

## **Evaluación Experimental y Analítica del Comportamiento Inelástico de Conexiones Viga-Columna de Concreto Reforzado.**

**Francisco S. Yeomans Reyna, PhD**

Instituto Tecnológico y de Estudios superiores de Monterrey, Monterrey, N.L., México,  
[fyemans@itesm.mx](mailto:fyemans@itesm.mx)

**Luís Orta Cortes, M. Sc. Ing.**

Instituto Tecnológico y de Estudios superiores de Monterrey, Monterrey, N.L., México,  
[Luis.orta@itesm.mx](mailto:Luis.orta@itesm.mx)

### **Resumen**

En la evaluación de la respuesta de estructuras de concreto reforzado bajo sismos es importante el estudio de la respuesta inelástica de dichas estructuras, para lo cual se requiere de modelos de predicción del comportamiento inelástico para vigas, columnas así como para las conexiones viga-columna. El presente reporte discute los resultados experimentales de conexiones viga-columna de concreto reforzado típicas sujetas a un tren de desplazamientos controlados que incluyen incursiones inelásticas, generando la respuesta histerética de la conexión. Adicionalmente se reportan los resultados de simulaciones para análisis de marcos de concreto reforzado asumiendo conexiones rígidas, conexiones elásticas así como inelásticas.

### **Palabras Clave**

Conexión viga columna, inelasticidad, concreto reforzado, sismos.

### **1. Introducción**

Durante las últimas décadas se han presentado avances importantes en el diseño de estructuras de concreto resistentes a sismos. En países como Estados Unidos, Japón y Nueva Zelanda, por mencionar algunos, se han efectuado investigaciones relevantes en la predicción de la respuesta inelástica de estructuras sujetas a cargas dinámicas (Hakuto et al., 2000). Dentro del grupo de elementos que conforman una estructura de concreto, existen algunos a los que han sido estudiados ampliamente en cuanto a su respuesta inelástica, tal es el caso de las vigas y columnas principalmente. Por otro lado, existen elementos estructurales cuya caracterización inelástica ha sido limitada, tal es el caso de los nudos o uniones viga – columna. De los estudios recientes realizados en uniones de concreto sobresalen aquellos que contemplan uniones internas y externas de los niveles intermedios de un edificio. Dichas uniones contemplan la característica de que la columna se extiende por la parte superior e inferior de la unión.

A raíz del sismo de Loma Prieta en 1989, el NISEE (National Information Service for Earthquake Engineering) (NISEE), desarrollo un estudio de uniones viga – columna donde la viga se extiende hacia la izquierda y derecha de la unión y la columna únicamente se extiende hacia debajo de la unión. El objetivo fue evaluar el comportamiento en laboratorio de estas uniones para explicar las posibles causas de falla en las estructuras de vías de comunicación. Como parte de sus conclusiones se estableció que las uniones, viga – columna, eran elementos particularmente débiles (Lowes, 1998) De acuerdo al reporte del Comité 352 del ACI-ASCE (ACI-ASCE 352, 1991) se estableció la necesidad de investiga la

respuesta de conexiones de esquina (unión de rodilla) viga-columna de concreto reforzado en particular su respuesta experimental bajo carga cíclica y el efecto de la flexibilidad de las conexiones en la respuesta de la estructura completa.

