



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE CONEXIONES
ATORNILLADAS EN LOS PATINES (BFP) DE DISTINTAS
CONFIGURACIONES, MEDIANTE ANÁLISIS NO LINEALES
DE ELEMENTO FINITO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

P R E S E N T A :

JOSÉ GIOVANNI SANTIAGO PERALTA

TUTOR:

DR. ROBERTO MELI PIRALLA

CO-TUTOR:

M.I RAÚL JEAN PERRILLIAT



MÉXICO D.F., DICIEMBRE 2011

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	DR. JUAN JOSÉ PÉREZ GAVILÁN
Secretario:	M.I. ISMAEL VÁSQUEZ MARTÍNEZ
Vocal:	DR. ROBERTO MELI PIRALLA
1 ^{er} . Suplente:	M.I. RAÚL JEAN PERRILLIAT
2 ^{do} . Suplente:	M.I. OCTAVIO GARCÍA DOMÍNGUEZ

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

DR. ROBERTO MELI PIRALLA

RESUMEN

Este estudio describe el comportamiento de siete conexiones metálicas atornilladas de tipo "bfp" (bolted flange plate) y tipo "árbol" analizadas mediante carga monótona y cíclica modeladas con elemento finito con el programa ANSYS. El comportamiento se define con curvas carga-desplazamiento y momento-rotación para los dos tipos de análisis, obteniéndose patrones de esfuerzos para cada uno de los elementos que forman parte de la conexión. De la misma forma, se hacen comparaciones de las conexiones tipo "árbol" con las "bfp" en cuanto a resistencia y daño en zona de panel, y también se hace la comparación entre conexiones tipo "end-plate" (placa-tope) con las tipo "bfp". Las conexiones del tipo "end-plate" fueron tomadas del estudio realizado por Ruiz (2010) y se utilizaron como base para la calibración y validación de los modelos.

ABSTRACT

This study describes the behavior of seven steel bolted connections type "BFP" (bolted flange plate) and type "arbol" analyzed by monotonic and cyclic loading modeled with finite element using the ANSYS program. The behavior is defined by load-displacement curves and moment-rotation for the two types of analysis, resulting in patterns of stress for each element that form part of the connection. Likewise, comparisons are made between connections type "arbol" with "BFP" in terms of damage and resistance of panel zone, and also made the comparison between connections "end-plate" (placa-tope) and "BFP". Connections "end-plate" were taken from the study by Ruiz (2010) and used as a basis for calibration and validation of models.

CONTENIDO

RESUMEN

ABSTRACT

1. INTRODUCCIÓN.....1

1.1. Objetivo2

1.2. Alcances.....2

1.3. Contenido.....2

2. GENERALIDADES.....3

2.1. Estudios previos3

2.2. Modelo para calibrar y validar las conexiones.....4

2.3. Comparación de resultados6

3. GEOMETRÍA DE LAS CONEXIONES Y TIPOS DE ANÁLISIS10

3.1. Tipos de conexiones10

3.2. Características de las conexiones.....12

3.3. Geometría16

3.4. Resistencia de los modelos.....24

3.5. Modelado de las conexiones.....26

3.5.1. Malla28

3.5.2. Tipos de elementos.....32

3.5.3. Elementos de contacto.....36

3.5.4. Modelo del tornillo43

3.6. Propiedades de los materiales44

3.7. Modelado del material45

3.8. Cargas.....47

3.8.1. Carga monótona	48
3.8.2. Carga cíclica	49
 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	52
4.1. Comportamiento ante carga monótona.....	52
4.2. Efecto de la carga axial en la columna.....	74
4.3. Comparación del comportamiento monótono entre modelos del tipo bolted flange plate.....	76
4.4. Comparación del comportamiento monótono entre modelos del tipo “árbol”.....	78
4.5. Comparación del comportamiento entre modelos del tipo “árbol” y “bolted flange plate”	79
4.6. Comportamiento ante carga cíclica	81
4.7. Comparación del comportamiento cíclico entre modelos del tipo “Bolted Flange Plate”.....	89
4.8. Comparación del comportamiento cíclico entre modelos del tipo “árbol”	90
4.9. Comparación entre modelos de carga monótona y cíclica.....	91
4.10. Comparación entre conexiones tipo “end-plate” y las conexiones tipo “bolted flange plate” en carga monótona.....	95
 5. CONCLUSIONES.....	99
 REFERENCIAS.....	103

APENDICE A

Capítulo 1

1. INTRODUCCIÓN

Las construcciones metálicas en nuestro país están teniendo mucho auge, la mayoría de los edificios de mediana y de gran altura se están construyendo en acero, de ahí la importancia de realizar estudios de este tipo de estructuras, siendo las conexiones un elemento trascendental. Por tal razón, es necesario contar con los estudios suficientes y normas que especifiquen su diseño y desempeño en zona sísmica, así como su construcción.

Esta problemática de insuficiencia de estudios en las conexiones, se puede resolver haciendo investigaciones a través de modelos experimentales, pero existe un inconveniente, el realizar este tipo de ensayos implica costo y tiempo debido a que elaborar un modelo no es nada sencillo. Sin embargo, existe otra herramienta que logra simular de manera confiable el comportamiento que se reproduce en un modelo experimental y se denomina simulación numérica o simulación por computadora, la cual puede ser mediante análisis de elemento finito, diferencias finitas, elementos discretos, etc. La simulación por elementos finitos, ha demostrado que proporciona datos sumamente confiables y similares a los ensayos experimentales siempre que se cuente con las calibraciones adecuadas. Esto se ha comprobado mediante varias pruebas de conexiones de acero viga-columna que se ensayan en laboratorio y también se reproducen en modelos de elemento finito para tratar de obtener resultados similares.

Este estudio se enfoca a obtener el comportamiento de conexiones viga-columna a momento atornilladas, mediante modelos de elemento finito. Las uniones por estudiar son la denominada tipo “árbol” y la tipo placa atornillada en patines BFP (*“Bolted Flange Plate”, por sus siglas en inglés*), estas conexiones son atornilladas con placas que se unen al patín y alma de la trabe que va a ser conectada. Se toma como referencia el trabajo realizado por Ruiz (2010) para ajustar algunos parámetros de los modelos por elaborar y validar los resultados. El análisis se hará mediante modelos analíticos detallados con ayuda del programa ANSYS. Una característica importante que tienen modelos numéricos es que proporcionan resultados útiles en forma adicional que son difíciles de medir en pruebas de laboratorio, como la distribución de las presiones ocasionadas por las fuerzas aplicadas, la pretensión en los tornillos, el momento

en la junta, y el flujo de esfuerzos principales en la conexión. La geometría de todos los modelos se realiza en AutoCAD y se exporta al generador del programa ANSYS.

1.1. Objetivo

El objetivo del trabajo es determinar el comportamiento de conexiones con placa atornillada en patines (Bolted Flange Plate) denominadas BFP y tipo “árbol” con distintas geometrías mediante la aplicación de cargas sostenidas y cíclicas, con la elaboración de modelos de elemento finito.

