

# ANÁLISIS COMPARATIVO DE ESTRUCTURAS CON Y SIN REFORZAMIENTO (FRP)

## COMPARATIVE ANALYSIS OF STRUCTURES WITH AND WITHOUT REINFORCEMENT (FRP)

**JULIO DARÍO PÁEZ CORNEJO**

Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí. [julio.paez@uleam.edu.com](mailto:julio.paez@uleam.edu.com)

### RESUMEN

Este artículo estudia las variaciones en el comportamiento estructural que implica el reforzamiento con polímeros reforzados con fibras o FRP por sus siglas en inglés (Fiber Reinforced Polymers). Para ello se elaboraron 50 modelos computacionales, que se analizaron con diversas características geométricas tales como: irregularidad en planta, irregularidad en elevación, vigas banda, vigas descolgadas, diferente número de pisos, entre otras, los cuales fueron predimensionados con el Código Ecuatoriano de la Construcción 2002 y analizadas con las Normas Ecuatorianas de la Construcción 2011. Una vez identificadas los elementos de menor capacidad, se refuerzan con FRP de acuerdo al ACI 440, para ser analizadas nuevamente y establecer las comparaciones pertinentes entre los análisis eigenvalores, modal espectral y Pushover estático, de los cuales se observa que el FRP, disminuye los periodos de vibración, aumenta la frecuencia, disminuyen los factores de participación modal y reduce las derivas en un escaso porcentaje, pero aumenta considerablemente la capacidad de la estructura permitiendo soportar mayores solicitaciones con un menor desplazamiento en la azotea.

**PALABRAS CLAVE:** normativas, comportamiento, FRP.

### ABSTRACT

This article studies the variations in the structural behavior that imply the reinforcement with fibers reinforced polymers or FRP, by its acronym in English (Fiber Reinforced Polymers). For this purpose, 50 computational models were elaborated, which were analyzed with different geometric characteristics such as: irregularity in the floor, unevenness in elevation, band beams, raised beams, different number of floors, among others, which were predimensioned with the Ecuadorian Code of Construction 2002 and analyzed with the Ecuadorian Construction Standards 2011. Once the elements of lower capacity are identified, they are reinforced with FRP according to ACI 440, to be analyzed again and to establish the relevant comparisons between the eigenvalues, modal spectral and static Pushover analyzes, of which it is observed that the FRP decreases the periods of vibration and increase the frequency, decrease the modal participation factors and reduce drifts in a small percentage, but considerably increases the capacity of the structure allowing it to withstand greater stresses with less displacement on the roof.

**KEYWORDS:** construction codes, structural behavior, FRP.

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.23878/alternativas.v17i3.211>

**RECIBIDO:** 30/05/2015

**ACEPTADO:** 30/08/2015

## INTRODUCCIÓN

Las aplicaciones de los materiales compuestos, como las fibras reforzadas con polímeros (FRP) en la ingeniería civil son recientes, aunque su utilización crece rápidamente debido a sus excelentes propiedades mecánicas, su resistencia a la corrosión, su menor peso y la flexibilidad de uso, para proyectar nuevas tipologías estructurales y para reparación de estructuras deterioradas. Sin embargo al surgir nuevas aplicaciones también aparecieron nuevos problemas, por lo que se requieren estudios que aporten nuevos conocimientos, y que permitan estandarizar las metodologías de cálculo, diseño y ejecución, garantizando así un uso apropiado de esta tecnología en constante desarrollo (Pérez, 2014).

En la actualidad la empresa Seismosoft SRL, creada en 2002 en Pavía, Italia, ha venido desarrollando el programa SEISMOSTRUCT capaz de predecir el comportamiento con grandes desplazamientos de pórticos espaciales, sometidos a cargas estáticas o dinámicas, teniendo en cuenta tanto las no linealidades geométricas, como la inelasticidad de los materiales. El programa dispone de una gran variedad de modelos de materiales (hormigón, acero, FRP, aleaciones con memoria de forma, etc.), así como también de una gran biblioteca de elementos 3D, que pueden ser utilizados para la creación de diversas secciones de acero, hormigón y compuestas.

El reforzamiento con FRP es un método de rehabilitación sísmica, empleado cuando solo ciertos elementos presentan déficit en la capacidad, ya sea a flexión, corte, carga axial o flexo-compresión, dados por cambios de uso de la estructura o por las actualizaciones de los códigos de construcción, como en el caso de Ecuador, donde en el año 2011, surgieron las Normas Ecuatorianas de la Construcción, en reemplazo del Código Ecuatoriano de la Construcción (CEC 2002), el mismo que se considera mucho más exigente en cuanto a la demanda sísmica a nivel de cargas últimas, en comparación con la demanda sísmica a nivel de cargas servicio del CEC 2000 (Rosero, 2013).

## ESTADO DE ARTE

Un estado del conocimiento el reforzamiento en las estructuras con FRP como técnica de reparación mejora las deficiencias estructurales que han conducido al deterioro y a la reducción de su funcionalidad. Asimismo, el reforzamiento como técnica de rehabilitación es eficiente, en las estructuras que no cumplen con los requisitos necesarios para garantizar un buen comporta-

miento durante eventos extremos, bien sea por inadecuados diseños o por baja calidad en la construcción, por cambio de las condiciones de uso o por la necesidad de adaptar la estructura a los requisitos de diseño actuales (Pendhari, 2007).

