

REFORZAMIENTO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS CON FIBRA DE VIDRIO

Roberto Aguiar Falconí Dr. Ing.¹, Pablo Caiza Sánchez Dr. Ing.², Diego Cevallos Oña³

1 Universidad de las fuerzas Armadas - ESPE, Ecuador, rraguiar@espe.edu.ec

2 Universidad de las fuerzas Armadas - ESPE, Ecuador, pecaiza1@espe.edu.ec

3 Universidad de las fuerzas Armadas - ESPE, Ecuador, diego.pauldc@gmail.com

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 Clave: 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.

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

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

2. MATERIALES Y MÉTODOS

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. En el caso de el trabajo de tesis para realizar la investigación se utilizó fibra de vidrio GFRP SikaWrap Hex 100g, como se muestra en la Fig. 1 y además fibra de vidrio tradicional como se muestra en la Fig. 2.



Fig.1: SikaWrap Hex 100G

El proceso de instalación de la fibra de vidrio estructural se presenta de manera más detallada en el enlace que se muestra en la bibliografía [1]. De una manera detallada se puede comentar que para usar este tipo de material se debe tener en cuenta las recomendaciones que sugiere el proveedor, como el uso de gafas, guantes etc, para la preparación de la resina se tiene dos componentes el A y el B El procedimiento de uso de la resina es el siguiente: Se empieza pre mezclando el componente A, se debe premezclar el componente A 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. 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 Previamente a la impregnación de la resina se debe limpiar las impurezas, con la ayuda de una brocha se procede a impregnar el elemento. 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. 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. 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.



Fig. 2: 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/m² esta fibra tiene la particularidad de no tener una dirección establecida a diferencia de la fibra SikaWrap. 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 I se detalla la cantidad usada de resina que se usó para realizar los ensayos.

Tabla I: Dosificación de la resina

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

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.

En la redacción de la tesis se muestra varios modelos de confinamiento de hormigón, de los cuales en el presente artículo se va a referir sólo a los modelos que se usaron en la parte práctica del proyecto de tesis.

2.1 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. 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, 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) [2]. 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.

La envolvente viene dada por la siguiente expresión:

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

2.2 MODELO ACI 440.2R-08

En la Fig.3 se observa la curva esfuerzo deformación con línea continua del hormigón confinado con FRP que considera el ACI 440.2R-08 [3]. 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.

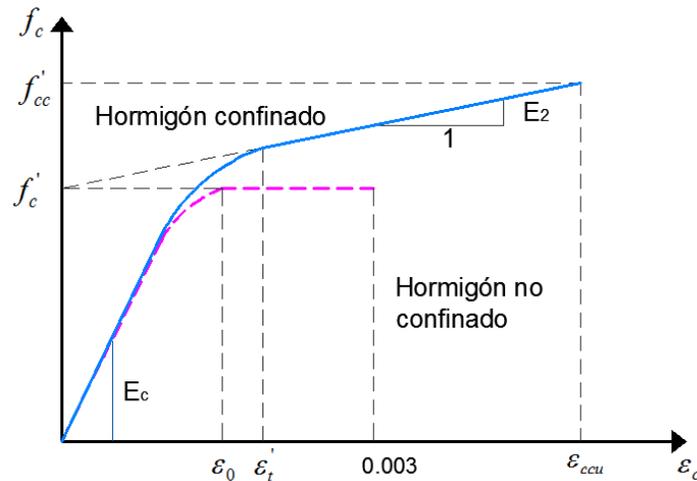


Fig.3: Modelo de ACI 440.2R-08 para hormigón confinado con FRP

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

$$f'_{cc} = f'_c + \varphi \cdot 3.3 \cdot k_a \cdot f'_l \quad (2)$$

Para la dosificación del hormigón se usó el método recomendado por el ACI 211 [3].

2.3 ENSAYOS A COMPRESIÓN DE HORMIGÓN SIN FIBRA

En base a la norma (ASTM C469, 2010) [4] Método de ensayo. Determinación del módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson del concreto a compresión, se calcula la deformación 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. 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 Fig.4 se puede ver los ciclos de carga y descarga que ese realizaron para obtener la curva esfuerzo – deformación, para obtener la curva envolvente, se toma los valores máximos de cada iteración.