## 2. Objetivos de la línea de investigación.

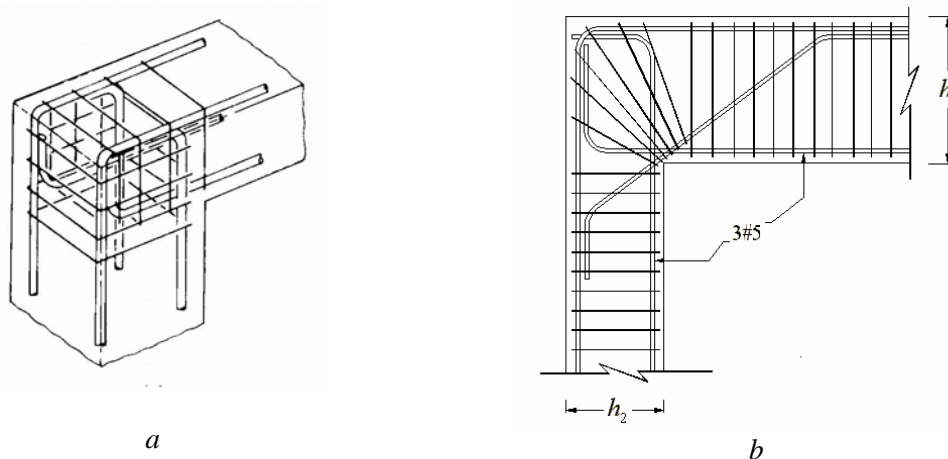
Como parte de la línea de investigación general sobre componentes estructurales de la maestría en Ingeniería y administración de la construcción en la especialidad de ingeniería estructural, se estableció como línea de trabajo el estudio del comportamiento inelástico de las juntas de esquina viga-columna de concreto reforzado sujetas a carga sísmica simulada, así como la evaluación de su influencia en el análisis estructural.

El proyecto se dividió en tres etapas:

- Primer etapa: evaluación experimental de tres conexiones viga-columna sujetas a carga sísmica simulada.
- Segunda etapa: evaluación analítica de un marco típico de concreto reforzado incorporando un nuevo elemento “junta viga-columna” adicionalmente a los elementos vigas y columna típicos.
- Tercer etapa: verificación de la predicción del modelo analítico comparándolo con pruebas de marcos completos (escala 1/10) de concreto reforzado sujetos a carga sísmica simulada. Establecimiento de recomendaciones para el análisis y diseño estructural.

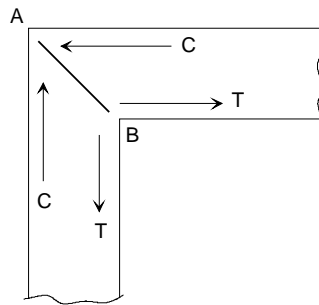
### 2.1 Evaluación experimental de conexiones viga-columna (Primera etapa)

Con el fin de poder evaluar experimentalmente el comportamiento de la conexión viga columna se construyeron tres especímenes cada uno con la junta viga-columna mas una extensión de viga y columna de longitud  $L/2$  asumiendo una posición de mitad del claro para los puntos de inflexión en la estructura de donde provendrían. Dado que la respuesta de la conexión depende de una serie de factores tales como: la cuantía, la resistencia a la compresión del concreto, la resistencia a la fluencia del acero, la cantidad de refuerzo transversal, las dimensiones transversales de los elementos, etc., para esta investigación en particular se uso un arreglo propuesto por Park y Paulay (Park y Paulay, 1996) como uno de los mas eficientes en la transmisión de esfuerzos (Figura 1).



**Figura 1 a: Refuerzo ortogonal en juntas de rodilla sujetas a cargas alternas, estribos ortogonales. b: Refuerzo de la conexión utilizada. (Park y Paulay, 1996)**

El modelo que se utilizó es el que se muestra en la figura 1.5. La sección es rectangular de 25 cm de base por 45 cm de peralte total y con un recubrimiento de 7 cm al centro del arreglo de las varillas. La conexión consiste de dos piernas de 146 cm. De longitud. Las piernas tienen un mayor acero de refuerzo con la finalidad de que la falla se presente en la conexión, de tal forma que las piernas cuentan con tres varillas de #5 tanto en lecho superior como inferior. A 10 cm. del paño de la columna el refuerzo el refuerzo que entra a la conexión se reduce a dos varillas. Adicionalmente se colocaron tres varillas #5 en la zona interna de la conexión, atravesándola formando un ángulo de 45 grados con las caras internas de la conexión. Con el fin de soportar los esfuerzos de tensión en la junta se añadieron estribos en la conexión los cuales corren en la dirección de la diagonal de la junta (diagonal A-B de la conexión de acuerdo a la Figura 2) (Park and Paulay, 1996).