1.2. Alcances

Se pretende obtener curvas carga contra desplazamiento y momento rotación de todos los modelos de análisis monótonos y, curvas de histéresis para los análisis cíclicos, también estudiar patrones de comportamiento de esfuerzos de Von Mises representados en el modelo.

1.3. Contenido

En el capítulo dos se habla acerca de los estudios que se han hecho de conexiones de modelos de elementos finitos experimentales y analíticos. La elaboración de una conexión que se toma como referencia para calibrar y validar los datos de los modelos a realizar con base a una conexión ya elaborada en el trabajo de Ruiz (2010).

En el capítulo tres se define la geometría y pasos para la construcción de los siete modelos así como sus características y el porqué de cada uno de ellos, así como el protocolo de carga monótona aplicada a todos los modelos y carga cíclica aplicada a cinco de ellos.

En el capítulo cuatro se analizan los resultados obtenidos de análisis monótonos y cíclicos, con curvas momento rotación y de histéresis respectivamente, de cada uno de los modelos; y el efecto que tiene la carga axial en la columna. También se hacen comparaciones con las conexiones del tipo placa tope.

En el capítulo cinco se dan las conclusiones así como recomendaciones para el diseño y desempeño de las conexiones según el comportamiento de sus elementos en el modelo y cuál es la mejor alternativa de acuerdo con los resultados analizados.

Capítulo 2

2. GENERALIDADES

2.1. Estudios previos

Existen diversos estudios de conexiones metálicas modeladas con el método del elemento finito, la mayoría para conexiones placa-tope (end-plate). El trabajo más importante para este fin ha sido el realizado por Shi et al (2008) por la razón que desarrolla un modelo numérico en ANSYS con la capacidad de simular y analizar el comportamiento mecánico de diferentes tipos de conexiones placa-tope en las cuales todos los tornillos están pretensionados. Estos modelos son comparados con resultados de pruebas las cuales verifican que el procedimiento numérico puede simular y analizar detalladamente el comportamiento de varios tipos de conexiones placa-tope y sus componentes con exactitud. La investigación de Shi et al, estudia ocho conexiones de forma experimental y analítica con ANSYS. Por otra parte, explica algunos de los parámetros configurados en el programa para tener una buena convergencia en la solución de la conexión. En la figura 2.1 se muestra un modelo típico de ANSYS realizado por de Shi et al (2008) y también una comparativa del modelo experimental y del modelo numérico.

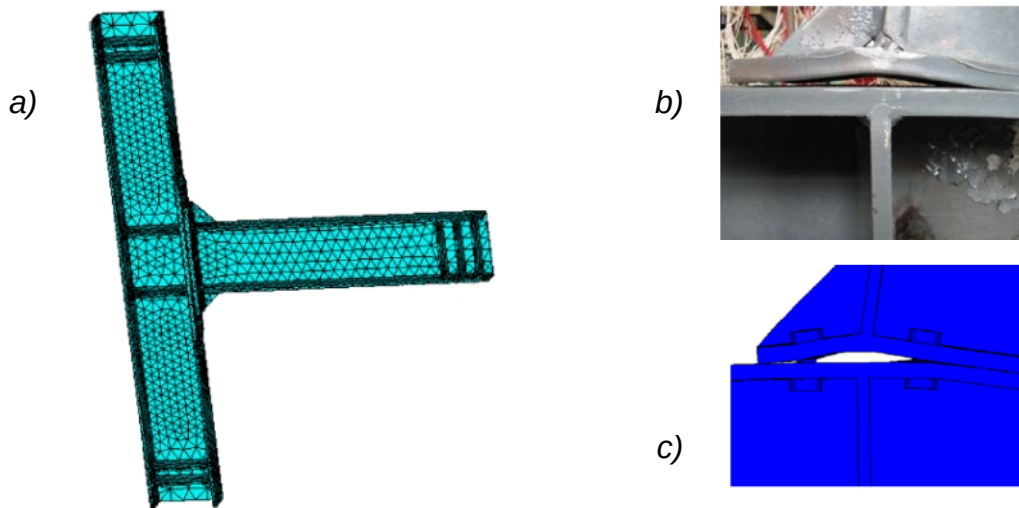


Figura 2.1 Modelo de Shi et al, a) Modelo de elemento finito típico de la conexión, b) Modelo experimental, c) Modelo elemento finito

2.2. Modelo para calibrar y validar las conexiones

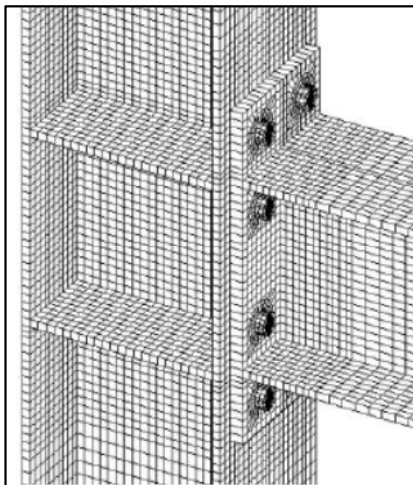
El contar con información de estudios experimentales proporciona una base para poder desarrollar modelos numéricos mediante la calibración y validación y así integrar una gran variedad de datos y adaptar herramientas de modelaje utilizadas en modelos existentes y extrapolarlas a modelos nuevos elaborados en computadora.

El término calibrar se refiere a utilizar modelos analíticos y/o experimentales existentes como patrones o guías que sirven para reproducir un modelo nuevo en base a éstos considerando sus características, propiedades, materiales, etc.

La validación numérica consiste en comparar el modelo calibrado (modelo nuevo) con el tomado como base y cotejar los resultados, los cuales deben ser similares en relación con el comportamiento de la conexión, para que el modelo sea válido.

La validación sirve para tener la certeza de lo que se está haciendo está bien. Para el caso del ANSYS, en saber qué parámetros configurar para obtener el comportamiento deseado. A partir de esto se pueden elaborar otros modelos incluyendo otras configuraciones que no se consideraron en el modelo base.

Para validar la conexión se toma como referencia el modelo **CN2** del trabajo de Ruiz (2010) en el cual se calibran y validan las conexiones con los modelos de Shi et al (2008) (ver fig 2.2). El modelo CN2 se reproduce con la misma geometría y propiedades de materiales, para obtener un comportamiento similar en la nueva conexión.



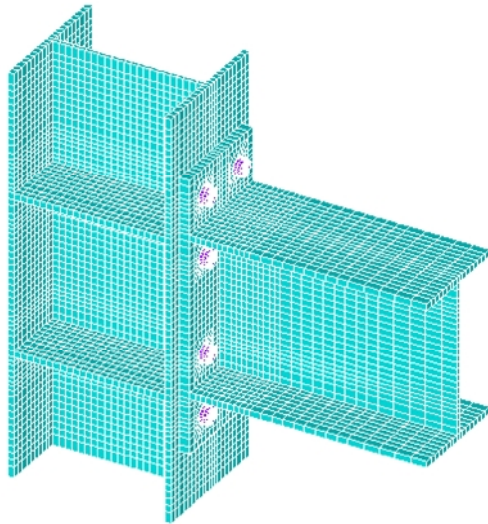
Elementos sólidos 21,008

Nodos 259,024

Grados de libertad 777,072

Figura 2.2 Modelo CN2 (Ruiz 2010)

En la figura 2.3 se observa el **Modelo1v** que reproduce las características y propiedades de la conexión **CN2**, haciendo notar que es muy similar.