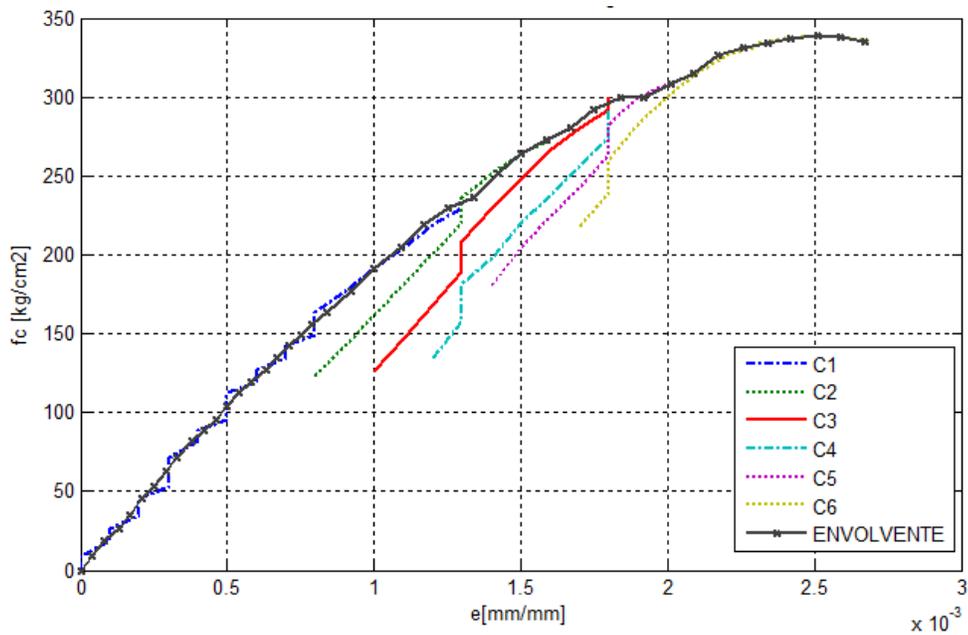


Fig.4: Iteraciones para obtener la curva esfuerzo deformación del hormigón sin confinar

3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

3.1 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DEL HORMIGÓN SIN CONFINAR

Para obtener la curva que se muestra en la Fig.5, se tuvo que realizar varias iteraciones, 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 $\varepsilon_0 = 0.0026073$

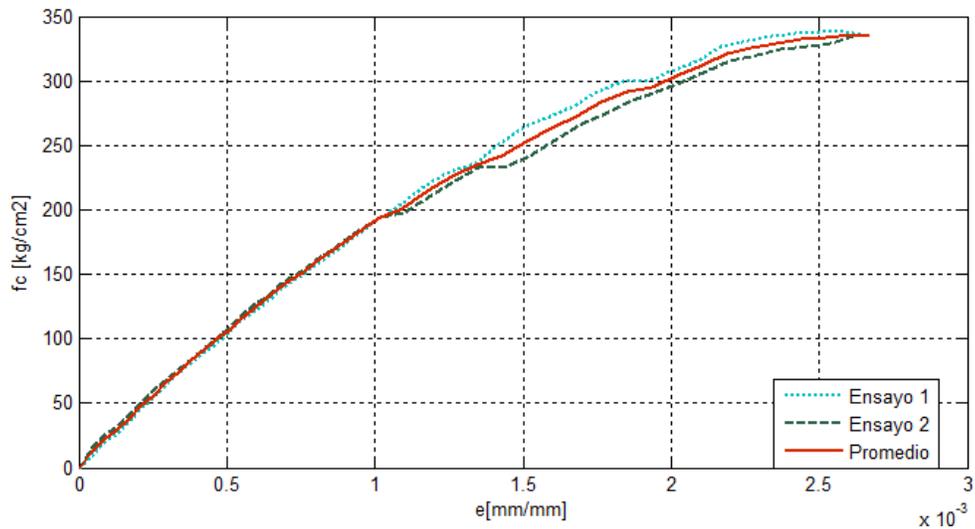


Figura 5: Curvas Esfuerzo – deformación del hormigón sin fibra

3.2 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 6.