**Figura 2. Fuerzas tratando de abrir la junta estribos a lo largo de la línea A – B. (Park y Paulay, 1996)**

## 2.1 Equipo de medición para la prueba experimental

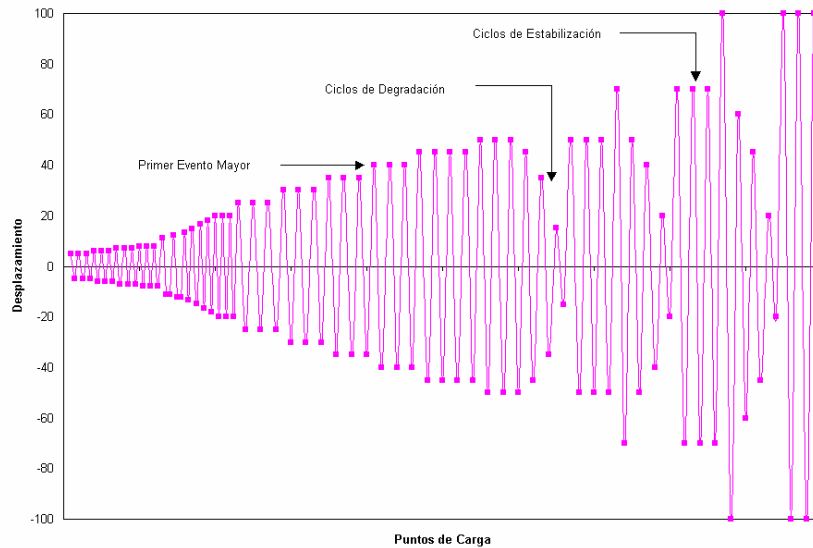
Para este proyecto se utilizó un sistema de adquisición de datos, el cual tiene capacidad para diez dispositivos de desplazamiento (LDVT), treinta galgas extensométricas y cinco celdas de carga. Para esta prueba se utilizaron cinco LDVT, una galga embebida en el concreto de la junta y una celda de carga. Tres LDVT fueron colocados de manera que midieran el desplazamiento relativo entre las dos piernas, uno más en el extremo de la pierna utilizado como referencia y el último colocado en el extremo de la junta para medir el desplazamiento ascendente o descendente que pudiera tener al hacer el efecto de abrir y cerrar la junta.

## 2.2 Programa de carga

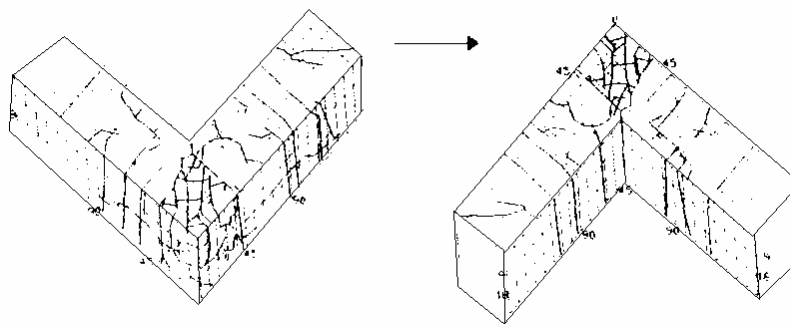
El criterio para cargar los especímenes fue el de desplazamientos controlados. Debido a que se requería un modelo de desplazamientos cíclicos se recurrió al procedimiento propuesto por Porter (Porter, 1987). De acuerdo con este proceso, la carga se aplica cíclicamente y en forma cuasi-estática. La carga se incrementa de modo progresivo con referencia a los desplazamientos hasta llegar al primer evento mayor que es cuando se inicia el abatimiento de las propiedades elásticas del material. A partir de ese punto el sistema comienza a degradarse y el patrón de cargas es modificado como puede observarse en la Figura 3.

## 2.3 Patrón de agrietamiento

En la Figura 4 se muestra el patrón de agrietamiento que siguieron las conexiones. Se puede observar que la falla se presentó en la conexión tal como se esperaba. En este patrón podemos observar que el refuerzo localizado en forma perpendicular a la sección A-B mostrada evitó un agrietamiento excesivo en la zona interna de la conexión.