La rehabilitación y/o la reparación de las estructuras en hormigón armado se han realizado tradicionalmente con láminas de acero. No obstante, debido a la evidencia de la vulnerabilidad de las estructuras mostrada durante los sismos de Loma Prieta (1989), de Northridge (1994) y de Kobe (1995), eventos sísmicos que marcaron un hito importante sobre el diseño sismoresistentes y los procesos de reforzamiento efectivos, por lo que se realizaron un gran número de investigaciones para mejorar las técnicas existentes y estudiar otros materiales como refuerzo con el fin de garantizar un adecuado funcionamiento de las estructuras existentes sin causar sobrecostos (Molina, 2000; Gómez, 2002).

En el área de las estructuras reforzadas enfocada al estudio de los materiales compuestos, se han realizado ensayos a diferentes escalas de vigas, pilares, uniones viga-pilar, muros y losas de entrepiso. Las investigaciones enfatizan que el uso de los materiales compuestos como refuerzo de estructuras es una buena técnica; sin embargo, advierten que se requieren adecuados conocimientos de diseño y de construcción para estandarizar metodologías que garanticen el apropiado uso de este tipo de materiales (Eindea, 2003; Karbhadi, 2005).

Los materiales compuestos más utilizados como refuerzo son los polímeros reforzados con fibras (FRP), predominando el uso de la fibra de vidrio (GFRP) y la fibra de carbono (CFRP); en menor proporción han sido utilizados los materiales compuestos con fibra de aramida (AFRP). En los FRP, las fibras soportan las acciones mecánicas en una dirección predeterminada y la resina o matriz actúa como medio

para transferir las tensiones entre las fibras cercanas garantizando de paso la uniformidad de las deformaciones de las mismas (Car, 2000).

Debido al creciente uso del FRP en la rehabilitación y reparación de estructuras de hormigón, en algunos países se han desarrollado guías de diseño y construcción del FRP como refuerzo para edificios y puentes ACI440.2R-08 en Estados Unidos; JSCE-1997 en Japón; Standard S806-02 y CAN/CSA-S6-00 en Canadá; FPI-CEB-2001 en la Unión Europea; CNR DT 200/2004 en Italia. No obstante, todavía existe mucha incertidumbre en aspectos tales como

la durabilidad, reducción de capacidad con el tiempo, adherencia entre los diferentes sustratos, entre otros factores que motivan a continuar estudiando.

A pesar de que los compuestos tienen una resistencia más alta que la del acero, y que están conformados por fibras que, como las de carbono, tienen un módulo de elasticidad similar o superior al del acero, su uso está limitado por las deformaciones admisibles de los materiales. Por ello, generalmente el FRP tiene en las estructuras de hormigón un comportamiento elástico (Karbhadi, 2000). Esta limitación ha conducido a que en las diferentes guías de diseño de estructuras con refuerzo de FRP se deba partir de diferentes hipótesis; por ejemplo, no se considera la contribución del FRP en el diseño a compresión para evitar problemas de pandeo en las fibras mientras que a flexión se limitan las deformaciones del FRP para prevenir su delaminación (Mufti, 2007).

Los tejidos de fibra usados en el reforzamiento estructural contribuye significativamente a mejorar el desempeño de estas edificaciones frente a solicitaciones de diferente índole, en especial, las producidas por sismos, siempre y cuando se tengan adecuados sistemas de anclaje. (Vega, 2015). La facilidad de aplicación y la resistencia a la corrosión son algunas de las ventajas bien conocidas de la técnica de reequipamiento FRP sobre los métodos de reforzamiento convencionales, aunque por otro lado, el FRP es un material costoso y presenta una rotura frágil (Ehsani et al 1999).

El comportamiento mecánico de FRP difiere del comportamiento del acero de refuerzo. Los componentes del FRP son anisotrópicas debido a la orientación de las fibras en los barras y en los laminados, y se caracterizan por una alta resistencia a la tracción sólo en la dirección de las fibras de refuerzo. Este comportamiento anisotrópico afecta la resistencia al corte (ACI, 2004).

Como en el ejemplo de este artículo se estudia el comportamiento de diferentes estructuras aporticadas con y sin FRP bajo cargas laterales, teniendo en cuenta diferentes características de configuración.

### MODELOS

Con el fin de obtener información oportuna sobre estructuras que necesiten rehabilitarse y teniendo como antecedente la reforma de los códigos ecuatorianos de construcción del CEC 2002 al NEC 2011, siendo este último más

riguroso en cuanto a la demanda sísmica, y además teniendo en cuenta que la mayoría de estructuras han sido diseñadas bajo la normativa anterior.

Se plantea el análisis numérico de 50 estructuras con diferentes características con la finalidad de determinar elementos que necesiten ser reparadas para mejorar su desempeño.

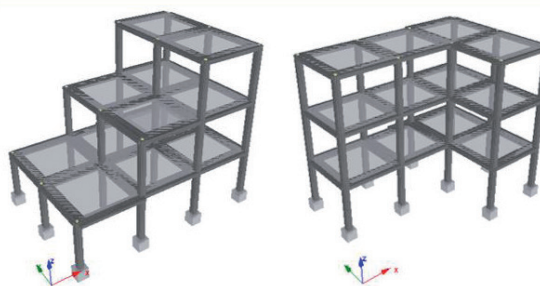


Figura 1. Estructuras bases Fuente.

