

**ENSAYO PARA LA PRECALIFICACIÓN DE UNA CONEXIÓN METÁLICA  
RÍGIDA VIGA I – COLUMNA COMPUESTA.**

**ANDRES FEPILE ROA FRANCO  
SAMUEL ERNESTO MARTINEZ ORTIZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2014**

**ENSAYO PARA LA PRECALIFICACIÓN DE UNA CONEXIÓN METÁLICA  
RÍGIDA VIGA I – COLUMNA COMPUESTA.**

**SAMUEL ERNESTO MARTINEZ ORTIZ  
ANDRES FELIPE ROA FRANCO**

**Trabajo de Grado para optar al título de:  
Ingeniero Civil**

**Director**

**RICARDO A. CRUZ HERNENDEZ  
Ingeniero Civil. Phd. Msc.**

**Co-director**

**CARLOS M. TORRES TORRES  
Ingeniero Civil. Msc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2014**

## DEDICATORIA

A Dios por permitirnos lograr este objetivo, A nuestros padres por ser guías de vida, A nuestros familiares y amigos que siempre han estado ahí para aconsejarnos y compartir con nosotros, A Todas aquellas personas que creyeron y que no creyeron, que también fueron un motivo para seguir adelante.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos principalmente a Dios, a nuestro director de proyecto, Dr. Ricardo A. Cruz por su paciencia y dedicación durante el desarrollo de este proyecto, al co-director, Ing. Carlos Torres, al ing. Luis Garza Vásquez por su apoyo incondicional y a la ing. Carolina Quintero por sus experiencias compartidas, a nuestros padres, por brindarnos su apoyo y en general a todas las personas que de alguna manera fueron de gran importancia para que este proyecto se realizara y se concluyera con éxito.

## CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN.....                                 | 16 |
| 1. PRECALIFICACION DE CONEXIONES.....             | 18 |
| 1.1 Jerarquía de plastificación.....              | 18 |
| 1.2 Parámetros de calificación.....               | 19 |
| 1.3 Definición de la conexión.....                | 19 |
| 2. METODOLOGIA.....                               | 21 |
| 2.1 Configuración geométrica del laboratorio..... | 22 |
| 2.2 Modelo computacional.....                     | 23 |
| 2.2.1 resultados del modelo.....                  | 24 |
| 2.3 fabricación y montaje del espécimen.....      | 25 |
| 2.3.1 procedimiento.....                          | 26 |
| 2.3.2 instrumentación.....                        | 29 |
| 2.3.3 posición de instrumentos de medición.....   | 29 |
| 2.4 realización de la prueba.....                 | 32 |

|  |    |
|--|----|
| 3. RESULTADOS Y ANALISIS.....              | 34 |
| 3.1 Tabulación y correlación de datos..... | 35 |
| 3.2 Diagrama vs desplazamiento.....        | 35 |
| 3.3 Fisuras presentadas.....               | 37 |
| 4. CONCLUSIONES.....                       | 43 |
| 5. RECOMENDACIONES.....                    | 45 |
| REFERENCIAS.....                           | 46 |
| BIBLIOGRAFIA.....                          | 48 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Detalle de la conexión seleccionada.....                          | 20 |
| Figura 2. Dimensionamiento del espécimen según sus puntos de inflexión..... | 21 |
| Figura 3. Configuración del espécimen en el laboratorio.....                | 21 |
| Figura 4. Detalle de la FBP.....  | 22 |
| Figura 5. Detalle de la geometría del espécimen en SOLIDWORKS.....          | 23 |
| Figura 6. Resultados en ANSYS.....  | 24 |
| Figura 7. Detalle de la rótula plástica en ANSYS.....                       | 25 |
| Figura 8. Resultados en ANSYS.....  | 25 |
| Figura 9. Detalle del apoyo inferior.....                                   | 26 |
| Figura 10. Alineación y nivelación de los apoyos.....                       | 26 |
| Figura 11. Ensamble de la viga a la columna.....                            | 27 |
| Figura 12. Detalle del refuerzo longitudinal y transversal.....             | 27 |
| Figura 13. Detalle de la formaleta.....                                     | 28 |
| Figura 14. Detalle del espécimen hidratado.....                             | 28 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 15. Detalle de los instrumentos de medición.....                        | 29 |
| Figura 16. Detalle de la ubicación de los instrumentos de medición.....        | 30 |
| Figura 17. Diagrama del sistema de datos laboratorio UIS.....                  | 31 |
| Figura 18. Diagrama del protocolo de carga.....                                | 32 |
| Figura 19. Detalle del espécimen.....  | 32 |
| Figura 20. Diagrama fuerza vs desplazamiento de en la prueba experimental..... | 34 |
| Figura 21. Diagrama desplazamiento vs fuerza de los datos obtenidos.....       | 35 |
| Figura 22. Envolvente momento vs rotación de la prueba experimental.....       | 36 |
| Figura 23. Diagrama momento vs rotación en el primer cuadrante.....            | 36 |
| Figura 24. Diagrama momento vs rotación en el tercer cuadrante.....            | 37 |
| Figura 25. Detalle del apoyo superior después de la prueba.....                | 38 |
| Figura 26. Detalle del espécimen recubierto de carburo blanco.....             | 39 |
| Figura 27. Detalle de fisuras en la cara de la columna.....                    | 40 |
| Figura 28. Detalle de fisuras en el costado izquierdo de la columna.....       | 41 |
| Figura 29. Detalle de fisuras en el costado derecho de la columna.....         | 41 |

Figura 30. Detalle de fisuras en la parte posterior de la columna.....42

## RESUMEN

**TITULO:** ENSAYO PARA LA PRECALIFICACIÓN DE UNA CONEXIÓN METÁLICA RÍGIDA VIGA I – COLUMNA COMPUESTA.

**AUTORES:** ANDRES FELIPE ROA, SAMUEL ERNESTO MARTINEZ

**PALABRAS CLAVE:** CONEXIÓN METÁLICA, ANGULO DE DERIVA, HISTÉRESIS, ROTULA PLÁSTICA, PÓRTICO.

### DESCRIPCION:

En el campo de las estructuras metálicas es necesario realizar estudios para evaluar los elementos más críticos e importantes como lo son las conexiones en pórticos resistentes a momento para estructuras de acero. En este sentido es necesario calificar las conexiones, realizando ensayos de laboratorio basados en los requerimientos dados por el Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes NSR-10 y la AISC. Este proyecto presenta la adecuación física del laboratorio y el ensayo para la calificación de conexiones, y en particular la PRECALIFICACIÓN DE UNA CONEXIÓN METÁLICA RÍGIDA VIGA I – COLUMNA COMPUESTA. Para lograr este objetivo se construyó un espécimen que consta de una columna metálica compuesta de acero de sección W8X31 embebida en concreto de sección 45X45 cm, y una viga de sección W16X31 conectada con 8 pernos, por placa extendida. Además se realizó un modelo computacional en ANSYS con el fin de simular el comportamiento del espécimen, evaluar esfuerzos y comparar los resultados.