**Figura 3. Patrón de desplazamientos secuenciales (Porter, 1987)**

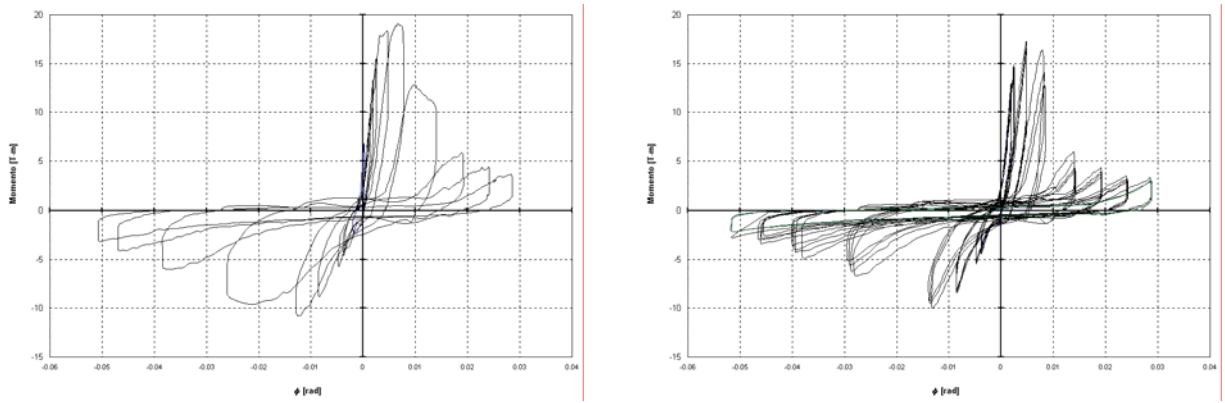


**Figura 4. Patrón de agrietamiento de las conexiones (Reboloso y Yeomans, 1998)**

La Figura 5 muestra los diagramas de histéresis Momento-giro en la conexión, obtenidas de una de las pruebas experimentales. El diagrama virgen nos da una idea del comportamiento de la rigidez de la conexión en función del desplazamiento y en el diagrama estabilizado examinamos el grado de degradación que manifiesta la junta. El momento máximo positivo fue de 22.5 Ton-m al centro de la junta, mientras que el máximo negativo fue de 12.6 Ton-m.

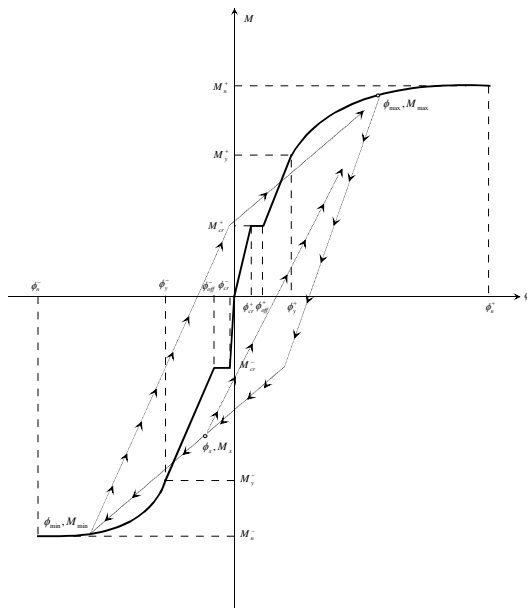
### 3. Evaluación analítica del comportamiento de conexiones viga-columna (Segunda etapa)

Sobre la base de los resultados obtenidos experimentalmente, se continuó trabajando en el tema para obtener de forma analítica como afecta al comportamiento de la estructura el considerar a la conexión viga-columna como un elemento flexible e inelástico. Dicho comportamiento se comparó analizando el sistema estructural bajo distintos criterios de análisis dinámicos y comparando principalmente tres aspectos; desplazamiento lateral, fuerza cortante en la base y el momento interno en la junta, que será el que se utilice en una fase de diseño y detallado del refuerzo.

