

## ANÁLISIS DEL NODO EXTERIOR VIGA-COLUMNNA EN HORMIGÓN ARMADO REFORZADO CON POLÍMERO DE FIBRA DE CARBONO

### ANALYSIS OF OUTER RC BEAM-COLUMN JOINT STRENGTHENED WITH CFRP

**Alba Carolina Duque Eslava**

Ingeniera, Departamento de Ingeniería Estructural  
Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, Venezuela  
Correo electrónico: [albaduqueeslava@gmail.com](mailto:albaduqueeslava@gmail.com)

**Fabiola Andreina Rojas Mendoza**

Ingeniera, Departamento de Ingeniería Estructural  
Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, Venezuela  
Correo electrónico: [fabiolarojas212@gmail.com](mailto:fabiolarojas212@gmail.com)

**Hermenegildo Rodríguez Gómez**

Profesor, Departamento de Ingeniería Estructural, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, Venezuela  
Correo electrónico: [rodriguez@ucla.edu.ve](mailto:rodriguez@ucla.edu.ve)

**Juan Carlos Vielma Pérez**

Profesor, Escuela de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile,  
Correo electrónico: [juan.vielma@pucv.cl](mailto:juan.vielma@pucv.cl)

## RESUMEN

Para aquellas estructuras que requieren refuerzo existen diversidad de técnicas para solucionar este problema, presentándose como alternativa la fibra de carbono. Este artículo presenta el estudio del comportamiento del nodo exterior viga-columna en Hormigón armado reforzada con polímero de fibra de carbono (CFRP), sometida a cargas cíclicas. Se elaboraron cinco especímenes de nodo viga-columna en forma de T rotada 90°: el primero fue considerado espécimen patrón y no posee refuerzo con fibra de carbono, al segundo se le colocó el refuerzo en los laterales del nodo, el tercero reforzado en la parte superior e inferior del mismo, el cuarto es combinación entre los especímenes dos y tres y por último en el quinto se envolvieron por completo la viga, columna y el nodo. Estos elementos fueron sometidos a un historial de desplazamiento, mediante un actuador, obteniéndose curvas de comportamiento histerético, se analizaron para obtener propiedades como resistencia, desplazamiento, rigidez, ductilidad y energía disipada, para realizar comparaciones. En conclusión, las configuraciones presentaron una variación de la rigidez inicial no considerable y en cuanto la ductilidad, un aumento en la rama positiva y disminución en la negativa. Por último las configuraciones cuatro y cinco presentaron un mejor comportamiento general en los parámetros mencionados.

**Palabras clave:** Nodo exterior viga-columna, Fibra de Carbono, Reforzamiento Sísmico.

## ABSTRACT

To structures that required reinforcement exists a diversity of techniques to solve this problem, being an alternative the carbon fiber reinforced polymer (CFRP). This article shows the study of the behavior from outer RC beam-column joints strengthened with carbon fiber reinforced polymer applying cyclical loads. They were made five beam-column node specimens with "T" shape, rotated 90: the first one was considered pilot and it did not has any reinforcement, the second one was reinforced on the sideways, the third had reinforcement at the bottom and top from the node, the fourth was a combination between the second one and third one, and finally the fifth beam, column specimen were completely wrapped. These elements were submitted to a serie of displacements with an actuator to obtain hysteretic behavior curves and were analyzed to get properties like strength, displacement, stiffness, ductility and dissipated energy to make comparisons. In conclusion, the initial stiffness variation was not considerable in any element and the ductility had an increase at the positive branch and a decrease at the negative branch. Finally the fourth and fifth specimens presented a better general behavior for all mentioned parameters.

**Keywords:** Overstrength; ductile RC frames; steel bracing; seismic design.

## 1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad la vida útil de muchas estructuras se ve afectada por diferentes factores, la influencia de los fenómenos naturales o la incorrecta práctica de diseño y construcción de las obras civiles son algunas de las causas. Bien es sabido que para el refuerzo y rehabilitación de edificaciones existen muchos métodos y materiales (Fardis, 2009), desde los más tradicionales, hasta innovadores materiales compuestos que cada año se suman al mercado de la construcción. Se debe entender que ninguna técnica es superior a otra solo es necesario estudiar cual es la más idónea tomando en cuenta el lugar a reforzar, ambiente, costos y otros. En el conjunto de estos materiales se halla la Fibra de Carbono conformado por fibras de carbono y una matriz de resina epóxica, que ofrece nuevas posibilidades de refuerzo con grandes ventajas como es la alta resistencia aportada al elemento pero con un bajo peso. Estas características han permitido que se haya producido un crecimiento en las estructuras de hormigón armado que son reforzadas con fibra de carbono, incrementándose también el número de estudios de laboratorio, como por ejemplo Di Ludovico et al. (2008) y Prota et al. (2005) y también mediante estudios numéricos, Martínez (2008), Oller et al. (2013) que se han llevado a cabo para caracterizar las mejoras que introducen a las estructuras.

Sobre la base de las consideraciones anteriores esta investigación pretende estudiar el comportamiento de un nodo exterior viga-columna sometido a cargas cíclicas y reforzado con Fibra de carbono a través de la comparación con un espécimen no reforzado; con el fin de brindar nuevos conocimientos sobre el aporte a la resistencia estructural del elemento, la disposición y cantidad del material a usar y la técnica de colocación. Vale indicar que este tipo de

refuerzo de nodos ha sido estudiado para diferentes configuraciones y variaciones en la condición del confinamiento por Khalifa y Nanni (2002), Karayannis y Sirkelis (2008) y Rodríguez et al. (2015).

De acuerdo con lo anterior, en la investigación se tiene como objetivo general estudiar el comportamiento de un nodo exterior de viga-columna de Hormigón armado reforzado con fibra de carbono sometido a cargas cíclicas. Adicionalmente se tienen los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un programa de ejecución de ensayos de nodos exteriores viga-columna reforzados o no con fibra de carbono.
- Someter los nodos exteriores viga-columna con refuerzo en diferentes configuraciones o sin refuerzo a cargas cíclicas hasta el nivel de falla para obtener curvas de comportamiento.
- Comparar los resultados obtenidos en las curvas de comportamiento de los ensayos experimentales de los nodos exteriores viga-columna reforzados o no.

Según Rosales (2008) en su trabajo señala que las barras de fibra de carbono son una alternativa eficiente para el refuerzo de elementos estructurales en funcionamiento, ya que el impacto estético es muy bajo y el procedimiento de aplicación es muy sencillo

En el trabajo experimental de Duque *et al.* (2010) se diseñaron y construyeron cuatro pórticos de Hormigón a escala sin zonas de confinamiento en los nudos y considerando únicamente la carga gravitacional, dos de los cuatro marcos fueron fortalecidos en los nudos mediante un confinamiento con Polímeros Reforzados con Fibra de Carbono y todos fueron sometidos a carga monotónica.

Estos concluyeron que el refuerzo duplica la resistencia y rigidez de los pórticos e incrementa su desplazamiento máximo sin pérdida de resistencia en un 60%. Así mismo, el confinamiento de los nudos con la fibra de carbono disminuye notablemente las fisuras y grietas de los elementos estructurales. Alfinger, Linárez (2013) realizaron un estudio experimental sobre el refuerzo estructural de juntas esquineras viga-columna de Hormigón armado mediante el uso de fibra de carbono en diferentes configuraciones.

