

## REFUERZO Y REPARACION DE VIGAS DE FUNDACION DE HORMIGÓN ARMADO CON LÁMINAS DE MATERIALES COMPUESTOS

Patricia N. Domínguez<sup>a</sup>, Claudio J. Orbanich<sup>a,b</sup>, Néstor F. Ortega<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur  
Av. Alem 1253 8000 Bahía Blanca, Argentina, [nfortega@criba.edu.ar](mailto:nfortega@criba.edu.ar)*

<sup>b</sup> *Becario CONICET*

**Palabras Clave:** viga de fundación, hormigón armado, fisuras, reparación, refuerzo, FRP (Fiber Reinforced Plastic)

**Resumen.** Desde hace varios años, los materiales compuestos, progresivamente, están reemplazando a las láminas de acero, en el refuerzo de estructuras deterioradas o que necesitan, por cambio de uso o intensificación del mismo, un aumento de resistencia. Está largamente probado que la adición de laminados de resinas epoxi con fibras a estructuras, tales como vigas y losas, aumenta considerablemente la resistencia a flexión y corte de las mismas.

El paso fundamental en el análisis de estructuras reforzadas con materiales compuestos, es comprender el comportamiento individual de cada uno de los materiales que intervienen y su interacción con los restantes. En este caso, además de los dos componentes básicos que conforman el hormigón armado, entran en juego dos materiales más, las láminas de material compuesto y el adhesivo utilizado para pegarlas.

En el presente trabajo se analiza el comportamiento de una viga de fundación de hormigón armado, a través del estudio de la variación de su capacidad resistente y de sus deflexiones. Se comparan dichos parámetros para la viga sana, fisurada y reparada con la mencionada técnica.

La modelación numérica se realizó por el Método de los Elementos Finitos, con el programa ABAQUS 6.7. Se utilizaron modelos no lineales para el hormigón y el suelo y un modelo de comportamiento lineal para el material compuesto.

## 1 INTRODUCCION

Desde mediados del siglo XIX, el hormigón armado ha sido, por sus nobles características, el material preferido para construcciones importantes tales como edificios, puentes, presas, tanques, etc. Tanto el paso de los años, como la agresión del medio ambiente han deteriorado muchas de esas estructuras, las que actualmente necesitan reparación y/o reacondicionamiento para mantener los servicios para las cuales fueron proyectadas. Paralelamente, muchas estructuras en uso, se ven requeridas constantemente por cambios en las condiciones de funcionamiento, tal es el caso, entre otros, de puentes con aumento de las cargas vehiculares o edificios que cambian de prestación. En estos casos, se suele presentar la necesidad de reforzar dichas estructuras a fin de que puedan soportar las nuevas exigencias.

Uno de los materiales más empleados actualmente tanto para la reparación como para el refuerzo de estructuras de hormigón armado, es el compuesto por resinas epoxi reforzadas con fibras (FRP según sus siglas en inglés) de vidrio (GFRP) o de carbono (CFRP). Este tipo de refuerzo ha reemplazado exitosamente al de láminas de acero, ya que los compuestos de fibras tienen muy buena resistencia a tracción, son livianos, fáciles de manejar, presentan buen comportamiento frente a los agentes externos y a la fatiga, no requieren de herramientas especiales para su colocación y los trabajos pueden hacerse rápida y fácilmente. Seguramente, su uso se impondrá en la medida que descienda su costo.

Está largamente probado que la adición de laminados de resinas epoxi con fibras a estructuras, tales como vigas y losas, aumenta considerablemente la resistencia a flexión y corte de las mismas (Khalifa A. et al. 1998; Khalifa A. et al. 1999; Khalifa A., Nanni A., 1999; Lijuan Li, Toutanji H., Zhao L., Zhang Y., 2006; Yongchang Guo, Feng Liu, 2008) y en el caso de columnas, logra mejorar la resistencia a través de un efecto de confinamiento. No está, sin embargo, tan estudiado el uso de este tipo de refuerzos en vigas de fundación. El objetivo del presente trabajo es, justamente, analizar la posibilidad de refuerzo y reparación de este tipo estructural, con materiales compuestos.

La viga de fundación estudiada, que se describe en la Sección 2, fue modelada en Abaqus (ABAQUS CAE, 2007). El modelo empleado fue validado para el caso de una viga reforzada con láminas de fibras con el trabajo de H.T. Hu et al. (2004). Las características de los materiales empleados se detallan en la Sección 3 y finalmente se exponen los resultados y conclusiones.

En el presente trabajo se modelaron en conjunto suelo y estructura (K. Jonson et al. 2006), y se adoptaron modelos Elasto-Plásticos, para el Hormigón Armado (CEB-FIB 90, 1990; Hsuan-Teh Hu et al., 2004) y para el suelo (J.E. Bowles, 1974; Hans F. Winterkorn and Hsai-Yang Fang, 1975; K Terzaghi y R. B. Peck, 1992; A. Jimenez Salas y J.L. De Justo Alpeñes, 1995), mientras que el refuerzo de fibras se modeló con un comportamiento elástico lineal hasta rotura (Hsuan- Teh Hu et al., 2004).

## 2 DESCRIPCION DEL MODELO ESTUDIADO

En este trabajo se estudió una viga de fundación, cuyas características geométricas se muestran en la Figura 1. Esta fundación está asentada sobre un volumen de suelo de dimensiones suficientes, como para poder asumir la ausencia de los desplazamientos en los bordes del mismo. La interacción entre estructura y suelo se consideró rugosa, o sea sin deslizamiento entre ambas.