Para la calificación es necesario realizar una gráfica de histeres del comportamiento del espécimen, de la cual se toma la envolvente y se analizan los datos más relevantes y de interés que son los ubicados en el primer y tercer cuadrante. Con base a estos resultados se puede verificar si se cumplen los parámetros de calificación.

---

Trabajo de grado.

Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ricardo Cruz.

## ABSTRACT

**TITLE:** ENSAYO PARA LA PRECALIFICACIÓN DE UNA CONEXIÓN METÁLICA RÍGIDA VIGA I – COLUMNA COMPUESTA.

**AUTHORS:** ANDRES FELIPE ROA, SAMUEL ERNESTO MARTINEZ

**KEY WORDS:** METAL CONNECTION, DRIFT ANGLE, HYSTERESIS, PLASTIC KIT, GATEWAY.

### DESCRIPTION:

In metal structures field is necessary to make some test to evaluate the most critical and important elements like connections in resistant porticos in structural steel members. In this sense, it is necessary to classify the connections, performing lab tests based on the requirements given by the Colombian Earthquake Resistant Building Regulations NSR-10 and AISC laboratory. This project presents the Laboratory physical adequacy and the test to qualify connections, particularly the PREQUALIFICATION OF RIGID METAL BEAM CONNECTION I - COMPOSITE COLUMN. To reach it, a specimen consisting of a metal column section composed of steel embedded in concrete W8X31 section 45x45 cm, and a beam section connected W16X31 8 bolts, constructed by extending plate. In addition a computational model was made in ANSYS to simulate the behavior of the specimen, evaluate strain and compare the results.

For the qualification is necessary to make a graph of histeres behavior of the specimen, which takes the shell and analyzed the most relevant and interesting data that are located on the first and third quadrant. Based on these results, can be verify whether the qualification parameters are met.

---

Bachelor Thesis.

Physics Mechanical Engineering Faculty, Civil engineering school. Director: Ricardo Cruz.

## INTRODUCCIÓN

En edificaciones con estructuras metálicas es necesario garantizar que las conexiones entre elementos cumplan con los requerimientos dados por el Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes NSR-10, AISC. Con base a investigaciones que se han venido realizando a raíz de los desafortunados sucesos que han ocurrido a lo largo del tiempo, se sabe que las estructuras se deben diseñar para resistir un sismo fuerte; el grupo denominado SAC Joint Venture, patrocinado por la FEMA [1] han recomendado nueve tipos de conexiones metálicas para la unión viga - columna, junto con su procedimiento de diseño y evaluación de desempeño para su calificación, las cuales son:

- Aleta soldada sin refuerzo – alma pernada.
- Aleta soldada sin refuerzo – alma soldada.
- Conexión soldada de aleta libre.
- Conexión soldada con cubre placa.
- Conexión con sección reducida en la viga, también conocida como “hueso de perro”.
- Conexión con placa de extremo no atiesada.
- Conexión con placa de extremo atiesada.
- Conexión con cubre placa pernada.
- Conexión con Te doble, parcialmente restringida.

Posteriormente la AISC [2] actualizo las conexiones precalificadas para pórticos resistentes a momento con capacidad intermedia y especial de energía para aplicaciones sísmicas y proponen sus tipos de conexiones, Conexión a momento con sección reducida en la viga, Conexión a momento con placa de extremo y pernos de tres formas: a. Con cuatro pernos sin placa rigidizadora, b. Con cuatro pernos con placa rigidizadora, c. Con ocho pernos con placa rigidizadora, Conexión a momento con cubre placa atornillada al ala. Conexión a momento

soldada a la aleta sin reforzar. Conexión a momento con soporte atornillado tipo Kaiser. Conexión bi – axial ConXtech [3].

Una vez calificadas se pueden usar en la construcción de edificios aporricados resistentes a momento. Toda conexión propuesta para su utilización debe ser previamente calificada. Un ejemplo de la utilización de estas conexiones calificadas se encuentra en Edificios Altos existentes, Chung et al [4].

Hasta el momento se han precalificado en Colombia algunas conexiones, entre otras las siguientes:

- Gallo A. y Narváz J. [5] calificaron una Conexión pernada, la cual califico para DMI y DMO.
- Cano D. y Mazo A. [6] calificaron una conexión soldada, la cual no califico.
- Acero H. [7] calificaron una conexión soldada en campo, viga IPE400, la cual califico para DES.
- Bermúdez C. y Álvarez D. [8] calificaron una conexión tubular pernada, la cual califico para DMI y DMO.

Aunque se han realizado ensayos de precalificación de conexiones metálicas rígidas hay que resaltar que se trata de un ensayo complejo por su infraestructura e instrumentación.

En este trabajo se presentan los resultados de la precalificación de una conexión a momento con placa de extremo y pernos, con cuatro pernos sin placa rigidizadora, agregando platinas de continuidad en el perfil de la columna.

## **1. PRECALIFICACIÓN DE CONEXIONES**

Los pórticos resistentes a momento deben garantizar que el proceso de rotulación se presente en la viga produciendo daño solo en ella para evitar que este se produzca en la columna y así evitar el colapso [9].

Se denomina conexión al punto en el cual se encuentran las vigas y columnas, junto a ellas las vigas se rotulan pasando al estado plástico. Estas conexiones deben ser rígidas y dar a la estructura estabilidad lateral como respuesta a la sollicitación de cargas sísmicas horizontales.

Para describir el comportamiento de una conexión y calificarla es necesario conocer aspectos principales dentro del proceso de disipación de energía que se debe garantizar en un sistema estructural de pórticos resistentes a momento (PRM) [10].