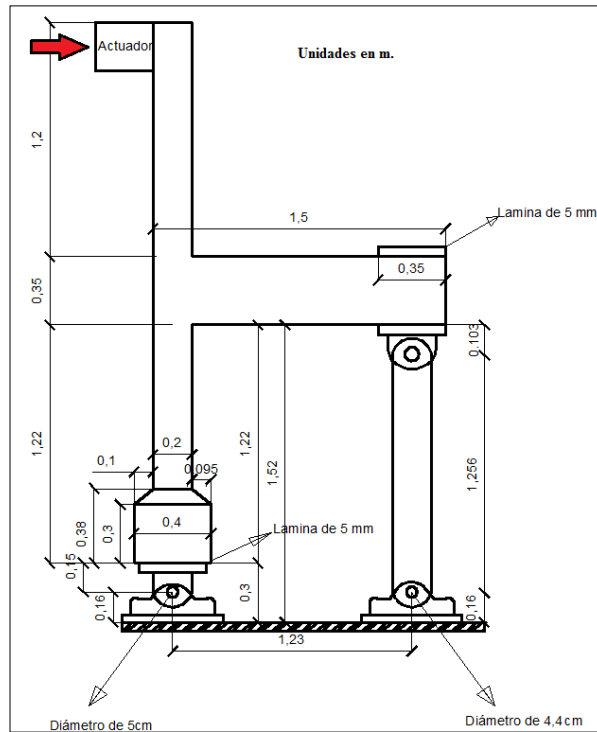
Pérez (2013) realizó ensayos experimentales a especímenes de junta esquinera viga-columna reforzados con fibra de carbono. Los especímenes reforzados presentaron un retraso en la aparición de grietas ya que se logra confinar notablemente el nodo. Además el refuerzo con fibra si permite aumentar la capacidad de resistir fuerzas mayores pero solo en configuraciones mixtas y a flexión. A partir de estos resultados se pudo validar simulaciones numéricas en rango no lineal de nodos viga columna reforzados con CFRP Vielma et al. (2013) y Vielma et al. (2014).

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Características de los especímenes

Para estudiar el comportamiento de un nodo exterior de viga-columna de Hormigón armado reforzado con fibra de carbono sometido a cargas cíclicas, se construyeron cinco (05) especímenes con una geometría de “T” girada 90°, las cuales están conformadas una (01) sin refuerzo y las cuatro (04) restantes con refuerzo con el fin de relacionar su comportamiento entre ellas.

Todo espécimen que fue construido para este ensayo está compuesto por dos miembros estructurales los cuales son una columna con una viga lo que se le conoce como un nodo viga-columna, con secciones transversales de 20 x 35 cm y 20 x 20 cm respectivamente, donde a cada elemento se le colocaron como refuerzo longitudinal cuatro (04) barras de diámetro 1/2”, así mismo los estribos y las ligaduras de diámetro 3/8” espaciadas cada 15 cm dentro de cada uno de los elementos estructurales.



**Figura 1** Configuración real del espécimen de Hormigón armado.

La configuración antes mencionada para los elementos viga-columna se seleccionó en base a que su diseño no cumpliera con todos los parámetros establecidos en las normas, tal es el caso de la sección de la columna que según la Norma COVENIN 1753-2006 en la sección 18.4.2 establece que “La menor dimensión transversal, medida a lo largo de una recta que pase por su centro geométrico, no sea menor que 30 cm.”. Por otro lado se optó por tomar un acero

longitudinal para la columna de al menos 1% de cuantía de acero para cumplir con el valor mínimo de la norma.

Es importante destacar que al momento de realizar el ensayo del nodo viga-columna, fue necesario incorporar un cabezal en el extremo inferior de la columna, con el fin de evitar que los especímenes al ejecutar los ensayo fallen por corte en el apoyo y que de esta manera el daño se concentre en el lugar de interés que es el nodo, así como también lograr ajustar el espécimen a las piezas de acople del sistema. Se presenta a continuación en la Figura 1 el diseño de los especímenes.

## 2.2 Características de los Materiales

Las características de los materiales que se utilizaron para la construcción de los especímenes se muestran en la Tabla 1 a continuación:

**Tabla 1** Características de los materiales

Acero de Refuerzo	Fy (kgf/cm <sup>2</sup> )	Hormigón	F'c (kgf/cm <sup>2</sup> )
	4200		300

Para el refuerzo de los elementos estructurales de Hormigón armado descritos anteriormente se utilizó refuerzo de fibra de carbono denominada sikaWrap300C. Las características mecánicas del tejido son las siguientes (Ver Tabla 2):

**Tabla 2** Propiedades de la fibra de carbono

Resistencia a tensión	428,13Kgf / mm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad	24464,83Kgf/ mm <sup>2</sup>
Elongación	1,50 %
Dirección de la fibra	0° unidireccional
Peso por m <sup>2</sup>	300g
Espesor	0,17 mm
Densidad de la fibra	1,8 g/cm <sup>3</sup>

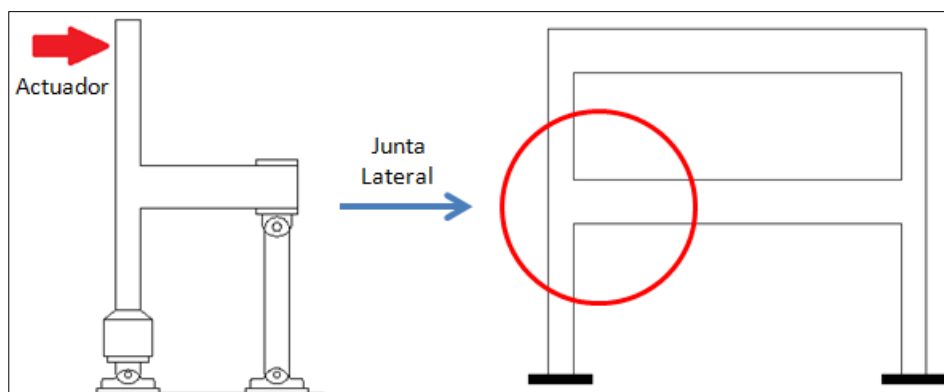
El tejido de la fibra de carbono fue adherido a las superficies de las vigas y de las columnas mediante una resina epóxica específicamente Sikadur 301. En la siguiente Tabla 3 se detalla las propiedades de la resina:

**Tabla 3** Propiedades de la resina epóxica

Resistencia a tensión	5,30Kgf / mm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad	203,87Kgf/ mm <sup>2</sup>
Elongación de rotura	3,50 %
Resistencia a flexión a 7 días	9,17Kgf / mm <sup>2</sup>
Deformación unitaria de plastificación	3,00 %
Resistencia a compresión a 7 días	9,79Kgf / mm <sup>2</sup>
Módulo de compresión	175,84Kgf / mm <sup>2</sup>

### 2.3 Diseño de las probetas

Para darle una solución a la problemática planteada, se realizaron cinco (5) nodos viga-columna de Hormigón armado donde cada espécimen se caracterizó por poseer diferentes configuraciones de refuerzos con fibra de carbono. De los cinco (5) especímenes construidos se definió uno (1) como el espécimen patrón el cual no se le aplicó refuerzos con fibra de carbono y los cuatro restantes si se les aplicó su refuerzo correspondiente.



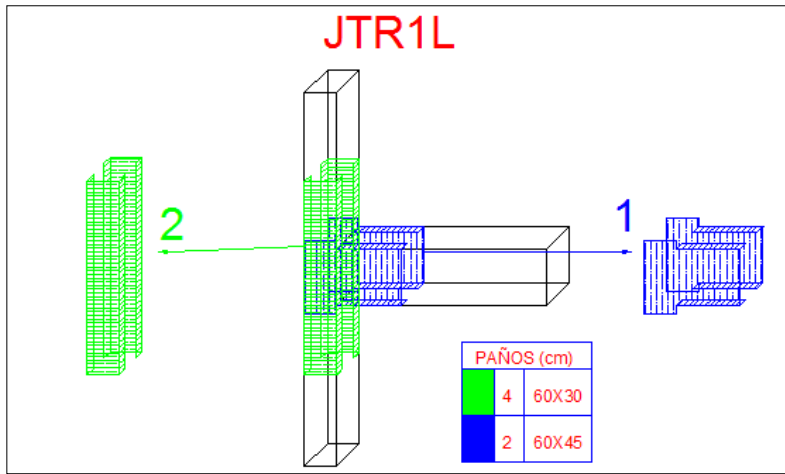
**Figura 2** Posición de los especímenes de Hormigón armado a ser ensayados

Para cumplir con lo planteado, los especímenes se colocaron en una posición donde la columna quedó en forma vertical y la parte inferior de la misma fue apoyada en una pieza de acople, se buscó que todos los especímenes se movilizaran en la misma dirección que la fuerza generada por el actuador la cual fue aplicada en la parte superior de la columna en posición horizontal (Ver Figura 2).

