

VERIFICACIÓN ANALÍTICA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOSAS PARA PUENTES DE POLÍMEROS REFORZADOS CON FIBRAS

Felipe J. Acosta¹

RESUMEN: Este artículo reporta la verificación analítica del trabajo experimental publicado por Acosta y Zureick (2001) donde se reporta la caracterización experimental de las propiedades mecánicas de losas para puentes hechas de Plásticos Reforzados con Fibras (PRF). Al nivel de cupones, la Teoría Clásica de Laminación (CLT por su nombre en inglés) fue utilizada para estimar los módulos de elasticidad, comparando favorablemente con resultados experimentales. Basado en análisis estadístico y de confiabilidad se determinaron factores de reducción ϕ clasificados por componentes, técnica de manufactura y refuerzo, los cuales, en combinación con CLT, toman en cuenta la variabilidad inherente del material y variaciones inducidas durante la manufactura. Modelos de elementos finitos utilizando ABAQUS están en concordancia con los resultados experimentales de las pruebas a escala real de las vigas con secciones triangulares y de los prototipos de paneles.

INTRODUCCIÓN

Para poder incrementar el uso de Polímeros Reforzados con Fibras (PRF) en la infraestructura civil es necesario tener confianza en el material y en las herramientas que poseen los ingenieros para poder analíticamente describir el comportamiento del material. En el artículo por Acosta y Zureick (2001) se presentaron los resultados experimentales de la caracterización de varios prototipos de losas para puentes desarrollados en el *Georgia Institute of Technology*, cuya configuración se muestra en la Figura 1. Estas losas están formadas por cuatro componentes; dos placas planas formando las dos superficies exteriores, vigas con sección triangular formando las celdas internas y adhesivo epoxi para mantener unidos los componentes. Todos los componentes estudiados estaban hechos de resina del tipo vinyl ester reforzadas con distintas configuraciones de fibras de vidrio del tipo E. Además, los componentes fueron manufacturados por dos técnicas diferentes. Las placas planas formando las capas superior e inferior estaban reforzadas con capas de telas cosidas (NCF por su nombre en inglés *Non Crimped Fabric*) con fibras orientadas en las direcciones de 0°, 90°, y $\pm 45^\circ$, manufacturadas por el método de estratificación manual. Dos versiones de las vigas de sección triangular fueron utilizadas. Una fue reforzada con NCF y manufacturada con la técnica de estratificación manual, y la otra fue reforzada con un trenzado tridimensional y manufacturada con la técnica de pultrusión. El material se caracterizó a nivel de cupones, de ensayos en flexión de las vigas de sección triangular y ensayos de varios prototipos a escala real de pedazos de losa del ancho de cinco celdas.

La investigación relacionada al tema de losas para puentes fabricadas de PRF comenzó hace aproximadamente 18 años. La primera revisión de literatura sobre el tema fue publicada por Zureick, *et al.* (1995). Desde entonces, otros artículos e informes han sido publicados en la literatura. Entre ellos encontramos a Shih (1995), Karbahri (1997), López-Anido, et al. (1997a, 1997b) y López-Anido y Gangarao (1997). La configuración de la losa de puente desarrollada en este trabajo se basó en el estudio de optimización realizado por Shih (1995). En éste se estudiaron cuatro configuraciones diferentes de losas para puentes sujetas a condiciones de carga equivalentes a un camión de AASHTO HS20-44 y fueron analizadas utilizando la técnica de los elementos finitos combinada con un algoritmo de optimización. Este estudio concluyó que el panel con sección V fue el más eficiente para una alta gama de condiciones de apoyo desde 1.22 m hasta 3.66 m. También fueron propuestos espesores de las diferentes partes y la arquitectura del refuerzo de fibra para satisfacer la capacidad y los criterios de servicio.

Este artículo presenta la corroboración analítica de la caracterización experimental de las propiedades mecánicas de prototipos de losa de puente hechos de PRF. La primera parte presenta la predicción de las propiedades del material (módulos de elasticidad en las direcciones principales) al nivel de cupón. Luego se presentan los modelos de elementos finitos utilizados para comparar los resultados experimentales de las vigas con sección triangular y prototipos de losas ensayados a escala real. Muchos de los resultados experimentales no son presentados en este trabajo, por lo que el lector deberá referirse a Acosta y Zureick (2001) o Acosta-Costa (1999).

¹ Universidad de Puerto Rico en Mayagüez, Departamento de Ingeniería Civil, Mayagüez, PR 00681-9041.

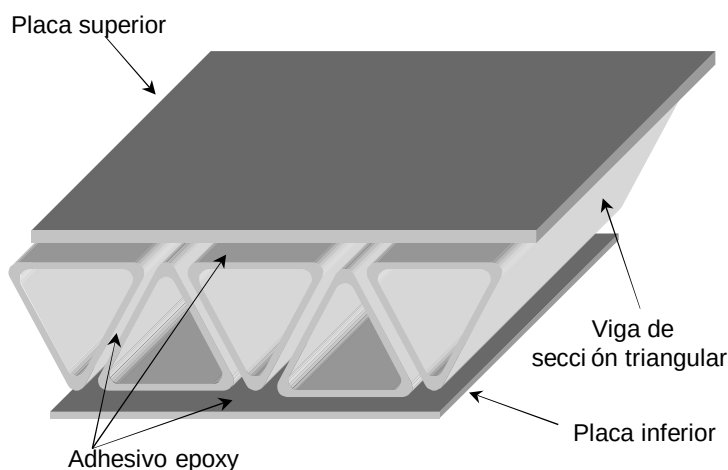


Figura 1: Configuración de la losa de puente de PRF (Acosta y Zureick, 2001).

RIGIDEZ AL NIVEL DE CUPÓN

Los principales módulos elásticos determinados experimentalmente para los materiales utilizados en este trabajo fueron predichos utilizando el método de la teoría clásica de laminados (CLT por sus siglas en inglés). Este procedimiento se puede aplicar a los materiales reforzados con las telas cosidas pues su arquitectura es del tipo de laminado de capas unidireccionales. Sin embargo, para los elementos reforzados con el trenzado en tres dimensiones, dada su compleja estructura, se requiere un análisis mucho más elaborado. Debido a que la forma del refuerzo fue alterada durante la manufactura como se muestra en la Figura 2, su análisis fue simplificado por un laminado equivalente. En esta figura se puede observar que los mazos de roving utilizados en combinación con el trenzado no se encuentran uniformemente distribuidos, creando regiones donde el espesor del trenzado varía al igual que su forma.

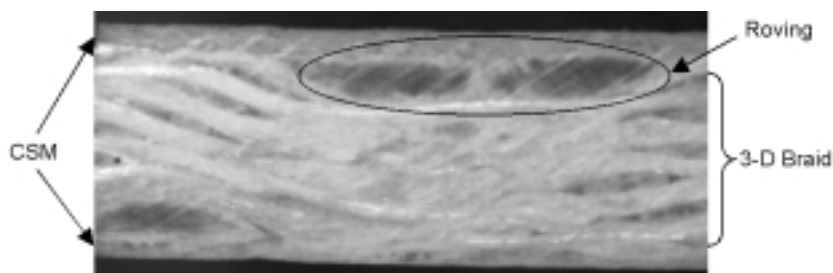


Figura 2: Vista microscópica de la sección transversal del material reforzado con trenzado 3-D según manufacturado.