Las edificaciones se diseñaron a partir de una estructura regular de 3 y 4 ejes en el sentido “x” e “y” respectivamente y con luces de 3.5 m; las dimensiones de las columnas y vigas fueron resultado del pre-dimensionamiento según el ACI 318, tal como se muestra en la figura 2.

	1 NIVEL	2 NIVELES	3 NIVELES	4 NIVELES	5 NIVELES
CON VOLADOS					
REGULARES					
IRREGULAR EN ELEVACIÓN					
IRREGULAR EN PLANTA					
DÉFICIT POR SOLICITACIÓN DE CARGA					

Figura 2. Estructuras en estudio.

Los modelos se analizaron numéricamente con la cuantía de acero determinada a partir del CEC 2002, pero se analiza bajo las demandas del NEC 2011, para determinar los elementos que necesitan reforzamiento, según el caso se elabora el diseño con FRP en base a la capacidad

resistente del elemento y posteriormente se ejecuta el análisis de la estructura reforzada.

**RESULTADOS DE LOS MODELOS SIN REFORZAMIENTO  
CORTANTE BASAL**

Los valores del cortante basal, corresponden a un cortante estático este varía proporcionalmente, según las características geométricas de cada estructura y del coeficiente sísmico; el cual es constante para estructuras de 1 a 4 niveles según su tipología, así tenemos: con volados, irregular en planta, entre otros; esto ocurre puesto que todos los modelos están bajo el mismo tipo de suelo (Suelo tipo S2), zona sísmica y uso (vivienda).

Por tanto el cortante basal cambia en función del tipo de estructura (factor de respuesta R), Irregularidad (factores  $\phi_p$ ,  $\phi_e$ ), la altura de la edificación (período de vibración), y el peso reactivo, de los cuales el la altura del edificio (de la cual depende el período de vibración), es la más influyente para la diferencia de resultados entre el CEC 2002 y las NEC 2011.

El coeficiente sísmico para el cortante basal disminuye, a partir de h= 15m (5 pisos) en el CEC 2002, mientras que en el NEC 2011 se mantiene constante hasta estructuras de h=24m (8 pisos), esto se debe a la variación de la aceleración espectral que está en función del periodo, y este a su vez de la altura (figura 3).

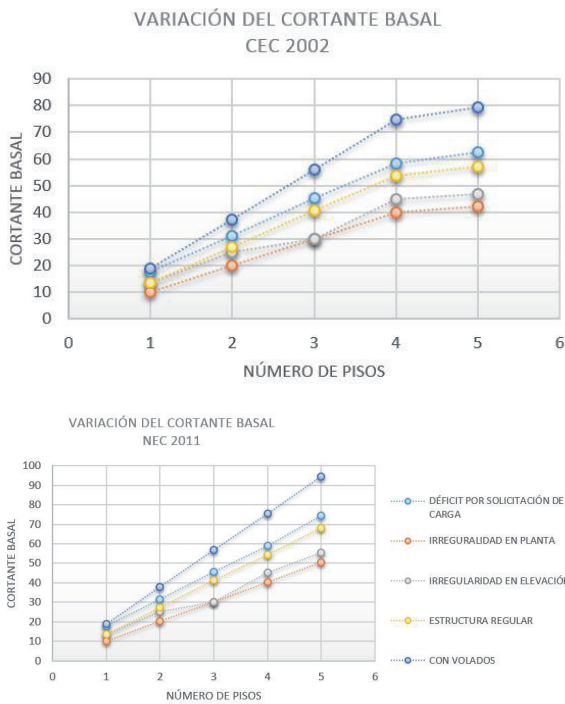


Figura 3. Variación del cortante basal, estructuras con viga banda.

Al comparar el cortante basal estático resulta que la norma actual es más rigurosa, por lo que existe mayor demanda por carga lateral, y por ende aumento en las cargas solicitantes a los elementos estructurales. Es importante recalcar que en función de los parámetros de seguridad en los diseños anteriores se prevé que no todas las estructuras necesitan reforzamiento.

**SOLICITACIONES EN LOS ELEMENTOS**

La cuantía de acero en el NEC 2011 es mayor que en el CEC 2000, en un 7% que es promedio de los modelos en estudio; esto se debe al aumento del coeficiente de la fuerza sísmica en la base, y por ende las demandas de los elementos también aumentan (momentos y cortantes), por lo que ciertos elementos que cumplían con el código anterior, presentan fallas al ser analizados con las nuevas normas, sobre todo en los primeros pisos.