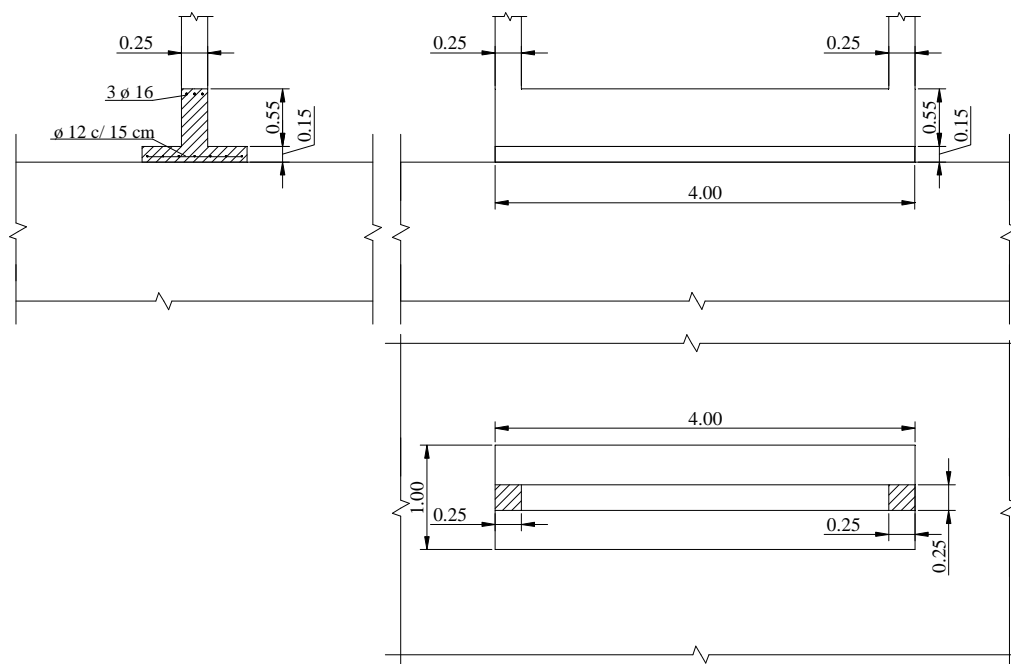


Figura 1: Geometría de la viga de fundación

El cuerpo de la viga fue modelado con 4352 elementos sólidos de 20 nodos (C3D20), el suelo con 3072 elementos sólidos de 8 nodos (C3D8), las armaduras de acero se modelaron con 1024 y 256 elementos de superficie (SFM3D8) con “rebar layer” embebidas en la sección de hormigón y los refuerzos de fibras con 224 elementos “shell” de ocho nodos (S8R).

Las láminas de FRP se consideraron rígidamente unidas al hormigón, sin modelarse el pegamento. Esta simplificación ya fue empleada por Hsuan-Teh Hu et al. (2004), obteniéndose resultados con una adecuada precisión, comparándolos con modelos experimentales.

Las cargas correspondientes a los esfuerzos transmitidos por las columnas, se distribuyeron en una superficie de 0.25 m x 0.25 m. Para la modelación numérica con el Método de los Elementos Finitos, se utilizó el programa Abaqus (ABAQUS CAE, 2007).

### 3 MODELOS CONSTITUTIVOS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Los materiales utilizados en este trabajo son los que se detallan a continuación.

#### 3.1 Acero

Se utilizó un diagrama de Tensión –Deformación Elástico-Perfectamente Plástico, como el de la Figura 2, con las siguientes características de la Tabla 1.

Tensión de Fluencia $\sigma_y$ (MPa)	344.7
Módulo de Elasticidad $E_a$ (GPa)	200
Coefficiente de Poisson $\nu$	0.3

Tabla 1: Características del Acero

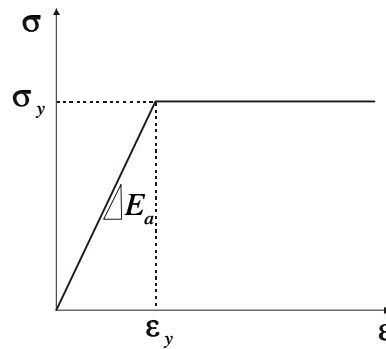


Figura 2: Diagrama Tensión-Deformación del acero

### 3.2 Hormigón

El hormigón adoptado en los modelos realizados, posee las características detalladas en la Tabla 2.

Resistencia a Compresión $f'_c$ (MPa)	34.47
Coefficiente de Poisson $\nu$	0.20
Deformación $\varepsilon_0$ correspondiente a $f'_c$	0.003
Resistencia a Tracción $f_c = \frac{1}{3}\sqrt{f'_c}$ (MPa)	1.96
Módulo de Elasticidad Inicial $E_c = 4700\sqrt{f'_c}$ (GPa)	27.6

Tabla 2: Características del hormigón, bajo cargas uniaxiales

Los valores del módulo de elasticidad inicial y de la resistencia a tracción pueden obtenerse, en función de la resistencia a compresión (ACI 318-05, CEB-FIP Model Code 1990)

Para la evaluación del comportamiento del hormigón bajo estados multiaxiales de tensión, se adoptó el modelo de Fisuras Distribuidas, provisto por Abaqus (ABAQUS/CAE, 2007). Este modelo es válido cuando la estructura está sometida a tensiones, esencialmente, monotónicas y a bajas presiones de confinamiento. El material falla, tanto por aplastamiento en compresión como por fractura en tracción, y se asume que la fisuración es el aspecto más importante del comportamiento del mismo.

Las superficies de falla y resistencias últimas en el espacio de tensiones, para un estado biaxial de tensiones se muestran en la Figura 3, cuando la tensión alcanza la superficie de falla, el material se fisura. La anisotropía introducida por la fisura es tenida en cuenta por el modelo, en cuanto afecta a la tensión y a la resistencia del material en el punto de integración.

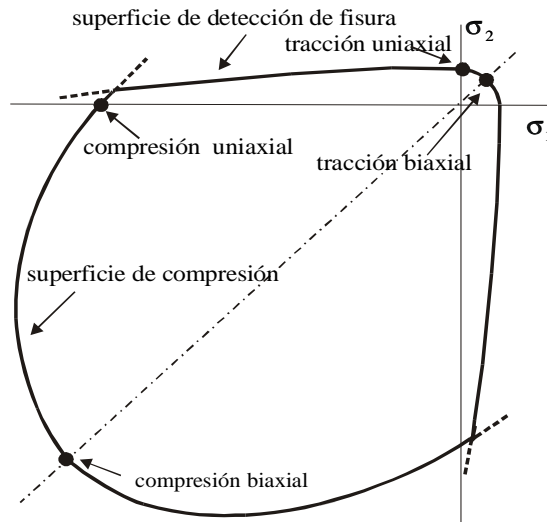


Figura 3: Superficie de falla del hormigón en el espacio de tensiones

Cuando las componentes principales de tensión son predominantemente de compresión, la respuesta del hormigón es modelada por la teoría elasto-plástica, usando una superficie de falla en términos del primer y segundo invariante de tensiones y una regla de endurecimiento isotrópica.

