

# ENSAYO A ESCALA NATURAL DE UNIONES VIGA-COLUMNA DE ACERO ESTRUCTURAL PARA LA DETERMINACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE RIGIDEZ DE LA CONEXIÓN

Martínez Morán, César Antonio, Preza Rivera, Fátima Alejandra, Samayoa Ávalos, Julio Alfredo.  
*Departamento de Mecánica Estructural, Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas"*  
Antiguo Cuscatlán, El Salvador.

[00006313@uca.edu.sv](mailto:00006313@uca.edu.sv)

[00006112@uca.edu.sv](mailto:00006112@uca.edu.sv)

[jsamayoa@uca.edu.sv](mailto:jsamayoa@uca.edu.sv)

**Abstract --- El objetivo de esta investigación es determinar la rigidez de conexiones viga-columna de acero estructural soldadas en marcos no arriostrados de uso común en El Salvador mediante ensayos de laboratorio a escala real, para predecir de manera adecuada el comportamiento y la capacidad de transferencia de momento flector de la conexión ante cargas de servicio típicas, para luego hacer la respectiva clasificación de la conexión ensayada en base a la rigidez secante de las curvas momento-rotación conforme a los criterios del AISC. Para la realización del ensayo se estudiaron dos tipos de conexiones, una por medio de placas, la cual es precalificada por el FEMA 350 y es considerada completamente restringida, y la otra por soldadura directa. Los ensayos se realizaron en el laboratorio de estructuras grandes de la UCA con modelos de ensayo estáticamente determinados controlados por la deriva de entrepiso. El protocolo de carga utilizado en el ensayo tomó como base el propuesto por el AISC 360 y adaptado acorde a la capacidad instalada en el laboratorio y la disponibilidad de material a ensayar. Los resultados mostraron que las conexiones ensayadas tienen un comportamiento parcialmente restringido, inclusive la precalificada por el FEMA 350, resultando en que la conexión por soldadura directa presentaba aproximadamente la mitad de la rigidez que la conexión por medio de placas. Además, se incluyó la rigidez real de las conexiones en un modelo analítico de un marco estructural para evaluar y comparar la deriva de entrepiso tomando en cuenta este factor contra marcos con rigidez en las conexiones idealizadas como completamente restringidos y simples.**

*Palabras clave* ---Conexiones, curva momento-rotación, clasificación AISC, estructura de acero estructural, rigidez.

## I. INTRODUCCIÓN.

En El Salvador las normas que rigen (o deberían regir, pues existe un vacío legal en su cumplimiento) el diseño y la construcción de estructuras de acero no han sido actualizadas desde la creación del reglamento para la Seguridad Estructural de las Construcciones (RESESCO) en 1994. Debido a ello los ingenieros estructurales basan sus diseños en especificaciones o normas que si han sido actualizadas, comúnmente en aquellas publicadas en el AISC. Es usual que los ingenieros opten por diseñar conexiones pre calificadas (conexiones que ya cuentan con el respaldo de ensayos experimentales) y/o valerse del criterio adquirido en experiencias previas. Lo anterior en sí mismo no es un problema, sin embargo sí lo es utilizar un determinado tipo de conexión, ya sea precalificada o no, suponiendo en el análisis

estructural que la conexión posee una rigidez tal que puede considerarse como rígida.

Anteriormente a la presente investigación no se han llevado a cabo ensayos a escala natural de conexiones viga-columna en acero estructural en El Salvador, de modo que las referencias previas en el tema son de casos de estudio internacionales.

En la Universidad de Chile se llevó a cabo la investigación titulada "Estudio experimental de conexiones de momento usando perfiles T soldados" en el cual se estudian modelos de ensayo viga-columna a escala natural controlados por deriva de entrepiso, aunque los objetivos eran medir capacidad y no rigidez. No obstante sirve como una buena base bibliográfica.

Por otra parte los estudios llevados a cabo por la Universidad de Lehigh exponen ensayos a escala natural como en la investigación titulada "Tests of Welded Steel Beam-to-Column Moment Connections" que son un precedente de ensayo de conexiones soldadas.

Tomando en cuenta las investigaciones previas y los vacíos que existen en las normativas de diseño en El Salvador, el objetivo de la presente investigación es determinar la rigidez de conexiones viga-columna de acero estructural soldadas en marcos no arriostrados de uso común en El Salvador mediante ensayos de laboratorio a escala real, para predecir de manera adecuada el comportamiento y la capacidad de transferencia de momento flector de la conexión ante cargas de servicio típicas, lo cual sirve para clasificar las conexiones y proveer información suficiente para incluirla en modelos analíticos que demuestren la importancia de la inclusión de esa información para conocer el comportamiento de las estructuras.