Elementos sólidos 29,096

Nodos 291,664

Grados de libertad 882,192

Figura 2.3 Modelo1v

Las condiciones de frontera y protocolo de carga que se utilizan para el modelo CN2 son los mismos que se aplican al Modelo1v.

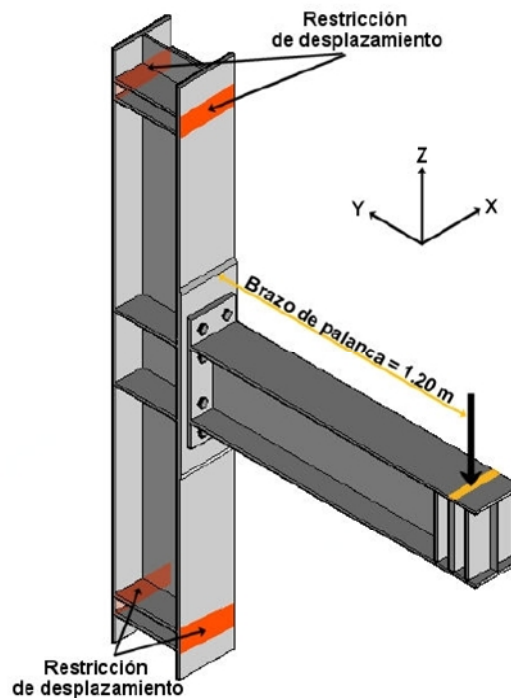


Figura 2.4 Condiciones de frontera de la conexión y punto de aplicación de la carga a 1.2 m del nudo

Los incrementos de carga fueron siete y cada uno con sub-incrementos diferentes, con máximo de cinco y un mínimo de tres. En la siguiente tabla se observa la secuencia de pasos y la carga aplicada.

Tabla 2.1 Protocolo de carga monótona

Pasos de carga	Carga		Tiempo	Momento	
	Kg/cm ²	Puntual (kg)		Ton--m	kN-m
1	Pretensión y peso propio		2		
2	75	3000	4	3.6	35.28
3	150	6000	6	7.2	70.56
4	225	9000	8	10.8	105.84
5	300	12000	10	14.4	141.12
6	375	15000	12	18.0	176.40
7	450	18000	14	21.6	211.68

2.3. Comparación de resultados

Para evaluar el comportamiento y hacer la comparativa del Modelo1v contra el CN2, se generan curvas de relación entre momento y rotación de la conexión, así como carga aplicada contra desplazamiento. En primer lugar se comparan (ver fig 2.5) las curvas carga contra desplazamiento en el extremo de la trabe.

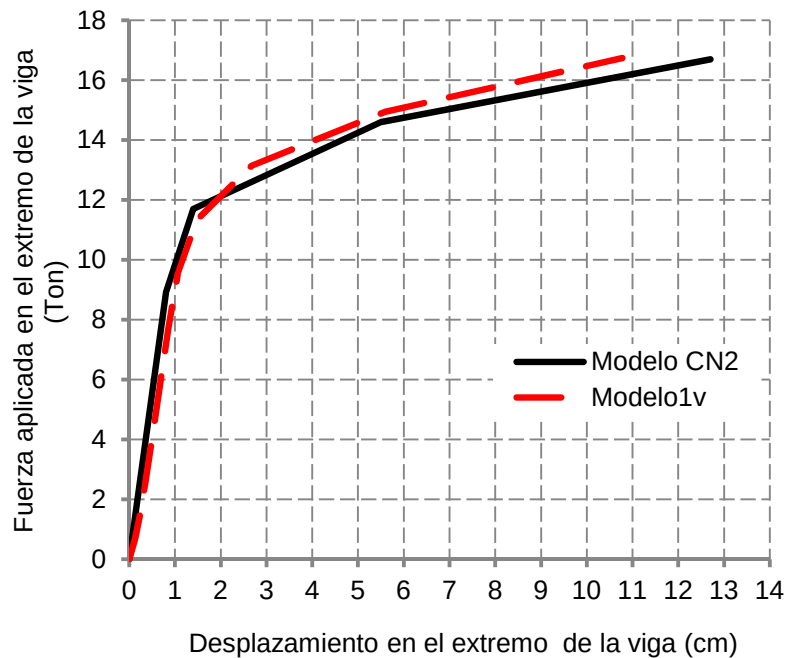


Figura 2.5 Curvas carga contra desplazamiento de la conexión CN2 y el Modelo1v

En la figura anterior la curva continua en color negro representa la conexión CN2 y la curva discontinua en color rojo es del Modelo1v, los desplazamientos son similares y se considera que el modelo es adecuado. En cuanto esfuerzos, se tiene una distribución que se muestra en los siguientes esquemas. Se toma como referencia la escala de isovalores (ver fig 2.6) para el Acero y tornillos, utilizada en el trabajo de Ruiz (2010).

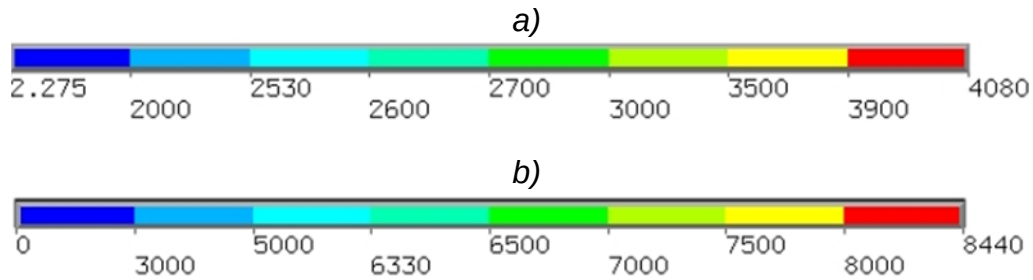


Figura 2.6 Escalas de isovalores de esfuerzos, a) Acero, b) Tornillos

En la parte izquierda el modelo CNV y en la derecha el Modelo1v.