En el estudio también se consideró como factor de análisis modelos que tienen estructuras con vigas bandas (embebidas en la losa) y con vigas descolgadas. (tabla 1)

TABLA 1. PORCENTAJES DE ELEMENTOS QUE FALLAN

DESCRIPCIÓN		1 NIVEL	2 NIVEL	3 NIVEL	4 NIVEL	5 NIVEL	
VIGA BANDA	DÉFICIT POR SOLICITACIÓN DE CARGA	c	59	29	47	0	0
	IRREGULARIDAD EN PLANTA	p	0	0	0	0	10
	IRREGULARIDAD EN ELEVACIÓN	e	0	0	10	24	27
	ESTRUCTURA REGULAR	r	0	0	20	0	0
	CON VOLADOS	v	0	33	70	53	36
VIGA DESCOLGADA	DÉFICIT POR SOLICITACIÓN DE CARGA	c	47	12	8	0	0
	IRREGULARIDAD EN PLANTA	p	8	0	0	0	0
	IRREGULARIDAD EN ELEVACIÓN	e	0	0	0	0	0
	ESTRUCTURA REGULAR	r	0	0	0	0	0
	CON VOLADOS	v	0	0	4	4	4

DESCRIPCIÓN		1	2	3	4	5	
		NIVEL	NIVEL	NIVEL	NIVEL	NIVEL	
VIGA BANDA	Déficit por sollicitación de carga	c	59	29	47	3	11
	Irregularidad en planta	p	0	0	8	2	43
	Irregularidad en elevación	e	0	0	58	60	74
	Estructura regular	r	0	0	20	3	10
	Con volados	v	0	64	92	75	82
VIGA DESCOLGADA	Déficit por sollicitación de carga	c	47	12	8	0	0
	Irregularidad en planta	p	8	0	0	0	0
	Irregularidad en elevación	e	0	0	0	0	0
	Estructura regular	r	0	0	0	0	0
	Con volados	v	0	0	45	15	27

Se puede apreciar que los porcentajes de elementos que fallan en las estructuras construidas con losas planas o vigas bandas son altos, debido a que las sollicitaciones son mayores y no absorben de manera óptima los esfuerzos generados.

### REFORMAMIENTO CON FRP

Una vez determinados los diferentes problemas en las estructuras de estudio, 40% de las estructuras presentan problemas de derivas y también en el cortante en las vigas. En la tabla 2, se presentan los diferentes reforzamientos que se plantean realizar de acuerdo al tipo de falla.

TABLA 2. TIPOS DE REFORZAMIENTOS

NEC 2011										
DESCRIPCIÓN	VIGA BANDA					VIGA DESCOLGADA				
	DÉFICIT POR SOLICITACIÓN DE CARGA	IRREGULARIDAD EN PLANTA	IRREGULARIDAD EN ELEVACIÓN	ESTRUCTURA REGULAR	CON VOLADOS	DÉFICIT POR SOLICITACIÓN DE CARGA	IRREGULARIDAD EN PLANTA	IRREGULARIDAD EN ELEVACIÓN	ESTRUCTURA REGULAR	CON VOLADOS
	c	p	e	r	v	c	p	e	r	v
1 NIVEL						C	C			
2 NIVEL					D	C				D
3 NIVEL	D	D	D	D	D	R+D				R+D
4 NIVEL	D	D	D	D	D		D	D		R+D
5 NIVEL	D	D	D	D	D					R+D
C	Reforzamiento a corte en vigas									
D	Reforzamiento a Flexo-compresión en Colimnas con encamisado y platinas de FRP									
R+D	Reforzamiento a corte en vigas y a flexo-compresión en columnas con encamisado de FRP									
D	Reforzamiento a flexo-compresión en columnas con encamisados de FRP									

TABLA 3. PERÍODOS DE VIBRACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS CON Y SIN REFORZAMIENTO

PERÍODOS DE VIBRACIÓN, ESTRUCTURA SIN REFORZAR (MODO 1)					
DESCRIPCIÓN	VIGA BANDA				
	DÉFICIT POR SOLICITACIÓN DE CARGA	IRREGULARIDAD EN PLANTA	IRREGULARIDAD EN ELEVACIÓN	ESTRUCTURA REGULAR	CON VOLADOS
1 NIVEL	0.284528	0.226213	0.241564	0.241564	0.6189
2 NIVEL	0.479438	0.439315	0.444125	0.463535	0.5532
3 NIVEL	0.756143	0.675542	0.596227	0.713164	0.8386
4 NIVEL	0.833744	0.765043	0.696907	0.818181	0.9396
5 NIVEL	0.892914	0.840179	0.73437	0.877009	10.035
DESCRIPCIÓN	VIGA DESCOLGADA				
	DÉFICIT POR SOLICITACIÓN DE CARGA	IRREGULARIDAD EN PLANTA	IRREGULARIDAD EN ELEVACIÓN	ESTRUCTURA REGULAR	CON VOLADOS
1 NIVEL	0.244329	0.191238	0.205116	0.204055	0.250639
2 NIVEL	0.392247	0.36128	0.351767	0.376888	0.452733
3 NIVEL	0.596734	0.529937	0.478978	0.559504	0.666688
4 NIVEL	0.59715	0.54452	0.500024	0.579081	0.677116
5 NIVEL	0.627509	0.578487	0.513125	0.612762	0.729293