## II. DEFINICIÓN DE LOS MODELOS EXPERIMENTALES.

En el presente trabajo se estudian dos tipos de conexiones diferentes. La elección de dichas conexiones como objeto de estudio obedece a que ambos tipos son ampliamente usadas en El Salvador como conexiones en estructuras de diversos usos. Los tipos de conexiones que fueron consideradas en el presente trabajo son: conexión por soldadura directa y conexión a través de placas soldadas.

En la conexión por soldadura directa se unen al patín de la columna los patines de la viga con soldadura de penetración completa, y el alma de la viga con soldadura de filete a ambos lados. Además como parte de la configuración de la conexión se hace uso de atiesadores en el alma de la columna.

Este es un tipo de conexión muy común en nuestro medio y considerada una conexión rígida por un amplio número de diseñadores.

La conexión a través de placas soldadas es precalificada por el FEMA 350 e identificada como “*Welded Flange Plate (WFP)*” y es considerada por dicho estándar como una conexión completamente restringida (Fully restrained). Este tipo de conexión utiliza placas (en adelante denominadas placas de patín), para conectar los patines de la viga al patín de la columna, sin una conexión directa del patín de la viga al patín de la columna. Dichas placas se conectan al patín de la columna por medio de soldaduras de penetración completa y se conectan a los patines de la viga por medio de soldadura de filete. El alma de la viga se conecta al patín de la columna por medio de una placa (en adelante denominada placa de alma) y no existe contacto entre el alma de la viga y el patín de la columna. Además como parte de la configuración de la conexión se hace uso de atiesadores en el alma de la columna. El apartado 3.5.4 de dicho estándar presenta los lineamientos de diseño para este tipo de conexiones. La conexión aparece esquematizada en la Fig. 2.

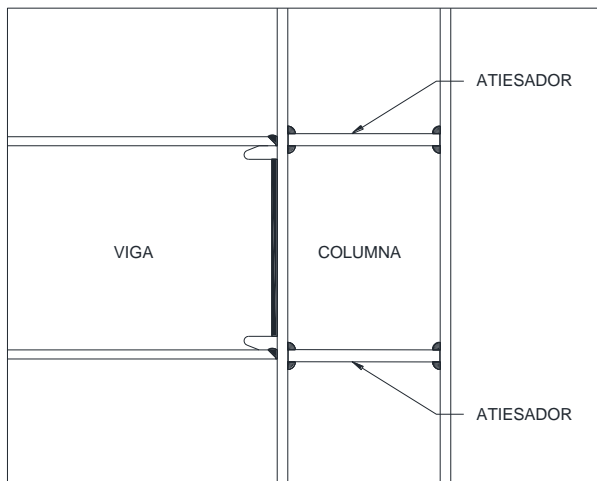


Fig. 1. Esquema de conexión viga-columna por soldadura directa.

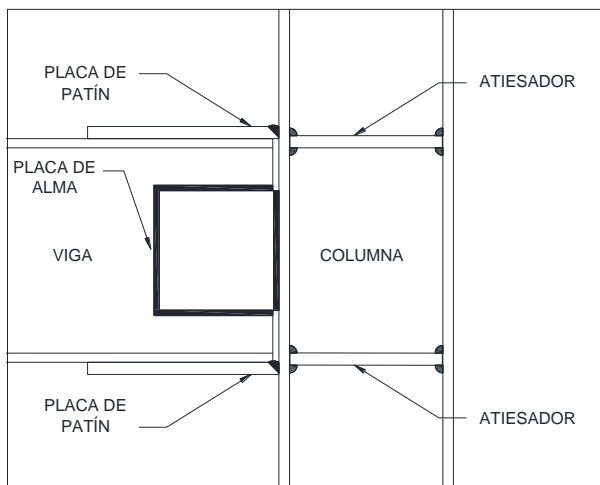


Fig. 2. Esquema de conexión viga-columna a través de placas soldadas.

Después de un proceso de análisis que tomó en consideración la capacidad instalada del laboratorio de estructuras grandes y las propiedades de los perfiles disponibles para realizar los ensayos se decidió construir modelos experimentales formados por una viga y una columna dispuestas como se esquematiza en la Fig. 3.