Para los materiales reforzados con NCF, el modelo consistió en placas estratificadas donde cada capa de tela de refuerzo estaba compuesta por cuatro estratos (Figura 3) de espesores proporcionales a la fracción del peso en cada dirección como se muestra en la Tabla 1. Los porcentajes de pesos reportados en la tabla deben ser ajustados para que su total llegue al 100% pues éstos no incluyen el peso del material utilizado para coser los mazos de fibras en la tela. El espesor de cada capa de tela se determinó por la fórmula $t_F = t_c / N^F$, donde t_c es el espesor del laminado y N^F es el número de capas de tela en el componente a analizar (Tabla 3). Partiendo de este valor, el espesor de cada capa individual de la tela se calculó como $t_i = w_i \cdot t_c$.

Las propiedades de los constituyentes principales, fibras y resinas, utilizadas en el análisis se indican en la tabla 4. Propiedades de las fibras del tipo E son las que se pueden encontrar en la literatura (Barbero, 1998) y las de la resina vinyl ester fueron provistas por el manufacturero. Estos valores se utilizaron en los cálculos de las

rigideces de cada estrato del laminado por las ecuaciones para determinar E_1 , E_2 , G_{12} y ν_{12} que se pueden encontrar en los libros de mecánica básica de materiales compuestos (Barbero, 1998) cuyos valores finales se incluyen en la

Tabla 5. Las propiedades de todo el laminado, E_x , E_y , G_{xy} y ν_{xy} fueron determinadas suponiendo un laminado simétrico, lo que implica que no hay acoplamiento entre deformaciones en el plano y flexión. Dada la repetición de la secuencia de la tela, el material fue homogenizado, minimizando el efecto de acoplamiento. Esta aproximación fue suficiente como se muestra en la Figura 4 para las pruebas en tensión y compresión. En esta gráfica se comparan diferentes razones de módulos en las direcciones de X y Y experimentales y analíticas (E^{Exp}/E^{An}). De la figura se observa una excelente predicción para las placas superior e inferior A², mientras que para la placa inferior B y las vigas triangulares la predicción de la rigidez estuvo por debajo de los valores experimentales, con diferencias de hasta un 10%. Esta diferencia se atribuye la carencia de uniformidad en los espesores en las vigas de sección triangular y a variaciones en la resina de la placa inferior B la cual fue provista por diferente manufacturero.

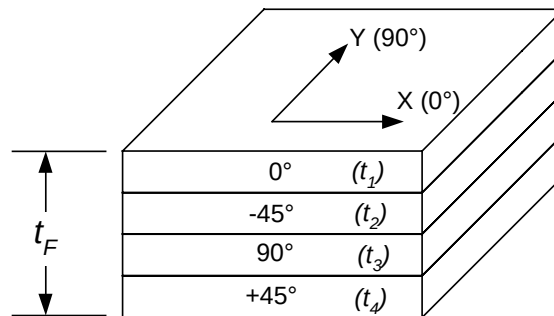


Figura 3: Distribución de las capas de las telas cosidas y sus espesores.

Tabla 1: Especificaciones de las telas de fibras COTECH®.

Nombre de la tela	Peso por unidad de área gr/m ² (oz/yd ²)	Orientación (Grados)	Distribución de peso (%)
EQX 4500	1532 (45.18)	0	29.24
		- 45	13.88
		90	42.50
		+ 45	13.88
EQX 2900	989 (29.16)	0	21.95
		- 45	18.74
		90	39.50
		+ 45	18.74

Tabla 2: Detalle del refuerzo de los componentes reforzados con NCF.

Componente	Refuerzo	Número de capas	Espesor nominal
Placa superior	EQX 4500	13	19 mm
Placa inferior	EQX 2900	4	5 mm
Vigas triangulares	EQX 2900	6	7 mm

La Figura 5 muestra el esquema de la simplificación realizada a la estructura tridimensional del refuerzo trenzado por un laminado equivalente. La secuencia de orientación de capas unidireccionales según el código de laminados consistió en $[0/0/-70/0/70/0/-70/0/70]_s$, donde cada capa constó de diferente espesor y

² Placas A y B provienen de distintos manufactureros.

contenido de fibra (v_f). El refuerzo consistió de capas de telas de fibras continuas aleatorias (CSM por sus nombres en inglés), de mazos de *roving* modelados como capa unidireccional y del trenzado tridimensional. Cada espesor fue estimado de la imagen de microscopio mostrada en la Figura 2. El espesor del *roving* fue medido y dividido en las dos superficies alrededor del trenzado. Los espesores del trenzado fueron estimados de forma similar al de NCF, donde cada capa es proporcional a la fracción de peso en cada dirección. Las capas externas del trenzado (-70°) tienen la mitad del espesor de las capas internas orientadas en $\pm 70^\circ$ pues estas contienen la mitad de la fibra. La fracción de fibra de cada capa fue estimada como $v_f = w_{af} / (\rho_f t_f)$, donde w_{af} es el peso por área unitaria (Tabla 7), ρ_f es la densidad de la fibra de vidrio (2.56 gr/cm^3) y t_f es el espesor. Espesores, fracciones de volumen de fibras y propiedades de cada capa se presentan en la Tabla 8. Para este análisis, las propiedades de las fibras de vidrio utilizadas fueron las de la Tabla 4. Sin embargo, para la resina se utilizaron las propiedades del vinyl ester típicas en la literatura (Barbero, 1998) las cuales son $E = 3.4 \text{ GPa}$, $G = 1.2 \text{ GPa}$ y $\nu = 0.38$. Es importante notar que todas las capas que constituyen la porción del trenzado contienen la misma fracción volumétrica de fibra (v_f).

Tabla 3: Espesores de los estratos de NCF.

Dirección de fibras	Placa superior A 13 capas EQX 4500 $\mu\text{m (in)}$	Placa superior B 13 capas EQX 4500 $\mu\text{m (in)}$	Placa inferior A 4 capas EQX 2900 $\mu\text{m (in)}$	Placa inferior B 4 capas EQX 2900 $\mu\text{m (in)}$	Vigas triangulares 6 capas EQX 2900 $\mu\text{m (in)}$
0°	453.86	369.32	226.	162.05	223.43
-45°	219.10	178.29	195.81	139.95	192.96
90°	672.96	547.61	412.24	316.74	406.23
$+45^\circ$	219.10	178.29	195.81	139.95	192.96

Tabla 4: Propiedades mecánicas de fibra y resina.

Propiedad	Vidrio tipo E	Resina tipo HYDROPEL Vinyl Ester
E (GPa)	72.4	3.7
G (GPa)	29.7	1.4
ν	0.22	0.35

Tabla 5: Información para análisis de CLT para cada capa de materiales reforzados con NCF.

Propiedad	Placa superior A 13 capas EQX 4500	Placa superior B 13 capas EQX 4500	Placa inferior A 4 capas EQX 2900	Placa inferior B 4 capas EQX 2900	Vigas triangulares 6 capas EQX 2900
v_f (%)	37	45	33	45	35
E_1 (GPa)	29.0	34.5	26.2	29.0	27.6
E_2 (GPa)	8.7	10.2	8.1	8.7	8.4
G_{12} (GPa)	3.2	3.8	3.0	3.2	3.1
ν_{12}	0.291	0.281	0.297	0.291	0.294

Tabla 6: Rigiezes analíticas de los laminados reforzados con NCF.