PERÍODOS DE VIBRACIÓN, ESTRUCTURAS REFORZADAS (MODO 1)					
VIGA BANDA					
DESCRIPCIÓN	DÉFICIT POR SOLICITACIÓN DE CARGA	IRREGULARIDAD EN PLANTA	IRREGULARIDAD EN ELEVACIÓN	ESTRUCTURA REGULAR	CON VOLADOS
1 NIVEL	0.284528	0.479438	0.732021	0.817076	0.859923
2 NIVEL	0.226213	0.439315	0.656892	0.749837	0.82328
3 NIVEL	0.241564	0.444125	0.565578	0.682901	0.718883
4 NIVEL	0.241564	0.463535	0.675782	0.802635	0.860372
5 NIVEL	0.6189	0.4388	0.7965	0.9067	0.9685
VIGA DESCOLGADA					
DESCRIPCIÓN	DÉFICIT POR SOLICITACIÓN DE CARGA	IRREGULARIDAD EN PLANTA	IRREGULARIDAD EN ELEVACIÓN	ESTRUCTURA REGULAR	CON VOLADOS
1 NIVEL	0.239716	0.392227	0.569332	0.59715	0.627509
2 NIVEL	0.191239	0.36128	0.529937	0.535499	0.578487
3 NIVEL	0.205116	0.351767	0.478978	0.49134	0.513125
4 NIVEL	0.204055	0.376888	0.559504	0.579081	0.612762
5 NIVEL	0.250639	0.436186	0.625372	0.663743	0.68733

La disminución del período indica que la estructura se volvió más rígida luego del reforzamiento con FRP, pero su efecto de rigidización no es significativo, resultado esperado debido a la escasa inercia y por lo tanto escasa rigidez que aporta al elemento y de manera general a toda la estructura (figura 5).

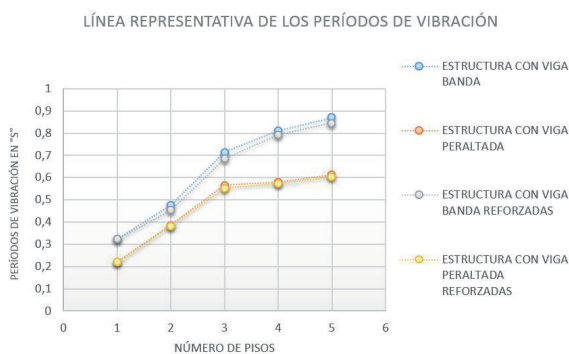


Figura 4. Representación gráfica de los periodos de vibración.

### PARTICIPACIÓN MODAL

El reforzamiento estructural con FRP, tiene una función similar al proporcionado por el acero de refuerzo, es decir aumenta la capacidad de deformación del elemento y por ende de la estructura, lo cual se observa en la siguientes tabla, donde los factores de participación modal de las edificaciones sin reforzar son ligeramente mayores, en comparación con las estructuras reforzadas con fibras de FRP.

TABLA 4. PORCENTAJES DE LAS MASAS MODALES EFECTIVAS DE LAS ESTRUCTURAS SIN REFORZAR (MODO 1 "UY")					
VIGA BANDA					
DESCRIPCIÓN	DÉFICIT POR SOLICITACIÓN DE CARGA	IRREGULARIDAD EN PLANTA	IRREGULARIDAD EN ELEVACIÓN	ESTRUCTURA REGULAR	CON VOLADOS
1 NIVEL	99.96%	87.51%	85.99%	82.37%	80.04%
2 NIVEL	99.75%	87.00%	82.96%	79.85%	78.35%
3 NIVEL	99.95%	74.91%	62.28%	61.99%	59.58%
4 NIVEL	99.92%	87.57%	83.78%	81.08%	79.56%
5 NIVEL	98.92%	83.78%	76.96%	79.07%	78.73%
VIGA DESCOLGADA					
DESCRIPCIÓN	DÉFICIT POR SOLICITACIÓN DE CARGA	IRREGULARIDAD EN PLANTA	IRREGULARIDAD EN ELEVACIÓN	ESTRUCTURA REGULAR	CON VOLADOS
1 NIVEL	0.239716	0.392227	0.569332	0.59715	0.627509
2 NIVEL	0.191239	0.36128	0.529937	0.535499	0.578487
3 NIVEL	0.205116	0.351767	0.478978	0.49134	0.513125
4 NIVEL	0.204055	0.376888	0.559504	0.579081	0.612762
5 NIVEL	0.250639	0.436186	0.625372	0.663743	0.68733

La disminución de los factores de participación modal puede ser beneficiosa en pequeñas proporciones, pero es posible que genera ciertos inconvenientes, al permitir que los modos de vibración superiores intervengan de manera significativa, en el comportamiento estructural de la edificación, sobre todo en estructuras con vigas banda, que son más susceptibles a disminuir la masa participante de los primeros modos (tabla 4).

TABLA 5.

PORCENTAJES DE LAS MASAS MODALES EFECTIVAS DE LAS ESTRUCTURAS REFORZADAS (MODO 1 "UY")					
VIGA BANDA					
DESCRIPCIÓN	DÉFICIT POR SOLICITACIÓN DE CARGA	IRREGULARIDAD EN PLANTA	IRREGULARIDAD EN ELEVACIÓN	ESTRUCTURA REGULAR	CON VOLADOS
1 NIVEL	99.96%	87.51%	84.71%	81.40%	78.44%
2 NIVEL	99.75%	87.00%	81.61%	78.94%	77.65%
3 NIVEL	99.95%	74.91%	59.41%	60.88%	58.58%
4 NIVEL	99.92%	87.57%	81.24%	80.11%	78.79%
5 NIVEL	98.92%	67.60%	75.31%	77.35%	77.52%
VIGA DESCOLGADA					
DESCRIPCIÓN	DÉFICIT POR SOLICITACIÓN DE CARGA	IRREGULARIDAD EN PLANTA	IRREGULARIDAD EN ELEVACIÓN	ESTRUCTURA REGULAR	CON VOLADOS
	c	p	e	r	v
1 NIVEL	99.87%	89.53%	85.67%	84.42%	82.79%
2 NIVEL	99.74%	89.49%	85.27%	81.52%	79.79%
3 NIVEL	99.65%	76.25%	63.47%	61.69%	60.20%
4 NIVEL	99.63%	89.06%	85.52%	83.01%	81.92%
5 NIVEL	59.19%	70.37%	70.95%	77.82%	75.65%