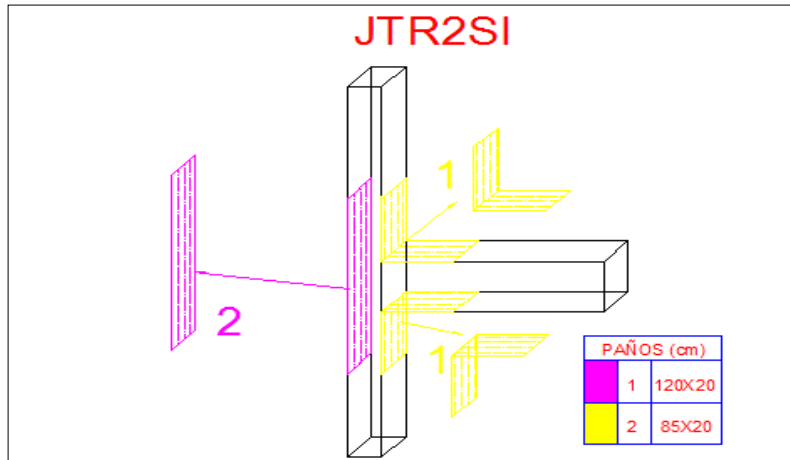
Las configuraciones seleccionadas para los reforzamientos con fibra de carbono para cada uno de los especímenes que fueron ensayados consisten en cuatro tipos, tal como se describe en la Tabla 4 e imágenes (Figura 3, Figura 4, Figura 5 y Figura 6) a continuación:

**Tabla 4** Denominación de cada uno de los especímenes ensayados

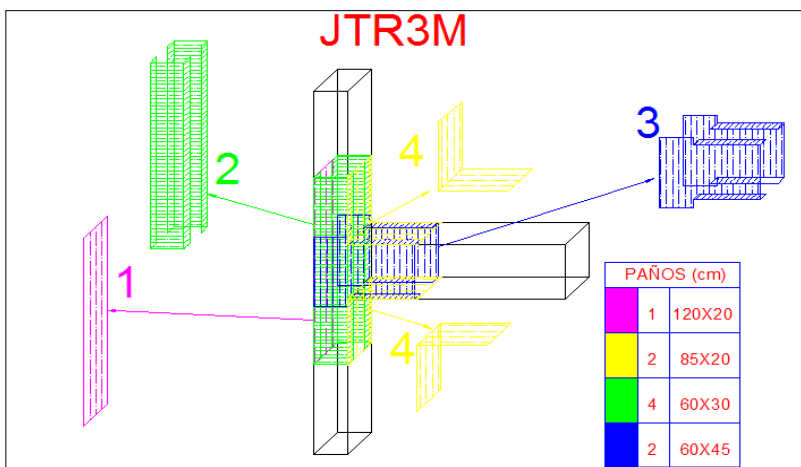
	Descripción
JTSR	Nodo viga-columna sin refuerzo de fibra de carbono
JTR1L	Nodo viga-columna con refuerzo lateral de fibra de carbono
JTR2SI	Nodo viga-columna con refuerzo Superior e inferior de fibra de carbono
JTR3M	Nodo viga-columna con refuerzo mixto de fibra de carbono, combinación del nodo JTR1L Y JTR2SI
JTR4E	Nodo viga-columna con refuerzo de fibra de carbono envolviendo a la viga y a la columna.



**Figura 3** Configuración del nodo viga-columna JTR1L.



**Figura 4** Configuración del nodo viga-columna JTR2SI.



**Figura 5** Configuración del nodo viga-columna JTR3M.

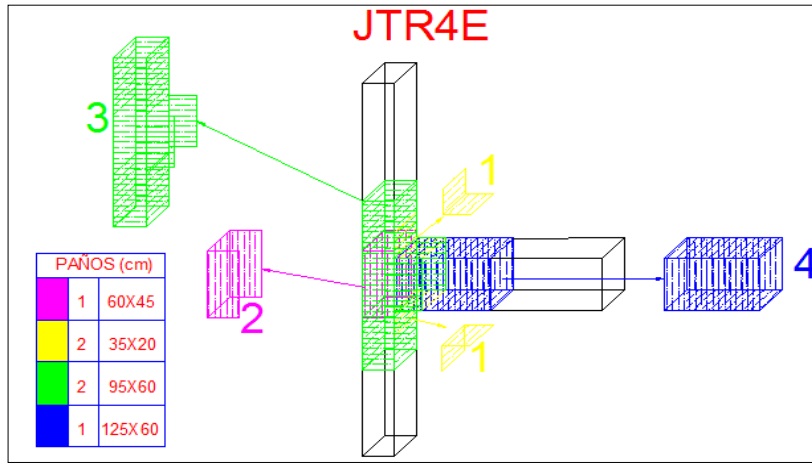


Figura 6 Configuración del nodo viga-columna JTR4E.

### 3 RESULTADOS

Para dar inicio a los ensayos de los nodos viga-columna se realizó en el ensayo de resistencia a compresión a los 7 días donde el Hormigón premezclado suministrado cumplió con los requerimientos de resistencia mínima de 250 kgf/cm<sup>2</sup>, luego se realizó esta prueba el día anterior a cada ensayo. En la siguiente Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos.

Tabla 5 Resultados de los ensayos a compresión de cilindros de los nodos viga-columna.

Espécimen	Resistencia (Kgf/cm <sup>2</sup> )
JTSR	296.24
JTR1L	323.21
JTR2SI	323.58
JTR3M	343.26
JTR4E	346.36

Los cinco especímenes fueron sometidos a cargas cíclicas mediante el uso de un actuador hidráulico, acoplado a un sistema computarizado de procesamiento de datos (Test Ware) introduciendo un historial de desplazamientos con el fin de obtener las curvas de histéresis carga-desplazamiento, sometiendo a los especímenes a cargas y descargas repetidas en las cuales se incrementa sucesivamente el desplazamiento máximo con respecto al anterior. (Ver Tabla 6)



Tabla 6 Historial de desplazamiento

Nro. de Ciclo	Desplazamiento Positivo (mm)	Desplazamiento Negativo (mm)
Ciclo 1	2	-2
Ciclo 2	4	-4
Ciclo 3	6	-6
Ciclo 4	8	-8
Ciclo 5	10	-10
Ciclo 6	15	-15
Ciclo 7	20	-20
Ciclo 8	25	-25
Ciclo 9	30	-30
Ciclo 10	35	-35
Ciclo 11	40	-40
Ciclo 12	45	-45
Ciclo 13	50	-50
Ciclo 14	55	-55
Ciclo 15	60	-60
Ciclo 16	70	-70
Ciclo 17	80	-80
Ciclo 18	100	-100