Propiedad	Placas planas				Vigas triangulares
	Superior A	Superior B	Inferior A	Inferior B	
E_x (GPa)	15.6	18.4	13.2	17.0	13.8
E_y (GPa)	18.4	21.7	16.3	21.2	17.1
G_{xy} (GPa)	5.0	5.9	5.2	6.7	5.4
ν_{xy}	0.209	0.204	0.240	0.232	0.238

A la extensa base de datos de las propiedades mecánicas de estos materiales se le realizaron análisis estadísticos y de confiabilidad. De estos análisis se desarrollaron constantes de reducción ϕ de tal forma que el

módulo de diseño sea ϕE^{An} , siendo E^{An} el valor calculado mediante CLT. Este análisis consistió en definir la relación $g = E^{Exp} - \phi E^{An}$ donde g es conocida como la función de rendimiento, la cual tiene características estadísticas, y E^{Exp} es el módulo de elasticidad experimental. El análisis consideró algunas variaciones inherentes del material constituidas en la fibra y matriz y por errores de manufactura (dimensiones y orientación de las fibras). Los detalles de todas las variables consideradas y sus variaciones estadísticas se encuentran en Acosta-Costa (1999). La técnica de simulación de Montecarlo se utilizó para simular aleatoriamente el comportamiento estadístico de g . Se investigaron valores de ϕ en el rango de 0.55 a 0.90. Un ejemplo de este análisis se muestra en la Figura 7 para el módulo en tensión de las placas planas reforzadas con NCF. Se seleccionó el valor de ϕ que satisficiera el requisito de brindar una probabilidad mayor de 95% de tener $g > 0$. Como resultado, se recomendaron los siguientes valores separados por tipo de refuerzo y componente:

Componente, Tipo de refuerzo, Técnica de manufactura	ϕ
Placas planas, NCF, Estratificación manual	0.85
Vigas triangulares, NCF, Estratificación manual	0.75
Vigas triangulares, Trenzado 3-D, Pultrusión	0.55

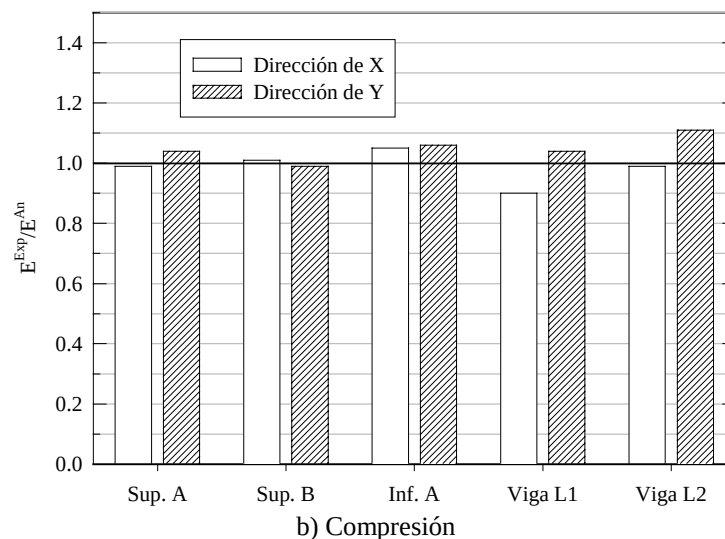
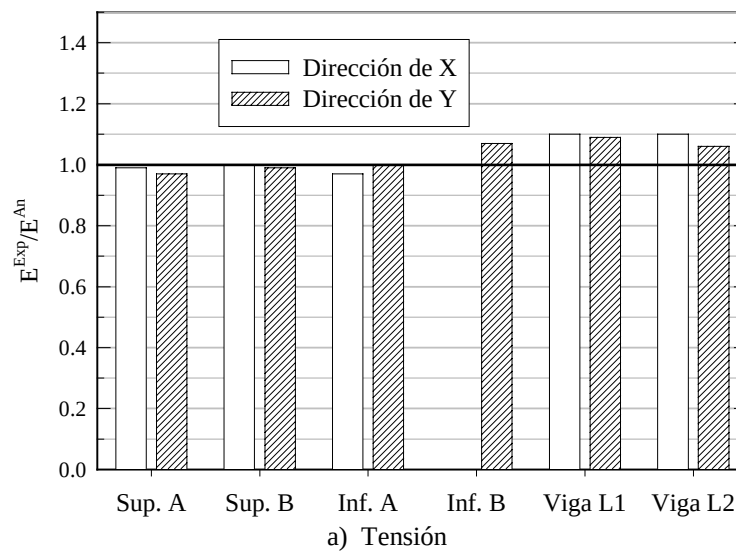


Figura 4: Comparación de las rigieises en tensión de los materiales reforzados con NCF.

Tabla 7: Distribución de las fibras en las vigas triangulares manufacturadas por pultrusión.

Tipo de refuerzo	Peso por unidad de área (oz/yd ²)	Fracción de peso (%)
Trenzado 3-D	148	90.3
Roving	14	8.5
CSM	2	1.2
Total	164	100

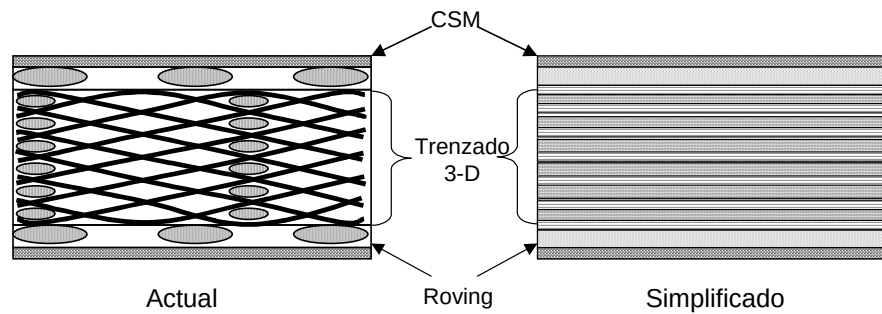


Figura 5: Simplificación del material reforzado con el trenzado 3-D como laminado.

Tabla 8: Información para el análisis de CLT de capas de materiales reforzados con trenzado 3-D.

	CSM	Roving	Trenzado 3-D		
			0°	-70° ⁽³⁾	±70°
t_i (μm)	420.4	621.0	114.7	256.1	512.2
v_f (%)	3.1	20.8	52.1		
E_1 (GPa)	4.7	17.7	39.2		
E_2 (GPa)	4.7	6.1	11.0		
G_{12} (GPa)	1.7	2.3	4.1		
v_{12}	0.350	0.312	0.272		

Tabla 9: Propiedades mecánicas del modelo de CLT para el material reforzado con trenzado 3-D.