Se presenta también de forma gráfica la tendencia de los factores de participación del primero modo tanto de las estructuras con y sin el reforzamiento de FRP (figura 5).

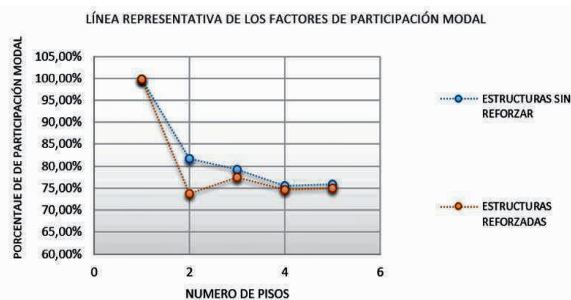


Figura 5. Porcentaje de disminución de las masas participante

Se puede notar la eficacia del FRP para reducir los factores de participación modal es inversamente proporcional a la masa de la estructura ya que esta disminuye al aumentar en número de pisos, esto se debe a que normalmente solo se refuerzan los elementos de los niveles inferiores al ser los más críticos.

## DERIVAS

Del análisis de respuesta espectral, se obtuvieron los siguientes resultados referentes a las derivas que muestran, la disminución en porcentajes bajos, lo que indica que el uso práctico del FRP como elemento rigidizador global, es ineficiente, esto se debe a la escasa sección transversal que aporta al elemento; sin embargo al confinar a los elementos, aumenta la resistencia a la compresión, y por lo tanto su módulo de elasticidad, modificando levemente la rigidez del elemento y de la estructura, permitiendo actuar en los puntos frágiles de la estructura, mejorado la capacidad portante del elemento y contribuyendo al desempeño estructural.

## CURVA DE CAPACIDAD

La capacidad completa de una estructura depende de la capacidad de esfuerzos y deformación de cada componente estructural. (Mora, 2009). La curva de capacidad se obtiene aplicando la técnica del pushover mediante un análisis estático no lineal. Al reforzar con FRP aumenta la pendiente de la curva de capacidad por lo que la estructura es capaz de resistir una mayor sollicitación lateral con un menor desplazamiento en la azotea.

Esta variación de tendencia lineal, depende de las características propias de cada estructura, es decir de su configuración geométrica, de los materiales que la conforman, de las cargas solicitantes, así como del reforzamiento con FRP, siendo esta variación directamente proporcional en la mayoría de casos, y llegando a aumentar hasta en un 35% la capacidad de la estructura. No obstante, como el reforzamiento por FRP aumenta la capacidad de la estructura esta puede ser inducida a padecer de una falla frágil, así tenemos el caso de la estructura de 3 niveles con viga descolgada y volados en dos de sus caras P3V, la cual disminuye ligeramente su capacidad (figura 6).

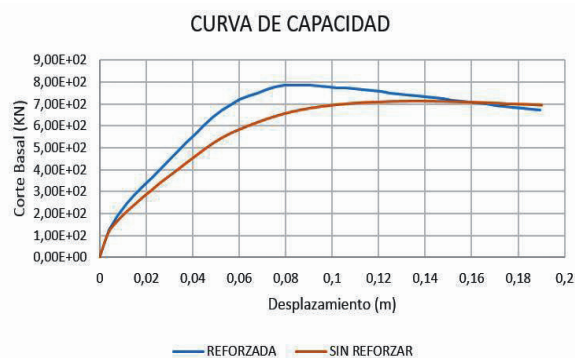


Figura 6. Curva de capacidad de la estructura P3V

El reforzamiento de una columna solo es posible cuando la fuerza axial máxima aplicada y flexión momento,  $P_u$  y  $M_u$  caen por encima de la línea de falla balanceada, esto se debe al hecho de que el reforzamiento es necesario cuando tengan una falla a compresión, si tiene una falla a flexión este tipo de reforzamiento es por demás innecesario, ya que la falla a flexión es la falla esperada en una columna, es decir se diseña este elemento para que falle primero a flexión "falla dúctil" antes que a compresión puesto que es una "falla frágil" (figura 7).

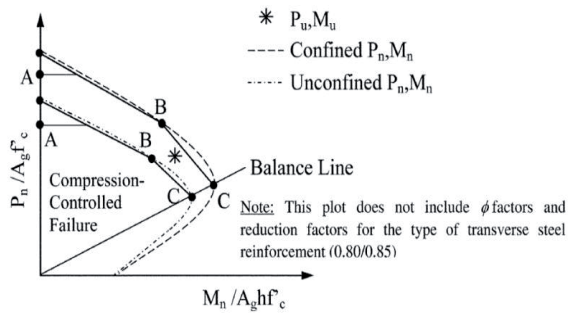


Figura 7. Diagrama de Interacción momento carga axial (ACI, 2008).