### **1.1 Jerarquía de plastificación**

Esta se determina de acuerdo al numeral F.3.7.3 pórticos resistentes a momentos compuestos con capacidad de energía especial (PRMC-DES), NSR-10 [11]. El término jerarquía de plastificación se refiere a la condición casi obligatoria en cualquier sistema estructural, en el cual se debe garantizar que la resistencia de las columnas sea mayor que en las vigas que se conectan a dichos elementos, con el fin de prevenir grandes deformaciones laterales que puedan poner en riesgo la estabilidad de la estructura.

## **1.2 Parámetros de calificación**

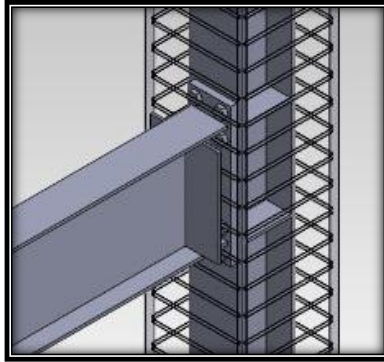
Cuando se realiza un ensayo de calificación de conexiones, se busca determinar la rigidez de la misma. Para que la conexión quede calificada, esta debe cumplir que:

- La conexión sea capaz de acomodar un ángulo de deriva de piso de 0,04 radianes como mínimo, siendo esta la relación resultante de dividir el desplazamiento relativo de dos pisos continuos por la altura de estos.
- La resistencia medida a flexión de la conexión, determinada en la cara de la columna, debe ser por lo menos 0.8 veces el Momento plástico ( $M_p$ ) de la viga conectada, para un ángulo de deriva piso de 0.04 radianes, donde  $M_p$  se calcula de acuerdo con el numeral F.3.7.2.6.2 [9].

## **1.3 Definición de la conexión**

Se trata de un espécimen compuesto por un sistema viga-columna, con una conexión rígida de acero conformada por una viga laminada de alma llena de sección W16X31 de acero ASTM A572 grado 50 y una columna de sección W8X31 del mismo material, embebida en concreto reforzado de sección 45x45 cm. conectada con 8 pernos, por placa extendida (figura 1).

**Figura 1:** Detalle de la conexión seleccionada.



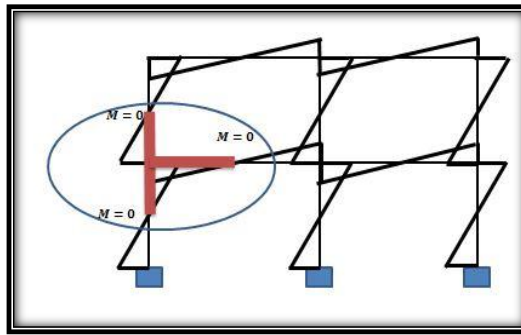
**Fuente:** Autores.

Para este proyecto, se realizó el diseño de un espécimen de prueba ya mencionado, que consta del nodo entre una viga y una columna del extremo de una estructura, siguiendo los diseños de Torres [12]; Se agregaron placas de continuidad en el perfil de la columna para evitar el pandeo en las aletas y una FBP (placa de apoyo de cara).

## 2. METODOLOGIA

El espécimen planteado se diseñó en representación a la unión que se forma entre una columna exterior y una de las vigas que llega a ella. Las dimensiones de dicho espécimen se determinaron tanto en la columna como en la viga en base a sus puntos de inflexión (puntos donde los momentos flectores son iguales a cero).

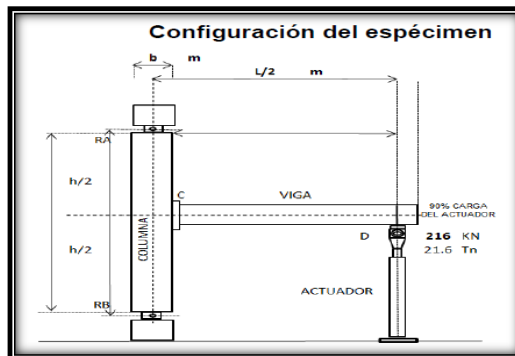
**Figura 2:** Dimensionamiento del espécimen según sus puntos de inflexión.



**Fuente:** Autores.

Sin embargo estas dimensiones fueron adaptadas a las condiciones del laboratorio, teniendo en cuenta el recorrido del actuador y por supuesto la carga del mismo, de la que se usara el 90% (240 KN), todo esto con el fin de no trabajar con valores límites y tener rangos de maniobrabilidad.

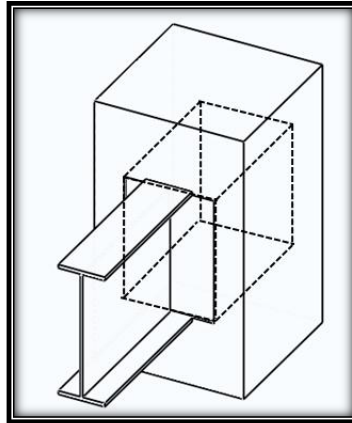
**Figura 3:** Configuración del espécimen en el laboratorio.



**Fuente:** Torres T.C. 2012.

La FBP se diseñó siguiendo los parámetros propuestos en ASCE [13] con el fin de dar más rigidez a la conexión con la finalidad de poner a trabajar el concreto a compresión en la zona panel.

**Figura 4:** Detalle de la FBP.



**Fuente:** Autores.

## 2.1 Configuración geométrica del laboratorio

Dicho espécimen será probado teniendo en cuenta la instrumentación necesaria para la adquisición de datos, con los cuales se comprobará si la conexión cumple con los parámetros esperados, además clasificarla según su rigidez.

El laboratorio de estructuras de la UIS (Universidad Industrial de Santander), cuenta con una placa de reacción de 5,022 m de ancho por 8,15 m de largo, además cuenta también con un muro de reacción de 7,085 m de alto, 5,022 m de ancho y un espesor de 0,46 m. Tanto en la placa, como en el muro, hay platinas con perforaciones roscadas, lo que permite crear elementos para la respectiva adaptación del espécimen en el laboratorio. Además el laboratorio cuenta con un actuador (gato hidráulico con control numérico) para la aplicación de la respectiva

carga al espécimen y un puente grúa con capacidad de carga de 5 ton con movimiento en las 3 direcciones.