Propiedad	Valores
E_x (GPa)	14.7
E_y (GPa)	20.4
G_{xy} (GPa)	5.0
v_{xy}	0.187

Los resultados obtenidos del análisis de CLT son reportados en la Tabla 9. Estos valores fueron comparados con resultados experimentales de la misma forma que los resultados del material reforzado con NCF. En la Figura 6 se muestran distintas comparaciones de (E^{Exp}/E^{An}) para las muestras ensayadas. Se determinaron experimentalmente los módulos en tensión y compresión en las direcciones de X y Y (Acosta y Zureick, 2001). En la dirección de X, se ensayaron cupones de tres anchos distintos (25 mm, 32 mm y 51 mm) y en la dirección de Y todos los cupones tuvieron igual dimensión pero distinto largo de sensores de deformación. Las condiciones de todos los cupones en compresión en ambas direcciones fue la misma. En la Figura 6a se muestra mejor correlación para los cupones de 25 mm de ancho. Cupones ensayados en tensión en la dirección de Y mostraron entre un 6% y 10% de las predicciones. Módulos en compresión en ambas direcciones están entre el 8% y el 25% por debajo de la predicción. La teoría de laminado clásico no considera el desalineamiento, la ondulación de las fibras, ni el daño inducido a las fibras durante la manufactura del material. Estas perturbaciones reducen el desempeño del material, especialmente en condición de carga en compresión (Bogetti, *et al.*, 1992 y Adams y Bell, 1994).

³ Este valor representa las dos capas exteriores del trenzado.

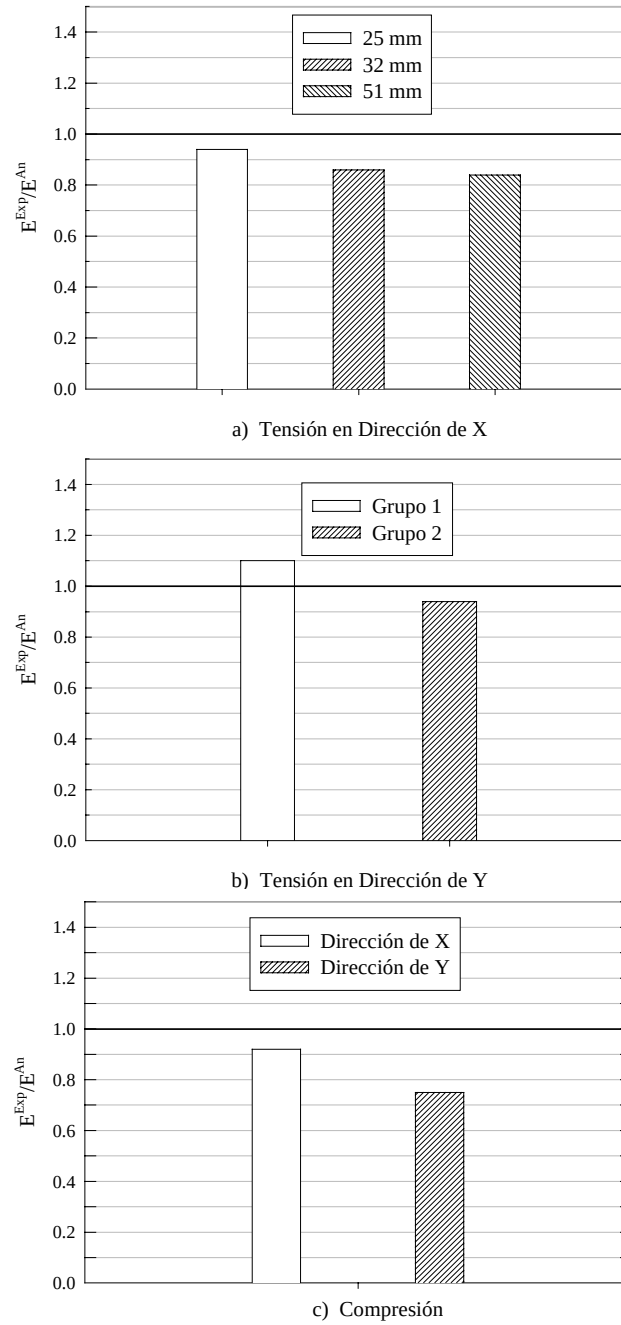


Figura 6: Comparación de la rigiees experimentales y analíticas del material reforzado con trenzado 3-D.

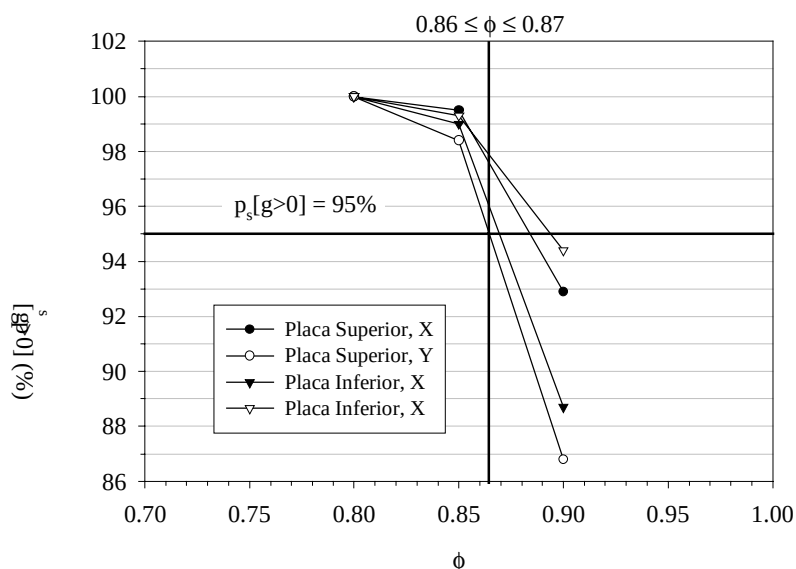


Figura 7: Gráfica de la probabilidad de $g > 0$ con respecto a valores de Φ .

ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DE VIGAS Y LOSAS

El comportamiento de las vigas de sección triangular y de los prototipos de las losas para puentes fueron corroboradas realizando análisis de modelos por elementos finitos. Estos análisis se realizaron utilizando el programa ABAQUS (1998). Las Figuras 8 y 10 muestran las mallas tridimensionales de las vigas con secciones triangulares y los prototipos de losas del ancho de cinco celdas. Las Figuras 9 y 11 muestran el detalle de las secciones transversales utilizadas en los modelos. La Figura 9a representa las vigas manufacturadas por estratificación manual reforzadas con NCF, mientras la Figura 9b representa las vigas manufacturadas por la técnica de pultrusión reforzadas con el trenzado 3-D. La Figura 12a muestra el detalle de la sección transversal y el refuerzo correspondiente al espécimen 3 de los prototipos de losas donde todos los componentes fueron manufacturados por la técnica de estratificación manual y reforzados con NCF (Acosta y Zureick, 2001). La Figura 12b muestra el detalle de la sección transversal con los refuerzos correspondientes al espécimen 4 de los prototipos de losas donde las placas externas fueron manufacturadas por la técnica de estratificación manual reforzadas con NCF y las vigas triangulares por la técnica de pultrusión reforzadas con el trenzado 3-D.

Los modelos consistieron en elementos de cáscara gruesa plana de ocho nodos con cuatro puntos de integración (orden de integración reducida) y seis grados de libertad por nodos (tres rotaciones y tres traslaciones). Los espesores y propiedades del material utilizados para los materiales reforzados con NCF fueron los mismos reportados en las Tablas 3 y 5 respectivamente. Los espesores y las propiedades del material reforzado con el trenzado 3-D que se utilizaron en los modelos están reportadas en la Tabla 8. La capa del material adhesivo del tipo epoxi utilizado para ensamblar los prototipos de las losas fue ignorada en los modelos de elementos finitos pues en análisis preliminares la diferencia de los resultados no fue significativa. Las suposiciones para el análisis fueron comportamiento lineal del material y deformaciones geométricas no-lineales.