La curva de Tensión-Deformación Equivalente para el hormigón, utilizada en el presente trabajo, que se grafica en la Figura 4, se obtuvo con la expresión propuesta por el Código Modelo CEB-FIP 90 (Comite Euro-International du Béton-Fédération International de la Précontrainte, 1990):

$$\sigma_c = - \frac{\left[ \frac{E_c \varepsilon_c}{E_0 \varepsilon_0} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right]}{1 + \left( \frac{E_c}{E_0} - 2 \right) \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)} f'_c \quad \text{donde } E_0 = \frac{f'_c}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

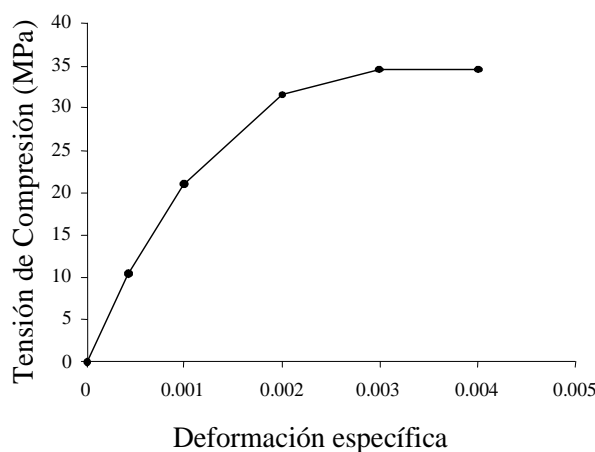


Figura 4: Curva de Tensión-Deformación Uniaxial Equivalente para el hormigón

Por otra parte, el hormigón armado, después de la fisuración del hormigón, todavía es capaz de resistir tensiones de tracción, en dirección normal a la fisura, debido a los efectos de

interacción entre el hormigón y el acero de refuerzo. Esta interacción se tiene en cuenta en el modelo adoptado, mediante la definición de la curva “Tension Stiffening”. Varios factores influyen en la adopción de esta curva, tales como densidad de las armaduras, adherencia entre acero y hormigón, tamaño del agregado grueso con respecto al diámetro de las barras de acero y al tamaño de la malla. En el presente trabajo se adoptó una simple línea descendente, que alcanza la tensión nula para una deformación  $\varepsilon^*$ , igual a diez veces la deformación correspondiente a la falla. (Figura 5).

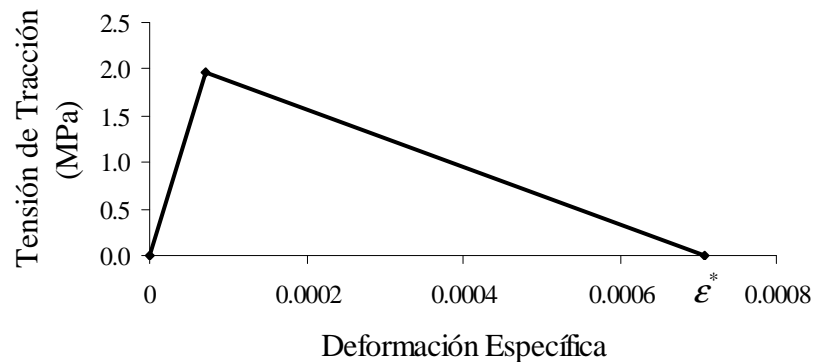


Figura 5: Curva “Tension Stiffening” para el hormigón

En cuanto al Módulo de Elasticidad Transversal  $G$ , en el presente trabajo se asume que no existe disminución del mismo.

### 3.3 Láminas de polímeros reforzados con fibras.

Los materiales compuestos usados como refuerzos pueden ser considerados láminas, ya que tienen dos dimensiones predominantes, mientras que el espesor es pequeño con respecto a ellas.

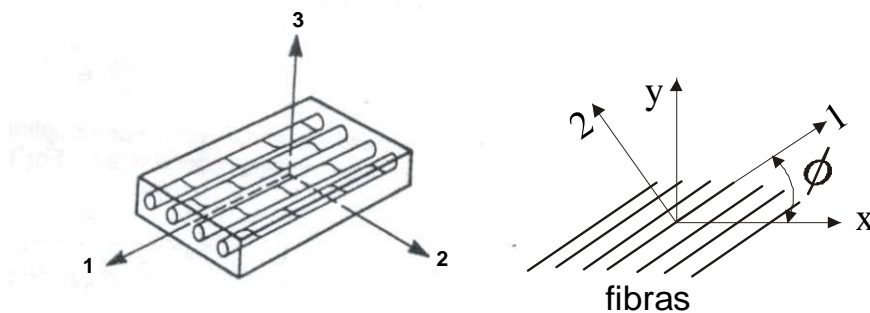


Figura 6: Lámina unidireccional, con los ejes de referencia

En este caso, cada lámina puede ser considerada como un estado plano de tensiones ( $\sigma_3 = 0$ ), por lo tanto con respecto a un sistema de ejes local o también llamado material (Figura 6), las relaciones entre tensiones y deformaciones pueden escribirse como:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1/\Delta & \nu_{12}E_2/\Delta & 0 \\ \nu_{12}E_2/\Delta & E_2/\Delta & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} \quad \text{y} \quad \begin{Bmatrix} \sigma_4 \\ \sigma_5 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{23} & 0 \\ 0 & G_{13} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_4 \\ \gamma_5 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

donde  $\Delta = 1 - \nu_{12}\nu_{21} = 1 - \nu_{12}^2 E_2 / E_1$

Con respecto a un sistema de coordenadas x,y,z, estas relaciones son:

$$\{\sigma\}^G = [T]^{-1} \{\sigma\}^M ; \quad \begin{Bmatrix} \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m & -n \\ n & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_4 \\ \sigma_5 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\{\epsilon\}^G = [T]^{-1} \{\epsilon\}^M ; \quad \begin{Bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m & -n \\ n & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_4 \\ \gamma_5 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{donde } [T]^{-1} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 2mn \\ mn & -mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad \text{siendo} \quad \begin{matrix} m = \cos \phi \\ n = \text{sen} \phi \end{matrix} \quad (5)$$

Las láminas se disponen en capas formando compuestos laminados, donde cada capa puede tener distinta orientación con respecto a los ejes globales, a fin de aportar resistencia en distintas direcciones. En el refuerzo de vigas y losas, comúnmente, se usan fibras unidireccionales o mallas. En el presente trabajo, como el objetivo es reforzar la viga a tracción, se usaron laminados unidireccionales [0]n, siendo n el número de láminas. El espesor de cada lámina es de 1 mm.

En la teoría clásica de placas construidas con materiales compuestos (Barbero E., 1999; Jones R., 1999), se definen las resultantes de tensión en el espesor de cada lámina, como:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} dz \quad \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} z dz \quad \begin{Bmatrix} V_y \\ V_x \end{Bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{Bmatrix} \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} dz \quad (6)$$

donde  $N_x, N_y, N_{xy}$  son fuerzas, por unidad de longitud, normales y tangenciales, en el plano;  $V_x, V_y$  son fuerzas de corte por unidad de longitud y  $M_x, M_y, M_{xy}$ , los momentos flectores de la placa por unidad de longitud.