De esta curva se obtiene los siguientes datos promedio, $f_{c\max} = 406.86 \text{ kg/cm}^2$ y una deformación final $\varepsilon_{ccu} = 0.009545752$

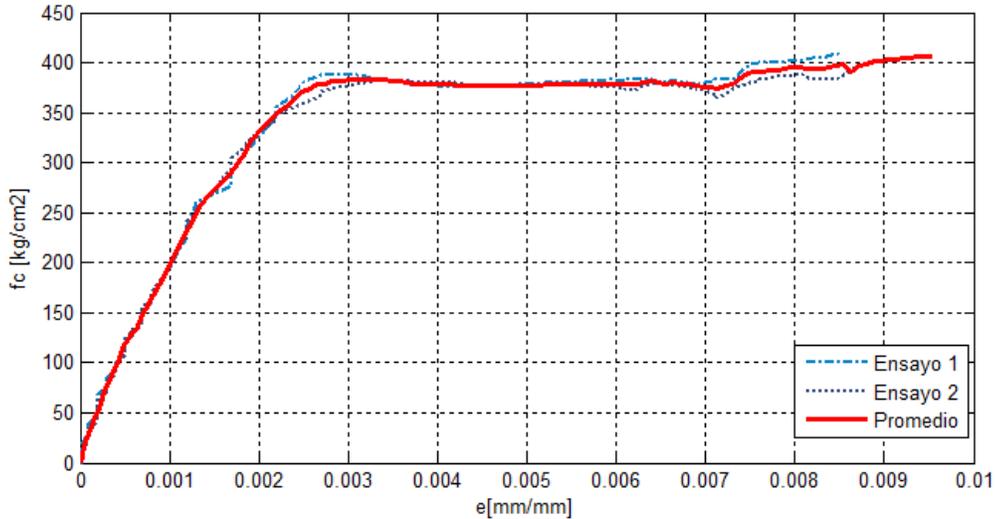


Fig. 6: Curvas Esfuerzo – deformación del hormigón confinado con SikaWrap 100G

3.3 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A HORMIGÓN CONFINADO CON UNA, DOS Y TRES CAPAS DE FIBRA DE VIDRIO TRADICIONAL

De la Fig. 7 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 $\varepsilon_{ccu} = 0.005347$.

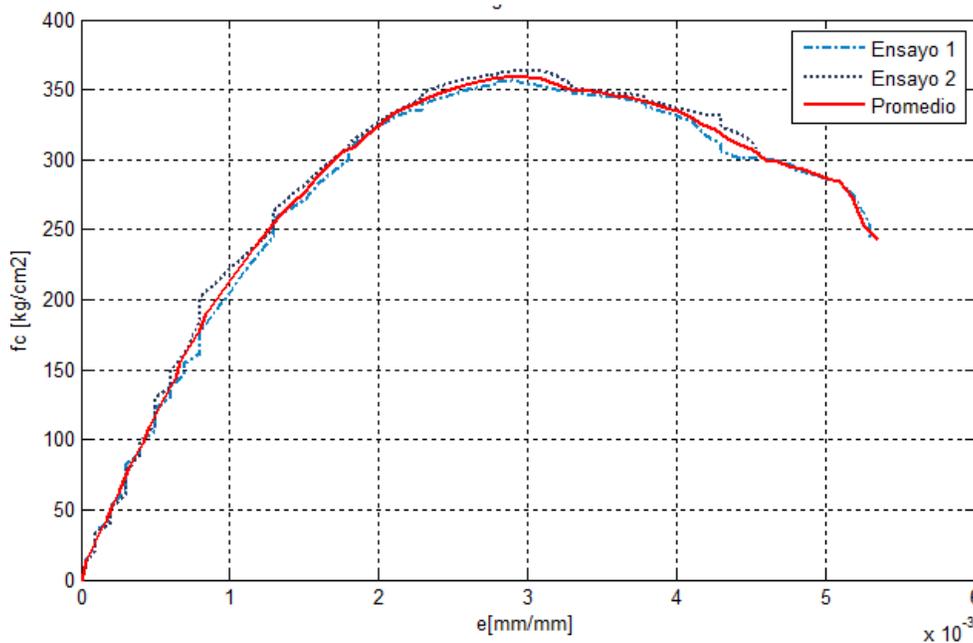


Fig. 7: Curvas Esfuerzo – deformación del hormigón confinado con una capa de fibra de vidrio tradicional

De la Fig. 8 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 $\varepsilon_{ccu} = 0.00746125$.