Es importante recordar que al aumentar la capacidad a flexión, la fuerza cortante que se transmite en los apoyos es mayor, esto podría cambiar el tipo de falla del elemento de una falla a flexión (de un tipo más dúctil), a una falla a cortante (de un tipo más frágil), por lo que el reforzamiento se debe emplear, cuando la falla a flexión del elemento afecta considerablemente la estructura, es decir que esta desencadena un mecanismo de colapso, de igual forma se deben tomar las debidas precauciones por el efecto de despegue del FRP del sustrato "debonding" y someter a un análisis estructural para evitar daños colaterales por el reforzamiento (ASCE 41, 2007).

De acuerdo con los resultados, la curva pushover varia significativamente de una estructura de un nivel a una de 5 niveles, una estructura de 1 piso está diseñada para resistir un valor específico de cortante basal en función de su peso, pero este valor varía según el número de pisos, estos valores se reflejan claramente en las curvas de capacidad sin normalizar, por esta razón se decide normalizar las gráficas en función de su cortante basal y el desplazamiento bajo dicha sollicitación; con la finalidad de determinar una curva representativa, y determinar la capacidad de cada estructura en relación a su propio cortante basal, tal como se muestra en la figura 8.

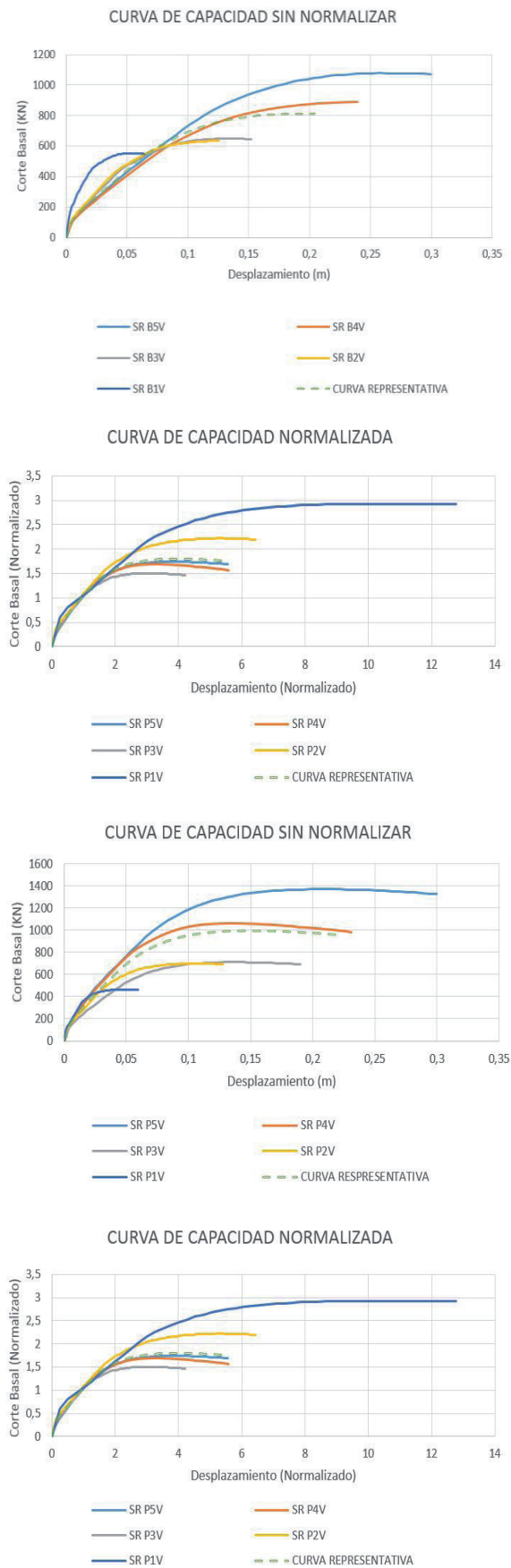


Figura 8. Curvas de capacidad normalizadas.



Las curvas de capacidad no normalizadas de las estructuras de 5 niveles presentan aparentemente un mayor desempeño estructural, sin embargo en las curvas de capacidad normalizadas las estructuras de un nivel son las que tienen un mayor desempeño al ser capaces de resistir alrededor de doce veces el cortante basal de diseño.

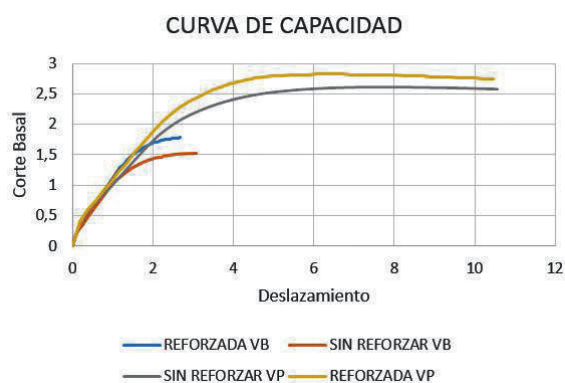


Figura 9. Curvas de capacidad normalizadas.