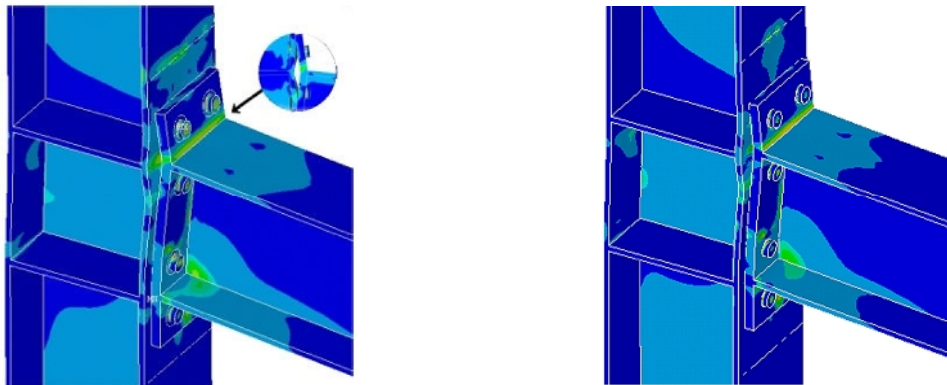


Figura 2.7 Conexión viga-columna

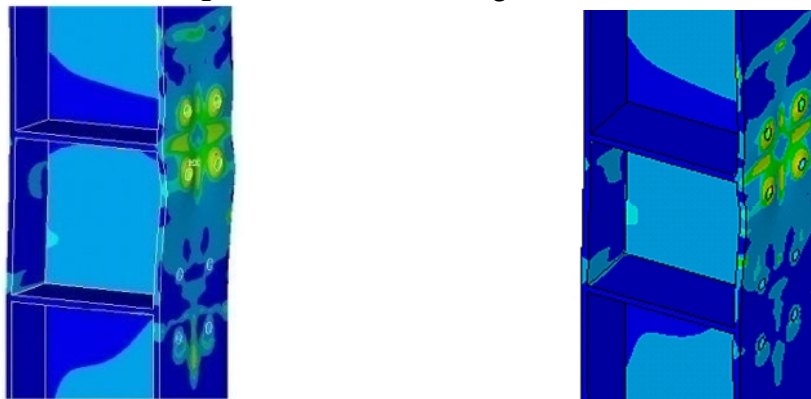


Figura 2.8 Vista en isométrico de columna



Figura 2.9 Viga y placa tope



Figura 2.10 Tornillo

Se obtiene la curva momento rotación y se compara. En la figura se muestran las dos gráficas.

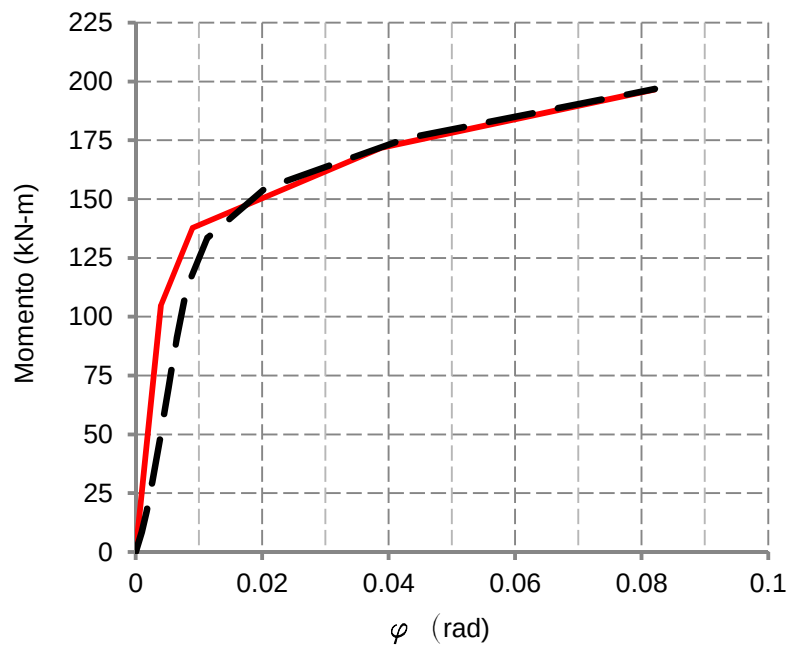


Figura 2.11 Curvas momento rotación, línea continua conexión CN2, línea discontinua Modelo1v

Si se toma como momento final aquel que se desarrolla en una rotación de 0.08 rad, para la conexión CN2 el momento es 195 kN-m y para el modelo1v de 196 kN-m, si se comparan los momentos finales se tiene un ratio de 1.005 el cual tiene muy buen nivel de aproximación. En conclusión, el modelo análogo a la conexión CN2 tiene un comportamiento similar, lo cual quiere decir que la calibración y validación fue exitosa, en consecuencia, ya se pueden elaborar modelos con diferentes configuraciones teniendo en cuenta los datos calibrados de esta conexión.

Capítulo 3

3. GEOMETRÍA DE LAS CONEXIONES Y TIPOS DE ANÁLISIS

3.1. Tipos de conexiones

Las modelos a elaborar son uniones viga-columna completamente atornilladas en los patines y alma de la trabe. A diferencia de las que se analizan en el trabajo de Ruiz (2010) las cuales son atornilladas únicamente en el patín de columna mediante placas tope que están soldadas a la viga y se denominan conexiones del tipo “end-plate”. Este trabajo es una continuación de la investigación antes mencionada, modificando la forma de unión entre la viga y la columna para definir las ventajas y desventajas de unas y otras.

Principalmente se analizan dos tipos de conexiones, la denominada **BFP** o placa atornillada en patines (Bolted Flange Plate por sus siglas en ingles) y la tipo **árbol**. A continuación se hace una breve descripción.

Conexión BFP. La viga se une a la columna mediante placas que se atornillan al alma y patines (ver fig 3.1). La columna trae soldadas desde taller placas de conexión para el alma y patines de la viga que va a ser conectada. Una ventaja de tener las placas de conexión soldadas en taller es el control de calidad que se tiene en el proceso de soldadura. La sección transversal de columna puede ser I o cajón, la de la viga sección I. Los agujeros se realizan en el alma y patín de la viga para colocar los tornillos según el número que va a ser utilizado.

En la figura 3.1 se muestran los elementos típicos de la conexión tipo BFP según el FEMA 350 y se detallan a continuación:

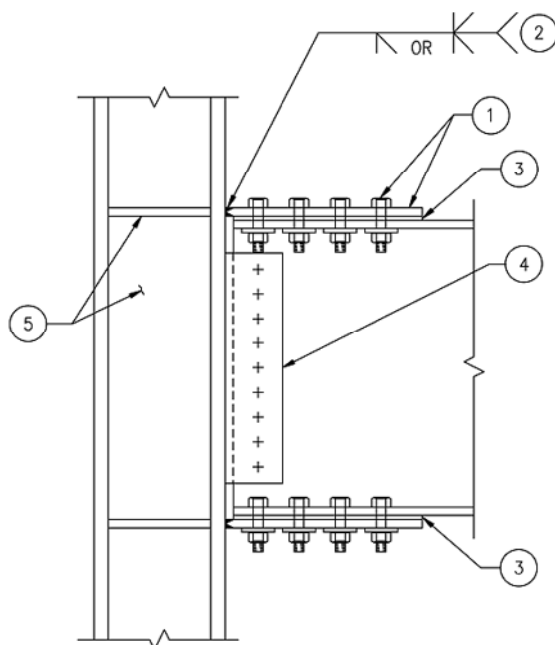


Figura 3.1 Conexión BFP (Bolted Flange Plate)

1. Tornillos y placas de conexión en patines. Los tornillos son totalmente pretensionados. Los agujeros en los patines de la trabe son estándar y, en las placas pueden ser sobredimensionados
2. Soldadura de penetración completa, puede ser de bisel sencillo o doble. Soldadura en campo o taller.
3. Son permitidas las cuñas entre los patines de la viga y las placas de los patines.
4. Placa de cortante y tornillos. Los agujeros del alma deben de ser estándar.
5. Zona de panel y placas para continuidad de los patines de la trabe.