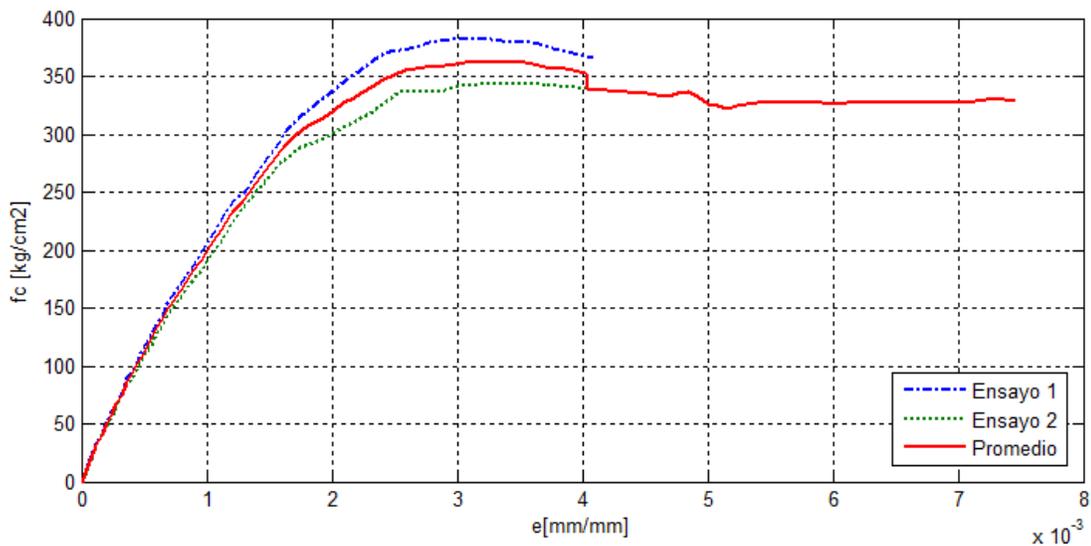


Fig. 8: Curvas Esfuerzo – deformación del hormigón confinado con dos capas de fibra de vidrio tradicional

Como se puede observar en la Fig. 9 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 $\varepsilon_{ccu} = 0.008359494$.

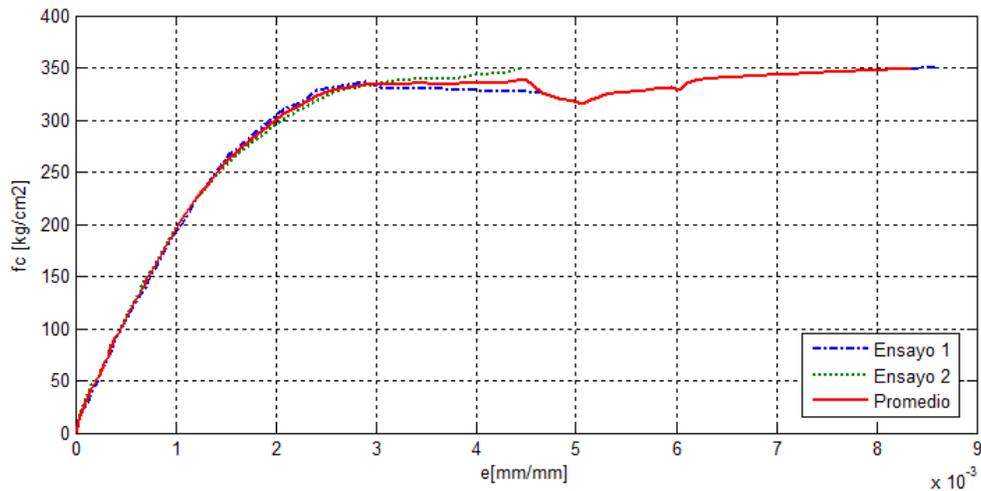


Fig. 9: Curvas Esfuerzo – deformación del hormigón confinado con tres capas de fibra de vidrio tradicional

4. RESULTADOS

4.1 MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN (SIN CONFINAR Y CONFINADO)

En base al Nec 11, [6] a los datos obtenidos en el laboratorio y a la ecuación del ACI [7] se calcula el módulo de elasticidad en base a los ensayos realizados, mencionados anteriormente los resultados se puede observar en la Tabla II.

