFRP (C-3) Fig. 5.11

En esta fase aparecieron dos fisuras en la unión columna-base, ambas de 0.05 mm y la fisura que apareció en la unión columna-base en la primera fase aumentó su espesor a 0.3 mm. Se formó una fisura a 22 cm de la base de 0.01 mm de espesor.

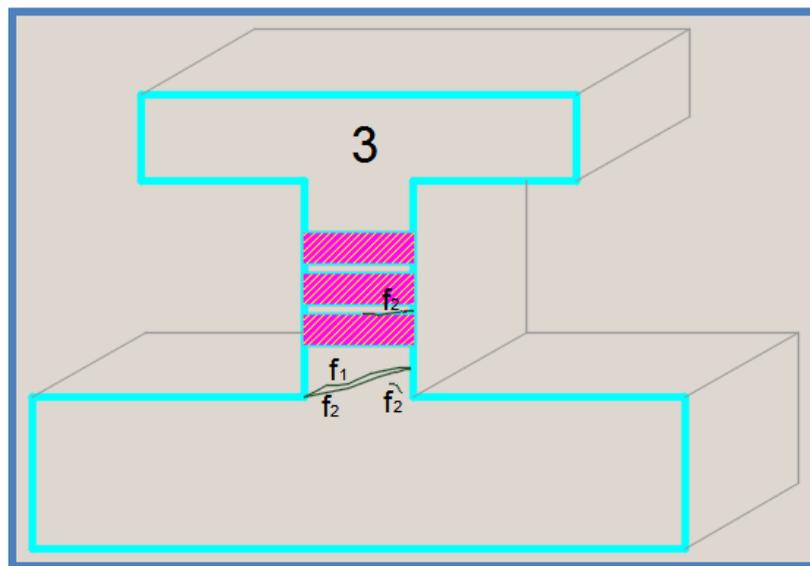


Fig.5.11.- Fisuras en el espécimen C3 - fase 2 del ensayo.

Fase 3 (F = 7.50 ton)

Espécimen control (C-1) Fig. 5.12 a Fig. 5.14

En esta fase la fisura que se formó a 15 cm de la base en forma diagonal aumentó el espesor de la grieta a más de 0.8 mm y se extendió hacia la esquina opuesta de la base, formando un ángulo aproximado de 45°. La fisura que se produjo al lado derecho tal como se muestra en la Fig. 5.12 aumentó su espesor a más de 0.8 mm. Luego aparecen más fisuras de 0.1 mm y las fisuras producidas en las fases 1 y 2 incrementaron su grosor en 0.4 mm.

En esta fase falla el espécimen con una carga lateral de 5.51 ton., la grieta diagonal se incrementa en más de 0.8 mm. Fig. 5.13 y Fig. 5.14

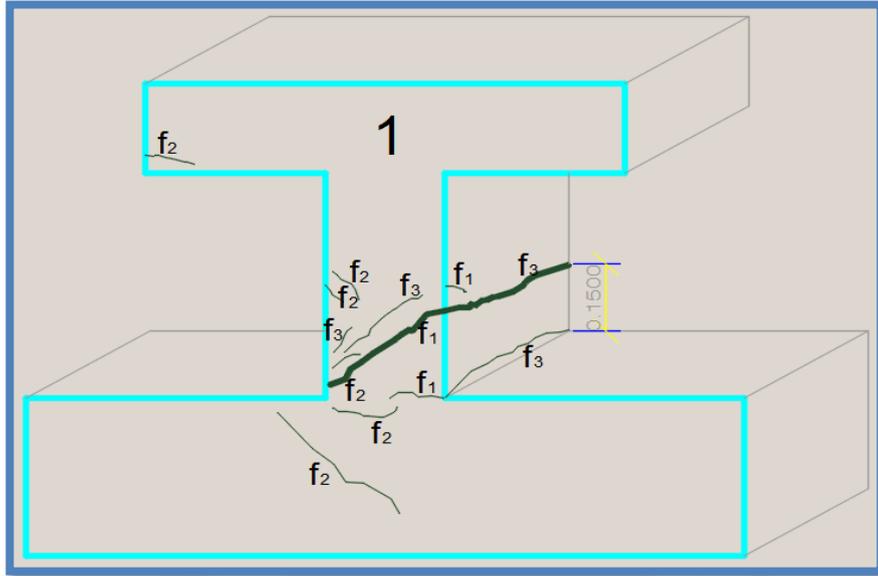


Fig.5.12.- Fisuras en el espécimen C1 - fase 3 del ensayo.



Fig. 5.13: Fisuras en el espécimen C1, después del ensayo.

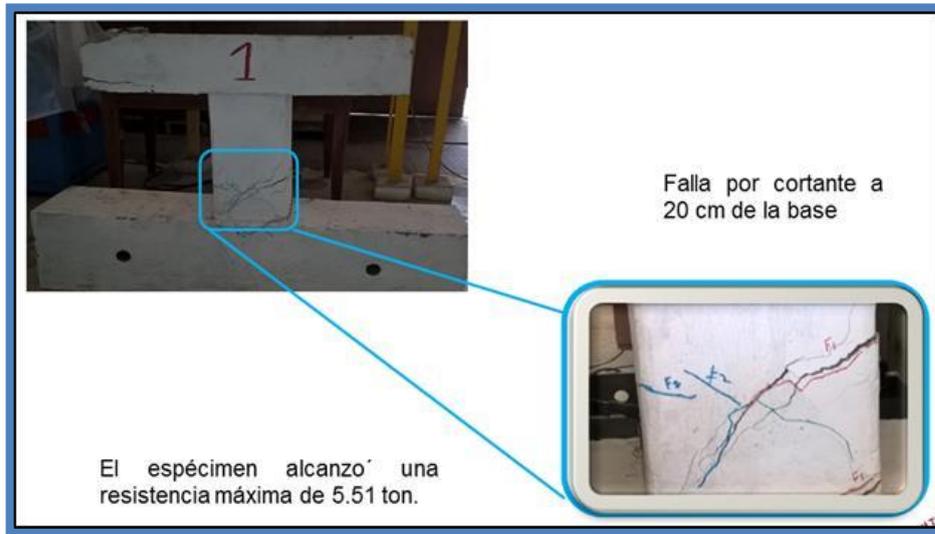


Fig. 5.14.- Falla del espécimen C1 en la fase 3 del ensayo.