7. De forma gráfica el historial de desplazamientos se muestra en la Figura

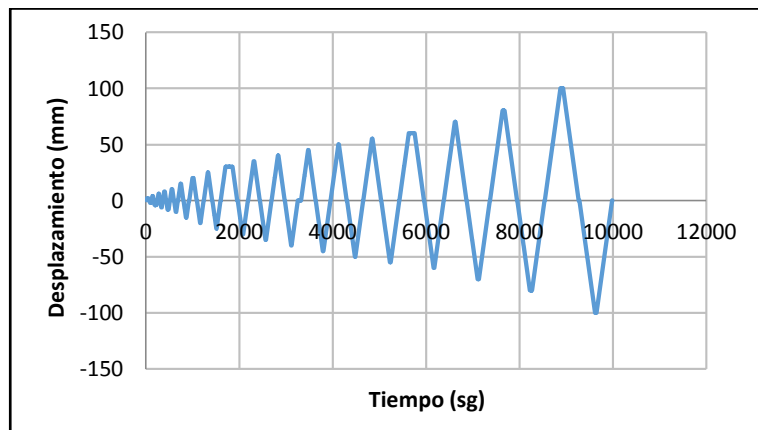
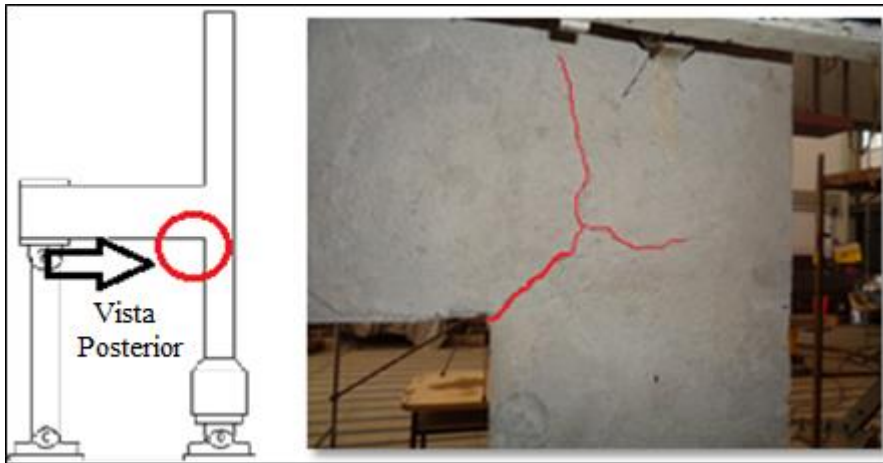


Figura 7 Historia de desplazamiento aplicada a cada uno de los ensayos

En el transcurso de cada ensayo realizado a los especímenes de nodo viga-columna ya sean reforzados o no, se llevó a cabo un registro foto Figura de las fisuras y grietas que fueron apareciendo durante los mismos, en la columna, la viga y nodo, así como también cualquier otro detalle ocurrido mientras avanzaba el ensayo.

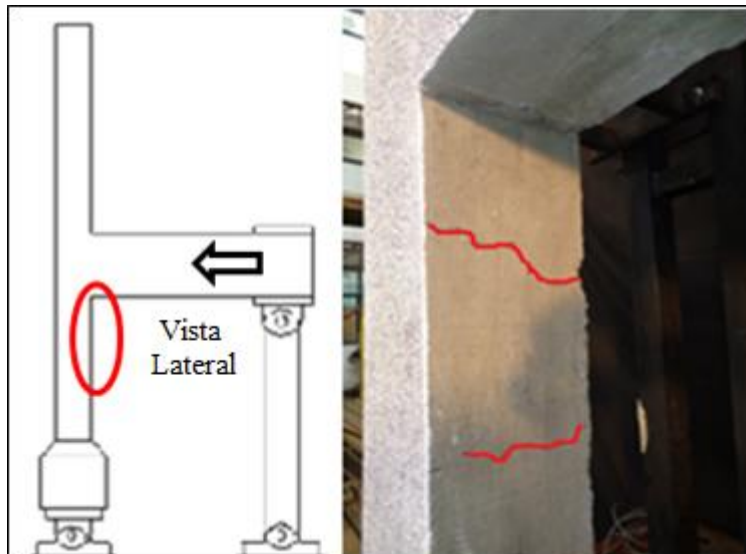
En el nodo viga-columna sin refuerzo de fibra de carbono (JT SR) a medida que el ensayo avanza las grietas comienzan a aparecer en la esquina

inferior siendo cada vez de mayor la separación en las fisuras y se extienden al centro del nodo tal como se muestra en la Figura 8.



**Figura 8** Vista posterior del nodo JTSR con grieta en la esquina inferior en ángulo de 45° y aparición de grietas hacia el centro del nodo.

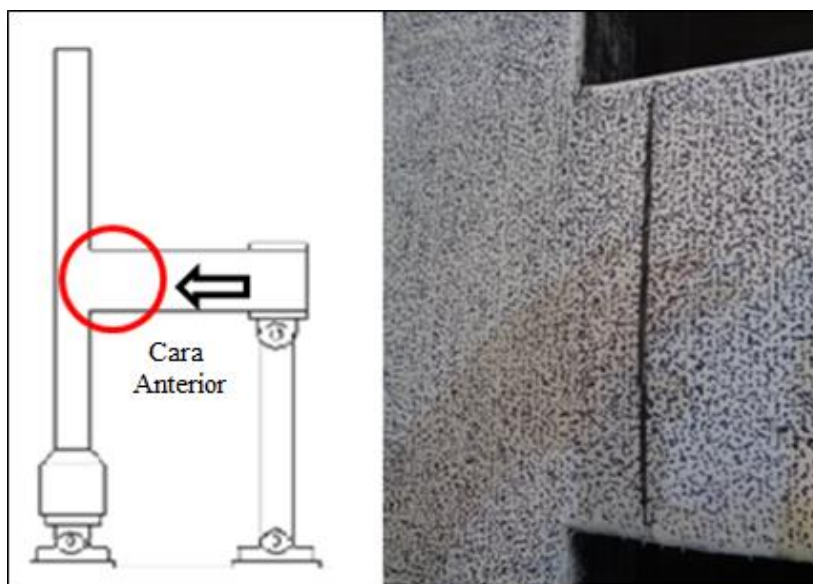
En la Figura 9 se observan grietas horizontales en la columna que son paralelas al acero de refuerzo transversal, y perpendiculares al eje de la columna lo que evidencia una falla por flexión.



**Figura 9** Cara interior de la columna de la JTSR que presenta grietas perpendiculares a su eje.

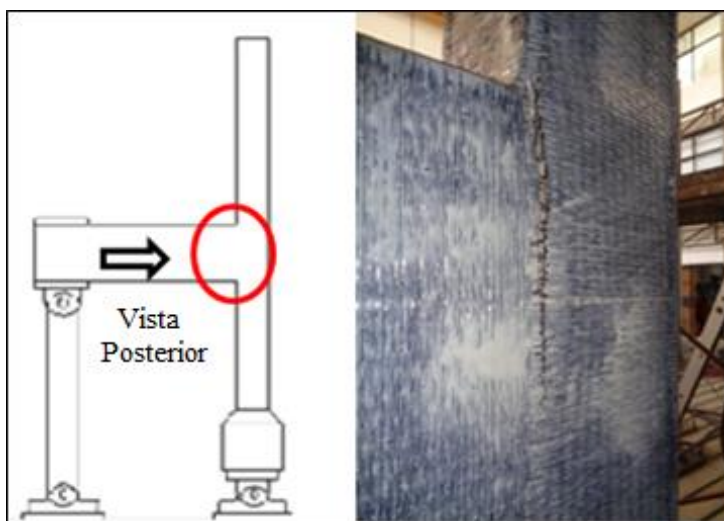
En el nodo viga-columna con refuerzo mixto de fibra de carbono (JTR3M) se presenta rotura de la fibra por completo a lo largo de toda la altura de la viga (Ver Figura 10) exactamente en la parte inicial delantera de ella, observando un desprendimiento del refuerzo y agrietamiento de la superficie del Hormigón debido que al tocar alrededor del área afectada se sintió como la fibra perdió su

adherencia y dejó de proteger a el nodo viga-columna cerca de esa zona donde presentó la falla.



**Figura 10** Rotura de la fibra a lo largo de toda la cara anterior de la viga de la JTR3M.

Para la configuración JTR4E terminar el ensayo, luego de la caída de la curva histerética, de manera superficial se logró observar que una de las fallas fue la rotura de la fibra como se muestra en la Figura 11, extendiéndose a lo largo de la unión viga-columna, además en el momento se constató la zona afectada y se asume que también había desprendimiento del material de fibra de carbono y de parte del recubrimiento de Hormigón.