El sistema es estáticamente determinado, lo cual permite definir el momento que resiste la conexión en función de la carga aplicada. Además con lo anterior se puede dimensionar la longitud de la viga en función del momento que se necesita aplicar y considerando la capacidad instalada en el laboratorio.

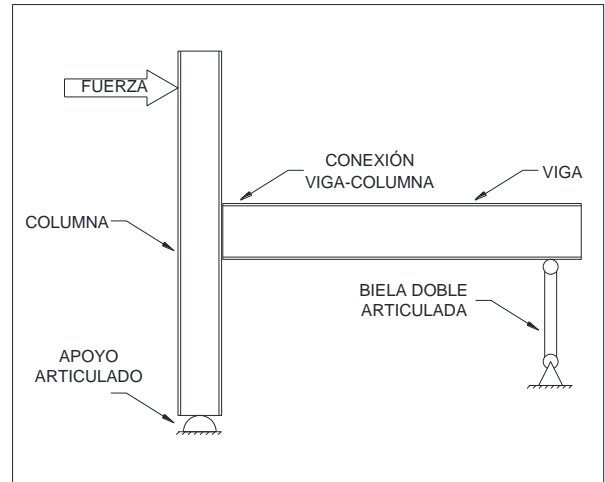


Fig. 3. Esquema de montaje de ensayos a escala natural de conexiones viga-columna.

Los modelos a escala real, en adelante solo denominados probetas, fueron nombrados de la siguiente manera:

- CM-FP\_01 : probeta cuya forma de conexión viga-columna fue a través de placas soldadas.
- CM-FP\_02 : probeta cuya forma de conexión viga-columna fue por soldadura directa.

Para ambas probetas se utilizaron perfiles tipo W 14x109 para las columnas y perfiles W18x65 para las vigas. El material de dichos perfiles fue laminado bajo la norma ASTM A992 Grado 50 (esfuerzo de fluencia 50 KSI). La probeta CM-FP\_01 se diseñó de acuerdo al FEMA 350 sección 3.5.4 y la probeta CM-FP\_02 no hay elementos de conexión que diseñar más allá de especificar el tipo de soldadura. Se presentan a continuación las figuras con el diseño de las probetas.

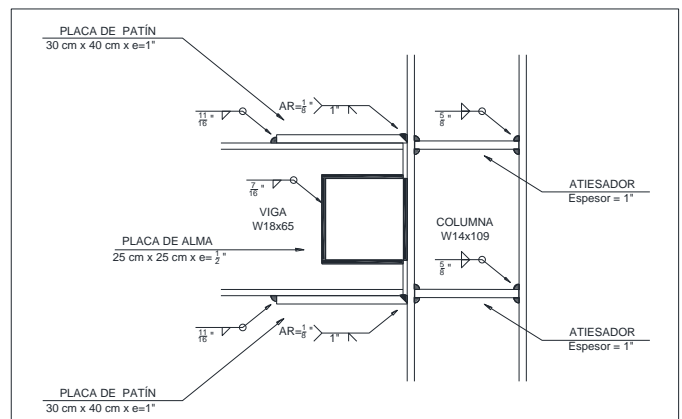


Fig. 4. Requerimiento de diseño por el FEMA 350 para el diseño de la conexión por medio de placas soldadas para la probeta CM-FP\_01.

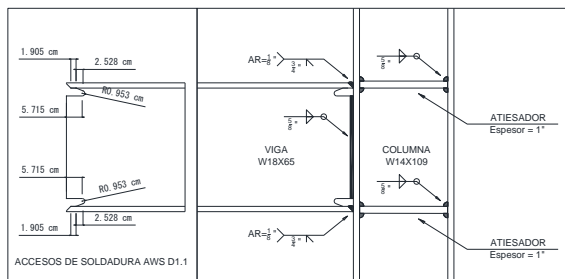


Fig. 5. Conexión por medio de soldadura directa para probeta CM-FP\_02.

### III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL E INSTRUMENTACIÓN.

En la TABLA 1 y Fig. 6 se muestra el equipo utilizado en los ensayos. El equipo se dispuso de esa forma con el objetivo poder generar curvas momento-rotación.

Las probetas para cada tipo de conexión consistieron en una viga conectada a una columna al centro de esta última. La columna se encontraba con un apoyo tipo rótula en su base y la viga se apoyaba sobre una biela rígida doblemente articulada con una celda de carga de 50 ton que se ubicada en el extremo lejano de la viga.