Especímen reforzado con CFRP (C-2) Fig. 5.15

En esta fase apareció una fisura (F_3) de 0.05 mm y la fisura que apareció en la unión columna-base en la primera fase aumentó su espesor a 0.4 mm. La fisura que se formó a 22 cm de la base se mantuvo en 0.01 mm. de espesor.

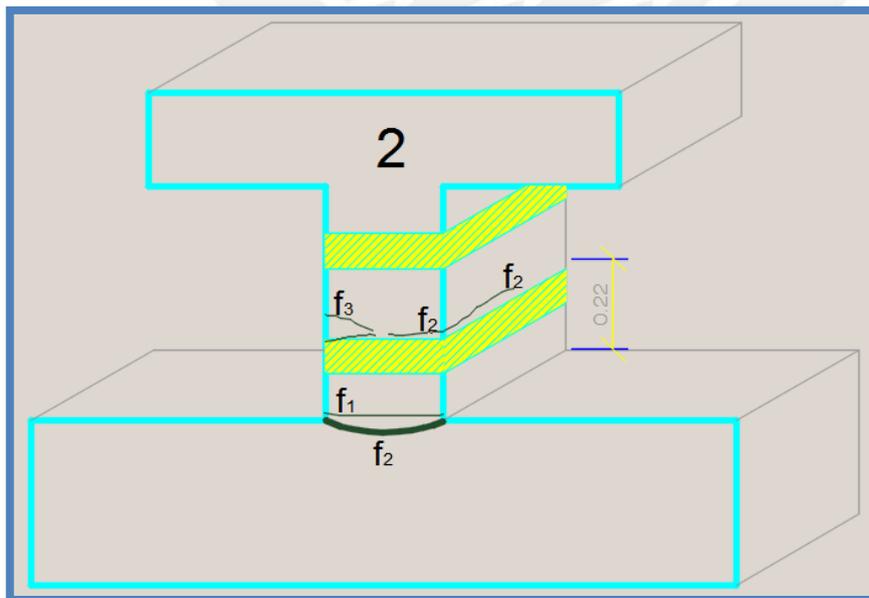


Fig. 5.15.- Fisuras en el espécimen C2 - fase 3 del ensayo.

Espécimen reforzado con GFRP (C-3) Fig. 5.16

En esta fase no aparecieron más fisuras, las existentes de la fase dos aumentaron su grosor a 0.1 mm. Y la fisura de la base de la fase uno, aumento a 0.4 mm.

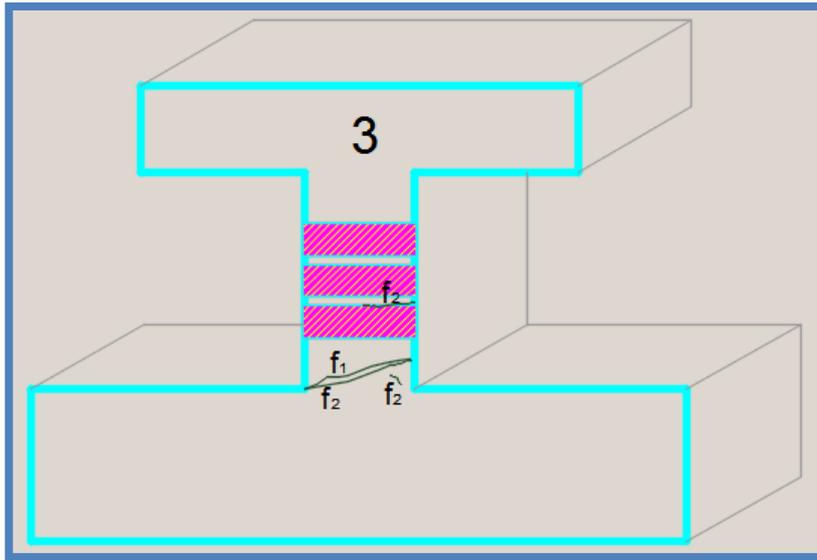


Fig. 5.16.- Fisuras en el espécimen C3 - fase 3 del ensayo.

Fase 4 (F = 10 ton) Fig. 5.17 y Fig. 5.18

Espécimen reforzado con CFRP (C-2)

En esta fase la fisura existente en la unión columna-base se incrementó en más de 0.8 mm. Se produjo la falla en la base por flexión, con una carga lateral de 7.68 ton.

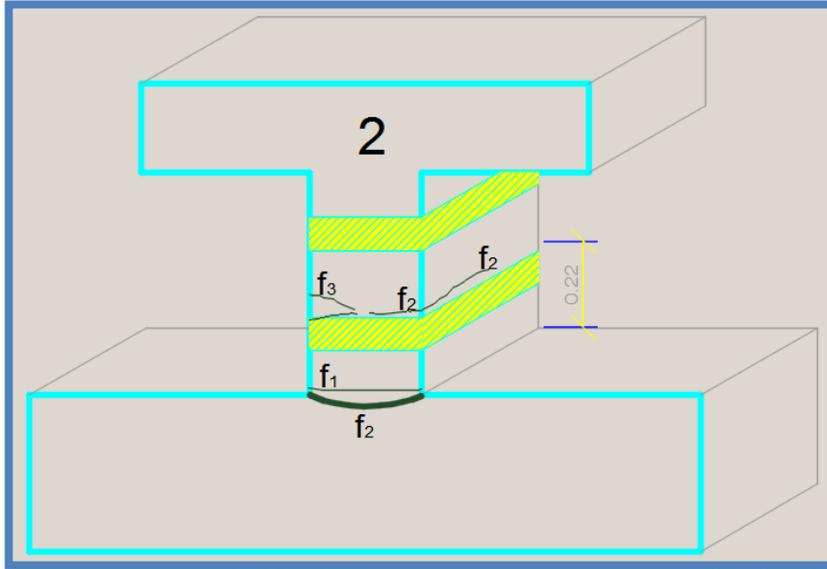


Fig. 5.17.- Fisuras en el espécimen C2 - fase 4 del ensayo.