Se puede apreciar, que las estructuras con vigas peraltadas presentan un mejor comportamiento estructural, indistintamente de si son o no reforzadas; a pesar de que, las estructuras con vigas bandas aumenten en un 30% la línea de tendencia, y las estructuras con viga peraltada solo un 5% post- reforzamiento.

### CONCLUSIONES

Una vez analizado las estructuras con y sin reforzamiento se concluye:

- Las fibras reforzadas con polímeros constituyen, una gran herramienta para la rehabilitación estructural, por su amplia variedad de formas y de prestaciones, pero se requieren tiempo, investigación y recursos, para aprovechar al máximo todas sus potencialidades, que se encuentran actualmente limitadas a las teorías clásicas de fuerzas y rigideces.
- Las estructuras desarrolladas en este proyecto, tienen características geométricas y de armado similares, a las construcciones comunes de la costa ecuatoriana, de las que un 52% se reforzó por presentar problemas de derivas, y fallas a cortante en las vigas; lo que crea incertidumbre respecto a la integridad estructural de las edificaciones existentes, sobre todo en las edificaciones con vigas bandas, que son propensas a

padecer grandes deformaciones, por su escaso desempeño estructural.

- El NEC 2011, es un código que trabaja con la carga sísmica última, ligeramente superior a la carga sísmica mayorada otorgada por el CEC 2002, por lo que aumenta la cuantía de acero en los elementos estructurales alrededor de un 7%, pero no se puede afirmar que las exigencias de éste, ocasionen inequívocamente problemas a las estructuras diseñadas con el CEC 2002, debido a los criterios de sobre-resistencia y redundancia.
- El reforzamiento con FRP, aumenta considerablemente la capacidad individual de los elementos estructurales, y por ende de toda la estructura, puesto que es un elemento de acción pasiva, es decir trabaja a medida que se deforma, proporcionando rigidez, reduciendo el periodo, y los porcentajes de participación modal, a manera de un acero equivalente, pero es ineficiente para corregir problemas de derivas, por su escasa aportación de inercia, y puede inducir a problemas de fallas frágiles y de torsión, cuando no se controla una rigidización equitativa.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI Committee 440. ACI 440.2R-08. (2008). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. American Concrete Institute. MI. USA.
- ASCE 41. (2007). Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. Estados Unidos: American Society of Civil Engineers. ACI
- Car E., Oller S., Oñate E. (2000). Tratamiento Numérico de Materiales Compuestos. Monografía No.57. Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMNE). Barcelona, España.
- CEC. (2000). Código Ecuatoriano de la Construcción. Ecuador: Ministerio de desarrollo urbano y vivienda.
- CNR. (2006). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. CNRDT200/2004. CNR Committee-Italian National Research Council. Italia.
- CSA,. (2002). Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers. Design Code. Standard S806-02. Canadian Standards Association. Ontario, Canada.

- CSA. (2006). Canadian Highway Bridge, Design Code. CAN/CSA-S6-00, Canadian Standards Association, Ontario, Canada.
- Einde L.V.D., Zhao L., Seible F. (2003). Use of FRP composites in civil structural applications. *Construction and Building Materials*. 17(6-7):389-403.
- FIB. (2001). Externally Bonded (FRP) Reinforcement for RC Structures. FIB Bulletin No. 14. International Federation for Structural Concrete (FIB - Fédération Internationale du Béton. Lausanne, Swiss.
- Gómez C., Oller S., Barbat A. (2002). Evaluación del daño sísmico de puentes de hormigón armado. *Rev. Internac. Mét. Num. Cál. Dis. Ing.* 18(2):309-329.
- JSCE. (1997). Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials. Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials. Japan.
- Karbhari V.M. (2005). Building materials for the renewal of civil infrastructure. *Reinforced Plastics*. 49(1):14-25.
- Karbhari V.M., Zhao L. (2000) "Use of composites for 21st century civil infrastructure". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 185 (2-4):433-454.
- Molina M. (2000). Ductilidad en uniones de concreto reforzadas externamente con láminas de acero. Máster en Estructuras. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Mora, E. 2009. Programa de Curva capacidad Pushover elemental. Universidad Central de Ecuador.
- Mufti A.A., Bakht B., Banthia N., Benmokrane B., Desgagne G., Eden R., Erko M.-A., Karbhari V., Kroman J., Lai D., Machida A., Neale K., Tadros G., Taljsten B. (2007). New Canadian Highway Bridge Design Code design provisions for fibre-reinforced structures. *Canadian Journal of Civil Engineering* 34(3):267-283.
- Nanni A., (2003). North American design guidelines for concrete reinforcement and strengthening using FRP: Principles, applications and unresolved issues. *Construction and Building Materials*. 17(6-7):439- 446.
- Pendhari S.S., Kant T., Desai M.Y. (2007). Application of polymer composites in civil construction: A general review. *Composite Structures*. 84(2):114-124.
- Rosero, L. (2013). Reforzamiento de estructuras de hormigón armado con FRP (fiber reinforced polymers). Aplicación al caso de refuerzo de una losa y columnas de un Salón de Audiovisuales y un Auditorio. Tesis de Grado en Ingeniería Civil, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí-Quito, - Ecuador.