**Figura 11** Ruptura del material a lo largo de la unión viga-columna de la JTR4E.

Luego de graficar los valores obtenidos para cada uno de los ensayos realizados, ya sea para los especímenes reforzados como para el patrón se obtiene la curva de histéresis con el fin de conseguir los valores máximos positivos y negativos de la fuerza horizontal aplicada en el extremo superior del elemento, ésta en unidades de kilogramos-fuerza (Kgf) con su respectivo desplazamiento en milímetros (mm). A continuación se muestra la Figura 12 de los resultados obtenidos para el nodo JTR4E. De igual forma se hizo para el resto de los especímenes.

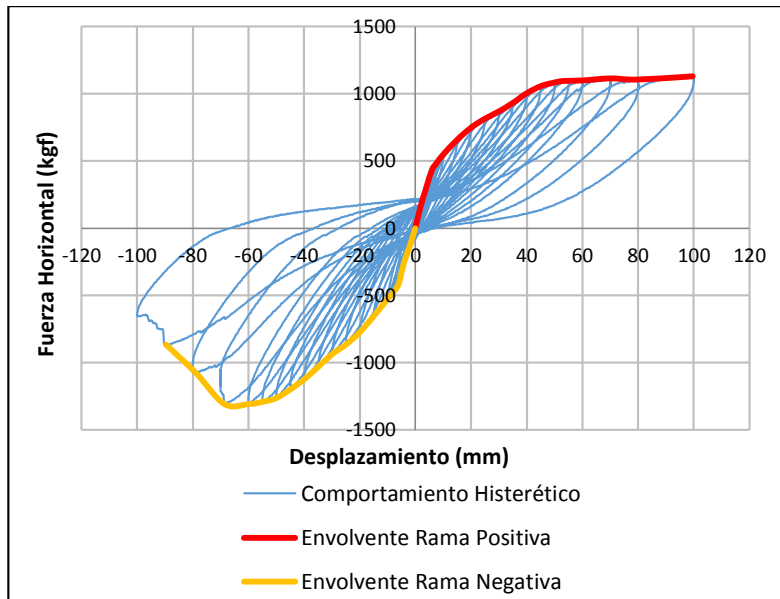


Figura 12 Curva Histerética del nodo viga-columna JTR4E y envolventes.

### 3.1 Fuerzas máximas alcanzadas

Haciendo primero una comparación entre el espécimen sin refuerzo y los reforzados en diferentes configuraciones, se deduce que utilizar fibra de carbono en los elementos permite aumentar la capacidad de resistir una fuerza mayor. Por otro lado con los resultados de los nodos reforzados se observa que la combinación JTR3M y JTR4E son las de mayor resistencia, y que la JTR2SI es la de menos aporte (Figura 13).

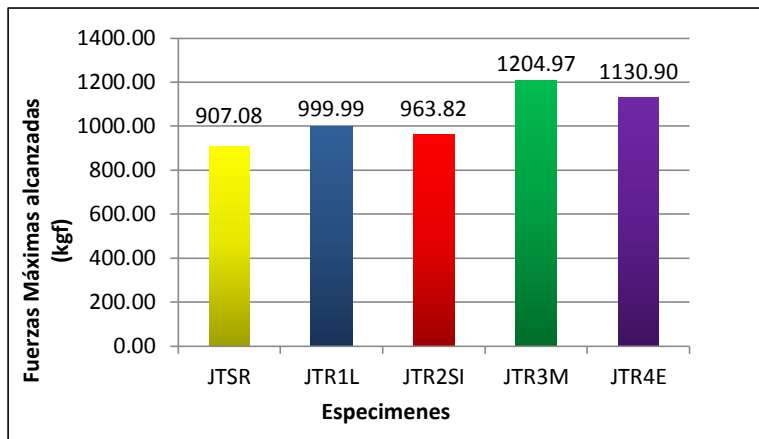


Figura 13 Máximas fuerzas alcanzadas de los especímenes en la rama positiva.

La Figura 14 presenta las fuerzas máximas alcanzadas por los especímenes pero ahora en la rama negativa, donde nuevamente la combinación JTR4E y JTR3M con valores de -1308,22 y -1206,59 Kgf, respectivamente, son las que presentan resistencia mayor, seguida por el espécimen JTR1L y por último el nodo JTR2SI.

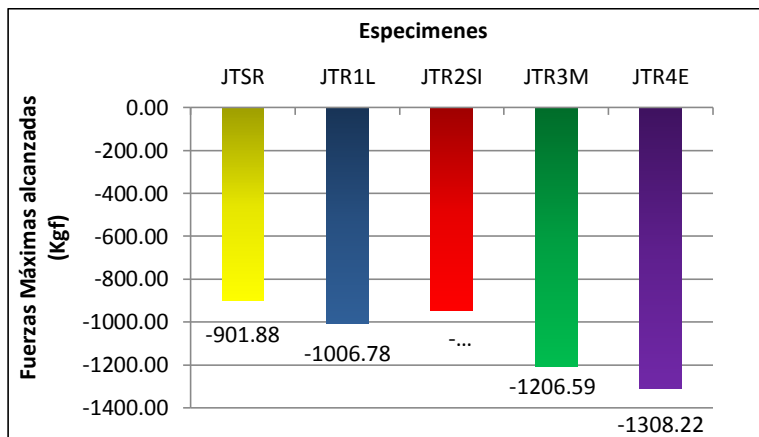


Figura 14 Máximas fuerzas alcanzadas de los especímenes en la rama negativa.

3.2 Desplazamientos relacionados con la carga máxima

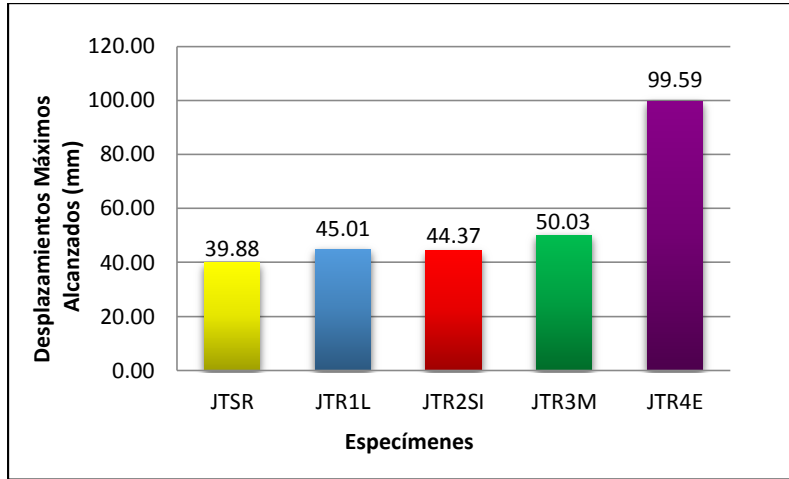


Figura 15 Desplazamientos relacionados con la carga máxima alcanzada en cada espécimen en la rama positiva.

En la Figura 15 se puede observar que los desplazamientos de la rama positiva fueron ascendentes entre ellos a excepción del nodo JTR2SI que disminuyó con respecto a los que tenían mayor cantidad de refuerzo, debido a que esta configuración no reforzaba la zona más débil que en nuestro caso era el nodo, por otro lado se logra analizar que los ensayos que poseen una configuración donde se les colocó más capas de fibra de carbono soportaron un desplazamiento mayor, siendo el ensayo JTR4E el que alcanzó un desplazamiento más elevado.