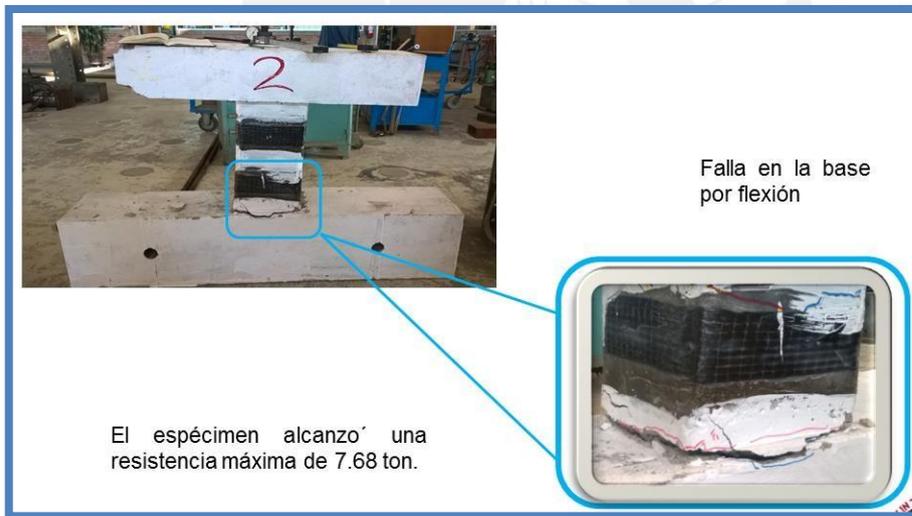


Fig. 5.18.- Falla del espécimen C2 en la fase 4 del ensayo.

Espécimen reforzado con GFRP (C-3) Fig. 5.19 y Fig. 5.20

En esta fase colapsó el espécimen con un carga lateral de 7.95 ton., al pronunciarse la fisura de la base en más de 0.8 mm.

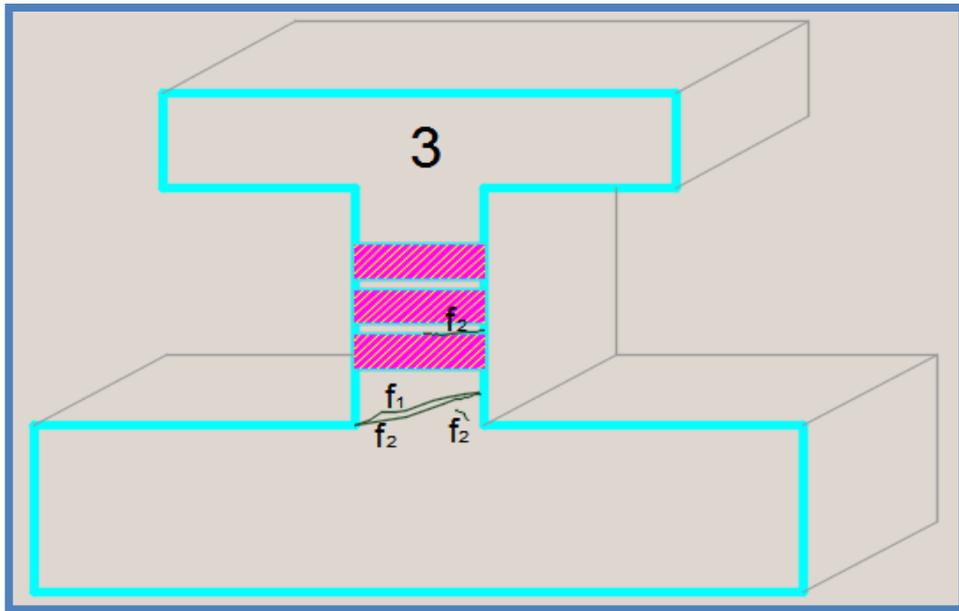


Fig. 5.19.- Fisuras en el espécimen C3 - fase 4 del ensayo

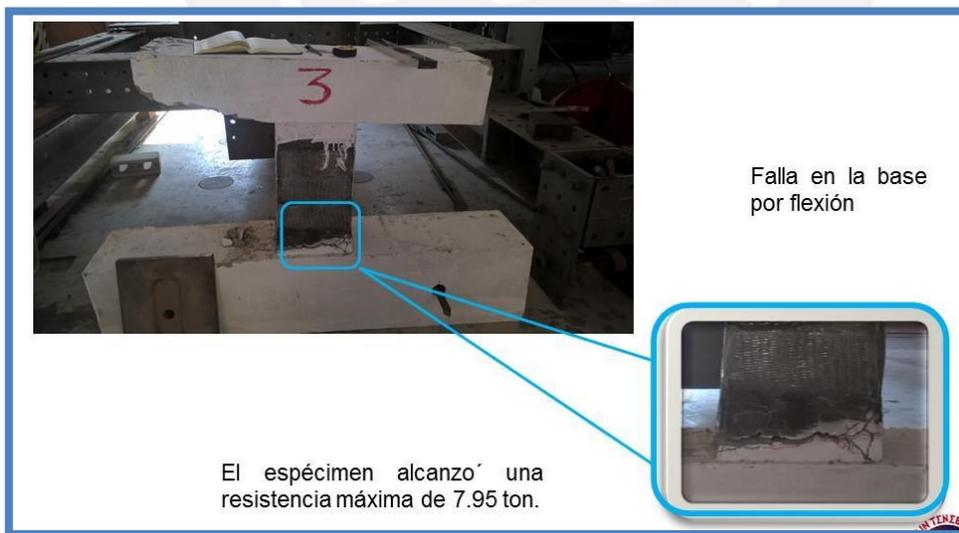


Fig. 5.20.- Falla del espécimen C3 en la fase 4 del ensayo.

CAPITULO 6.- INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS.

En este capítulo se realizó el procesamiento e interpretación de los resultados de los ensayos de los especímenes de columnas cortas.