Las condiciones de borde para los modelos fueron simplemente apoyados, con los grados de libertad restringidos como se muestra en las Figuras 7 y 9. Las cargas aplicadas a los triángulos se muestran en la Figura 8. Los nodos para la viga en posición invertida fueron rígidamente conectados para simular las placas de acero que se utilizaron en la distribución de las cargas. Los modelos de los prototipos de losas fueron cargados al centro por una presión uniforme como se muestra en la Figura 10. El número de elementos donde se aplicó la carga se determinó basado en el tamaño de la placa de acero utilizada en la prueba. Debido a que la malla no coincidió exactamente con los tamaños actuales de las placas, éstas fueron ajustadas a los modelos. Al modelo del espécimen 3 se le aplicó presión sobre ocho elementos cubriendo un área de 25.4 cm x 24.6 cm. De manera similar, al modelo del espécimen 4 se le aplicó la presión sobre 16 elementos cubriendo un área de 24.5 cm x 50.8 cm. No se intentó modificar el modelo para considerar la rigidez de la placa utilizada para distribuir la carga sobre los especímenes.

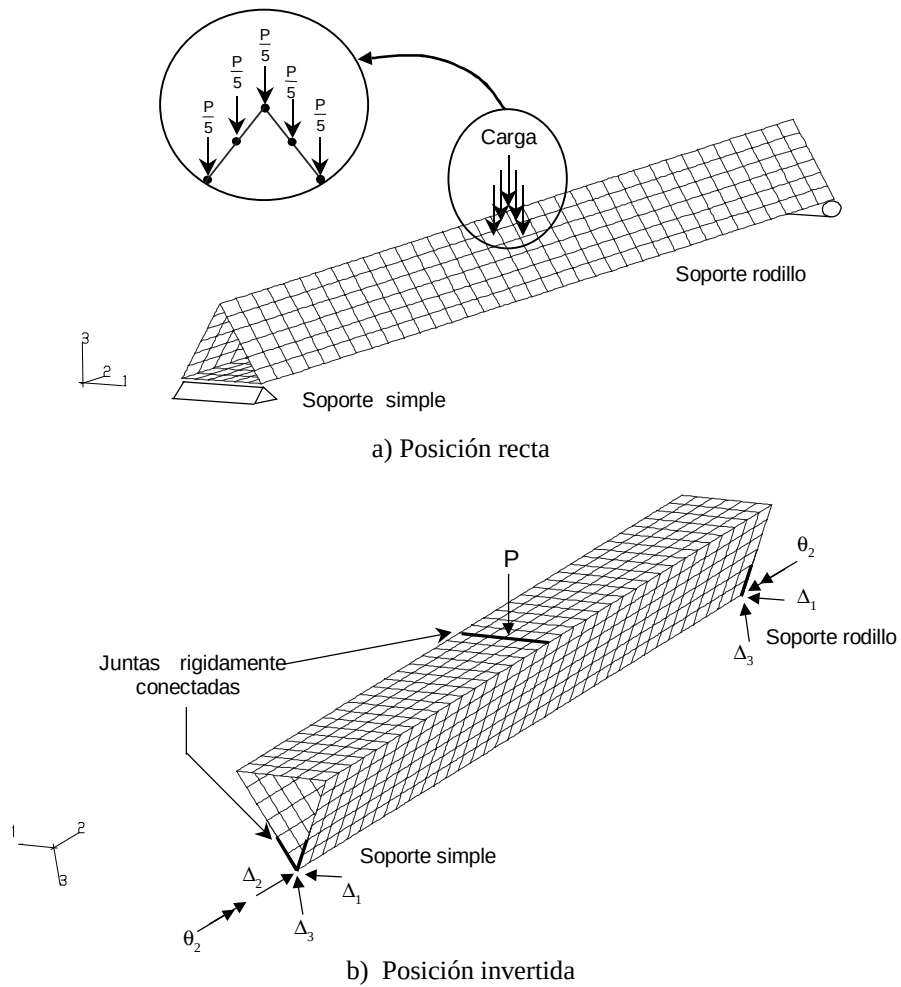


Figura 8: Detalles de los modelos de elementos finitos para las vigas con sección triangular.

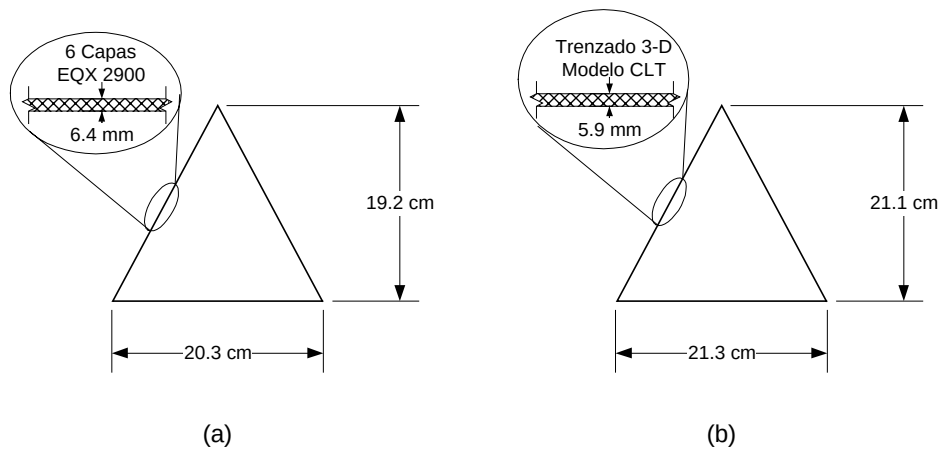


Figura 9: Detalles de las secciones de los modelos de elementos finitos para vigas triangulares: a) NCF, b) trenzado 3-D.

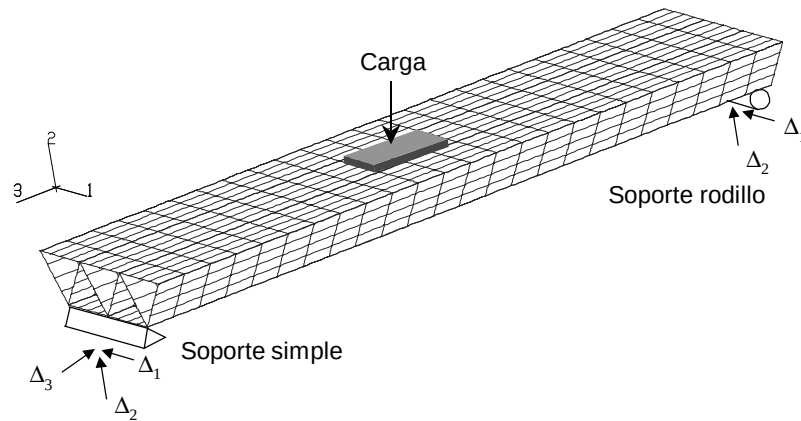


Figura 10: Malla de elementos finitos para especímenes de losas.