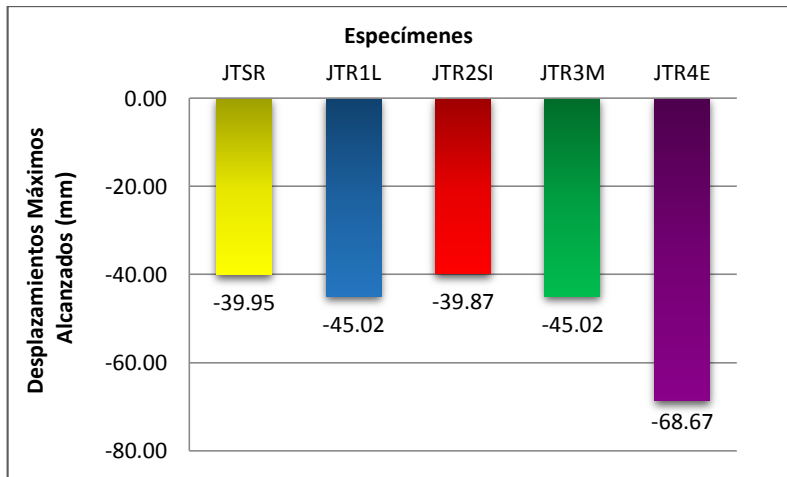


Figura 16 Desplazamientos relacionados con la carga máxima alcanzada en cada espécimen en la rama negativa.

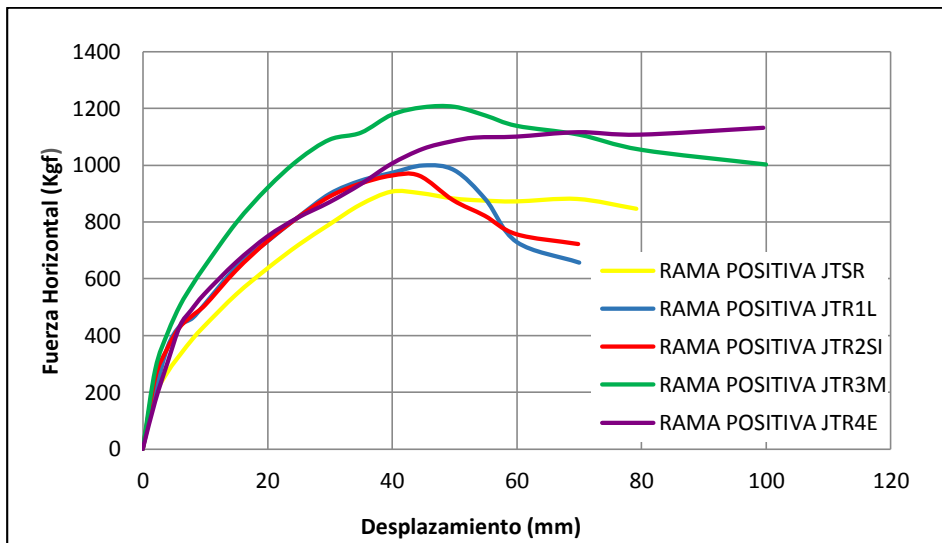
A diferencia de la rama positiva la rama negativa se puede observar en el Figura 16 que los especímenes JTSR Y JTR2SI presentan un desplazamiento muy similar entre ellos, lo mismo sucedió con los ensayos JTR1L Y JTR3M, sin

embargo al igual que en la rama positiva el nodo JTR2SI también disminuyó su desplazamiento con respecto a los demás especímenes, finalmente el JTR4E fue el que mayor soportó desplazamiento por tener un mayor refuerzo en la zona del nodo que es la más débil.

### 3.3 Comparación de curvas envolventes de los especímenes

En el Figura 17 se presenta el comportamiento de las curvas envolventes de cada uno de los ensayos de los nodos viga-columnas exactamente de la rama positiva, primero se observó que la rigidez inicial de todos los elementos reforzados con fibra de carbono, se mantiene prácticamente igual que la del nodo sin refuerzo considerado como patrón.

Como segundo análisis se puede observar que los especímenes que tienen la capacidad de soportar mayores fuerzas son JTR3M y JTR4E, pero predominando el espécimen JTR3M, es importante destacar que los dos ensayos tenían configuraciones donde su característica principal era cubrir todo el nodo por ser la zona con mayor probabilidad de falla del elemento estructural, por lo que de alguna manera la colocación del refuerzo de fibra de carbono en esta área cumple con el incremento de la capacidad de deformación ante la presencia de una carga.



**Figura 17** Comparación de las curvas envolventes de cada uno de los especímenes de la rama positiva.

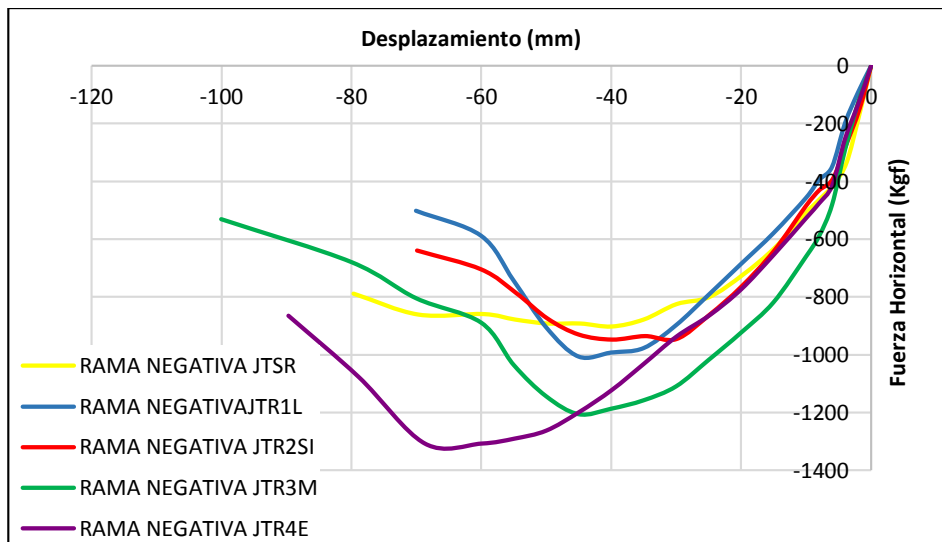
Analizando el nodo sin refuerzo de fibra de carbono se evidencia que tiene un comportamiento dúctil, por lo que al alcanzar la máxima fuerza tiene una gran capacidad de deformación manteniendo a esta en un rango de valores similares. Al comparar la JTSR con respecto a los nodos que presentaron valores mayores en su envolvente, como lo es la JTR3M se logra observar un incremento de resistencia en la misma, sin embargo su capacidad de deformación es afectada por una disminución de fuerzas luego de alcanzar el valor máximo.

Por otro lado, al evaluar la curva envolvente de la JTR4E se observa que su resistencia máxima tiene un valor que es mayor a la JTSR pero menor a la JTR3M, no obstante el elemento en cuestión logra soportar una deformación mayor, pero sin aumentar ni disminuir su resistencia esto es típico de un comportamiento dúctil.

Por último, observando la JTR1L y la JTR2SI evidencian un aumento de resistencia poco significativo en comparación con la JTSR y además la envolvente luego de llegar a la máxima fuerza, muestra una caída inmediata de su capacidad resistente lo que se atribuye a un comportamiento frágil.

Se puede observar en la Figura 18 el comportamiento de las curvas envolventes de cada uno de los ensayos de los nodos viga-columna de la rama negativa, donde al igual que en la rama positiva ninguno de los ensayos reforzados con fibra de carbono aumenta su rigidez inicial en comparación con el nodo sin refuerzo.

Por otro lado el espécimen que resiste mayor fuerza es el JTR4E seguido por el nodo JTR3M. Comparando con el nodo patrón, este aumento de fuerza es de casi 50% para el elemento JTR4E. Sin embargo a pesar de que en todos los ensayos se logra una fuerza mayor a la del nodo sin refuerzo, a medida que se van deformando éstas van perdiendo su capacidad resistente por lo que se evidencia un comportamiento frágil.