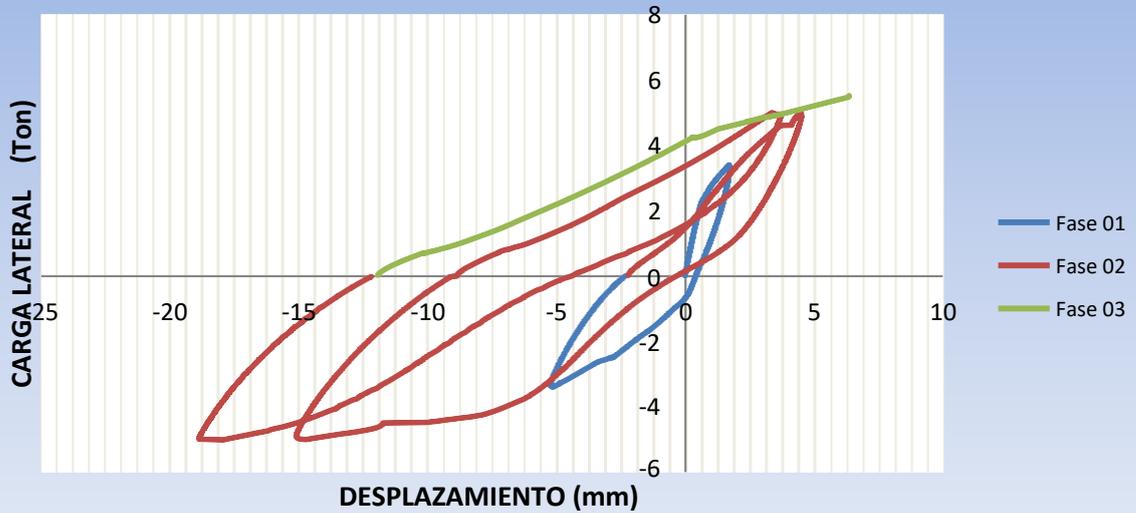
La rigidez del espécimen se fue degradando de forma paulatina y continua conforme se incrementaba la carga. Así mismo se observa que para los primeros ciclos el área entre los lazos histéricos es pequeña, en tanto que para los últimos ciclos el área entre los lazos se hace mayor. Esto es debido a la aparición de grietas que produjeron que el espécimen incursionara en el rango inelástico.

Se observó que durante la aplicación de la carga en la dirección negativa (empujón) sobre el espécimen, se obtuvieron desplazamientos mayores que los registrados durante la aplicación de carga en la dirección positiva (jalón); esto es debido al desprendimiento del recubrimiento en la parte inferior del espécimen debido a la flexión.

6.1.- Diagramas Histeréticos Fuerza Cortante vs. Desplazamiento Lateral

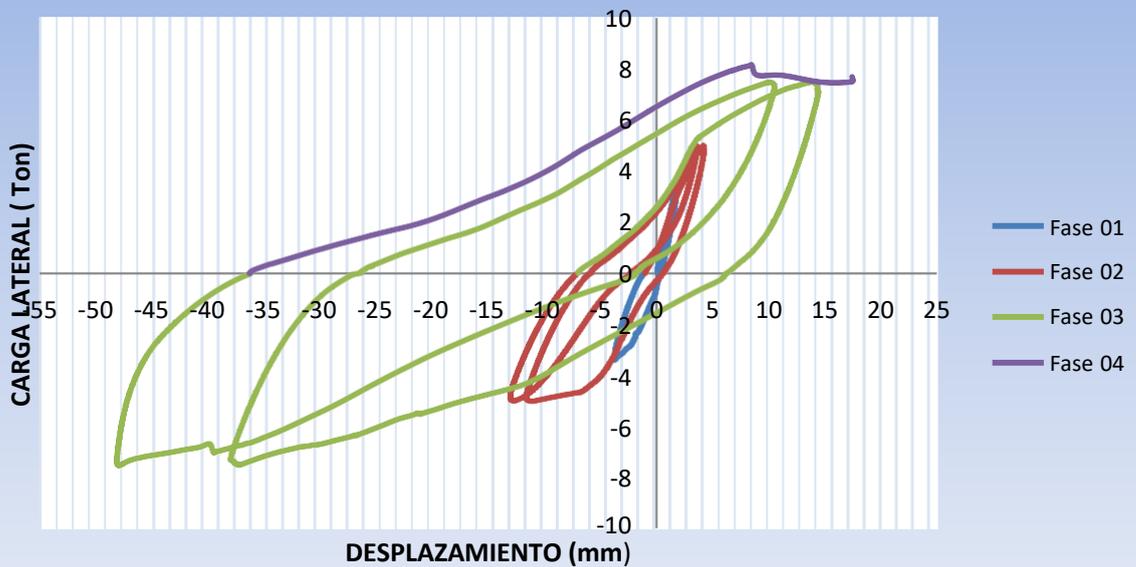
En los diagramas de lazos Histeréticos de los especímenes C1, C2 Y C3 se aprecia la degradación de la rigidez lateral conforme se incrementa la carga horizontal. Esto se puede ver en el cambio de la pendiente de los lazos Histeréticos en cada fase. En las figuras 6.1, 6.2 y 6.3 se presentan los lazos Histeréticos correspondientes a los especímenes C-1, C-2, C-3, respectivamente.