TABLA 1  
MATERIALES A UTILIZAR PARA EL ENSAYO A ESCALA NATURAL DE UNA CONEXIÓN VIGA-COLUMNA.

#	Equipo utilizado de ensayo	Cantidad
1	Prisma de concreto 2.68 mts x 0.7 mts x 0.75 mts	2
2	Cubo de concreto 1 mts x 1 mts x 1 mts	3
3	Placas de 0.6 m x 0.6 m x 1/4"	2
4	Placas 1.5 mts x 1.15 mts x 1/4"	2
5	Rótula	3
6	Celda de carga 50 ton	1
7	Actuador hidráulico	1
8	TDS	1
9	CDP 200	1
10	CDP 25	7
11	Strain Gauges 2 mm	5
12	Strain Gauges 5 mm	3



Fig. 6. Instrumentación del ensayo a escala natural.

### IV. RESULTADOS.

Los resultados para la probeta CM-FP\_01:

La figura 7 muestra el desplazamiento de la columna en el punto de aplicación de la carga. El ensayo se controló por dicho desplazamiento o deriva de entrepiso. Debido a que el comportamiento de la probeta es influenciado por la rigidez de la conexión, se utilizó un protocolo de carga diferente para las probetas CM-FP\_01 y CM-FP\_02, elegidos al controlar por carga la primera etapa del ensayo, medir el desplazamiento y buscar en una tabla previamente preparada el protocolo de carga más acorde a la probeta en particular.



Fig. 7. Gráfico del Historial de desplazamiento de la probeta CM-FP\_01.

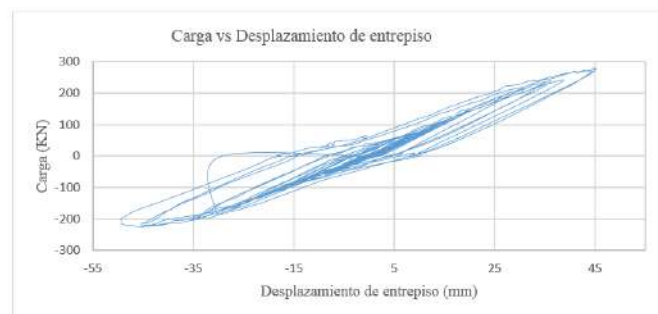


Fig. 8. Gráfico de Carga aplicada vs Desplazamiento en el punto de aplicación de la carga de la probeta CM-FP\_01.

La figura 8 muestra el ciclo de histéresis carga-deriva de entrepiso de la probeta, y se observa un comportamiento lineal en cada ciclo de carga.

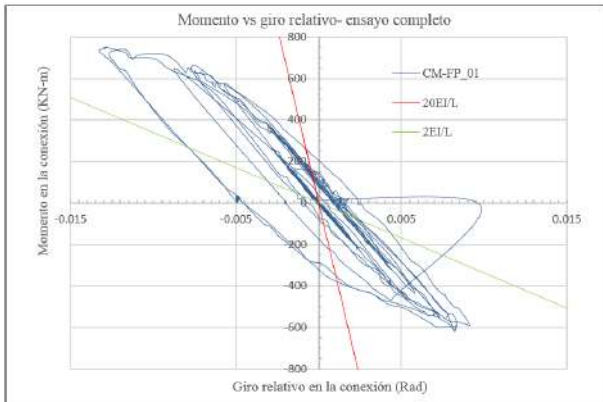


Fig. 9. Momento-cambio en el ángulo relativo viga-columna en promedio para los tres deformímetros del patín inferior de la viga para la probeta CM-FP\_01.

El 84.0 % de la relación momento-cambio en ángulo relativo viga-columna presenta una rigidez secante entre los límites  $\frac{20EI}{L} = 338009.87 \frac{KN-m}{rad}$  y  $\frac{2EI}{L} = 33800.98 \frac{KN-m}{rad}$ , de modo que el comportamiento representativo de la conexión se encuentra dentro del rango de rigidez secante de una conexión parcialmente restringida.