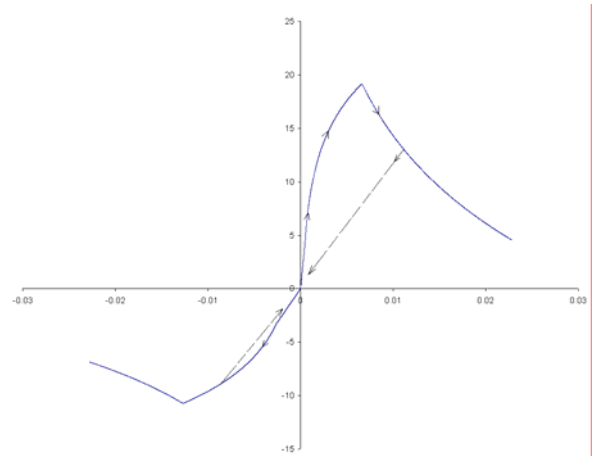


**Figura 5. Diagrama de histéresis virgen/estabilizado para la conexión viga – columna ensaye 2 (Reboloso y Yeomans, 1998)**

Primeramente, el análisis dinámico tradicional que considera elementos elástico–lineales y juntas rígidas. El segundo considera a los elementos inelásticos siguiendo reglas de histéresis propuestas por Takeda (Takeda et al., 1970) y juntas rígidas (Figura 6a ). El tercero considera a los elementos inelásticos y a la junta un elemento elástico–lineal, obteniendo su rigidez a partir de la evaluación experimental reportadas por Reboloso y Yeomans (Reboloso y Yeomans, 1998). El último tipo de análisis considera tanto a los elementos como a las juntas como inelásticos. En el caso de las juntas se implementaron las reglas de histéresis que definen la envolvente propuestas por Yeomans (Yeomans, 1993) utilizando para las reglas de carga y descarga un modelo orientado al origen (Figura 6b).



**Figura 6a. Modelo de histéresis para elementos tipo viga**

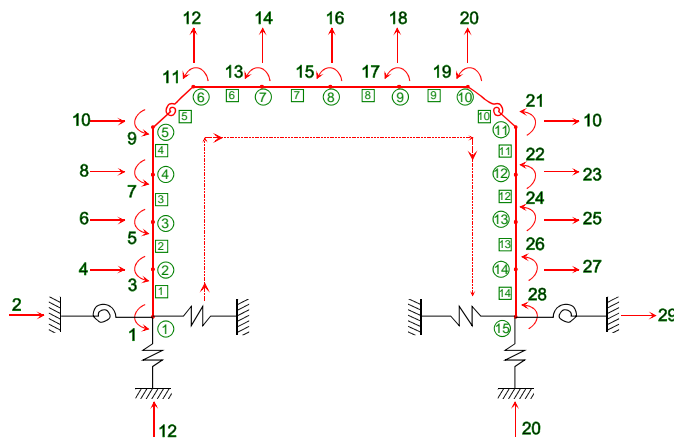


**Figura 6b. Modelo de histéresis para las juntas viga – columna.**

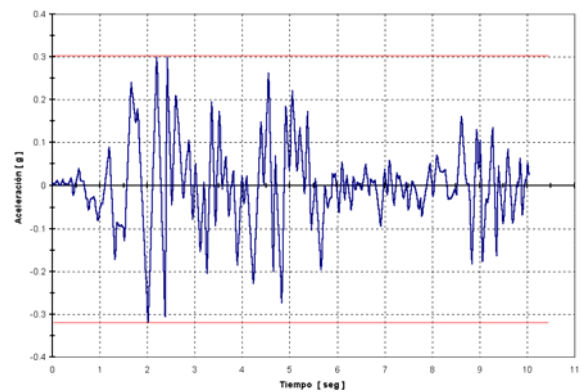
### 3.1 Modelo Estructural y Acelerograma

Para los elementos tipo viga se consideraron dos grados de libertad por nodo, mientras que para los elementos tipo junta (elementos 5 y 10 de la Figura 7a) únicamente el grado de libertad rotacional. Por otra parte, el acelerograma considerado en el estudio fue la componente Norte–Sur del sismo de El Centro

1940 (Figura 7b). De acuerdo con la base de datos del NISEE, el incremento de tiempo de los puntos es 0.02 seg., mientras que para la solución se utilizó 0.01seg. El pico se presenta en 2.02seg con 0.319g. Utilizando los primeros 10 segundos.