ESPECIMEN C1

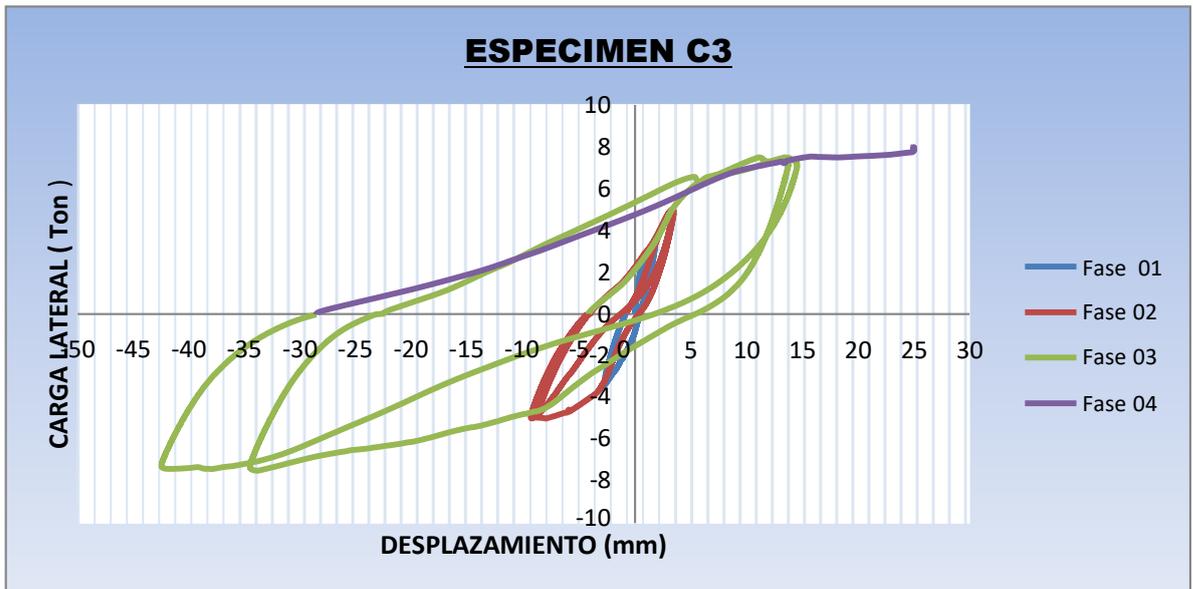


□□□ □ □□ □□□□□□ □ □ □□□□ □□□□□□□□□□ □□□ □ □□□□□□□ □□

ESPECIMEN C2



□□□ □ □□ □□□□□□ □ □ □□□□ □□□□□□□□□□ □□□ □ □□□□□□□ □□



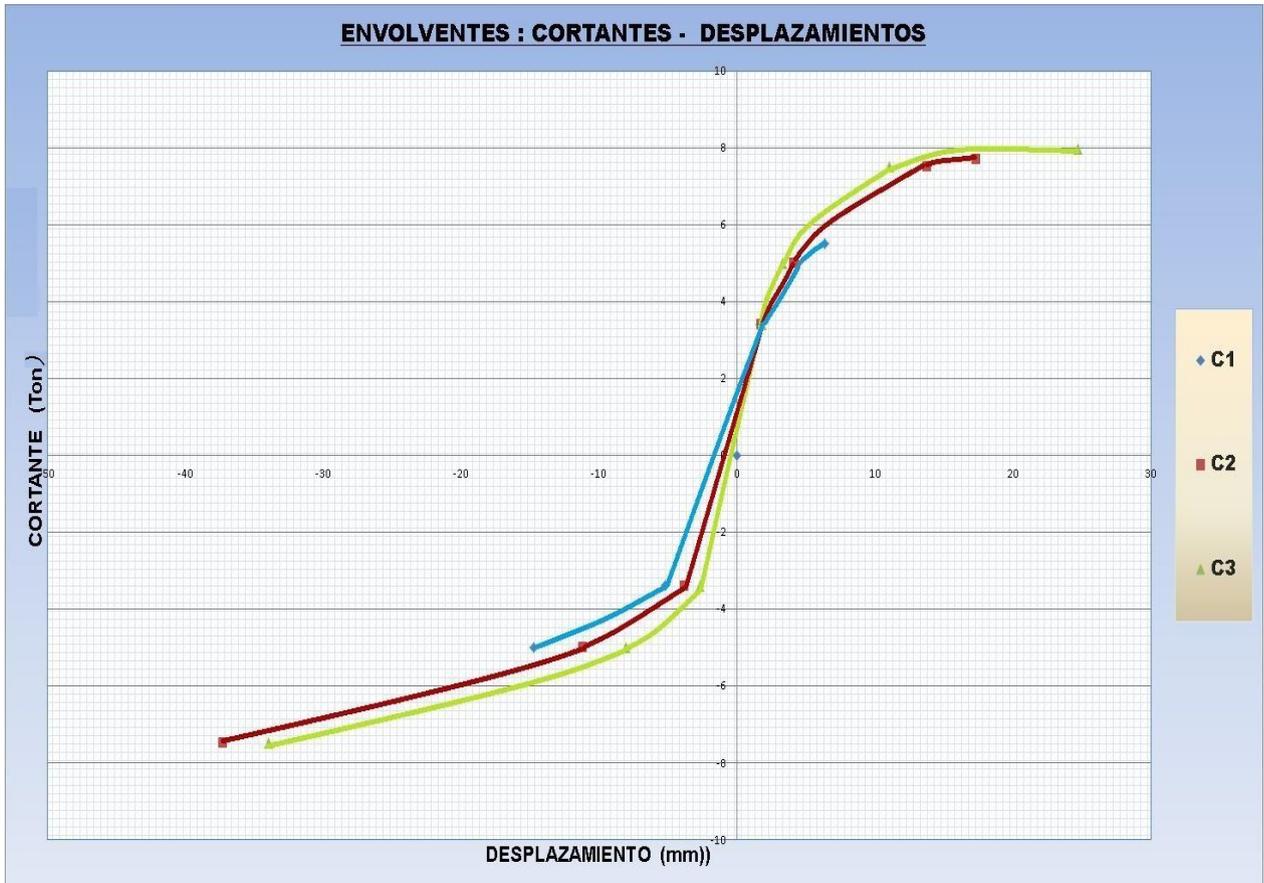
□□□□ □□ □□□□ □□□□□□□□ □□ □□□□□ □□□□□□□□□□□□ □□□□ □□ □□□□□□□□ □□□

6.2. Envoltente fuerza cortante vs. desplazamiento lateral

Para realizar la envoltente de lazos histéreticos, se seleccionaron los datos asociados a la mayor fuerza cortante (positiva y negativa) en cada fase. Los datos fueron registrados en las Tablas N°6.1, N°6.2 y 6.3, para los especímenes C1, C2, y C3 respectivamente. Las envoltentes se muestran en la Fig. N° 6.4.