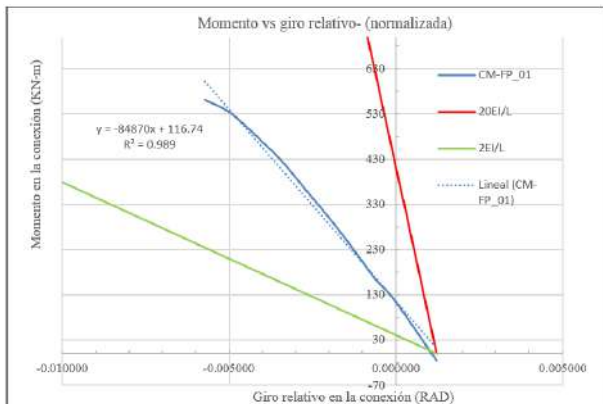


Fig. 10. Superposición de la relación momento-giro relativo del ensayo contra los criterios de clasificación del AISC para la probeta CM-FP\_01.

En la Fig. 10 se aprecia que el comportamiento de la conexión se encuentra prácticamente en el medio entre los límites que separan a una conexión completamente restringida y a una conexión de simple apoyo.

Se presenta a continuación una tabla resumen con datos para diseño.

TABLA 2  
RIGIDEZ ROTACIONAL DE LA PROBETA CM-FP\_01 ANTE CARGAS DE SERVICIO.

Condición de servicio	Momento (KN-m)	Cambio en ángulo relativo viga-columna (rad)	Rigidez Rotacional (KN-m/rad)
100% Fy	660.96	0.00750	88128.13
90% Fy	594.86	0.00720	82620.13
80% Fy	528.77	0.00490	107912.00
70% Fy	462.67	0.00390	118634.03

Los resultados para la probeta CM-FP\_02:

En la figura 11 se presenta las deformaciones aplicadas según el protocolo de carga utilizado para la probeta.

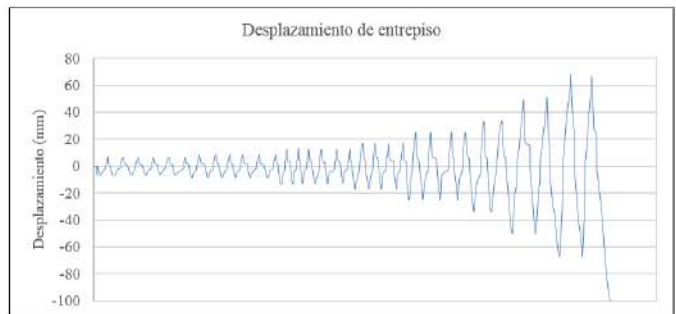


Fig. 11. Gráfico del historial de desplazamiento para la probeta CM-FP\_02.

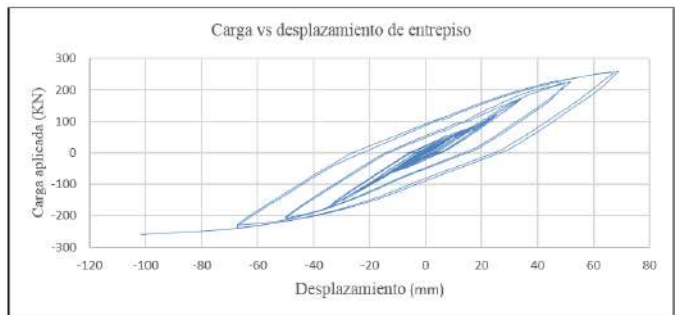


Fig. 12. Gráfico de Carga aplicada vs Desplazamiento en el punto de aplicación de la carga para probeta CM-FP\_02.

Al igual que en la probeta CM-FP\_01, el ciclo de histéresis tiene un comportamiento lineal en cada ciclo de carga y en ambos casos se presentan deformaciones permanentes en la conexión, de modo que la conexión tiene un comportamiento plástico

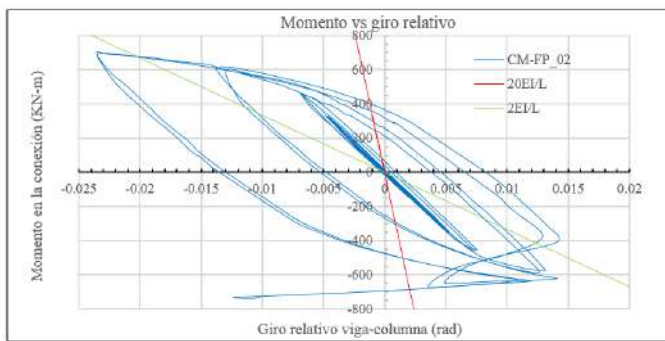


Fig. 13. Momento-cambio en ángulo relativo viga-columna promedio de los tres deformímetros del patín inferior de la viga.