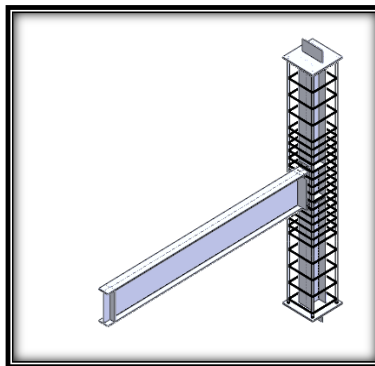
## 2.2 Modelo computacional

Se realizó un modelo de forma tridimensional acorde a las dimensiones y al tipo de material del cual está compuesto cada elemento del espécimen de estudio. El método empleado consiste en dividir un sólido en una serie de elementos llamados sub-sólidos, denominados elementos finitos; la unión de todos estos elementos es conocido como malla.

El modelo se realizó con el fin de predecir el comportamiento del espécimen en el laboratorio, y de esta manera estar preparados para la realización del ensayo. Se utilizó el programa SOLIDWORKS versión estudiantil para la realización detallada de la geometría y ANSYS 11 licenciado para la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander.

Se construyó la geometría en SOLIDWORKS (figura 5) teniendo en cuenta las dimensiones del espécimen, simulando las uniones de soldadura como elementos rígidos, para simplificación de iteraciones en el programa al evaluar esfuerzos.

**Figura 5:** Detalle de la geometría del espécimen en SOLIDWORKS.

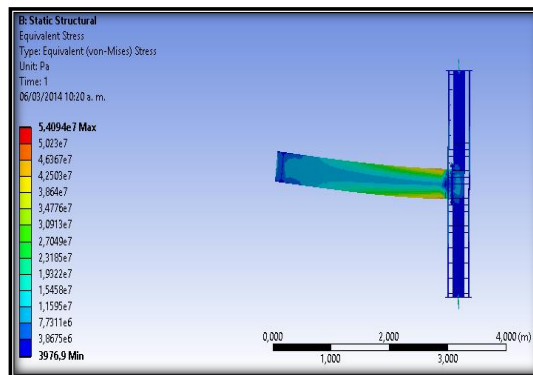


**Fuente:** Autores.

## 2.2.1 Resultados del modelo

Al aplicar el protocolo de carga se observa la rótula plástica en las aletas de la viga junto a la placa de cara de la columna a 230 mm del eje de la columna, la distancia teórica calculada al punto de rotulación es de 328.4 mm. En esta zona se aprecia una concentración de esfuerzos importantes, los puntos de intersección con los estribos no sufren mayor deformación gracias al confinamiento dado por la placa de cara de columna. Además en la figura 6 se observa la deformación de la columna debido al comportamiento de las platinas de los apoyos.

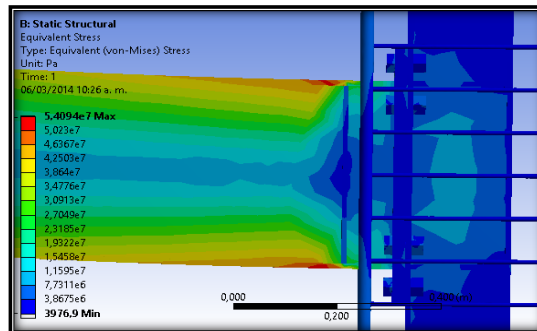
**Figura 6:** Resultados en ANSYS.



**Fuente:** Autores.

En la figura 7 se observa la formación de la rótula plástica muy cerca a la cara de la columna debido a la rigidez y el tipo de acero estructural.

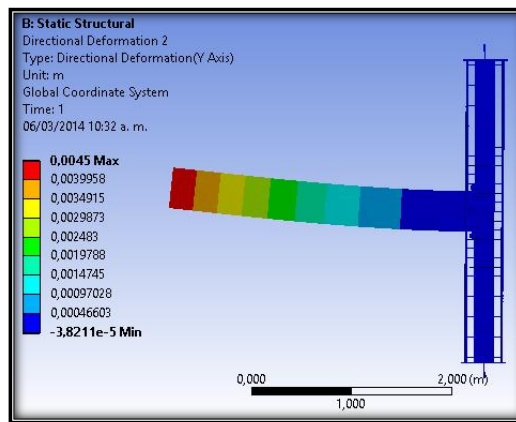
**Figura 7:** Detalle de la rótula plástica en ANSYS.



**Fuente:** Autores.

En la figura 8 se muestra el aumento del recorrido vertical inducido por el punto de aplicación de la carga.

**Figura 8:** Resultados en ANSYS.



**Fuente:** Autores

### 2.3 FABRICACIÓN Y MONTAJE DEL ESPÉCIMEN

Para garantizar un comportamiento de rótula en los extremos del espécimen se construyeron apoyos con unas platinas puestas de forma vertical de modo que se comporten como apoyo de segundo grado (figura 9), asegurando que no habrá momento en los extremos.

**Figura 9:** Detalle del apoyo inferior.



**Fuente:** Autores.

### 2.3.1 Procedimiento

- Se colocaron a punto los apoyos y se procede a soldar la columna metálica a estos, teniendo en cuenta su respectivo nivel y alineación (figura 10).

**Figura 10:** Alineación y nivelación de los apoyos.



**Fuente:** Autores.

- Se utiliza una estructura metálica para arriostrar la viga restringiendo el pandeo flexo-torsional.
- Ensamblar la viga al perfil metálico de la columna por medio de 8 pernos pasantes de alta resistencia ya pretensionados de una pulgada de diámetro. Los pernos se diseñaron para que funcionen en el rango elástico (figura 11).

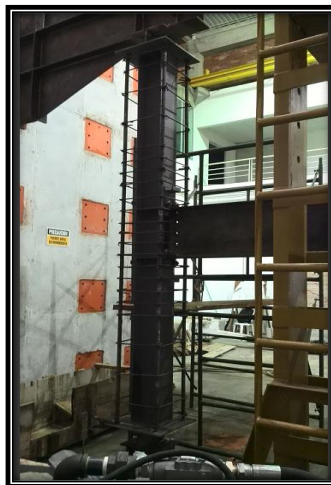
**Figura 11:** Ensamble de la viga a la columna.



**Fuente:** Autores.

- Se colocó el refuerzo longitudinal (4 barras de 1 pulg) y transversal (estribos de 3/8 de pulgada).