**Figura 18** Comparación de las curvas envolventes de cada uno de los especímenes de la rama negativa.

### 3.4 Daño experimental de la rigidez global

A partir de las curvas de histéresis se analizó el daño experimental de la rigidez global de la estructura ya sea que este reforzada o no, mediante los lazos de histéresis que presentan una variación de la pendiente de un ciclo a otro se permite apreciar de manera gráfica que el sistema experimenta una degradación de rigidez.



Sin embargo, es necesario cuantificar este daño. Para ello se utilizó la Ecuación (1):

$$Daño = 1 - \frac{K_f}{K_0} \quad (1)$$

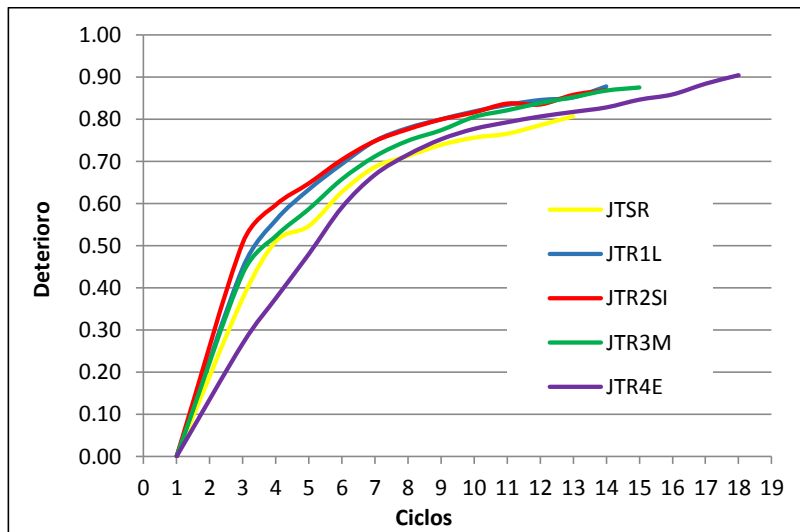
Donde:

$K_f$  = Rigidez efectiva

$K_0$  = Rigidez Inicial

A continuación en la Figura 19 se presenta la forma en que el daño evoluciona durante los ciclos a los que fueron sometidos los especímenes, estos son correspondientes a la rama positiva. En este caso ocurre un resultado curioso debido a que tres de los especímenes reforzados con fibra de carbono (JTR1L, JTR2SI y JTR3M) presentan un daño superior al espécimen sin refuerzo.

Por otro lado el JTR4E muestra un daño menor en comparación con el JTSR, pero este comportamiento se mantiene hasta el ciclo 8, de allí en adelante el nodo reforzado de forma envuelta inicia un incremento del daño con respecto al elemento patrón no reforzado.



**Figura 19** Evolución del daño experimental de la rigidez global de todos los especímenes en la rama positiva

En cuanto a la rama negativa, se aprecia que en todos los ciclos de los nodos viga-columna se obtuvo un daño bastante menor en comparación con la JTSR. Ahora comparando el daño entre los nodos reforzados, el de mayores resultados es la JTR2SI, seguidamente por la JTR1L, JTR3M y la JTR4E en orden descendente. Es importante destacar que estos tres últimos mencionados a partir del ciclo 7 siguen una misma tendencia de valores. Todo esto se observa en la Figura 20

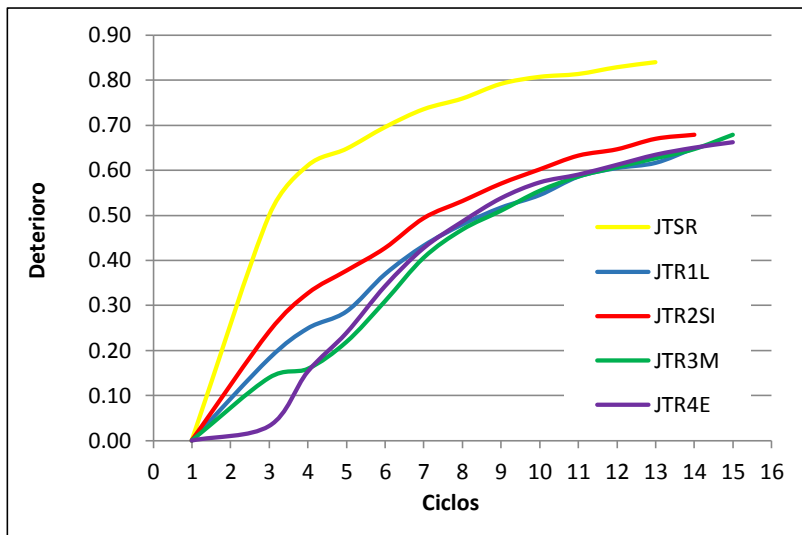


Figura 20 Evolución del daño experimental de la rigidez global de todos los especímenes en la rama negativa

### 3.5 Ductilidad

El cálculo del valor de ductilidad es necesario para determinar las deformaciones plásticas que presenta cada uno de los ensayos. Para el mismo se aplicará la siguiente Ecuación:

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (2)$$

Donde,

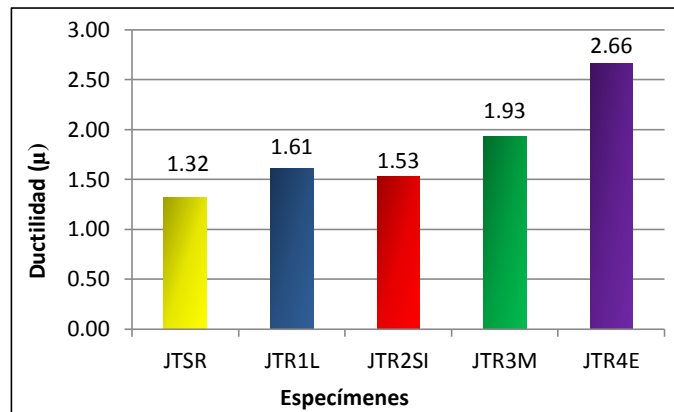
$\mu$  = Ductilidad

$\Delta u$  = Desplazamiento último

$\Delta y$  = Desplazamiento de plastificación

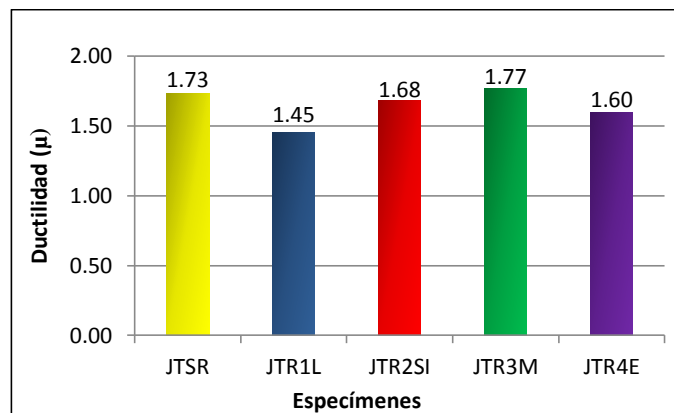
El análisis de la ductilidad es muy importante debido a que esta propiedad permitirá analizar la capacidad de deformación de cada uno de los ensayos de las juntas viga-columnas, esto se realizó a través de la teoría de Park (1988).

Evaluando la rama positiva en la Figura 21 se aprecia que el espécimen JTR4E es el que obtuvo el valor máximo de ductilidad, de igual forma el resto de los ensayos mantienen el comportamiento de una ductilidad mayor con respecto al espécimen patrón (JTSR).