El 88.62 % de la relación momento-cambio en ángulo relativo viga-columna presenta una rigidez secante entre los límites  $\frac{20 EI}{L} = 334862.87 \frac{KN-m}{rad}$  y  $\frac{2EI}{L} = 33486.28 \frac{KN-m}{rad}$ , de modo que el comportamiento representativo de la conexión se encuentra dentro del rango de rigidez secante de una conexión parcialmente restringida.

La relación momento-giro de la conexión para cargas inferiores a fluencia de la viga refleja una proporcionalidad directa, con un factor de correlación de 0.96 para una tendencia lineal. Es de mucho valor notar que la pendiente de la línea de tendencia lineal de la relación momento-rotación tiene un valor de 33001 KN-m y considerando que la relación  $\frac{2EI}{L}$  tiene un valor de 33486 KN-m, se establece que el comportamiento de la conexión tiende al de una conexión de simple apoyo.

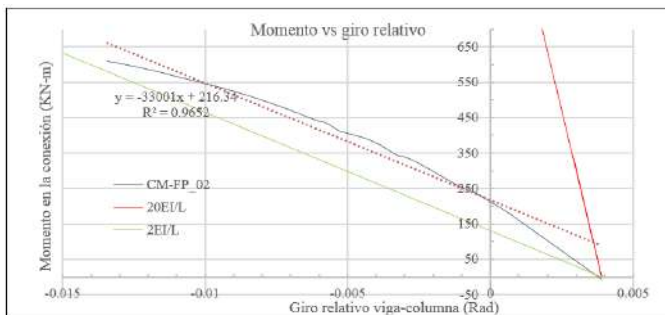


Fig. 14. Superposición de la relación momento-giro relativo del ensayo contra los criterios de clasificación del AISC para CM-FP\_02.

Se presenta a continuación una tabla resumen con datos para diseño.

TABLA 3  
RIGIDEZ ROTACIONAL DE LA PROBETA CM-FP\_02 ANTE CARGAS DE SERVICIO.

Condición de servicio	Momento (KN-m)	Cambio en ángulo relativo viga-columna (rad)	Rigidez Rotacional (KN-m/rad)
100% Fy	660.96	0.01720	38427.97
90% Fy	594.86	0.01260	47211.50
80% Fy	528.77	0.00840	62948.67
70% Fy	462.67	0.00680	68040.10

A continuación se presenta información comparativa entre ambas probetas.

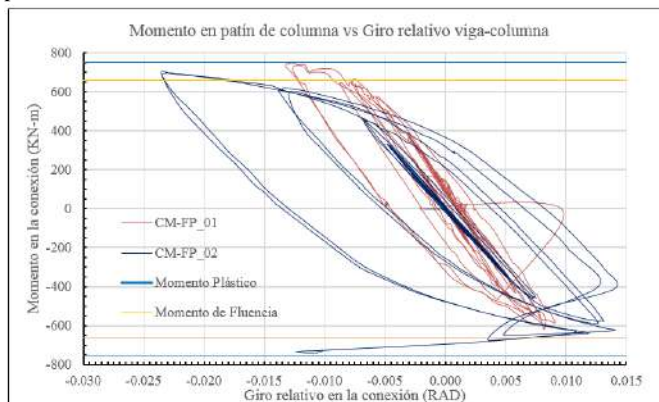


Fig. 15. Gráfico comparativo para relación Momento en la conexión vs Giro relativo entre las probetas CM-FP\_01 y CM-FP\_02.

En la Fig. 15 se puede observar que la rigidez de la probeta 1 (CM-FP\_01) es mayor que la rigidez de la probeta 2 (CM-FP\_02), evidenciada en la pendiente de las gráficas. A menor pendiente menor rigidez rotacional de la conexión. Es importante mencionar que las deformaciones permanentes son de mayor magnitud en la probeta CM-FP\_02, una evidencia adicional que demuestra que la conexión tiene una menor rigidez rotacional.

La degradación de la rigidez rotacional a lo largo del ensayo se puede evidenciar en la separación en la gráfica momento-rotación entre ciclos de carga, producto de las deformaciones permanentes. Por lo tanto la evidencia demuestra que la conexión de la probeta CM-FP\_02 presenta una degradación de rigidez más acelerada y drástica que la probeta CM-FP\_01, ya que ante momentos de igual magnitud, en el peor de los casos, la deformación es prácticamente el doble en las últimas etapas del ensayo.