Se compararon los desplazamientos medidos a la mitad del largo de apoyo y deformaciones en los extremos de tensión y compresión de las vigas de sección triangular con los resultados de modelos de elementos finitos. La Figura 13 muestra la localización de algunos de los sensores de deformación en estas vigas. Las Tablas 9 y 10 presentan ejemplos de comparación de deflexiones para los dos tipos de vigas estudiadas. En ellas se presentan los valores de deflexiones experimentales, analíticos y la razón δ^{Exp}/δ^{An} para distintos largos de apoyo. También se presenta el nivel de carga al cual fueron sometidas las vigas. Se puede observar una diferencia entre resultados experimentales y analíticos. La Figura 14 muestra gráficamente la comparación de las deflexiones experimentales y analíticas. Teóricamente todos los puntos correspondientes a un solo elemento deberían coincidir en una línea horizontal con respecto al largo de apoyo. Esto no fue observado en ninguno de las comparaciones realizadas. Este comportamiento sugiere que ocurrió un error experimental que incrementó proporcional al cambio del largo de apoyo.

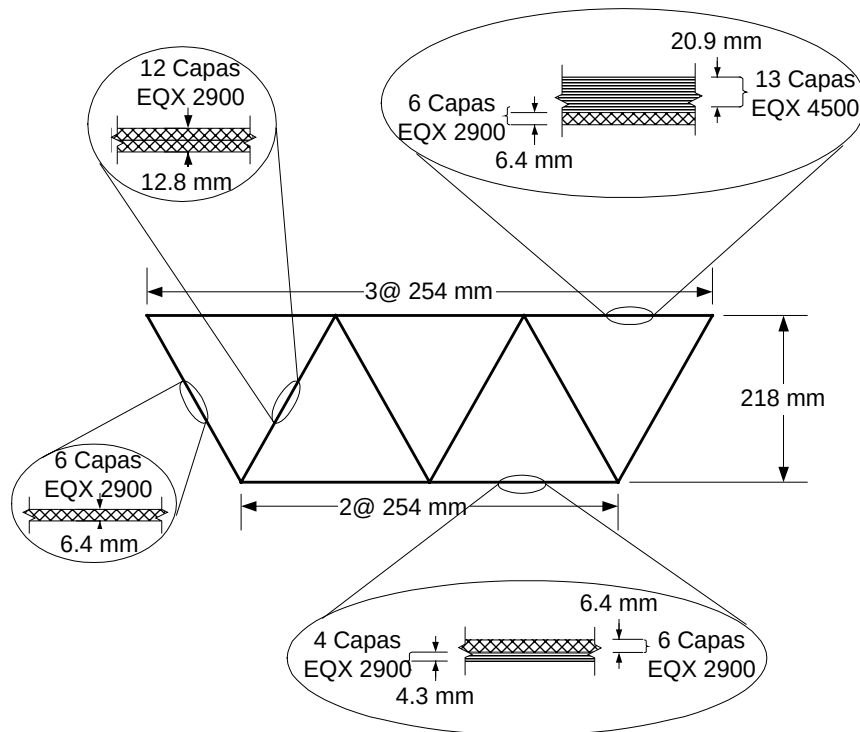


Figura 11: Detalles de las secciones de los modelos de elementos finitos para prototipos de losas.
a) Modelo con todos los componentes reforzados con NCF.

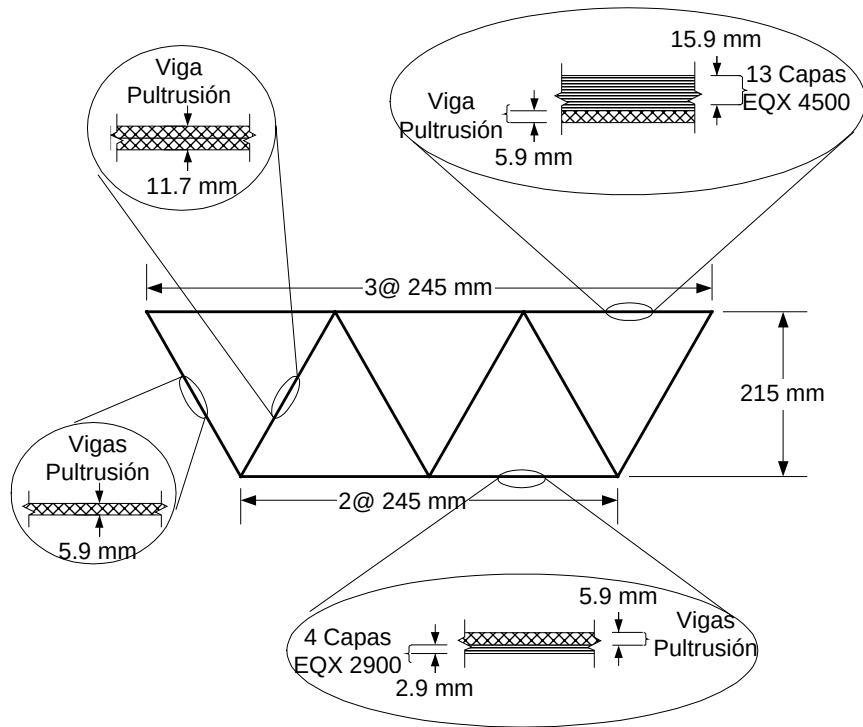


Figura 12: Detalles de las secciones de los modelos de elementos finitos para prototipos de losas.
b) Modelo con vigas triangulares reforzadas con trenzado 3-D.

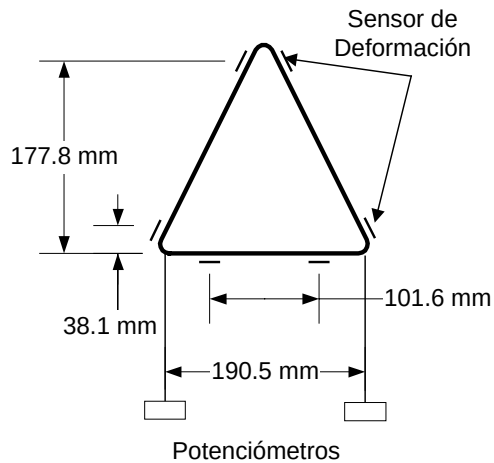


Figura 13: Localización de los sensores de deformación en vigas triangulares.

Tabla 10: Comparación de deflexiones para vigas triangulares reforzadas con NCF cargada en tres puntos (Viga STB).

Largo Entre Apoyos (L) y Carga Aplicada (P)		δ^{Exp} (mm)	δ^{An} (mm)	$\delta^{Exp} / \delta^{An}$
L = 1.52 m	P = 20.1 kN	8.6	7.1	1.21
L = 2.13 m	P = 16.0 kN	14.9	14.5	1.03
L = 2.74 m	P = 11.1 kN	20.6	20.9	0.98

Tabla 11: Comparación de deflexiones para vigas triangulares reforzadas con trenzado 3-D cargada en tres puntos (Viga BTC).