La FEMA 350 menciona que el comportamiento de este tipo de conexión puede ser controlado por un número diferente de modos incluyendo: la fluencia por flexión de la viga, fluencia por flexión de las cubre placas, fluencia de la zona de panel en la columna, falla de tensión en la sección-neta del patín de la viga o cubre placas, falla por cortante de conexiones atornilladas, o falla de uniones soldadas. Algunos de estos modos son frágiles, mientras otros tienen una ductilidad significativa. Las conexiones de este tipo deben ser controladas de preferencia para un comportamiento dúctil donde varios de sus elementos son diseñados con la suficiente resistencia para que otros modos no deseados no ocurran. Por lo tanto, en esta investigación se tratará de obtener una falla por fluencia en la viga, que es lo más deseable, porque la articulación plástica se aleja de la columna.

Conexión tipo “árbol”. Es una conexión viga-columna en la que la unión se realiza alejada del paño de la columna (ver fig 3.2), con la finalidad que la articulación plástica se forme lejos de ésta. Una característica principal es que la columna ya trae soldado un muñón el cual se va a conectar con la trabe por medio de placas que se atornillan tanto en los patines como en el alma, esto representa una ventaja importante en el montaje de las estructuras.

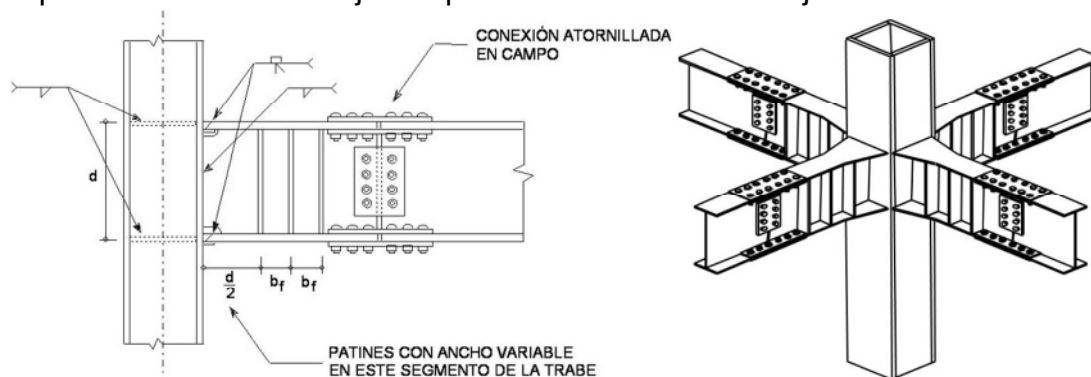


Figura 3.2 Conexión tipo árbol

3.2. Características de las conexiones

Como lo describe el tema anterior son dos tipos principales: la BFP y tipo árbol, a partir de las que se elaboran siete modelos con distinta geometría y configuración, para analizar en cada caso una variable diferente. Todas son atornilladas y con la misma calidad de acero estructural en todos sus elementos. El esfuerzo de fluencia para placas, trabe, columna, atiesadores es $F_y = 2530 \text{ Kg/cm}^2$, que corresponde a un acero A-36; los tornillos en el alma y patines son de alta resistencia A-325 con un $F_y = 6330 \text{ Kg/cm}^2$. La razón por la que se usa el acero A-36 es debido a que en el trabajo de Ruiz (2010) de “placas-tope” se utiliza esta calidad y se ocupa la misma curva esfuerzo-deformación para las conexiones a realizar, además de que al final se hace una comparativa entre las conexiones de este trabajo y las placa tope. Todos los modelos a ensayar son conexiones de borde o exteriores (se clasifican así por su ubicación en un edificio), pues así se analizan en la tesis de referencia. A continuación se detallan algunas de sus características.

Modelo 1 (BFP1). Es una conexión BFP; la sección transversal de trabe y columna es sección I, tiene atiesadores en la zona de panel que sirven para darle continuidad a las placas de los patines. Se entiende por panel, aquella zona del alma de la columna delimitada por los atiesadores colocados colinealmente con las placas de conexión de los patines de la trabe. En la zona de aplicación de carga del modelo, es decir, en la parte extrema de la viga, esta reforzada localmente con tres atiesadores a cada lado del alma con la finalidad de evitar una falla prematura por pandeo o inestabilidad del alma o patines de la viga (todos los modelos tienen estos atiesadores). Este modelo tiene 12 tornillos de $\frac{3}{4}$ " de diámetro en cada patín y 4 tornillos de $\frac{5}{8}$ " de diámetro en el alma.

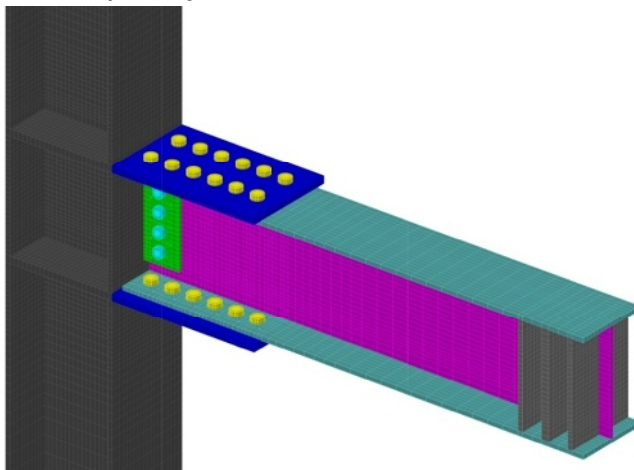


Figura 3.3 Modelo BFP1

Modelo 2 (BFP2). Conexión tipo BFP con las mismas características que la anterior, la única variante es el atiesador inclinado en la zona de panel. El modelo tiene el propósito de observar el efecto que tiene el atiesador en el comportamiento de la conexión.

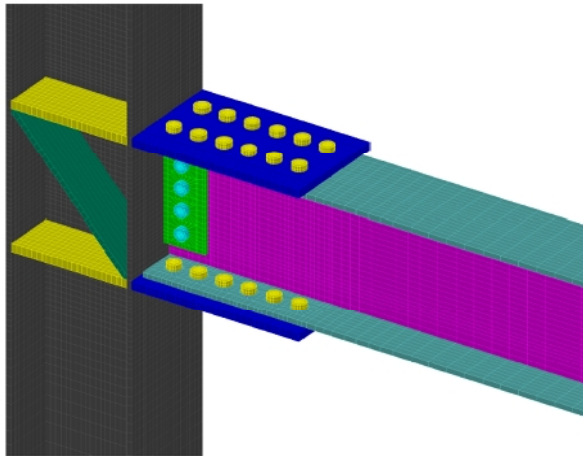


Figura 3.4 Modelo BFP2

Modelo 3 (BFP3). Conexión BFP, con todas las características de los modelos 1 y 2. Aquí la columna en lugar de ser sección I, se modifica a tipo cajón. En el interior de la columna se colocan atiesadores que coincidan en la zona donde se unen las placas de conexión para los patines de la trabe; en la figura 3.5 se muestran en color amarillo.