Claramente la conexión de la probeta CM-FP\_01 tiene una mayor rigidez rotacional. La línea de tendencia de cada gráfica básicamente une los puntos extremos de las gráficas y la pendiente de dichas líneas es una representación del comportamiento global de la conexión para efectos prácticos. De esta forma al comparar la pendiente de dichas líneas de tendencia encontramos que la rigidez de la conexión de la probeta CM-FP\_01 es prácticamente el doble que el de la probeta CM-FP\_02. La figura 16 muestra de mejor manera lo mencionado anteriormente:

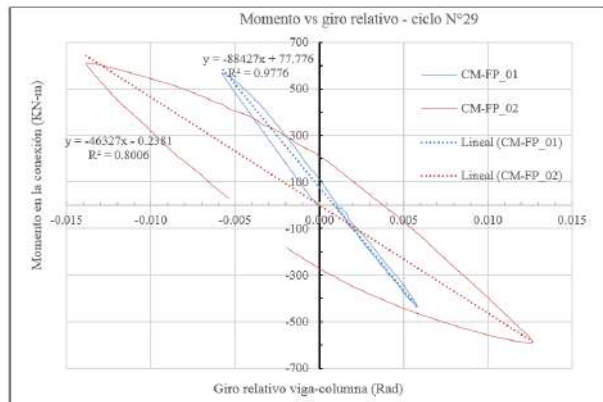


Fig. 16. Momento contra cambio en ángulo relativo viga-columna para el ciclo de carga número 29 para probeta CM-FP\_01 y CM-FP\_02.

A continuación se presenta los resultados de la aplicación de los datos de rigidez reales en un modelo estructural, el cual se ilustra en la Fig. 17.

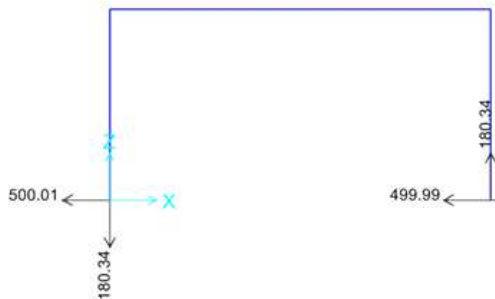


Fig. 17. Reacciones en la base del marco.

TABLA 4  
DERIVA Y MOMENTO DE UNA CONEXIÓN COMPLETAMENTE RESTRINGIDA.

<b>Deriva de entrepiso</b>	0.0200 m
<b>Momento en conexión viga-columna</b>	541.02 KN-m

TABLA 5  
DERIVA Y MOMENTO DE UNA CONEXIÓN CON UNA RIGIDEZ DE 82620.13 KN-M/RAD.

<b>Deriva de entrepiso</b>	0.0255 m
<b>Momento en conexión viga-columna</b>	416.06 KN-m

TABLA 6  
DERIVA Y MOMENTO DE UNA CONEXIÓN CON UNA RIGIDEZ DE 47211.5 KN-M/RAD.

<b>Deriva de entrepiso</b>	0.0281 m
<b>Momento en conexión viga-columna</b>	354.63 KN-m

TABLA 7  
DERIVA Y MOMENTO DE UNA CONEXIÓN SIN CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN DE MOMENTOS.

<b>Deriva de entrepiso</b>	0.0436 m
<b>Momento en conexión viga-columna</b>	0 m

TABLA 8  
COMPARACIÓN ENTRE LA RIGIDEZ Y AUMENTO EN LA DERIVA.

Rigidez rotacional de la conexión	Aumento en deriva de entrepiso
$82620.13 \frac{KN-m}{rad}$	27.5 %
$47211.5 \frac{KN-m}{rad}$	40.5 %
Conexión articulada	118 %

En la TABLA 8 la columna “Aumento en deriva de entrepiso” significa por ejemplo que cuando la rigidez es de  $82620.13 \frac{KN-m}{rad}$ , se tienen derivas de entrepiso en la estructura 27.5% mayores a las que se obtienen considerando conexiones perfectamente restringidas.

## V. CONCLUSIONES

- Considerando que la rigidez rotacional de la conexión está definida como el cambio de ángulo relativo entre la viga y

la columna respecto a su posición de referencia, se concluye que la probeta CM-FP\_01 posee una rigidez de mayor magnitud que la probeta CM-FP\_02.