**Figura 21** Valores de ductilidad en cada espécimen correspondiente a la rama positiva.

En cuanto a la rama negativa se presenta el valor mayor de ductilidad en la JTR3M superando por una diferencia muy pequeña al valor de ductilidad del espécimen patrón, mientras que las demás pruebas reforzadas mantuvieron un menor valor de ductilidad que el elemento sin refuerzo. (Ver Figura 22)

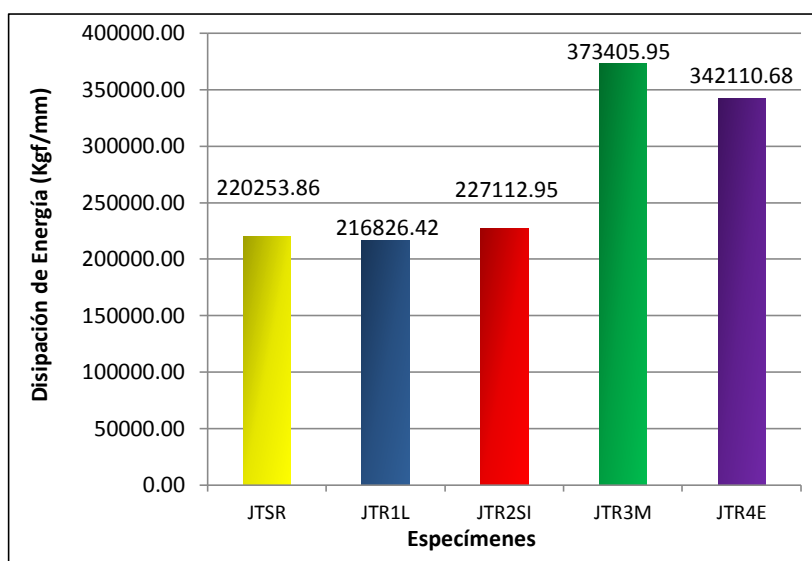


**Figura 22** Valores de ductilidad en cada espécimen correspondiente a la rama negativa

### 3.6 Disipación de Energía

Para el cálculo de la disipación de energía es necesario buscar el área encerrada dentro de cada uno de los lazos de histéresis del ensayo y luego éstas deben ser sumadas para encontrar el valor total

En la Figura 23 se muestran los valores de la sumatoria de la energía disipada para cada uno de los ensayos en una gráfica de barras para posteriormente hacer comparaciones entre ellos.



**Figura 23** Resultados de la energía disipada en cada uno de los especímenes. Los nodos que disiparon mayor energía fueron en primer lugar la JTR3M seguido por la JTR4E.

#### 4 CONCLUSIONES

- El uso de la fibra de carbono como refuerzo logra el aporte de varias ventajas tales como, la alta resistencia a la fatiga, ligereza, facilidad en el transporte y su colocación, sin generar cambios en la masa o en las dimensiones.
- Los resultados observados en las curvas de histéresis tanto en la rama positiva como en la negativa, no mantienen una misma tendencia de valores, debido a que el nodo T no es simétrico y por tanto presentaron diferentes comportamientos.
- Las configuraciones JTR1L, JTR2SI, JTR3M y JTR4E presentaron en la rama positiva un aumento muy pequeño de la rigidez inicial, mientras que en la rama negativa obtuvieron una pérdida de esta rigidez inicial en comparación con el nodo patrón sin refuerzo, por lo que el uso de la fibra de carbono no es la mejor opción para reducir las derivas del nodo.
- En el deterioro experimental de la rigidez en la rama positiva, todas las combinaciones presentaron un deterioro mayor mientras que en la rama negativa, obtuvieron un deterioro menor que el del nodo sin refuerzo, por lo tanto ninguna de las juntas es capaz de aumentar su rigidez.
- En relación a la ductilidad en la rama positiva, todos los especímenes que tenían refuerzo con fibra de carbono presentaron un aumento con respecto al nodo patrón, lo que conlleva a que adquieran un comportamiento dúctil, a diferencia de la rama negativa sólo el espécimen JTR3M logra superar el

valor del JTSR, indicando un comportamiento frágil, lo que no es recomendable para cualquier elemento estructural.

- En el caso de las configuraciones JTR3M, JTR2SI y JTR4E lograron disipar mayor energía en comparación al nodo que no tenía refuerzo por lo que el uso de la fibra brinda al elemento estructural una mayor estabilidad, no obstante el espécimen JTR1L no alcanzó el valor del nodo JTSR.
- Las configuraciones JTR3M y JTR4E son las que superaron de manera general los valores de todas las propiedades analizadas, con respecto al nodo que no poseía refuerzo con fibra de carbono, por lo que éstas son planteadas como la mejor opción para refuerzo estructural de todas las combinaciones que se estudiaron en esta investigación.

## 5 BIBLIOGRAFÍA

- Alfinger H., Linarez C., (2013) *Estudio experimental del refuerzo de juntas esquineras viga-columna de Hormigón armado a través del uso de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP)*. Trabajo Especial De Grado. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado.
- Di Ludovico M., Prota A., Manfredi G. y Consenza E. (2008). Seismic Strengthening of an underdesigned RC structure with FRP. *Earthq. Eng. Struct. D*. Vol. 37, 1, pp. 141-162.
- Duque A., Amazo, I., Ruiz D., (2010). "Ensayos de resistencia de pórticos de Hormigón a escala, reforzados con CFRP en los nudos" *Revista Tecnura*, (Vol. 15) Nro. 28, p 83-93, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- Fardis N. M. (2009). *Seismic design, assessment and retrofitting of concrete buildings*. Springer, Heilderberg, Alemania.
- Karayannis C.C. y Sirkelis G.M. (2008). Strengthening and rehabilitation of RC beam-column joints using carbon FRP jacketing and epoxy resin injection. *Earthq. Eng. Struct. D*. Vol. 37, 5, pp. 769790.
- Khalifa A. y Nanni A. (2002). Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites. *Constr. Build. Mater.* Vol. 16, 3, pp. 135146.
- Martínez X., Oller S. y Barbat A. H. (2008). Numerical procedure for the computation of RC structures reinforced with FRP using the serial / parallel mixing theory. *Comp. Struct.* Vol. 86, 1516, pp. 1604-1618.
- Norma COVENIN 1753-2006. *Proyecto y construcción de obras en concreto estructural (1ra Revisión)*. Capítulo 7. 43 p.
- Oller S., Molina M., Vielma J.C. Martínez X., Barbat A.H. y Nallim L. (2013). Análisis numérico de la reparación y refuerzo de estructuras con FRP. Gil, Ll. y Pérez, M. (Eds.) in *Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación*. Omnia Publisher, Terrassa, España. ISBN: 978-84-941872-9-2.
- Park R. (1988). "State-of-the Art Report: ductility evaluation from laboratory and analytical testing." *In proceedings 9th WCEE. IAEE*, (Vol. III), p 605-616, Tokyo-Kyoto, Japan.
- Pérez C.V. (2013). *Estudio del comportamiento sísmico de juntas viga-columna de Hormigón armado reforzadas con FRP*. Trabajo de Magister Scientiarum. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Venezuela.

- Prota A., Manfredi G., Balsamo A., Nanni A. y E. Consenza (2005). Innovative Technique for Seismic Upgrade of RC Square Columns. *7th Int. Symposium FRP Reinforcement for Concrete Structures*. pp. 1289-1303.
- Rodríguez H., Duque A., Rojas F., Picón R. y Vielma J.C. (2015). Análisis de nodo exterior viga-columna en Hormigón armado reforzado con polímeros de fibra de carbono sometido a cargas cíclicas. *X Convesis*. Cumaná, Venezuela.
- Rosales L. (2008). *Análisis del comportamiento de una viga de Hormigón armado, ensayada a flexión, reforzada con barras de fibra de carbono*. Trabajo de Grado. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Vielma J.C., Pérez C., Picón R. y Rodríguez H. (2014). Refuerzo pre-sísmico de juntas exteriores no conformes de Hormigón armado con FRP, estudio experimental y numérico. *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural*. Vol. 11 N° 1, 135-154, Passo Fundo, Brasil.
- Vielma J.C., Pérez, C.V., Picón R.A. y Rodríguez, H. (2013). Estudio experimental y numérico del comportamiento sísmico de juntas de Hormigón armado reforzadas con FRP. *VI Congreso Internacional de Métodos Numéricos*. Morelia, México.