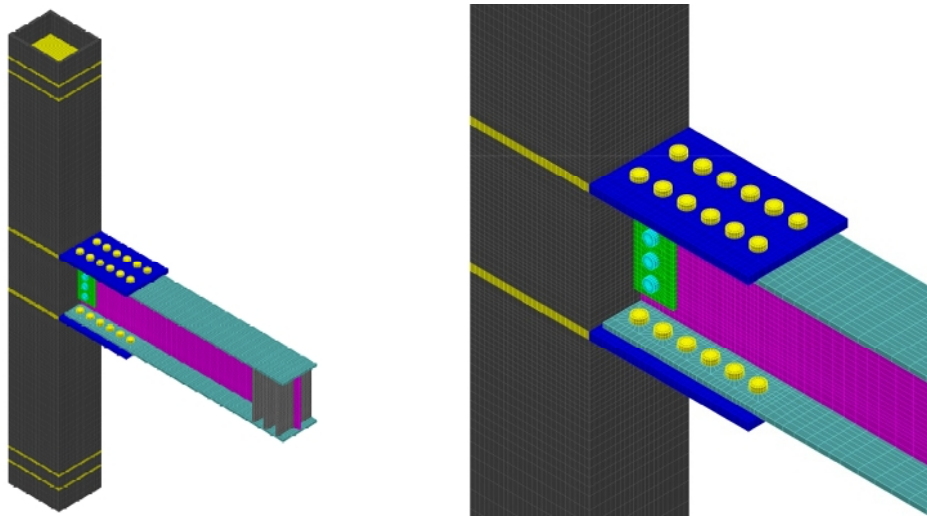


Figura 3.5 Modelo BFP3

Modelo 4 (BFP4). Conexión tipo “árbol”, con columna y trabe de sección transversal I, de las mismas dimensiones que todos los modelos anteriores. También cuenta con atiesadores en la zona de panel. En la parte del muñón (ver fig 3.6) el patín aumenta gradualmente cuando se aproxima al paño de la columna; también este fragmento se encuentra reforzado por atiesadores verticales. Este modelo tiene en los patines 24 tornillos en total de $\frac{3}{4}$ ” de diámetro y para el alma son 8 de $\frac{5}{8}$ ” de diámetro.

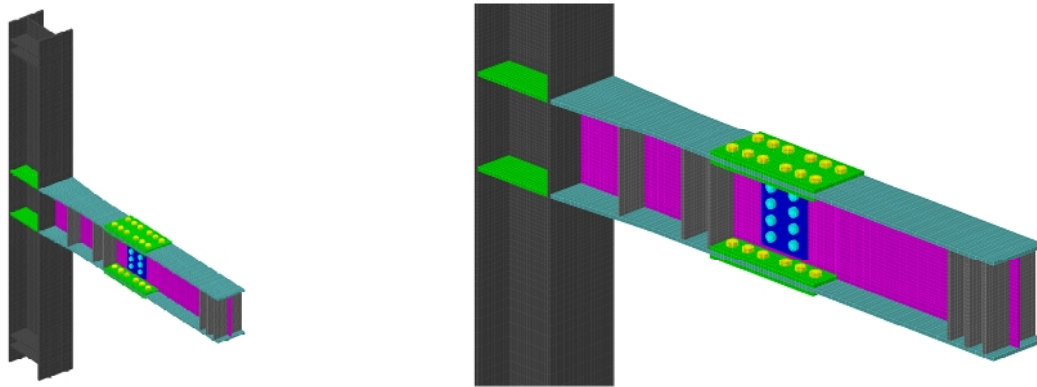


Figura 3.6 Modelo BFP4

Modelo 5 (BFP5). Conexión tipo árbol, con las mismas características que la anterior, la única diferencia es el atiesador inclinado en la zona de panel. El modelo tiene el objetivo de comparar el comportamiento de este modelo con el modelo 4 y formular una decisión acerca de cuál es mejor (ver fig 3.7).

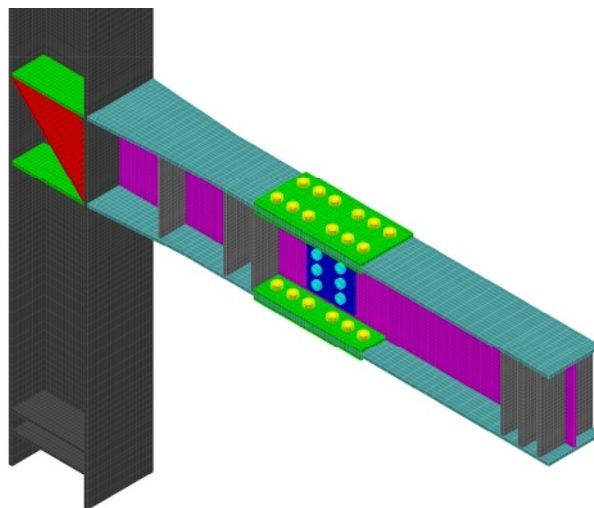


Figura 3.7 Modelo BFP5

Modelo 6 (BFP6). Conexión tipo árbol, en este caso la sección de la columna es cajón y la viga tiene la misma sección que el modelo 5. En la zona de unión de los patines de la trabe con la columna existen atiesadores en el interior de ella (ver fig 3.8).

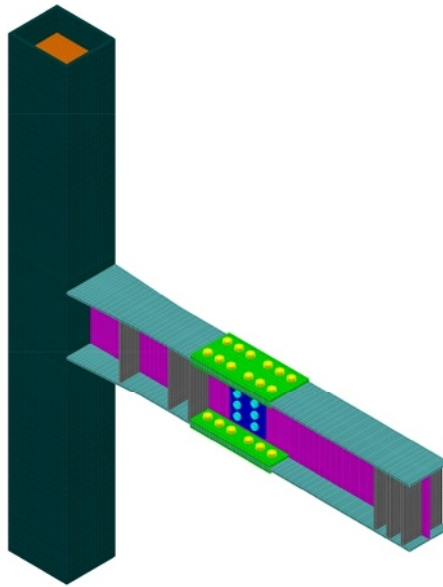


Figura 3.8 Modelo BFP6

Modelo 7 (BFP7). Conexión tipo árbol análoga a las anteriores (ver fig 3.9), lo diferente de esta unión es la forma de los patines de la viga que se unen a la columna, éstos presentan una ampliación de la zona de unión de la viga con la columna. Los atiesadores interiores no existen, ésta es la razón de ampliar los patines.