Por otra parte, las tensiones varían en cada una de las láminas, de tal manera que los esfuerzos se obtienen como la suma de las integrales de dichas tensiones, sobre cada una de ellas.

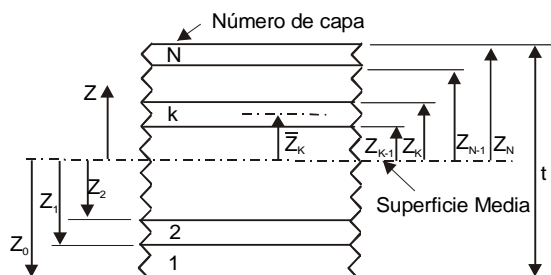


Figura 7: Esquema de la distribución de las capas en un material compuesto

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}^k dz \quad \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}^k z dz \quad \begin{Bmatrix} V_y \\ V_x \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{Bmatrix}^k dz \quad (7)$$

Además, hay que tener en cuenta que  $\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix}$ , donde  $\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \gamma_{xy}^0$  son las

deformaciones de la superficie media de la placa y  $k_x, k_y, k_{xy}$  las curvaturas.

El material usado como refuerzo fue modelado con un comportamiento elástico lineal hasta rotura y con las características que se muestran en la Tabla 3.

$E_1$ (GPa)	138
$E_2$ (GPa)	14,5
$G_{12} = G_{13}$ (GPa)	5,86
$G_{23}$ (GPa)	3,52
Coefficiente de Poisson $\nu_{12}$	0.21
Resistencia longitudinal a tracción (MP)	1450
Resistencia longitudinal a compresión (MP)	-1450
Resistencia transversal a tracción (MP)	52
Resistencia transversal a compresión (MP)	-206
Resistencia al corte (MPa)	93

Tabla 3: Características de las láminas de material compuesto.

### 3.4 Suelo

Para la simulación del suelo, se usó un modelo constitutivo elasto-plástico, con la variación de la tensión en función de la deformación que se muestra en la Figura 8 y la teoría de falla de Mohr Coulomb (Figura 9). Las características de los suelos utilizados se pueden observar en la Tabla 4. Los valores de los parámetros fueron elegidos teniendo en cuenta los que se proponen en las referencias (J.E. Bowles, 1974; Hans F. Winterkorn and Hsai-Yang Fang, 1975; K Terzaghi y R. B. Peck, 1992; A. Jimenez Salas y J.L. De Justo Alpeñes, 1995).

Parámetro característico	Arena Limosa	Arena arcillosa	Arcilla
Densidad $\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	18.80	16.70	17
Módulo de Elasticidad $E_{edo}$ (MPa)	13.00	9.15	1.605
Ángulo de Fricción Interna $\phi$ (grados)	23	26	30
Coefficiente de Poisson $\nu$	0.30	0.30	0.35
Ángulo de dilatación $\psi$ (grados)	0	0	0
Coefficiente de Cohesión $C$ (KPa)	12	13	10

Tabla 4: Características de los suelos utilizados



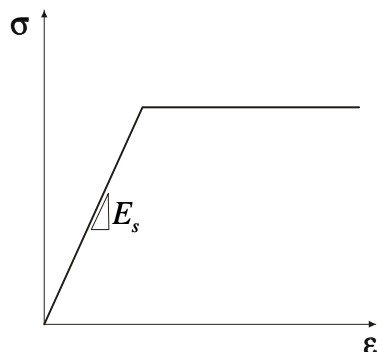


Figura 8: Curva de Tensión-Deformación para el suelo

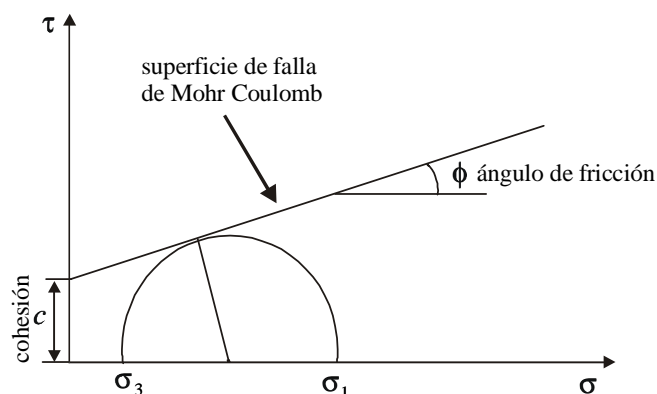


Figura 9: Superficie de Falla de Mohr-Coulomb

### 3.5 Modelo hormigón-láminas de polímeros reforzados con fibras

Debido a que no se encontraron publicaciones de otros autores con valores experimentales o numéricos de modelos semejantes al propuesto, que involucra suelo, estructura de hormigón y refuerzo de material compuesto se optó por comparar, por un lado, el conjunto hormigón armado-láminas de FRP y por otro el modelo completo con uno clásico, muy difundido, que es el de la viga de hormigón armado sobre fundación elástica. En el primer caso se modeló, una viga simplemente apoyada, sometida a una carga uniformemente distribuida, con las características geométricas y de materiales coincidentes con la estudiada por H.T. Hu (2004), quien contrasta su modelo con valores experimentales.