□□□□□ □□ □□□ □□□□□□□□□□□□□ □□□□□□□ □□□□□□□□ □□ □□□□□□□□ □□□□□□□□ □□□ □□ □□□□ □□□ □□ □□□□□□□□ □□□

ESPECIMEN	C1	V (Ton)	D1 (mm)
FASE 01	E	3.397	1.686
	J	-3.396	-5.168
FASE 02	E	4.994	4.447
	J	-4.993	-14.707
FASE 03	E	5.510	6.340
	J	-----	-----



□□□□ □□ □□□□ □□□□□□ □□□□□□ □□ □□□□□ □□□□□□ □□ □□□□□□□□□□□□

De la tabla 6.4 se puede apreciar que, al incorporar la fibra en el espécimen, ante una misma carga se reduce el desplazamiento en la fase 3, más fisuras implica más desplazamientos en C1.

□□□□ □□ □□□ □□□□□□□□□□ □□ □□□□□□□□□□ □□□ □□□
 □□□□ □□□□ □□□□□□

	CARGA LATERAL	DESPLAZAMIENTO
C1	5.51 Ton	6.34 mm
C2	5.51 Ton	4.33 mm
C3	5.51 Ton	4.09 mm

6.3. Desplazamiento lateral máximo y permisible

La Norma E.030 indica para los elementos de concreto armado una deriva máxima de 0.007. Para nuestro caso específico, la deriva le corresponde un desplazamiento lateral expresado por: $\Delta=0.007 \times h$, donde “h” es la altura libre al eje de la viga superior ($0.50+0.20/2 = 0.60$ m), en consecuencia $\Delta=0.007 \times 600\text{mm}= 4.2$ mm.

El espécimen control (C-1):

En la fase 1 al producirse el jalón, alcanzó un desplazamiento máximo de 5.17 mm, es decir una deriva de 0.0086 mayor que la permitida por la norma E.030

En la fase 2 al producirse el empujón, alcanzo un desplazamiento máximo de 4.45 mm, es decir una deriva de 0.0074 ligeramente mayor que la permitida por la norma E.030, tal como se aprecia en la tabla N° 6.1.

El espécimen reforzado con banda de fibra de carbono (C-2):

Recién en la fase 2, en el jalón, alcanzó un desplazamiento máximo de 11.16 mm y en la fase 3, en el empujón, se alcanza el máximo desplazamiento de 13.80 mm en esta fase, tal como se aprecia en la tabla N° 6.2.

El espécimen reforzado con banda de fibra de vidrio (C-3):

Recién en la fase 2, en el jalón, alcanzó un desplazamiento máximo de 8.03 mm y en la fase 3, en el empujón, se alcanza un desplazamiento máximo de 11.07 mm en esta fase, tal como se aprecia en la tabla N° 6.3.

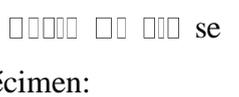
En  se muestra los máximos desplazamientos presentados en el espécimen:

Tabla 6.6. Desplazamiento y fuerza lateral de los especímenes.

ESPECIMEN	DESPLAZAMIENTO (mm)	FUERZA LATERAL (ton)
C-1 EMPUJON JALON	6.340 -14.707	5.510 -4.993
C-2 EMPUJON JALON	17.371 -37.271	7.680 -7.504
C-3 EMPUJON JALON	24.726 -33.965	7.958 -7.489

6.4. Rigidez lateral inicial (Fig. 6.5 a Fig. 6.10)

Para el cálculo de la rigidez lateral es necesario el uso de la gráfica Carga Lateral versus Desplazamiento registrado por el LVDT D1 en una etapa completamente elástica. Por ello que se utilizó la información obtenida en la Fase 1, antes que se presenten fisuras en los especímenes.

Como se puede apreciar en la tabla N° 6.6 la rigidez experimental del espécimen control C1 es de 3 ton/mm, mientras que la del espécimen reforzado con dos bandas de fibra de carbono C2 es de 3.73 ton/mm, la rigidez del espécimen reforzado con tres bandas de fibra de vidrio C3 es de 4 ton/mm, incrementándose la rigidez en un porcentaje de 24.4% y 33.3% respectivamente.

La rigidez experimental del espécimen control fue 25.67% menor que la rigidez determinada del análisis teórico (3.77 ton/ mm (acápite 3.5.1)).

Diagrama de Fuerza Cortante vs. Desplazamiento para Fase 01

		V 1 (Ton)	D1 (mm)	V 2 (Ton)	D2 (mm)	ΔV (Ton)	ΔD (mm)	$K = V/D$ (Ton/mm)
Rigidez inicial	C1	1.91	0.5	2.060	0.550	0.150	0.050	3.00
	C2	1.918	0.955	2.310	1.060	0.392	0.105	3.73
	C3	1.61	0.36	1.930	0.440	0.320	0.080	4.00