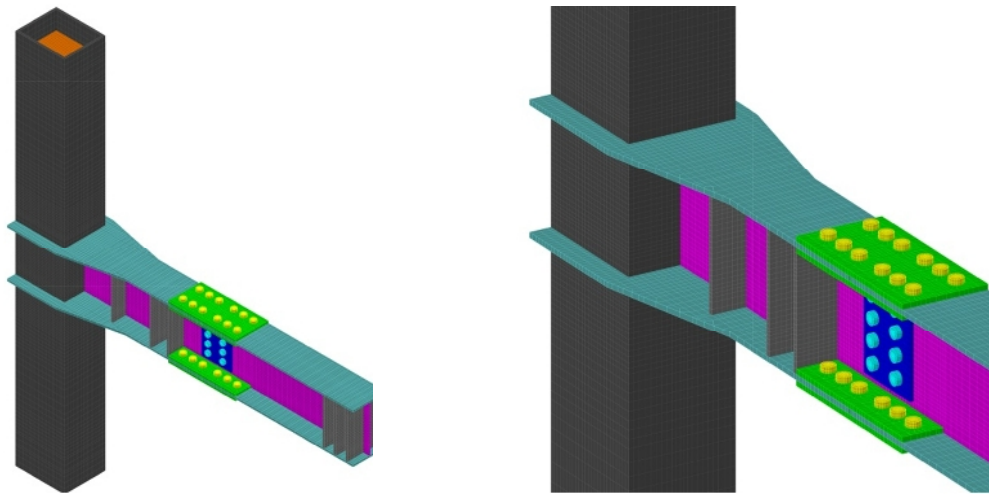


Figura 3.9 Modelo BFP7

3.3. Geometría

Todos los modelos están formados por una columna de 2.3 m de altura que simulan el entrepiso del marco de acero donde se ubica la conexión. Las secciones de trabe y columna para todos los modelos tienen las mismas dimensiones.

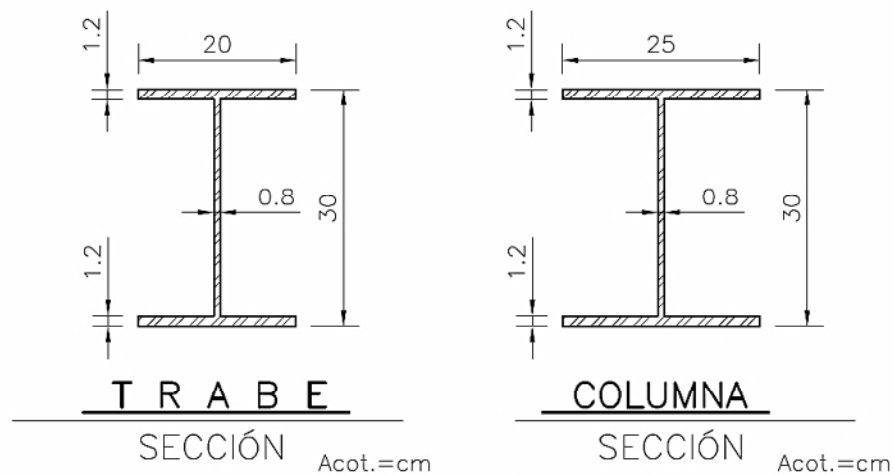


Figura 3.10 Sección transversal de trabe y columna

En las siguientes imágenes, se presentan la geometría de todas las conexiones, tales como: dimensiones de placas, longitudes de los elementos, distribución de tornillos, distribución de atiesadores, etc., empezando por el modelo BFP1 (ver fig 3.11 y 3.12).