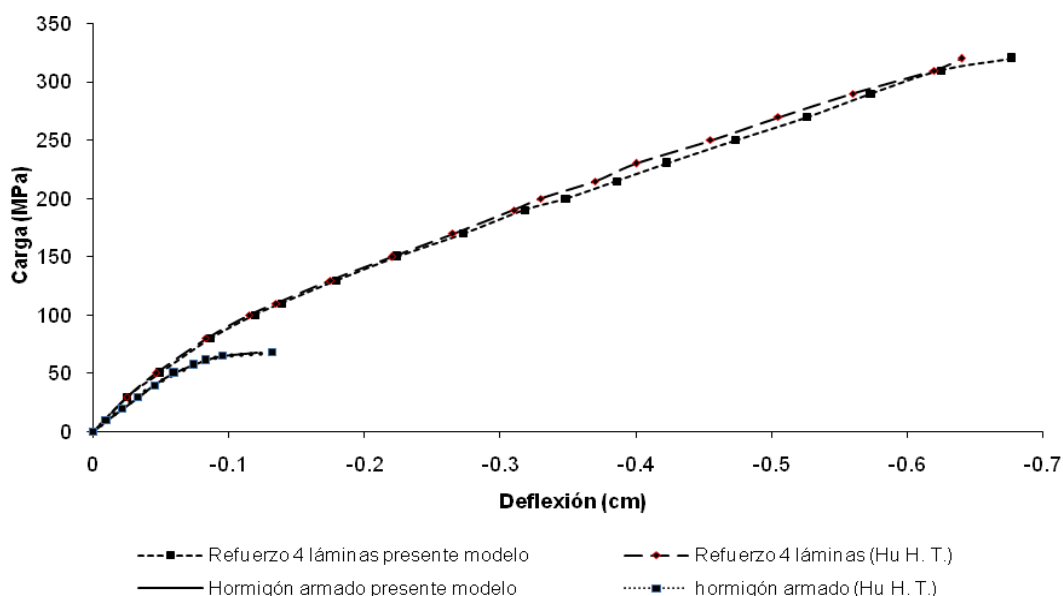


Figura 10: Comparación de los modelos de hormigón armado y hormigón armado reforzado con láminas de FRP

En la Figura 10 se puede ver la buena correspondencia existente entre ambos modelos, tanto para el de hormigón armado solamente, como para el reforzado con 4 láminas de FRP.

En el segundo caso, se estudió una viga de fundación, con la misma geometría que la presentada en la Figura 1, con una carga aplicada en cada columna de 100 KN, sin el empleo

de refuerzos de material compuesto, asentada sobre arena limosa y sobre arcilla y se observó que los desplazamientos obtenidos del cálculo de la viga sobre fundación elástica utilizando coeficientes de reacción del terreno  $k = 18 \text{ MN/m}^3$  y  $k = 2.5 \text{ MN/m}^3$  respectivamente, difieren en menos del 2% de los obtenidos empleando el modelo propuesto en esta publicación.

## 4 ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

### 4.1 Láminas aplicadas como refuerzo estructural

Para estudiar el refuerzo de vigas de fundación con materiales compuestos, se modeló primeramente una viga de hormigón armado sin refuerzo apoyada sobre arcilla con un Coeficiente de Cohesión  $C=10000 \text{ Pa}$  y un Ángulo de Fricción Interna  $\phi = 30$  grados, y luego se incorporaron de 2 a 8 láminas pegadas a lo largo de la viga entre bordes de columnas.

En la Figura 11 se muestran los desplazamientos, en el centro de la viga, en función de la carga externa, aplicada sobre cada columna y de la cantidad de láminas colocadas. Se puede observar que la carga última aumenta con el número de láminas de FRP, hasta un cierto valor, después del cual la viga de fundación no toma más carga, dependiendo del tipo de suelo, en la que esté fundada. Con la colocación de 2 láminas se logra un aumento de resistencia del 13%, con 4 láminas del 17%, manteniéndose este porcentaje para 6 y 8 láminas. Estos incrementos están muy lejos de los alcanzados en vigas, como la utilizada para la validación del modelo, donde se alcanza una resistencia cinco veces mayor que la original, con el uso de 4 láminas.

En la Figura 12 se presentan los desplazamientos verticales de la viga de fundación, medidos en el centro de la viga, en función del número de láminas de refuerzo colocadas, para una carga de 150 kN aplicada en los extremos de la viga de fundación. Como se puede ver, los desplazamientos verticales disminuyen con el incremento del número de láminas colocadas, ya que las mismas aportan rigidez, pero a partir de 4 láminas las diferencias son despreciables por lo que no se justifica su uso. Al analizar las diferencias producidas entre los puntos extremos y el centro de la viga se determinó un valor de 1.11 mm (aproximadamente  $1/3600$ ), con la incorporación de 2 láminas la diferencia se redujo en un 32.66 %, con 4 láminas la reducción fue del 41.12 %, con 6 láminas la reducción fue del 45.96 % y con 8 láminas del 49.27 %. Todos estos desplazamientos relativos son muy pequeños, favoreciendo a la reducción de la fisuración del hormigón de la viga y por ende, mejoran su durabilidad.

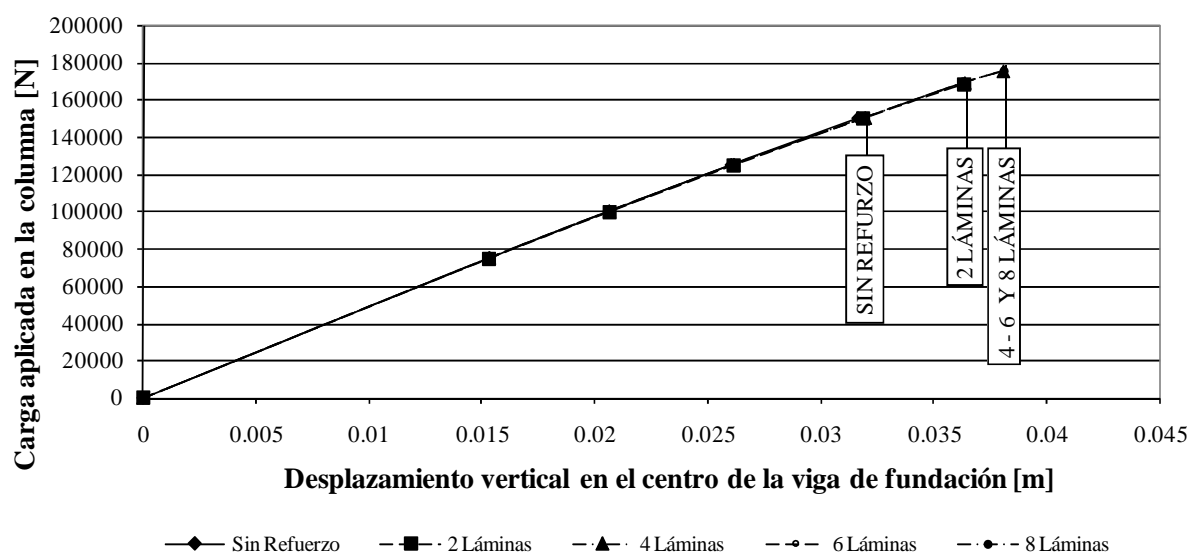


Figura 11: Desplazamientos verticales del centro de la viga de fundación en función de las cargas aplicadas en las columnas y del número de láminas de refuerzo.