- La conexión de la probeta CM-FP\_01, la cual es precalificada por el FEMA 350, se clasifica como una conexión parcialmente restringida en base a la clasificación del AISC según el ensayo realizado, debido a que la relación momento en la cara de la columna contra el cambio de ángulo relativo viga-columna posee una rigidez secante menor a  $\frac{20EI}{L} = 338009.87 \frac{KN-m}{rad}$  pero mayor a  $\frac{2EI}{L} = 33800.98 \frac{KN-m}{rad}$  en el 84% de los datos registrados en el ensayo a escala real de la conexión, ambos son los límites de rigidez secante estandarizada por el AISC.
- En base a los resultados obtenidos en el ensayo a escala real, la conexión de la probeta CM-FP\_02 se considera como una conexión parcialmente restringida en base a los criterios del AISC. Lo anterior se respalda considerando que el 88.62% de los datos de la gráfica de comportamiento momento en la cara de la columna contra el cambio de ángulo relativo viga-columna posee una rigidez secante menor entre  $\frac{20EI}{L} = 334862.87 \frac{KN-m}{rad}$  y  $\frac{2EI}{L} = 33486.28 \frac{KN-m}{rad}$ , donde ambos son los límites de clasificación del AISC.
- La rigidez rotacional de las conexiones de las probetas CM-FP\_01 y CM-FP\_02 no es constante y tiende a disminuir a medida que el momento flector aumenta.
- Conocer el verdadero comportamiento de la conexión y cuál es la rigidez con la que trabaja ante un determinado rango de cargas aplicadas es necesario, ya que una suposición de la rigidez de la conexión puede llevar a un análisis estructural alejado de la condición real de comportamiento

Con este trabajo se abre una línea de investigación en la rama de conexiones en estructura de acero estructural en El Salvador, que como se ha demostrado inciden en el comportamiento global de una estructura. Pueden evaluarse otras configuraciones de conexiones de uso común y profundizar en el efecto en un diseño estructural producto de incluir información de la rigidez real en una conexión.

## RECONOCIMIENTOS

Realizamos especial agradecimiento a Dios. Agradecemos el apoyo de nuestras familias y del equipo de trabajo de los laboratorios de mecánica estructural, laboratorio de estructuras grandes y al Dr. Ing. José Carlos Hasbún.

## REFERENCIAS.

- ANSI/AISC 341-10. (12 de Julio de 2010). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. ANSI/AISC 341-10. Chicago, Illinois, Estados Unidos.
- Campos Carranza, E. G., Martínez Andrés, N. A., Martínez Melara, J. I., & Mazariego Muñoz, J. D. (2017). Estudio,

Procesamiento y Aplicación de Normas Sismorresistente Para el Diseño de Marcos Especiales de Momento de Acero Estructural Conforme a las Especificaciones ANSI/AISC 360-10 y ANSI/AISC 341-10. San Salvador: Universidad Centroamericana José Simeón Cañas.

Cañas Hernández, H. J., Rauda Carbajal, G. J., & Urrutia Barrios, D. (2017). Estudio, Procesamiento y Aplicación de Normas Sismorresistente Para el Diseño de Marcos Especiales de Momento de Acero Estructural Conforme a las Especificaciones ANSI/AISC 360-10, ANSI/AISC 341-10 y ANSI/AISC 358-10. San Salvador: Universidad Centroamericana José Simeón Cañas.

Cornejo Alvarenga, R. S., & Valiente Zubieta, A. (Octubre de 2005). Manual de Diseño de Conexiones en Edificios a Base de Marcos No Arriostrados de Acero Estructural. *Manual de Diseño de Conexiones en Edificios a Base de Marcos No Arriostrados de Acero Estructural*. San Salvador, El Salvador.

Guzmán Salinas, O. (Septiembre de 2006). Diseño de Conexiones con AISC-LRFD-1999. México D.F., México.

Iman, F., Mamood, M. T., & Tom, L. (Junio de 2016). Sistema de Clasificación Para Conexiones Viga-Columna Semirígidas. *Latin American Journal of Solids and Structures*.

McCormac, J., & Csernak, S. (2015). *Diseño de Estructuras de Acero*. México: Alfaomega.

Salas Quintanilla, C. C. (2016). Estudio Experimental de Conexiones de Momento Usando Perfiles T soldados. Santiago de Chile, Chile.

Swanson, J. A., & Leon, R. T. (Enero de 2000). Bolted Steel Connections: Tests on T-Stub Components. *Journal of Structural Engineering*.

Takeuchi, C. P. (2007). *Conexiones en Estructuras Metálicas*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Tamboli, A. R. (2010). *Handbook of Structural Steel Connections Design and Details* (2° ed.). New York: McGraw Hill.