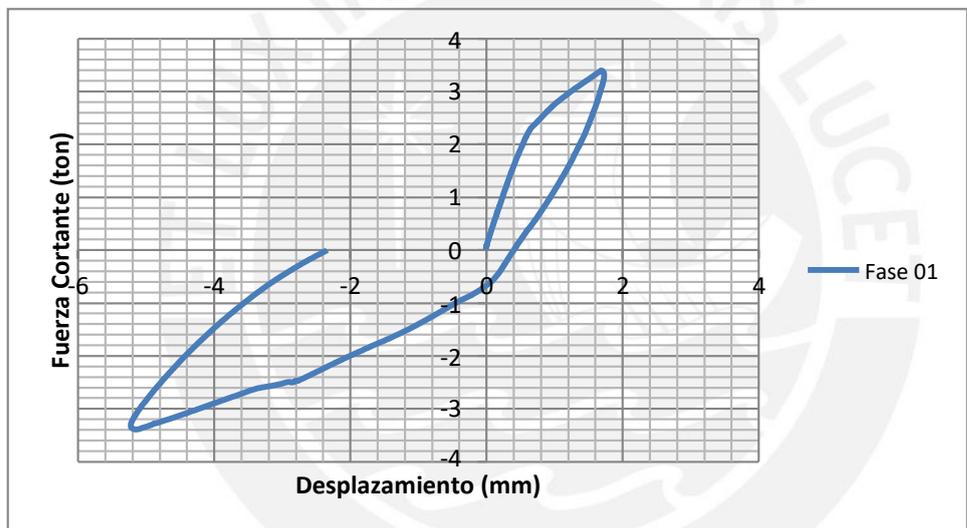


Diagrama de Fuerza Cortante vs. Desplazamiento para Fase 01

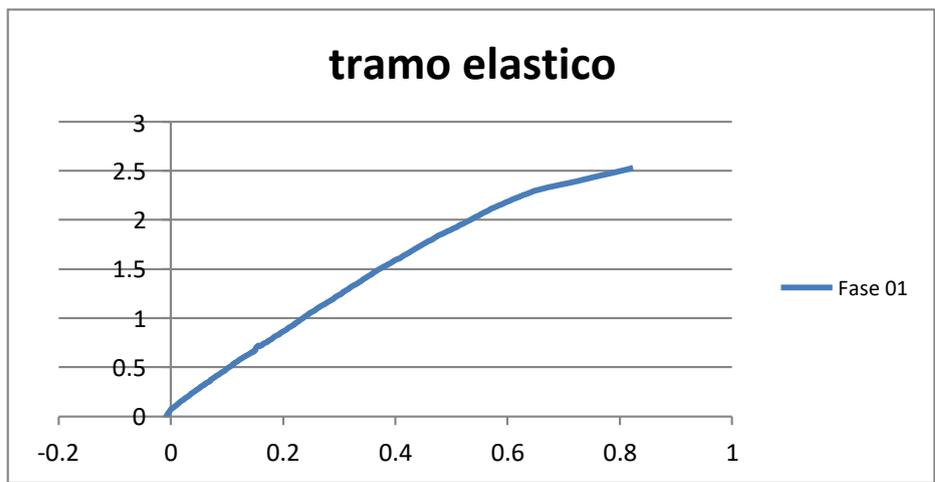
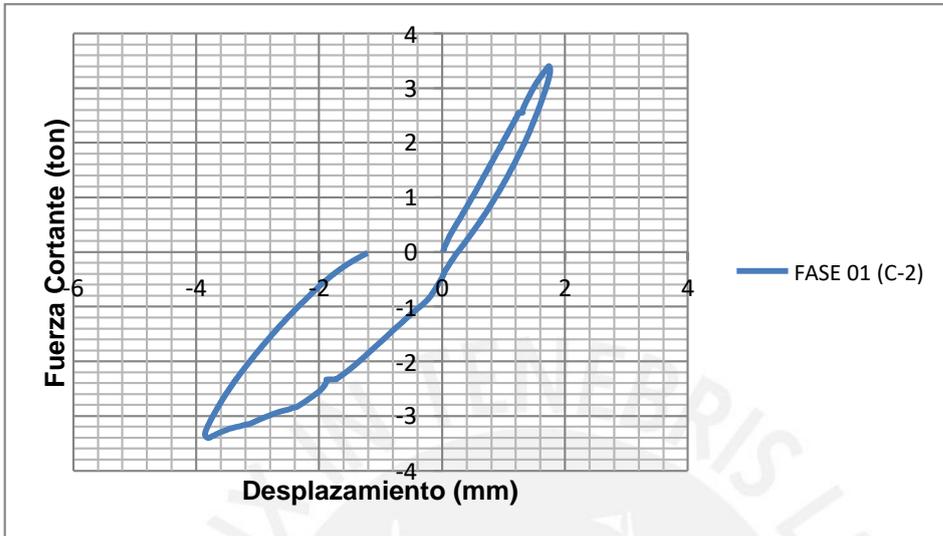
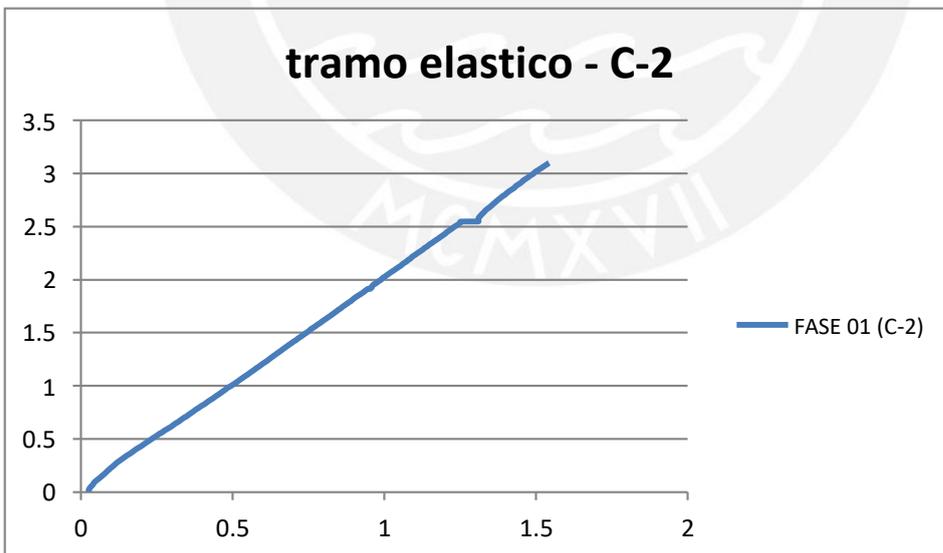


Diagrama de Fuerza Cortante vs. Desplazamiento para Fase 01



ET LUMEN ET VERITAS LUCET



ET LUMEN ET VERITAS LUCET

6.5.-Resistencia a la tracción por flexión.

La primera fisura de tracción por flexión del espécimen control (C1), se observó en la fase 1 de ensayo, para una fuerza de 1.40 tonf, cuyo valor fue 12.5% menor que el valor teórico determinado en el capítulo 3 (1.60 tonf).

Para el espécimen reforzado con dos bandas de fibra de carbono (C2), la fuerza asociada a la primera fisura fue de 1.8 tonf, se presentó en la fase 1, valor que resultó 12.5% mayor al valor determinado en el análisis teórico (1.6 tonf).