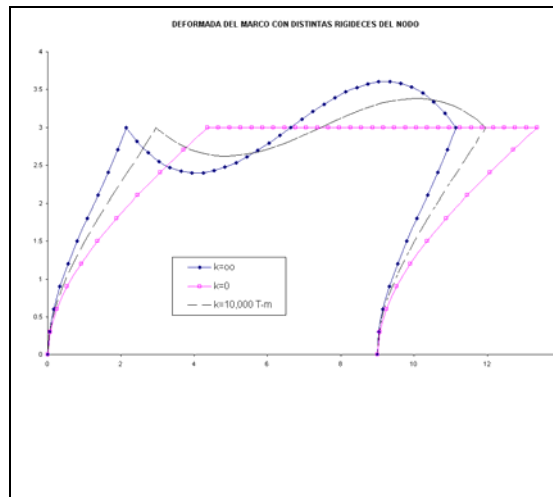


**Figura 7a. Esquema general de los grados de libertad. (Takeda et al., 1970)**

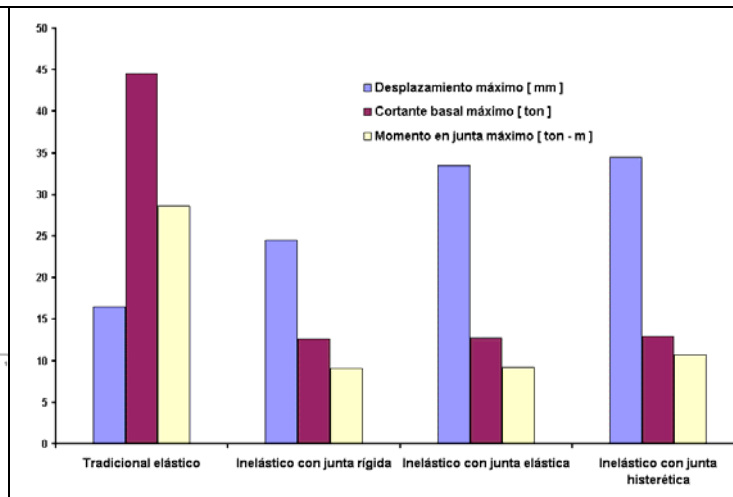


**Figura 7b. Acelerograma El Centro 1940. (NISEE)**

Se generó un software para evaluar la respuesta paso a paso utilizando el método de la aceleración lineal. Se graficaron los efectos máximos que experimentó el marco bajo distintos tipos de análisis. Los resultados se muestran de la Figura 8a y Figura 8b.



**Figura 8a. Deformada del marco (Orta, 2001)**



**Figura 8b. Comparativa de efectos máximos para distintas consideraciones de análisis**

#### 4. Conclusiones de la primer y segunda etapa

De acuerdo al comportamiento experimental de la junta, se observa que:

1. La predicción de la resistencia con un comportamiento cíclico es aceptable
2. La rigidez inicial coincide con el criterio rígido.
3. Se muestra una degradación de rigidez cuando se incursiona en grandes deformaciones

De acuerdo al comportamiento analítico del marco, se hace una comparativa de los resultados obtenidos con respecto al análisis dinámico tradicional, reportados en la Tabla 1, y se obtiene que:

**Tabla 1 Comparativa entre distintas consideraciones de análisis**

Tipo de análisis	Desviación		Momento en la junta $\left(\frac{M}{M_n}\right)$	Cortante basal $\left(\frac{V}{c_{\max} W}\right)$
	$\left(\frac{\Delta}{H}\right) \%$	$\left(\frac{\Delta}{\Delta_{trad}}\right)$		
Dinámico junta rígida (tradicional)	5.490	1.00	2.672 (0.891†)	5.822 (1.941†)
Dinámico – Inelástico – junta rígida	8.167	1.49	0.849	1.656
Dinámico – Inelástico – junta elástica	11.187	2.04	0.854	1.660
Dinámico – Inelástico – junta histerética	11.483	2.09	1.002	1.688

† Aplicando un factor de ductilidad igual a 3.