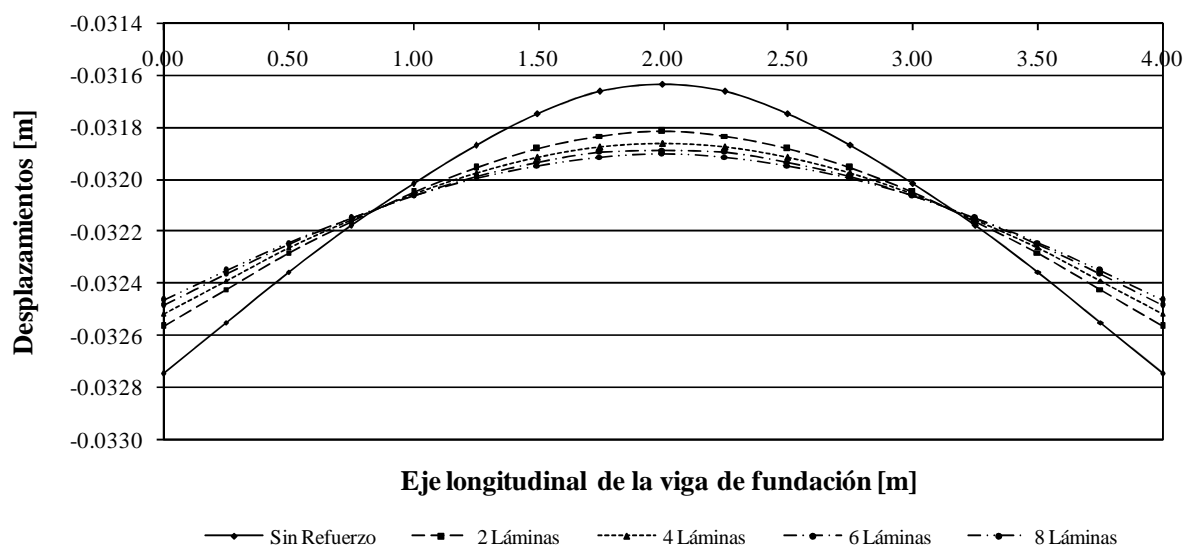


Figura 12: Desplazamientos verticales de las vigas de fundación en función del número de láminas para una carga de 150 kN.

La Figura 13 muestra los desplazamientos de la viga de fundación, cuando se varía el coeficiente de cohesión  $C$  del suelo, para una viga de fundación sin láminas y con el uso de 4 láminas de refuerzo, con una carga de 150 kN, aplicada en los extremos de la viga de fundación. Como es lógico, una mayor cohesión del suelo conduce a menores desplazamientos y menor curvatura de la fundación.

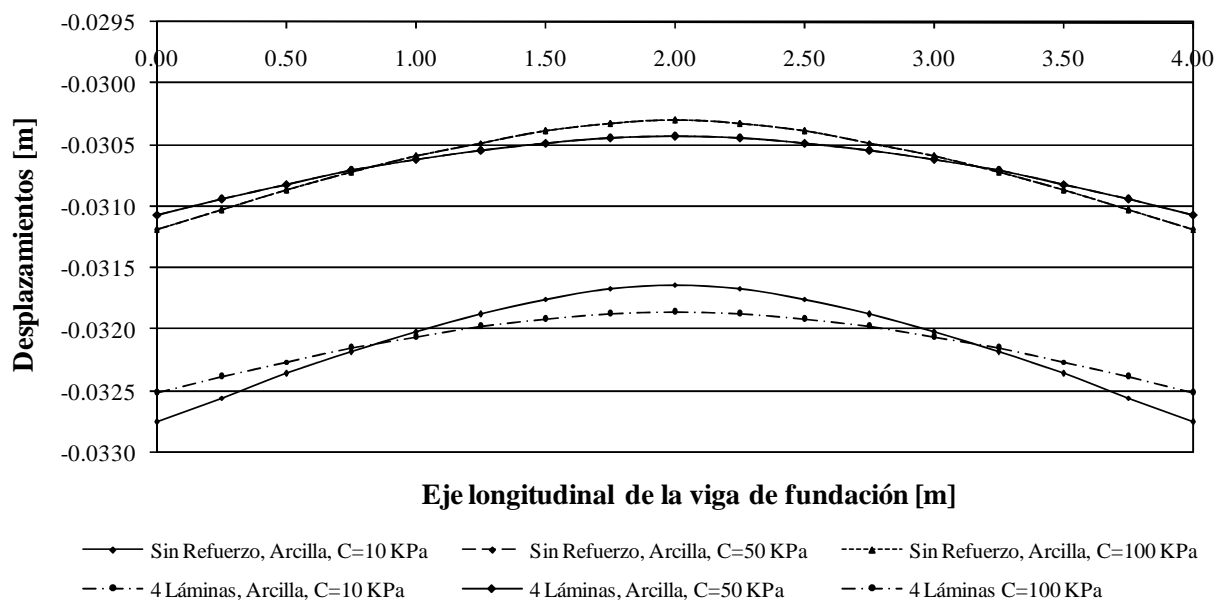


Figura 13: Desplazamientos verticales de las vigas de fundación en función del coeficiente de cohesión  $C$  y del número de láminas para una carga de 150 kN.

Al analizar los desplazamientos producidos entre los puntos extremos y el centro de la viga para una viga fundada sobre arcilla con un coeficiente de cohesión  $C = 10$  KPa se determinó un valor de 1.11 mm. (aprox.  $1/3600$ ), para una arcilla con un coeficiente de cohesión  $C = 5$  KPa, la diferencia se redujo un 20 %, mientras que para una arcilla con  $C = 100$  KPa se

mantuvo la diferencia del 20 %.

Es interesante destacar que con la incorporación de 4 láminas y con  $C = 50$  KPa, la diferencia se redujo en un 43.14 % y con  $C = 100$  KPa, la diferencia se mantuvo en el 43.14%.

En la Figura 14 se presenta la comparación de las cargas máximas que pueden ser aplicadas en las columnas extremas de las bases, para distintos tipos de suelos, observándose que, por los motivos antes descriptos, una fundación con arena arcillosa, no presenta mejoras apreciables, si se la refuerza con 4 láminas de material compuesto.