Para el espécimen reforzado con tres bandas de fibra de vidrio (C3), la fuerza asociada a la primera fisura fue de 2.1 tonf, se presentó en la fase 1, valor que resultó 31.25% mayor al valor determinado en el análisis teórico (1.6 tonf).

6.6.-Resistencia ultima de los especímenes con refuerzos externos.

Los especímenes reforzados con dos bandas de fibra de carbono (C2) y con tres bandas de fibra de vidrio (C3), presentaron una resistencia ultima al cortante de 7.68 ton y 7.95 ton respectivamente

La resistencia cortante asociada al mecanismo de falla por flexión es de 7.16 ton, menor que las resistencias ultimas de los especímenes C2 y C3, por lo que la falla en estos especímenes reforzados seria por flexión.

CAPITULO 7.- CONCLUSIONES

Este estudio presenta los resultados de una investigación experimental sobre el comportamiento mecánico de columnas cortas reforzadas con FRP de carbono y de vidrio, sometidas a carga lateral cíclica. Con base en los resultados de esta investigación experimental se puede sacar las siguientes conclusiones:

1. En los lazos histeréticos se puede observar cómo la rigidez de los especímenes se fue degradando de forma paulatina y continua conforme se incrementaba la carga lateral.
2. La capacidad del espécimen de control (C1) fue de 5.51 toneladas, la del espécimen reforzado con dos bandas de fibra de carbono (C2) fue de 7.68 toneladas, en tanto que la del espécimen reforzado con tres bandas de fibra de vidrio (C3) fue de 7.95 toneladas.
3. El refuerzo con bandas CFRP y GFRP resultó efectivo al incrementar la resistencia a carga lateral en un 39% y 44% respectivamente.
4. El refuerzo controló el grosor de las grietas diagonales. Así, por ejemplo, para la deriva máxima (0.007), la grieta diagonal en el espécimen C1 fue 0.8 mm, mientras que en los especímenes reforzados fue de 0.2 mm.
5. Para el desplazamiento máximo permitido (4.2 mm), el refuerzo en el espécimen C2 aumentó su resistencia respecto al espécimen de control (C1) en 9%, y el espécimen C3 aumentó su resistencia respecto al espécimen de control (C1) en 11 %.
6. En el espécimen sin reforzar (C1), se produjo una grieta diagonal a 20 cm de la base lo cual produjo la falla por flexo-cortante, mientras que en los especímenes reforzados, el FRP controló el grosor de las grietas diagonales y la falla que se produjo en ambos especímenes reforzados con FRP fue falla en la base por flexión, que es mucho más dúctil.

7. El refuerzo con fibra de carbono proporcionó una capacidad de desplazamiento lateral superior al del espécimen sin refuerzo externo (C1). Se tiene que para el espécimen sin refuerzo (C1), el desplazamiento lateral ante la carga máxima de 5.51 toneladas, fue de 6.34 mm, mientras que el del espécimen reforzado con CFRP (C2), ante la carga máxima de 7.68 toneladas, su desplazamiento fue de 17.37 mm y del espécimen reforzado GFRP (C3), ante la carga máxima de 7.95 toneladas, su desplazamiento fue de 24.73 mm. Esto significa que los refuerzos de FRP, proporcionaron un incremento en la capacidad de desplazamiento lateral y en la resistencia, debido al confinamiento que le suministró a las columnas cortas.
8. El espécimen en todos los casos se deformó como las columnas cortas de un último nivel de una edificación, con curvatura simple, debido a que solo estaba empotrado en la base, en general el comportamiento fue como un voladizo.
9. El que mejor resultado presentó fue el espécimen reforzado con tres bandas de fibra de vidrio (C3), a pesar que es el equivalente teórico al espécimen reforzado con dos bandas de fibra de carbono (C2), pues incrementó la resistencia a carga lateral en un 3.5% (C3 vs C2). Además, el incremento a la capacidad de desplazamiento lateral en el espécimen C3 fue mayor en un 42.4 % que en el C2.
10. Las columnas cortas son vulnerables ante carga lateral, esta tesis ha servido para mostrar que los refuerzos externos con bandas de CFRP y GFRP, son efectivos en aumentar la resistencia al corte (resistencia lateral) y la capacidad de deformación.

BIBLIOGRAFIA

- [1] San Bartolomé A., Rivera C., Durán M., Muñoz A., Quiun D.
2000 “Estudio experimental de una técnica de reforzamiento para edificaciones existentes con problemas de columna corta. Proyecto SENCICO – PUCP.”
- [2] Aguiar R., Garzón M., Miranda C., Sosa D., Trujillo R.
2010 “Aisladores elastoméricos en estructuras con columna corta”, XVI Jornadas Nacionales de Estadística e Informática. Escuela Superior Politécnica del Litoral, 21 p., Guayaquil.
- [3] San Bartolomé A., Coronel C.
2008 “Reparación y reforzamiento de un muro de albañilería confinada mediante fibra de carbono”. Tesis de licenciatura en ciencias e ingeniería con mención en ingeniería civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [4] Contreras J.
2011 “Uso de fibras de carbono como reforzamiento a corte en vigas de concreto reforzado”. Tesis de licenciatura en ciencias e ingeniería con mención en ingeniería civil. Bogotá: Universidad de la Salle.
- [5] Fyfe Co LLC.
2012 Hoja técnica de Sistema Tyfo® SCH-41. San Diego (California).
- [6] Fyfe Co LLC.
2012 Hoja técnica de Sistema Tyfo® SEH-51^a. San Diego (California).
- [7] American Concrete Institute, Inc.
2008 440-2R-08: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. Estados Unidos.

[8] Ottazzi G.

2014 “Propiedades mecánicas del concreto”. Apuntes del curso concreto armado I.

Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, pp. 23-45.

[9] Pasquel E.

1992 “Propiedades principales del concreto”. Tópicos de tecnología del concreto en el

Perú. Lima: Colección del Ingeniero Civil, pp. 142.

[10] Ottazzi G.

2014 “Acero de refuerzo”. Apuntes del curso concreto armado I. Lima: Pontificia

Universidad Católica del Perú, pp. 57.