**Figura 12:** Detalle del refuerzo longitudinal y transversal.



**Fuente:** Autores.

- Se fabricó una formaleta en madera (figura 13) con ventanillas de llenado en la mitad y en la parte superior de la columna para garantizar el llenado total del concreto. Se aplicó la mezcla de concreto premezclado acelerado a tres días (21 MPa).

**Figura 13:** Detalle de la formaleta.



**Fuente:** Autores.

- Para mantener debidamente hidratado el concreto se hizo un roseado de agua.

**Figura 14:** Detalle del espécimen hidratado.



**Fuente:** Autores.

### 2.3.2 Instrumentación

Debido a las rotaciones que presentan los elementos que componen el espécimen, se utilizaron 4 transductores de desplazamiento (LSCT) (HM-2310.20) de 2" (50 mm) de rango, con sus respectivos soportes y 3 relojes comparadores análogos (2320S-10) de 20 mm de rango con sus respectivas bases magnéticas, adquiridos por el grupo de investigación en materiales y estructuras de construcción INME.

**Figura 15:** Detalle de los instrumentos de medición.



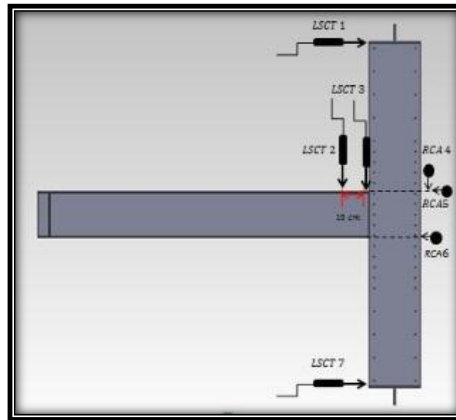
**Fuente:** Autores.

### 2.3.3 Posición de instrumentos de medición

En la figura 16 se muestra la ubicación de la instrumentación, los elementos 1 y 7 se usan para medir el giro de la columna como cuerpo rígido, valor que se debe restar al resto de giros, ya que los extremos de la columna no están restringidos

en el sentido horizontal. Los elementos 2 y 3 se usan para medir las deformaciones y determinar la rotación de la viga en el nodo. Estos se ubican separados 10 cm.

**Figura 16:** Detalle de la ubicación de los instrumentación de medición.

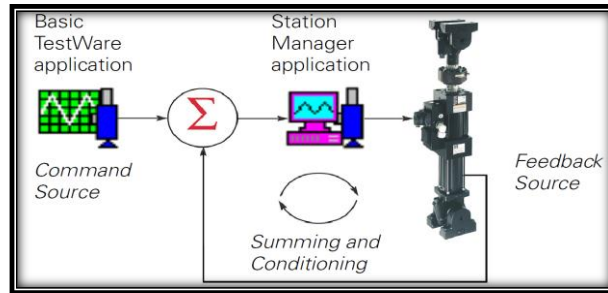


**Fuente:** Autores.

Los elementos 3, 4, 5 y 6 permitirán revisar las deformaciones en la zona de panel y la rotación de los deformímetros 5 y 6 dará la rotación de la columna que será comparado con las rotaciones 2 y 3 para revisar la rigidez de la conexión. Es necesario tener datos más confiables en los puntos 1, 2, 3 y 7, por lo tanto se utilizarán transductores de desplazamiento debido a su mayor exactitud, y en los puntos 4, 5 y 6 se utilizarán relojes comparadores análogos.

Para realizar el ensayo se requiere de un actuador, en el laboratorio contamos con un actuador MTS modelo No 243.35T con una capacidad a compresión de 365 KN y desplazamientos estáticos y dinámicos máximos totales son de 254mm [14]. Las lecturas de las deformaciones se hace por medio de los instrumentos de medición y la toma de datos se realiza por medio de un software que procesa la información tomada de los desplazamientos programados en el actuador y los deformímetros (figura 17).

**Figura 17:** Diagrama del sistema de datos laboratorio UIS.



**Fuente:** Torres C.

## 2.4 Realización de la prueba

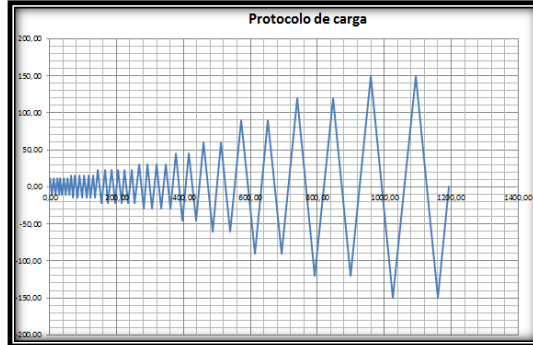
Después de tener a punto el montaje del ensayo se procede a poner en marcha el sistema de aplicación de la carga (actuador). Para la aplicación de la carga se utiliza un actuador teniendo en cuenta la norma dada en la NSR-10 para Colombia y provisiones sísmicas a nivel internacional, con los siguientes parámetros:

- (1) 6 ciclos a  $\theta = 0.00375$  rad
- (2) 6 ciclos a  $\theta = 0.005$  rad
- (3) 6 ciclos a  $\theta = 0.0075$  rad
- (4) 4 ciclos a  $\theta = 0.001$  rad
- (5) 2 ciclos a  $\theta = 0.0015$  rad
- (6) 2 ciclos a  $\theta = 0.02$  rad
- (7) 2 ciclos a  $\theta = 0.03$  rad
- (8) 2 ciclos a  $\theta = 0.04$  rad

Donde  $\theta$  es el ángulo de deriva piso medido en radianes. Para lograr valores adecuados en la toma de datos se debe sobrepasar de 0.04 radianes cargando a incrementos de  $\theta = 0.01$  rad, con dos ciclos en cada paso. A continuación en la

figura 18, el protocolo de carga, indicando desplazamientos positivos y negativos con respecto al tiempo.

**Figura 18:** Diagrama del protocolo de carga.



**Fuente:** Torres T.C. 2012.

A medida que aumentaba el desplazamiento generado por el actuador, se empezó a visualizar desplazamiento en todo el espécimen, especialmente los apoyos (figura 19). En la zona confinada de la columna (zona donde se encuentra la conexión) se empezaron a evidenciar fisuras en diferentes posiciones y direcciones.