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

Ecuación	Valor Calculado [Kg/cm2]
$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.000050}$	203056
$E_c = 1.15 \cdot \sqrt[3]{E_a} \cdot \sqrt{f_c}$	202508
$E_c = 15000 \sqrt{f_c}$	275052

En base a los resultados obtenidos en laboratorio se obtiene los módulos de elasticidad del hormigón confinado con fibra de vidrio tradicional y fibra de vidrio SikaWrap Hex 100g.

Tabla II: Valores del Módulo de Elasticidad del Hormigón confinado

	SikaWrap	Una capa	Dos capas	Tres capas
$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.000050}$	214729	225275	216682	202512

4.2 ANÁLISIS DE LAS CURVAS ESFUERZO DEFORMACIÓN CON FIBRA DE VIDRIO Y COMPARACIÓN CON MODELO ACI 440.2R-08

Según las ecuaciones del ACI 440 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 Fig.10:

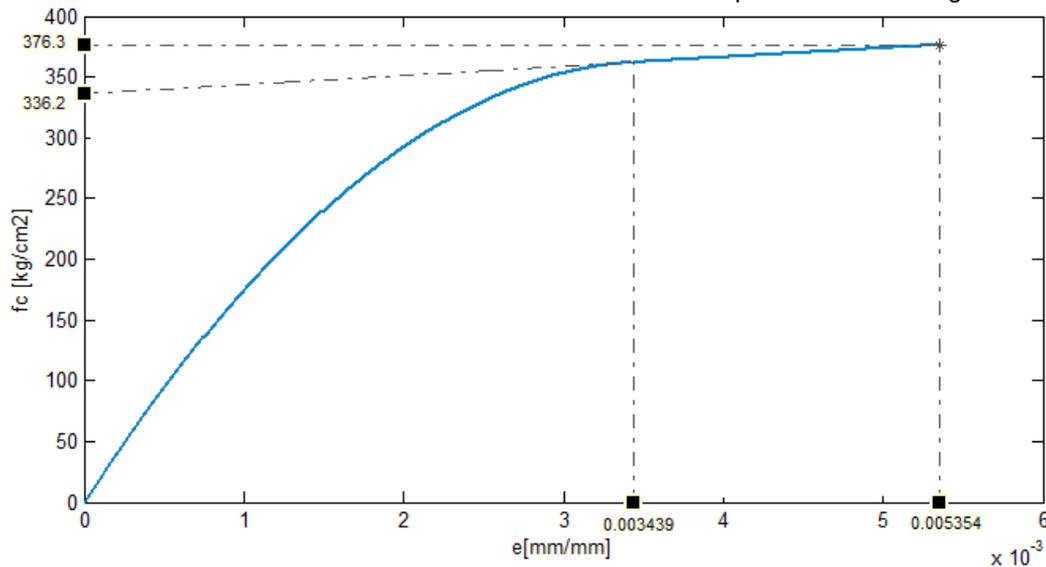


Fig.10: Curva Esfuerzo – deformación analítica del Modelo ACI 440.2R-08 con datos de proveedor

Al comparar las curvas obtenidas analíticamente como la que se obtuvo mediante los ensayos se puede ver la Fig. 11