Largo Entre Apoyos (L) y Carga Aplicada (P)		δ^{Exp} (mm)	δ^{An} (mm)	$\delta^{Exp} / \delta^{An}$
L = 1.52 m	P = 13.7 kN	4.0	4.0	0.99
L = 2.13 m	P = 9.8 kN	6.9	7.3	0.94
L = 2.74 m	P = 7.3 kN	9.8	11.3	0.86
L = 3.35 m	P = 4.4 kN	10.4	12.3	0.84

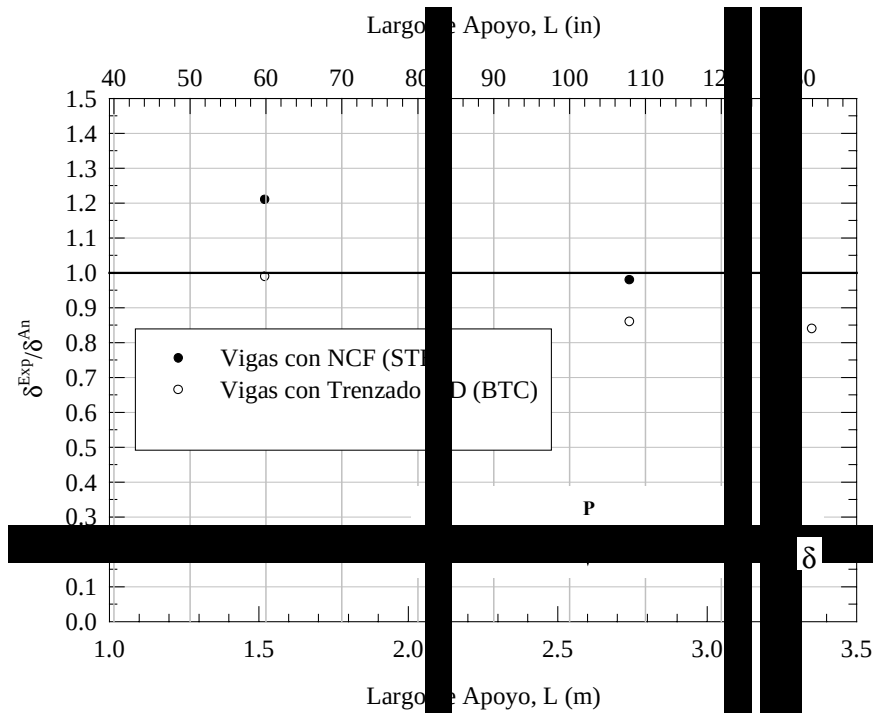


Figura 14: Gráfica de la razón $\delta^{Exp} / \delta^{An}$ en función del largo de apoyo.

De modo similar, las Tablas 12 y 13 muestran la comparación entre las deformaciones experimentales y analíticas de las vigas. Estas tablas presentan las deformaciones experimentales y analíticas junto a la razón $\epsilon^{Exp} / \epsilon^{An}$ para el lado en tensión y compresión de los elementos para cada largo entre apoyos ensayado junto con el valor de la carga máxima aplicada. Estos valores son menos confiables que las deformaciones pues los sensores de deformación son propensos a efectos locales del material y a errores de localización alrededor de la sección. Además, ningún nodo de los modelos de elementos finitos coincidió con la localización de los sensores de deformación, por lo que los valores se obtuvieron en los puntos de integración de los elementos que correspondieron a su localización.

Las Figuras 15 y 16 muestran gráficas comparando los diagramas de carga-deflexión experimentales y analíticos para los especímenes tres y cuatro de las losas. El espécimen tres está formado por componentes manufacturados por la técnica de estratificación manual y reforzados con la NCF mientras que el espécimen cuatro tiene placas planas similares al espécimen tres pero las vigas fueron manufacturadas por la técnica de pultrusión y reforzadas con el trenzado 3-D. Se puede observar que en ambos hay buena correlación de los valores experimentales y analíticos hasta el nivel de carga donde comienza a ocurrir daños ya sea en alguno de los componentes o en el adhesivo que mantiene las partes unidas. En el caso del espécimen tres esto ocurrió a 267 kN, mientras que para el espécimen cuatro ocurrió cerca de los 350 kN. A pesar de que la no-linealidad geométrica fue considerada en el análisis, el comportamiento de los modelos fue lineal. El daño no se consideró en el análisis.

Tabla 12: Comparación de las deformaciones en las vigas reforzadas con NCF (Viga STB).

Largo Entre Apoyos (L) Carga Aplicada (P)	Tensión					Compresión				
	ϵ^{Exp} (%)		ϵ^{An} (%)	$\epsilon^{Exp}/\epsilon^{An}$		ϵ^{Exp} (%)		ϵ^{An} (%)	$\epsilon^{Exp}/\epsilon^{An}$	
	S1	S2		S1	S2	S1	S2		S1	S2
L = 1.83 m P = 17.3 kN	0.15	0.13	0.15	1.00	0.87	0.24	0.25	0.25	0.96	1.00
L = 2.29 m P = 15.1 kN	0.16	0.15	0.17	0.94	0.88	0.26	0.28	0.27	0.96	1.04
L = 2.74 m P = 13.3 kN	0.17	0.16	0.18	0.94	0.89	0.27	0.29	0.25	1.08	1.16

Tabla 13: Comparación de las deformaciones en las vigas reforzadas con trenzado 3-D (Viga BTC).

Largo Entre Apoyos (L) Carga Aplicada (P)	Tensión					Compresión				
	ϵ^{Exp} (%)		ϵ^{An} (%)	$\epsilon^{Exp}/\epsilon^{An}$		ϵ^{Exp} (%)		ϵ^{An} (%)	$\epsilon^{Exp}/\epsilon^{An}$	
	S1	S2		S1	S2	S1	S2		S1	S2
L = 1.52 m P = 13.7 kN	0.052	0.052	0.04	1.30	1.30	0.059	0.059	0.08	0.74	0.74
L = 2.13 m P = 9.8 kN	0.073	0.074	0.08	0.91	0.93	0.082	0.083	0.11	0.75	0.75
L = 2.74 m P = 7.3 kN	0.082	0.083	0.09	0.91	0.92	0.091	0.093	0.13	0.70	0.72
L = 3.35 m P = 4.4 kN	0.067	0.067	0.07	0.96	0.96	0.073	0.074	0.10	0.73	0.74

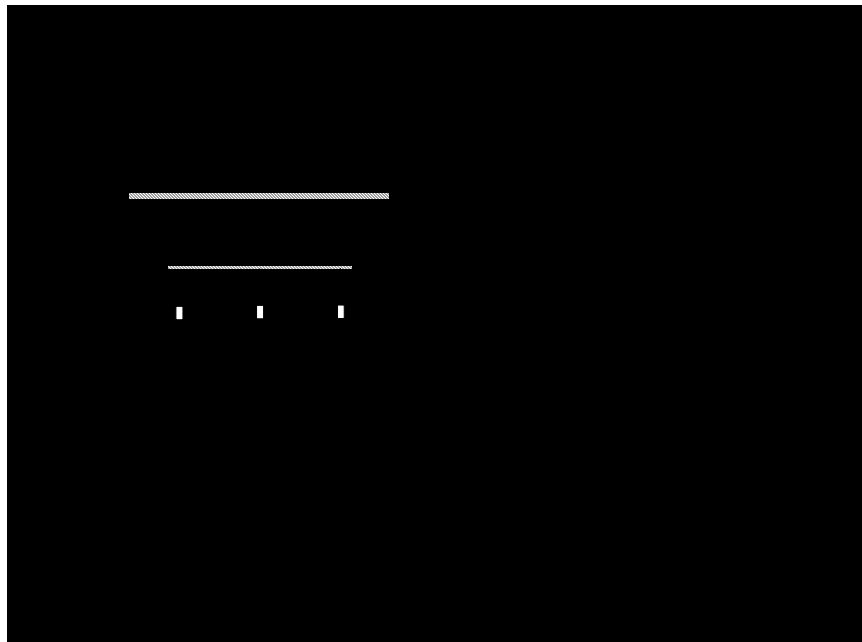


Figura 15: Comparación entre las deflexiones experimentales y analíticas (Especimen 3).