**Figura 19:** Detalle del espécimen.



**Fuente:** Autores.

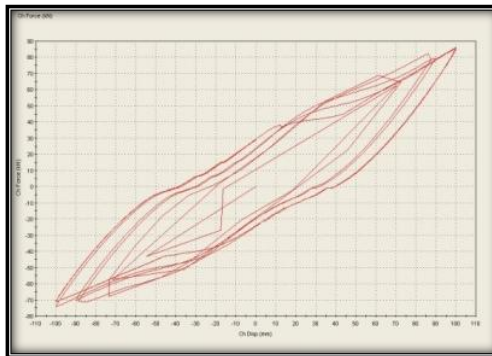
Los datos correspondientes al recorrido y la aplicación de la carga impuesta por el actuador son tomados por medio de un sistema de adquisición de datos que pertenecen al software del actuador.

### 3. RESULTADOS Y ANALISIS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos por medio de la metodología desarrollada y el análisis de los datos obtenidos en el ensayo, que permiten precalificar la conexión de estudio.

El sistema de adquisición de datos hace su propio proceso y envía dos gráficas, el protocolo de carga y el diagrama fuerza vs desplazamiento.

**Figura 20:** Diagrama fuerza vs desplazamiento de en la prueba experimental.



**Fuente:** Autores.

El diagrama fuerza vs desplazamiento (figura 20), permite visualizar los rangos máximos de desplazamiento, para 100 mm fue necesaria una fuerza de 85,94 [KN].

Otra grafica que se elabora (figura 22) es la correspondiente a Momento vs Rotación, que permitió calificar la conexión, siendo esta la verificación de cómo se supera el valor del momento plástico para una rotación de 0,04 rad superior al 80% de este ( $M_p$ ).

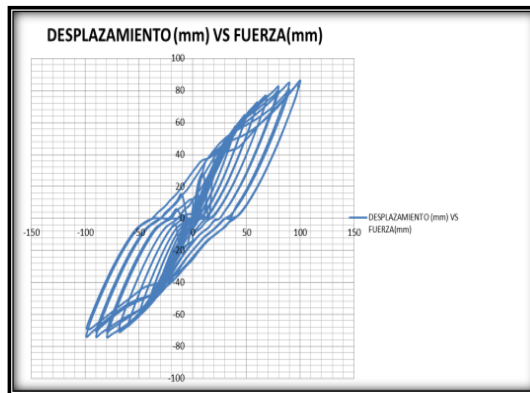
### 3.1 Tabulación y correlación de datos

Las gráficas Fuerza desplazamiento y momento vs rotación se graficaron en los cuatro cuadrantes, tomando todos los datos proporcionados por el sistema de captura de resultados (Actuador). En la gráfica fuerza vs desplazamiento (figura 21) se presentan la totalidad de las curvas, y en el de momento vs rotación se presenta la envolvente del diagrama de histéresis (figura 22). En este se necesita superar el 80% del momento plástico (245,94 KN-m) para una rotación de 0,04 Radianes, en los que se obtuvieron valores de momento de 240,29 [KN-m] para una rotación de 0,042 Radianes.

### 3.2 Diagrama fuerza vs desplazamiento

La relación existente entre la carga aplicada y el desplazamiento vertical que se produce en el punto de aplicación de la carga proporciona el comportamiento elástico o plástico de la viga, la rotación de la conexión o algún tipo de falla en la columna. Los datos de desplazamiento son el producto de la programación en el sistema de carga, pero la fuerza es la resistencia de oposición de la viga a desplazarse, la fuerza necesaria para el desplazamiento máximo fue de 85,94 KN.

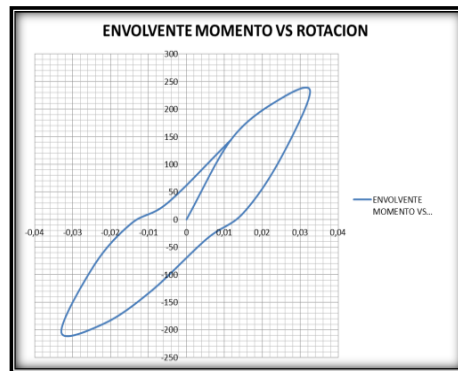
**Figura 21:** Diagrama desplazamiento vs fuerza de los datos obtenidos.



**Fuente:** Autores.

Por medio de los datos entregados por el sistema de captura del actuador en cuanto a fuerza aplicada en cada ciclo y a la multiplicación de esta por la distancia desde el punto de aplicación de la carga a la cara de la columna, se obtuvo el valor del momento en (KN-m), cuya envolvente se grafica en la figura 22.

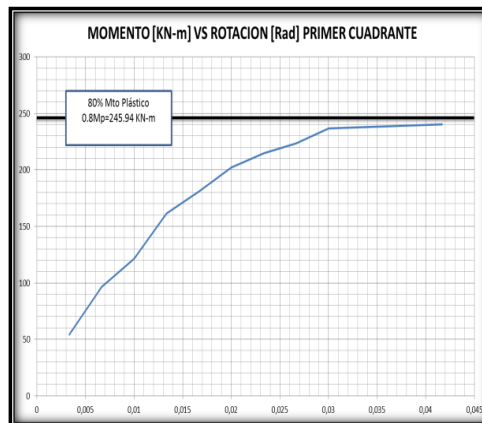
**Figura 22:** Envolvente momento vs rotación de la prueba experimental.



**Fuente:** Autores.

Los datos tomados del ensayo se tabularon buscando mostrar lo más relevante, o de mayor interés, por ser estos los valores máximos obtenidos, se tienen en cuenta los datos ubicados en el primer y tercer cuadrante de la gráfica.

**Figura 23.** Diagrama Momento [KN-m] vs Rotación [rad] en el primer cuadrante.

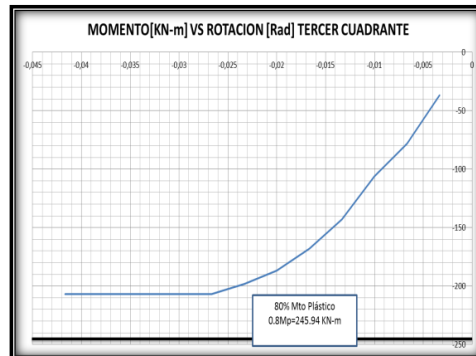


**Fuente:** Autores.

De la figura 23 se concluye que no se alcanzan a cumplir los parámetros más relevantes para calificar conexiones, ya que no llegamos al 80% del momento plástico que equivale a 245,94 [KN-m] para una rotación de 0,04 radianes, debido a que el valor máximo del momento fue de 240,29 [KN-m] para una rotación de 0,0417 [Rad].