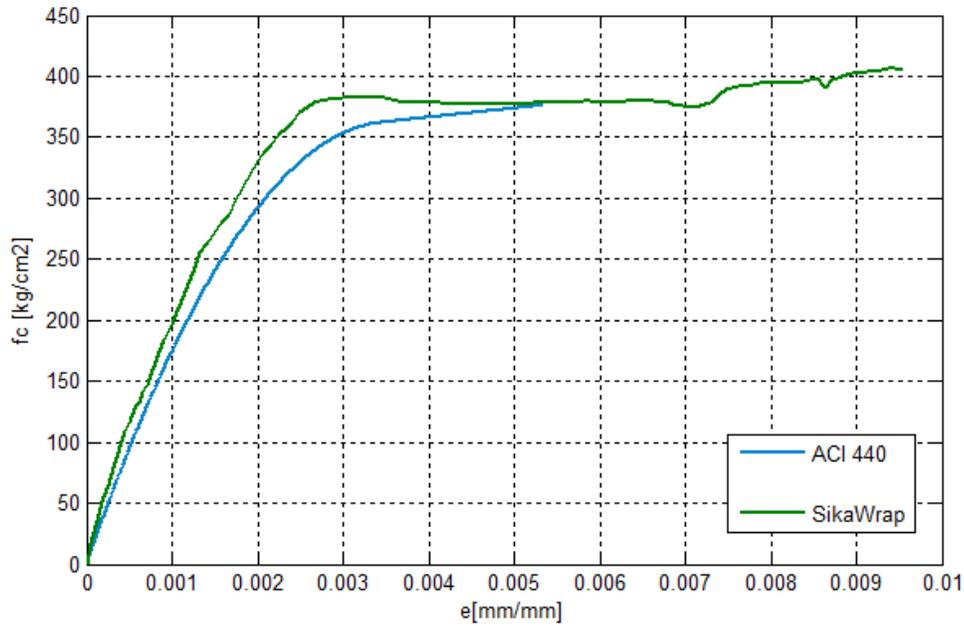


Fig.11: Curvas Esfuerzo – deformación Modelo ACI y experimental

De igual manera se compara las curvas obtenidas a los cilindros confinados con fibra de vidrio tradicional son una y dos capas de desprecia el resultado obtenido con tres capas. Los resultados se observan en las figuras 12 y 13

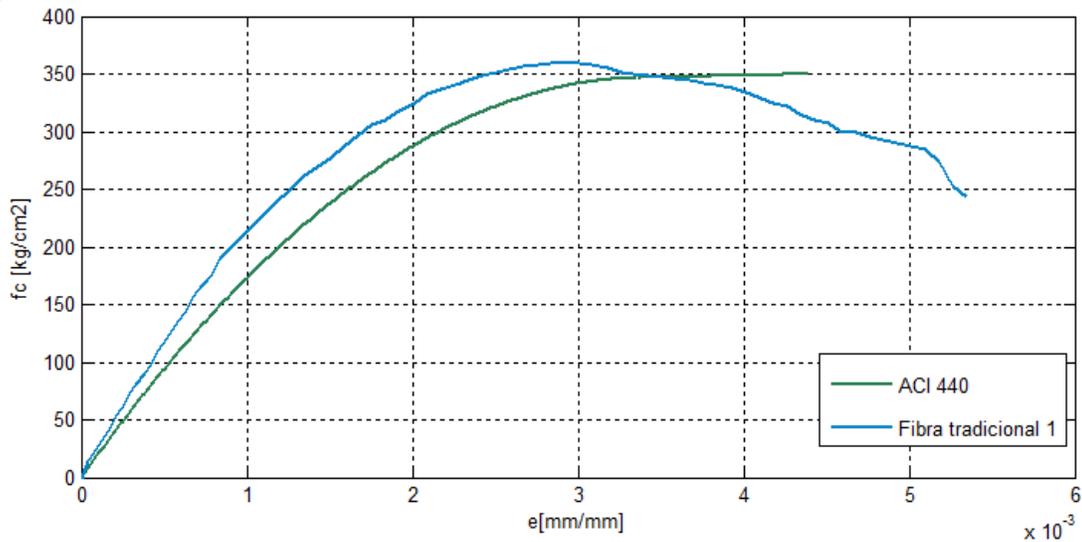


Fig.12: Curvas esfuerzo – deformación del hormigón confinado con una capa de fibra de vidrio tradicional