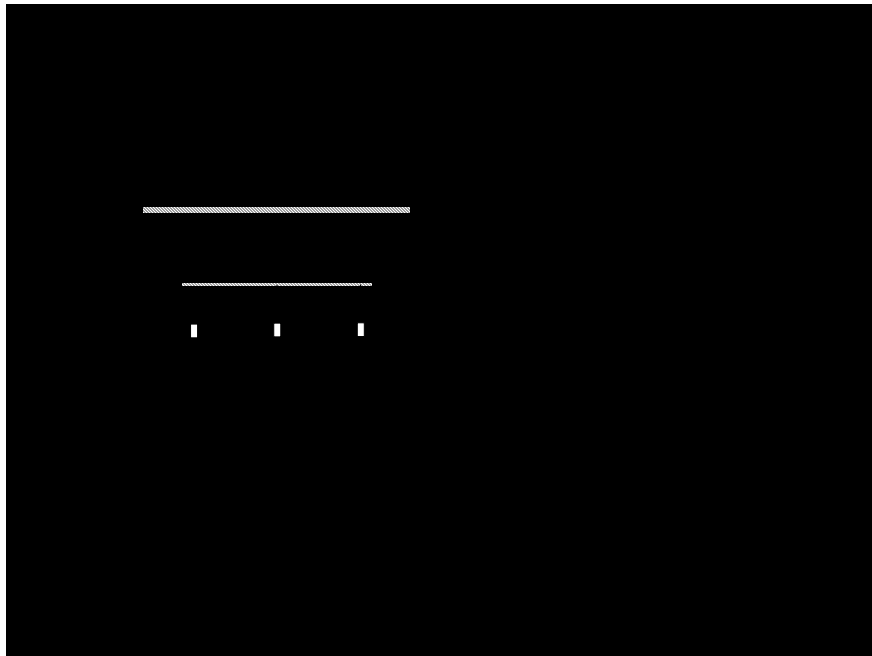


Figura 16: Comparación entre las deflexiones experimentales y analíticas (Especimen 4).

CONCLUSIONES

Este artículo presenta la verificación analítica de las propiedades mecánicas de losas para puentes hechas de Polímeros Reforzados con Fibras desarrolladas en el *Georgia Institute of Technology*. La parte experimental del trabajo se presentó en el artículo por Acosta y Zureick (2001). Se aproximó el comportamiento de los materiales que constituyeron los componentes de las losas al nivel de cupones, vigas y prototipos de losas a escala real. De este trabajo surgen las siguientes conclusiones:

- La teoría clásica de laminado puede ser utilizada para estimar los módulos de elasticidad en las direcciones principales del material para el refuerzo con las telas cosidas (NCF), sin embargo, éste pierde precisión en el análisis equivalente del material reforzado con el trenzado 3-D, el cuál contiene perturbaciones al arreglo de las fibras causadas durante el proceso de manufactura.
- Se proponen los siguientes valores de reducción ϕ : 0.85 - placas planas y NCF, 0.75 - vigas y NCF, y 0.55 - vigas y trenzado 3-D. Estos permiten estimar las propiedades de los materiales estudiados con cierto nivel de confiabilidad considerando sus variabilidades inherentes.
- A pesar de las simplificaciones realizadas en los análisis de los modelos de elementos finitos, estos proporcionaron resultados de deflexiones aceptables en comparación con los obtenidos experimentalmente.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer al Dr. Abdul-Hamid Zureick por el apoyo a través del desarrollo de este trabajo. También desea agradecer a la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez y a todas las instituciones que colaboraron financieramente con esta investigación canalizando los recursos financieros a través del *Georgia Institute of Technology* en Atlanta, Georgia, Estados Unidos.

APÉNDICE: NOTACIÓN

$E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}$	Propiedades mecánicas en ejes principales para una capa unidireccional
$E_x, E_y, G_{xy}, \nu_{xy}$	Propiedades mecánicas de un laminado
E^{Exp}, E^{An}	Módulos de elasticidad experimentales y analíticos
g	Función estadística de rendimiento
t_i, t_f	Espesores
V_f	Fracción de volumen
w_i	Fracción de peso
w_{af}	Peso por área unitaria
$\epsilon^{Exp}, \epsilon^{An}$	Deformaciones

$\delta^{Exp}, \delta^{An}$	Deflexiones
ρ_f	Densidad de fibras
ϕ	Factor de reducción

REFERENCIAS

- ABAQUS Reference Manual; version 5.8. (1998). Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI.
- Acosta, F. J. (1999). *Experimental Characterization of the Mechanical and Structural Properties of Fiber Reinforced Polymeric Bridge Deck Components*. Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology.
- Acosta, F. J., y Zureick, A.H. (2001). "Determinación Experimental de las Propiedades Mecánicas de Losas para Puentes de Polímeros Reforzados con Fibras", *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 1(1), pp. 3-20.
- Adams, D. O., y Bell, S. J. (1994). "Compression Strength Reductions in Composite Laminates Due to Multiply-Layer Waviness." *Composites Science and Technology*, 53, pp. 207-212
- Barbero, E. (1998). *Introduction to Composite Materials Design*, Taylor & Francis, Philadelphia, PA, Estados Unidos.
- Bettigole, N. H. (1990). "Replacing Bridge Decks," *Civil Engineering*, 6(9), pp. 76-77.
- Bogetti, T. A., Gillespie, J. W. Jr., y Lamontia, M. A. (1992). "Influence of Ply Waviness on the Stiffness and Strength Reduction on Composite Laminates." *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 5, pp. 344-369.
- Karbhari, V. M., Seible, F., Hegemier, G. A., y Zhao, L. (1997). "Fiber Reinforced Composite Decks for Infrastructure Renewal-Results and Issues." *Proceedings of the International Composites Expo'97*, Composite Institute, Nashville, TN, pp. 3-C(1-6).
- Lopez-Anido, R., y GangaRao, H. V. S. (1997). "Design and Construction of Composite Material Bridges." *Recent Advances in Bridge Engineering*, U. Meier and R. Betti (Eds), pp. 269-276.
- Lopez-Anido, R., GangaRao, H. V. S., Vedam, V., y Overby, N. (1997a). "Design and Evaluation of a Modular FRP Bridge Deck." *Proceedings of the International Composites Expo'97*, Composite Institute, Nashville, TN, pp. 3-E(1-6).
- Lopez-Anido, R., GangaRao, H. V. S., Trovillion, J., y Busel, J. (1997b). "Development and Demonstration of a Modular FRP Deck for Bridge Construction and Replacement." *Proceedings of the International Composites Expo'97*, Composite Institute, Nashville, TN, pp.16-D(1-6).
- Shih, B. J. (1995). *On the Analysis of Fiber-Reinforced Polymeric Bridge Components*. Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology.
- Zureick, A. H., Shih, B., y Munley, E. (1995). "Fiber-Reinforced Polymeric Bridge Decks." *Structural Engineering Review*, 7(3), pp. 257-266.