También se tomaron como datos de importancia los referentes al tercer cuadrante, mostrados en la figura 24, donde los valores de momento son el 14% menor que los del primer cuadrante.

**Figura 24.** Diagrama Momento [KN-m] vs Rotación [rad] en el tercer cuadrante.



**Fuente:** Autores.

Basados en los resultados obtenidos en la prueba de laboratorio, no se puede calificar la conexión, por lo tanto tampoco se puede clasificar según su rigidez. Esto se debe a desplazamientos muy grandes que se presentaron en los apoyos tipo placa (figura 25). Ellos no permitieron que la carga necesaria para concluir el proceso de calificación se concentrara solo en el nodo impidiendo la plastificación de la viga, permitiendo rotar el espécimen como un todo.

**Figura 25.** Detalle del apoyo superior después de la prueba.



**Fuente:** Autores.

La diferencia en el comportamiento de la columna modelada dista del espécimen de ensayo. Esto puede deberse a que el modelo considera el acero y el concreto como un todo, mientras que en el espécimen de laboratorio pueden no trabajar los dos elementos en conjunto, a pesar de que pueda existir alguna fricción entre ellos.

### **3.3 Fisuras presentadas**

Para observar e identificar las fisuras presentadas y la degradación del espécimen, este se recubrió en áreas adyacentes a la zona panel con una película de carburo blanco y se le trazo una cuadrícula de 70x70 mm para referenciar dichas fisuras.

**Figura 26.** Detalle del espécimen recubierto de carburo blanco.

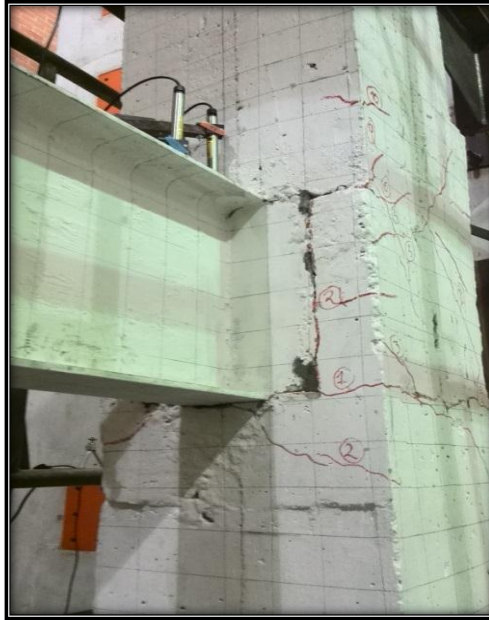


**Fuente:** Autores.

Como se esperaba, el agrietamiento del concreto se presentó en la zona panel y en las zonas alrededor de la conexión, la concentración de esfuerzos se incrementó por la presión que se ejercía cuando la carga sobre el espécimen se desarrollaba en sentido positivo y negativo.

Después de finalizar el segundo ciclo del protocolo de carga, empezaron a aparecer fisuras propagándose en dirección de las aletas de la viga desde la cara frontal de la columna (figura 27), por los costados de esta y finalmente hasta cerrarse en la parte posterior de ella.

**Figura 27.** Detalle de fisuras en la cara de la columna.



**Fuente:** Autores.

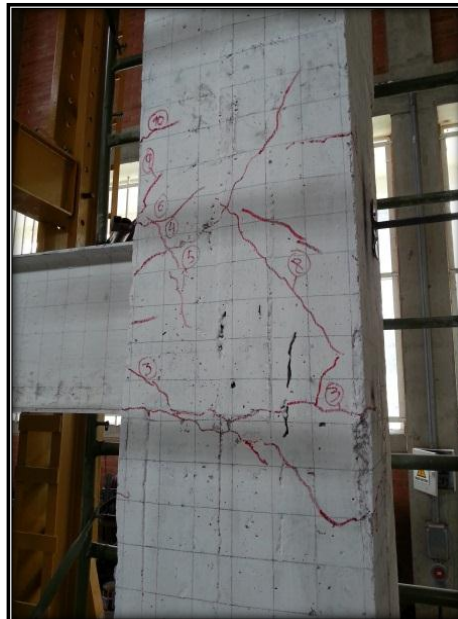
En la figura 28 y 29 se observa la propagación de las fisuras en la parte lateral de la columna, estas se formaron en sentido diagonal y en ambas direcciones. Algunas llegaron a cerrarse en la parte posterior.

**Figura 28.** Detalle de fisuras en el costado izquierdo de la columna.



**Fuente:** Autores

**Figura 29.** Detalle de fisuras en el costado derecho de la columna.



**Fuente:** Autores.

En la figura 30 se observa cómo se encuentran dos de las fisuras, estas pasaron por el punto de ubicación de conectores entre el concreto y el perfil de la columna, ubicados en la parte posterior de la columna.

**Figura 30.** Detalle de fisuras en la parte posterior de la columna.



**Fuente:** Autores.

Esta secuencia de las fisuras indica la rotación que se presenta en el nodo o zona panel de la conexión, evidenciando las deformaciones que se tuvieron en la columna, y se transmiten a la parte posterior por la unión de las aletas de los perfiles de la columna por las placas de continuidad.