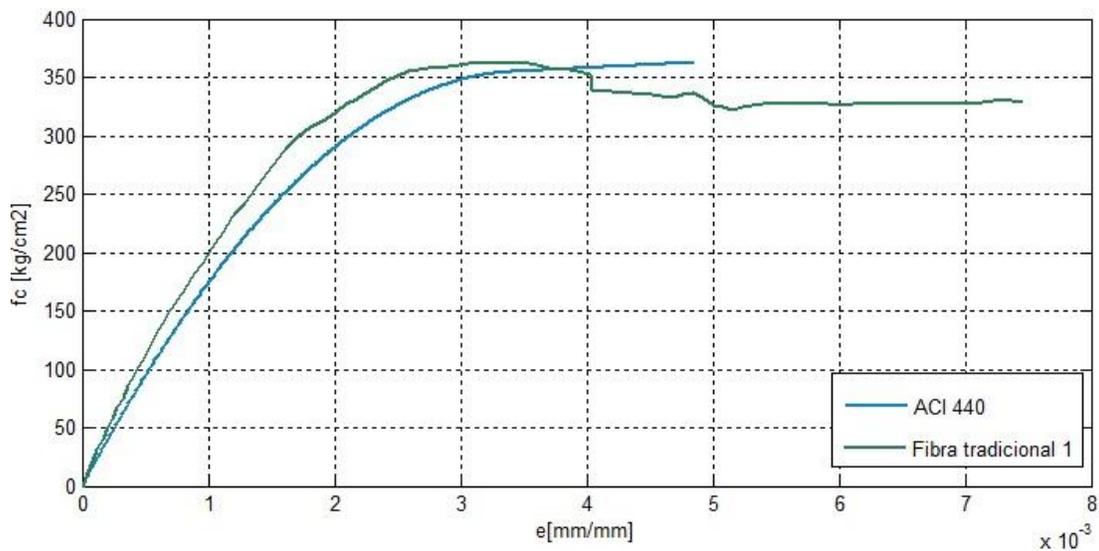


Fig.13: Curvas esfuerzo – deformación del hormigón confinado con dos capas de fibra de vidrio tradicional

4.3 COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS FIBRAS DE VIDRIO GFRP Y TRADICIONAL

Como se puede observar en la Fig. 14, 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.

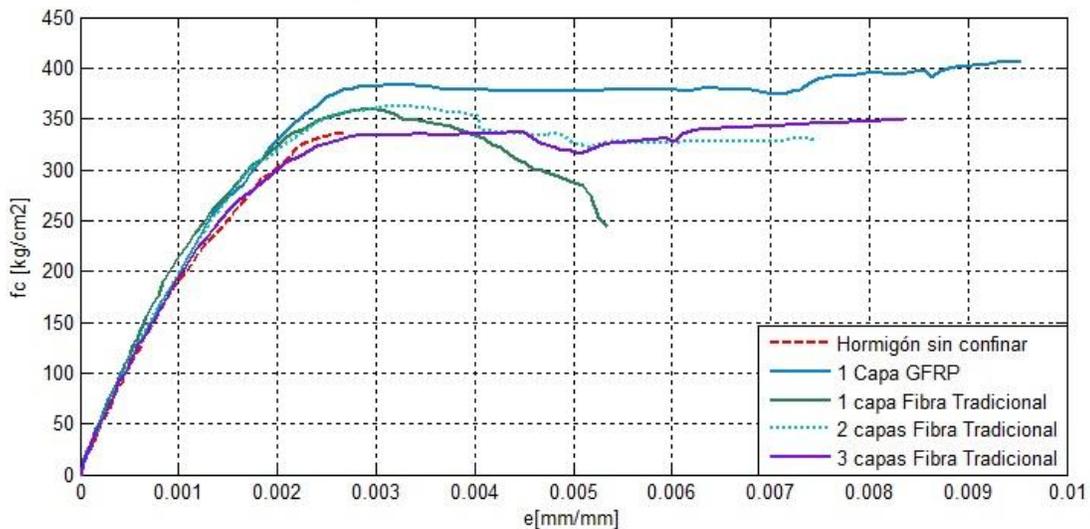


Fig. 14: Curvas esfuerzo – deformación obtenidas en laboratorio

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

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. 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 elasti-

cidad 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. 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.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- D. Cevallos, «YouTube,» 17 07 2013. [En línea]. Available:
1] <http://www.youtube.com/watch?v=iRAqgmKXxlU&feature=youtu.be>.
- J. L. Chambi Chuquichambi, *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: Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.
2]
- ACI Committee 440, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, 2002.
3]
- ACI 211.1-91, *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete (Reapproved 2002)*., American Concrete Institute, 2002.
4]
- ASTM C469, *Método de ensayo. Determinación del módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson del concreto a compresión*, ASTM International, 2010.
5]
- NEC 11, *Capítulo 1 CARGAS Y MATERIALES*, 2011.
6]
- ACI Committee 318, *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-05) y Comentario (ACI 318SR-05)*, 2004.
7]