1. Un análisis tradicional no arrojará una respuesta real del desplazamiento lateral, ya que el marco incursiona en deformaciones inelásticas, de tal forma que deben de cuidarse las especificaciones de separación entre edificaciones ante la posibilidad del choque durante un evento sísmico. Los desplazamientos resultaron del orden de 2.09 veces más grandes.
2. Se deberá utilizar un factor de reducción por ductilidad para obtener la fuerza en la base (cortante basal) a partir del análisis dinámico tradicional, y en función de la pericia de predecir dicho factor se tendrá la respuesta ante sollicitaciones sísmicas. Se requiere de un factor de ductilidad de 3, lo cual es adecuado de acuerdo con las especificaciones actuales (CFE,1993).
3. Al igual que el cortante basal se deberá utilizar un factor de reducción por ductilidad para obtener el momento interno de diseño para la junta a partir del análisis dinámico tradicional.
4. Si se cuida el aspecto de las separaciones entre edificaciones y se puede calcular el factor de ductilidad de acuerdo con las especificaciones (CFE,1993), no se requiere un análisis inelástico considerando a las juntas de esquina como un elemento flexible no-lineal.

## 5. Agradecimientos

La presente investigación fue desarrollada con el apoyo del Centro de Investigación en Diseño y Construcción del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM). El trabajo fue llevado a cabo en el laboratorio de Ingeniería Estructural del Departamento de Ingeniería Civil.

## 6. Referencias Bibliográficas

Hakuto Shigeru, Park Robert y Tanaka Hitoshi. (2000). “Seismic Load Test on Interior and Exterior Beam – Column Joints with substandard Reinforcing Details.” ACI Structural Journal. Vol. 97, No. 1, 11-25.

National Information Service for Earthquake Engineering (NISEE). “<http://nisee.berkeley.edu/>” University of California. Berkeley.

Lowes, Laura N. (1998). “Beam – Column Joints Tested for RC Highway Structures.” National Information Service for Earthquake Engineering. University of California, Berkeley.

American Concrete Institute (1991). Recommendations for Design of Beam – Columns Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures. ACI-ASCE Committee 352 (ACI 352R-91). Detroit, Michigan.

Park, R., Paulay T. (1996). “Estructuras de Concreto Reforzado.” Editorial Limusa. México D.F.

Porter M. L. (1987). “Sequential Phased Displacement (SPD) Procedure for TCCMAR Testing.” Third meeting of the joint technical coordinating committee in Masonry research. U.S – Japan Coordinating Earthquake Research Program. Sapporo, Japón.

Reboloso, Enrique y Yeomans, Francisco (1998). “Estudio del comportamiento de conexiones viga – columna de esquina (Tipo portal) de concreto reforzado bajo la acción de cargas cíclicas”. XI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Monterrey, Nuevo León. México.

Takeda Toshikazu, Sozen Mete A. y Nielsen N. Norby (1970). “Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes.” Journal of the Structural Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Vol 96, 2557–2573

Orta, Luis (2001). “Estudio del comportamiento de marcos de concreto reforzado considerando la flexibilidad por agrietamiento de la junta de esquina viga – columna. Tesis presentada como requisito parcial para obtener el grado de maestro en ciencias. ITESM.

Yeomans, Francisco (1993). “Seismic Modeling of Structures with Steel Deck Reinforced Concrete Diaphragms.” Disertación Doctoral, Iowa State University. 1993

Comisión Federal de Electricidad (CFE, 1993). Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). “Manual de Diseño de Obras Civiles”. Diseño Sísmico. México.

### **Información Biográfica**

Dr. Francisco S. YEOMANS REYNA. Dr. Yeomans es Director del Centro de Investigación en Diseño y Construcción del ITESM, es profesor titular del Departamento de Ingeniería Civil del mismo Instituto. Actualmente es coordinador del programa de Posgrado en Ingeniería Civil y Coordinador de la Cátedra de Desarrollo e Innovación de Procesos y Tecnologías de Vivienda.

M. Sc. Ing. Luís ORTA CORTES. El Ingeniero Orta es profesor consultor del Centro de Investigación en Diseño y Construcción del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Actualmente forma parte del claustro de profesores del programa de Posgrado en Ingeniería Civil y es co-asesor del área de ingeniería estructural del Centro de Diseño y Construcción del ITESM.