#### 4. CONCLUSIONES

- Siguiendo los parámetros para la calificación de conexiones establecidos por el reglamento colombiano de construcciones sismo resistentes NSR-10 en el numeral F.3.7.3.6.2 Conexiones viga columna, la resistencia a flexión de la conexión determinada en la cara de la columna, debe ser por lo menos 0.8 Mp de la viga conectada, para un ángulo de deriva de piso de 0,04 Radianes. Estos parámetros no se cumplieron porque para la rotación de 0,04 Radianes, el Momento calculado fue de 240,29 [KN-m], estando por debajo del 80% del Momento Plástico (245,94 KN-m), debido a que los apoyos no son los adecuados para la realización de este tipo de ensayo no permitiendo la carga necesaria en el nodo impidiendo la plastificación de la viga, dejando rotar el espécimen como un todo.
- Por esta razón la conexión no supero los parámetros requeridos para su precalificación y tampoco se puede clasificar según su rigidez.
- Por medio del Modelo computacional y el espécimen probado se determinó el estado de esfuerzo de la conexión y se observa un comportamiento similar en los dos primeros ciclos por sus desplazamientos pequeños, pero después se comportó de forma totalmente diferente. De lo anterior se concluye que el comportamiento del espécimen difiere considerablemente, entre el modelo computacional y el ensayo de laboratorio, siendo una de las razones principales el comportamiento ideal de todos los elementos del espécimen para el programa y la rigidez proporcionada a la columna en el modelo computacional al considerar la unión perfecta entre el concreto y el perfil metálico trabajando en conjunto como un solo elemento.
- La simulación del modelo computacional permite determinar el comportamiento de la conexión sin embargo se encontró que existen grandes variantes en el

comportamiento con la realidad, esto se debe a la idealización que toma el programa por defecto para simplificación de los cálculos.

- El montaje realizado es adecuado para calificar una conexión. Se observó un buen comportamiento cuando se aplica el protocolo de carga, e igualmente un buen comportamiento en la estructura para restringir el pandeo lateral en la viga permitiendo solo desplazamientos verticales. Sin embargo el tipo de apoyo utilizado para los extremos de la columna no fue el adecuado.
- Por medio de la curva de histéresis se pudo determinar el no cumplimiento de los requerimientos para la calificación de la conexión. También se verificó el comportamiento de la conexión con la aplicación total del protocolo de carga.
- De acuerdo al comportamiento y las fisuras presentadas se puede concluir que las mejoras realizadas a esta conexión, como lo son las placas de continuidad y la placa de apoyo de cara (FBP), aportan más rigidez a la conexión.

## 5. RECOMENDACIONES

- Los ensayos de calificación de conexiones son complejos y costosos, por lo tanto se deben realizar estudios previos, que garanticen resultados óptimos.
- El tipo de apoyos empleados debe comportarse como un apoyo de segundo grado permitiendo solo el giro y no desplazamientos horizontales, ya que este puede afectar los resultados al disminuir la rotación del nudo.
- Se deben probar los elementos a utilizar antes de la realización de la prueba, como los elementos de medición, para evitar inconvenientes el día de la realización de esta.
- En la realización de este tipo de ensayos además de los planos de diseño del espécimen, también se deben tener en cuenta elementos y acoples que puedan ser necesarios para el montaje del mismo..
- Debido a que el problema estuvo en los apoyos y no en la conexión, cabe la posibilidad de que hubieran errores en la mano de obra, especialmente en la soldadura.

## REFERENCIAS

- [1] Federal Emergency Management Agency. FEMA.(2000). Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings. FEMA 350. Federal Emergency Management Agency. SAC Joint Venture, Washington, E.U.
- [2] American Institute of Steel Construction. AISC. (2005). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. Ed 2010. Chicago. Illinois, EU: AISC.2010.
- [3] American Institute of Steel Construction. AISC. (2005). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. Ed 2005. Chicago. Illinois, EU: AISC.2005.
- [4] Wu L. Y. y Chung L. L. (2005) Seismic behavior of bolted beam-to-column connections for concrete filled steel tube (cft). Centro nacional para investigaciones en ingeniería sísmica y en el departamento de ingeniería civil de de la universidad nacional de Taiwán en Taipéi.
- [5] Gallo A. y Narvaez J. (2004). Conexión pernada. Universidad Nacional de Manizales.
- [6] Cano D. y Mazo A. (2004). Conexión soldada en campo. Universidad Nacional de Medellin.
- [7] Acero H. (2005). Conexión soldada en campo. Universidad del Valle.
- [8] Bermúdez C. y Álvarez D. (2010). Conexión pernada. Universidad Nacional de Manizales.
- [9] Torres T. C. (2012). Calificación de una conexión metálica rígida viga i columna compuesta. Universidad Industrial de Santander.

[10] Uribe M. (2008). Conexión pernada. Universidad Nacional de Bogotá.

[11] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. AIS. (2010). Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente. NSR 10.

[12] Torres T. C. (2012). Calificación de una conexión metálica rígida viga i columna compuesta. Universidad Industrial de Santander.

[13] GUIDELINES FOR DESIGN OF JOINTS BETWEEN STEEL BEAMS AND REINFORCED CONCRETE COLUMNS By the ASCE Task Committee on Design Criteria for Composite Structures in Steel and Concrete.

[14] Hoja Técnica Controlador de Hardware Actuador MTS .Universidad Industrial de Santander. 2006.

## BIBLIOGRAFIA

Acero H. (2005). Conexión soldada en campo. Universidad del Valle.

American Institute of Steel Construction. AISC. (2005). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. Ed 2005. Chicago. Illinois, EU: AISC.2005.

American Institute of Steel Construction. AISC. (2005). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. Ed 2010. Chicago. Illinois, EU: AISC.2010.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. AIS. (2010). Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente. NSR 10.

Bermúdez C. y Álvarez D. (2010). Conexión pernada. Universidad Nacional de Manizales.

Cano D. y Mazo A. (2004). Conexión soldada en campo. Universidad Nacional de Medellín.

Federal Emergency Management Agency. FEMA.(2000). Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings. FEMA 350. Federal Emergency Management Agency. SAC Joint Venture, Washington, E.U.

Gallo A. y Narvaez J. (2004). Conexión pernada. Universidad Nacional de Manizales.

GUIDELINES FOR DESIGN OF JOINTS BETWEEN STEEL BEAMS AND REINFORCED CONCRETE COLUMNS By the ASCE Task Committee on Design Criteria for Composite Structures in Steel and Concrete.

Hoja Técnica Controlador de Hardware Actuador MTS .Universidad Industrial de Santander. 2006.

Torres T. C. (2012). Calificación de una conexión metálica rígida viga i columna compuesta. Universidad Industrial de Santander.

Uribe M. (2008). Conexión pernada. Universidad Nacional de Bogotá.

Wu L. Y. y Chung L. L. (2005) Seismic behavior of bolted beam-to-column connections for concrete filled steel tube (cft). Centro nacional para investigaciones en ingeniería sísmica y en el departamento de ingeniería civil de de la universidad nacional de Taiwán en Taipéi.