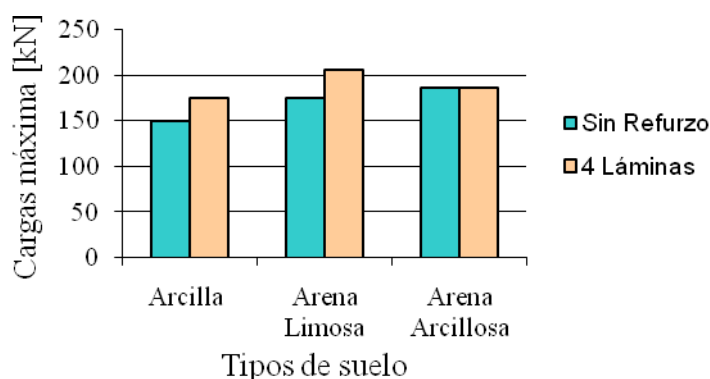


Figura 14: Comparación de cargas máximas en vigas con y sin refuerzo para distintos tipos de suelos

#### 4.2 Reparación de vigas de fundación con láminas de polímeros reforzados con fibras

Para estudiar la validez de las láminas de materiales compuestos, en la reparación de vigas de fundación, se compararon las elásticas de una viga sana, bajo una carga de servicio en cada columna de 93.75 kN, de la misma viga con una fisura central y luego reparada con la colocación de 2, 3 y 4 láminas de FRP. La fisura se generó en la parte media de la longitud de la viga, con una profundidad de 0.275 m (39 % de la altura) sobre la totalidad del ancho. Dicha fisura se modeló como una discontinuidad en la malla. Se eligió la parte central debido a que es la zona donde la probabilidad de aparición de fisuras por incrementos de carga es mayor. La profundidad elegida corresponde a observaciones previas realizadas sobre patrones de fisuración.

Como puede verse en la Figura 15 el agregado de láminas de FRP tiende a la recuperación de la elástica de la viga sana. Los desplazamientos disminuyen con el incremento del número de láminas colocadas, ya que las mismas aportan rigidez. Al analizar las diferencias de desplazamientos verticales producidas entre los puntos extremos y el centro de la viga, se determinó un valor de 0.43 mm, para la viga fisurada, con la incorporación de 2 láminas esta diferencia se redujo en un 11.1 %, con 3 láminas la merma fue del 14.6 % y con 4 láminas la reducción fue del 17.9 %. Con respecto a la capacidad resistente de la viga, se puede decir que la viga fisurada soporta una carga máxima un 30 % menor que la viga sana. Al aplicar las láminas de FRP se recupera parcialmente la capacidad portante. La incorporación de 4 láminas permite alcanzar el 88 % de la capacidad de la viga sana y la incorporación de más bandas no mejora notablemente esta situación (ver Figura 16).

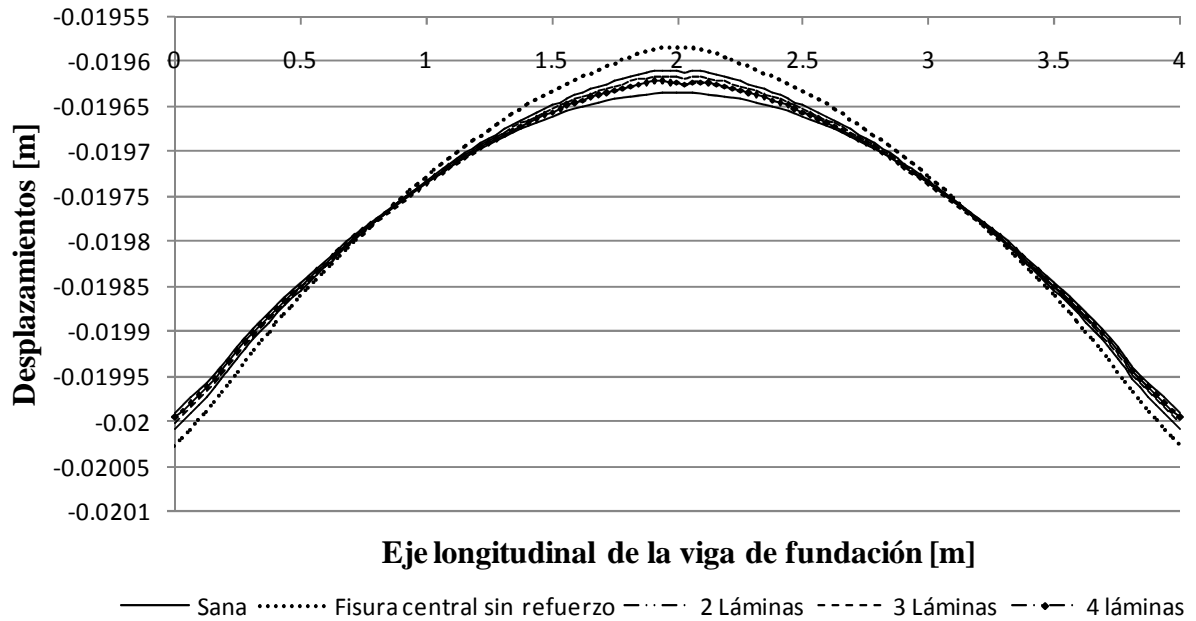


Figura 15: Elástica de la viga de fundación sana, fisurada y reparada para una carga de 93.75 kN.

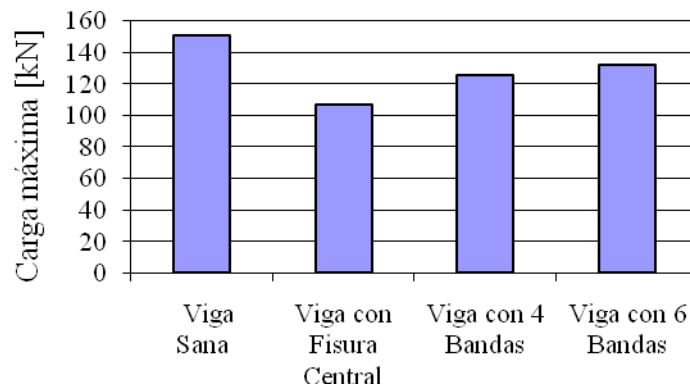


Figura 16: Carga última de la viga de fundación sana, fisurada y reparada

En la Figura 17 se muestra la variación de las tensiones normales, a lo largo de la longitud de la viga, en el laminado, en la armadura de acero y sobre la superficie del hormigón y de las tensiones tangenciales en el hormigón. Puede observarse, claramente, la concentración de tensiones en la zona de la fisura, en todos los materiales involucrados, razón por la cual es una zona crítica donde suele iniciarse el proceso de desprendimiento del laminado. Se puede ver que parte de las tensiones de tracción son tomadas, en la zona fisurada, por la armadura de acero y que las bandas de FRP se encuentran lejos de su capacidad resistente, por lo que incorporar mayor cantidad de láminas no se justifica, como ya se ha observado en los anteriores análisis.

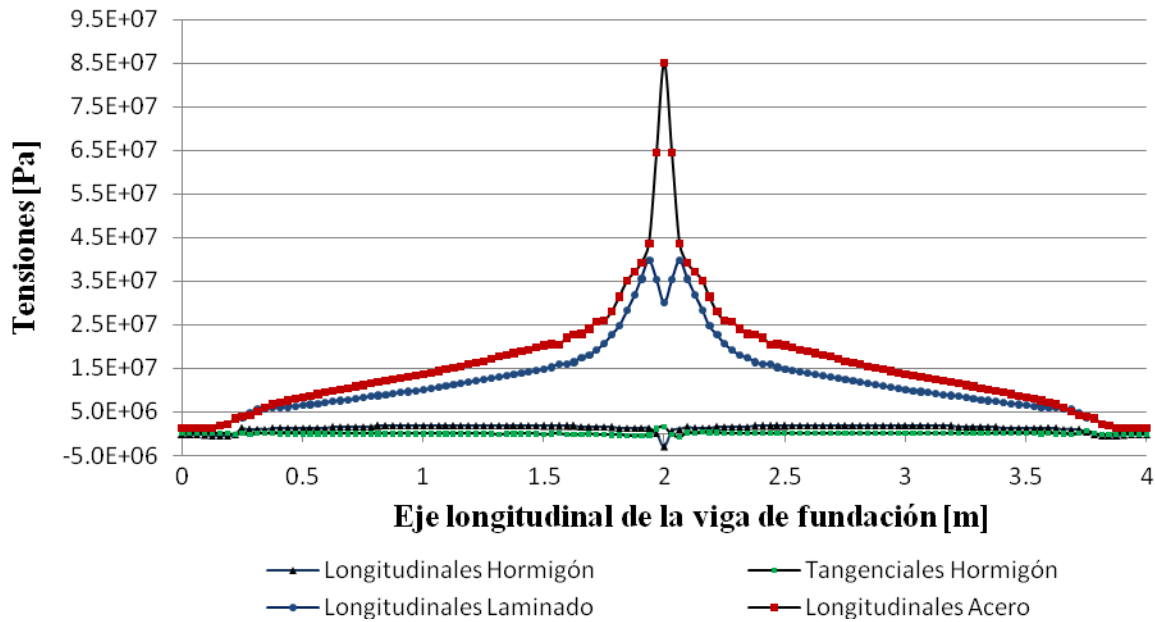


Figura 17: Tensiones en el borde superior de la viga de fundación para una carga de 125 kN.

## 5 CONCLUSIONES

Evidentemente en el comportamiento mecánico de las vigas de fundación intervienen varios factores que deben tenerse en cuenta, a la hora de evaluar la utilización de láminas de materiales compuestos, en la reparación y/o refuerzo, presentándose comportamientos estructurales más complejos de analizar, que en otros elementos a flexión, tales como vigas y losas.

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede observar que el refuerzo no mejora la capacidad de carga en las vigas de fundación de manera tan apreciable como en las vigas. Esto está relacionado con la interacción de la estructura de hormigón con el suelo, el cual juega un rol preponderante en el comportamiento del conjunto. Dependiendo del tipo de suelo empleado puede o no ser útil, mecánicamente hablando, la colaboración efectiva de las bandas.

Si se necesita transmitir cargas mucho mayores que aquellas para las cuales fueron proyectadas las estructuras de fundación, será necesario recurrir a realizar aumentos de la sección del hormigón.

Con relación a la reparación de las vigas de fundación fisuradas, donde se emplearon refuerzos de materiales compuestos, se observó que, en el caso estudiado, el crecimiento de la recuperación de la capacidad portante es lento pese al incremento de bandas de refuerzo, tendiendo a estabilizarse en un valor cercano a la capacidad de la viga sana. Asimismo, los valores de los desplazamientos verticales tienden a los correspondientes a la viga sana. En función de esto y teniendo en cuenta que las bandas son de sencilla y rápida aplicación, este tipo de reparación constituye una opción válida para la reparación de las vigas de fundación con las limitaciones antes mencionadas.

## 6 AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Departamento de Ingeniería y a la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur, por el apoyo

brindado para el desarrollo de estas investigaciones y a la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Bahía Blanca que nos permitió el uso del software ABAQUS.

## 7 REFERENCIAS

- ABAQUS/CAE, Version 6.7. *ABAQUS Inc*, 2007.
- ACI 318-05. Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-05) y Comentario (ACI 318SR-05), *American Concrete Institute*, 2005.
- Barbero Ever J., Introduction to composite materials design, Taylor & Francis, Inc, Philadelphia, 1999.
- Bowles, J.E., *Analytical and computer methods in foundation engineering*. McGraw Hill. 147-185. New York, 1974.
- Comite Euro-International du Béton-Fédération International de la Précontrainte, "CEB-FIP Model Code 1990".
- Hu, H.T., Lin, F.M., and Jan, Y.Y., Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete beams strengthened by fiber-reinforced plastics. *Composite Structures* 63:271-281, 2004.
- Jimenez Salas, J.A. y De Justo Alpeñes, J.L., *Geotecnica y Cimientos*. Editorial Rueda, Madrid, 1995.
- Jones Robert M., Mechanics of composite materials, 2nd ed., Taylor & Francis, Inc, Philadelphia, 1999.
- Jonson, K., Lemcke, P., Karunasena, W, and Sivakugan, N., Modelling the load-deformation response of deep foundations under oblique loading. *Environmental Modeling and Software*, 21:1375-1380, 2006.
- Khalifa A., Alkhrdaji, Nanni A., Lansburg S., Anchoraje of Surface Mounted FRP Reinforcement, *Concrete International*, 21-104:49-54, 1999.
- Khalifa A., Gold W., Nanni A., Aziz A., Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of RC Flexural Members, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 2-4, 195-203, 1998.
- Khalifa A., Nanni A., Rehabilitation of Rectangular Simply Supported RC Beams with Shear Deficiencies using CFRP Composites, *Journal of Construction and Building Materials*, 94:65-72, 1999.
- Li, Lijuan, Guo, Yongchang, Liu, Feng, Test Analysis for FRC beams with externally bonded FRP sheets, *Construction and Building Materials*, 22:315-323, 2008.
- Terzaghi, K., y Peck, R.B., *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica*, El Ateneo. 1992.
- Toutanji H., Zhao, L., Zhang, Y., Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Externally Strengthened with CFRP Sheets Bonded with an Inorganic Matrix, *Engineering Structures*, 28:557-566, 2006.
- Wintekorn, F. and Fang, Hsai-Yang, *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1975.
- Yang, X., Swamidass, S. and Seshadri, R. Crack identification in vibrating beams using the energy method. *Journal of Sound and Vibration*, 244(2):339-357, 2001.