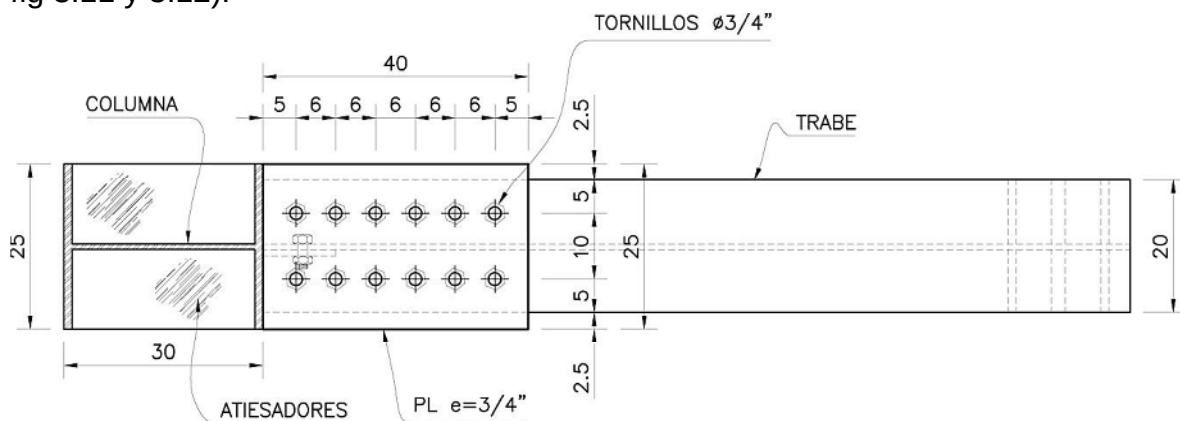


Figura 3.11 Vista en planta de la conexión BFP1

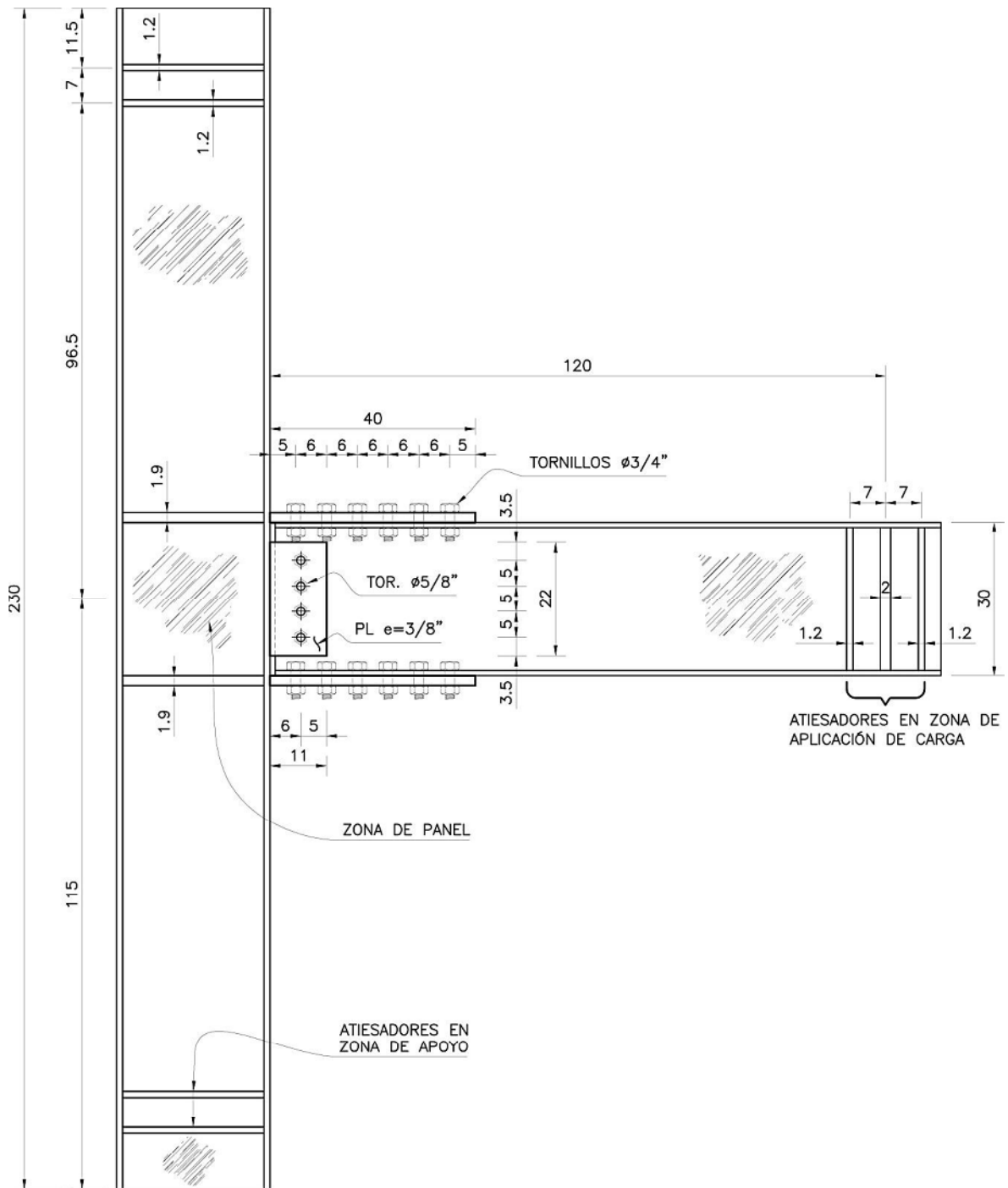


Figura 3.12 Vista en elevación de la conexión BFP1

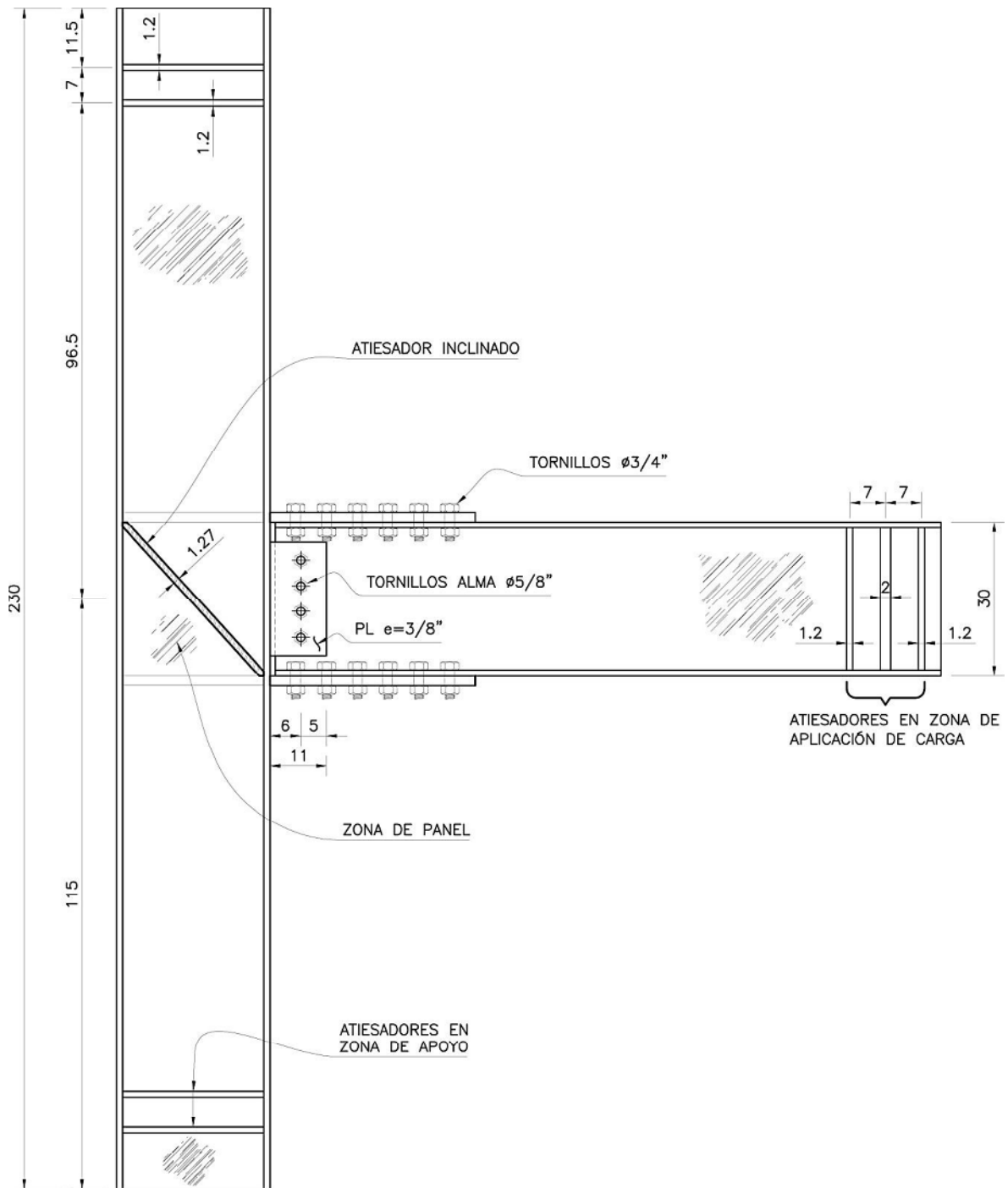


Figura 3.13 Conexión BFP2, con atiesador inclinado en la zona de panel

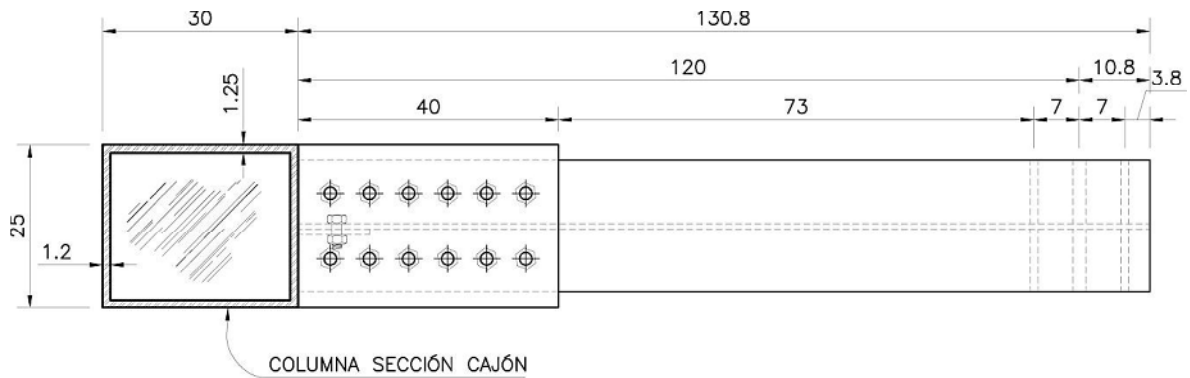


Figura 3.14 Conexión BFP3 con columna cajón vista en planta

En la figura 3.15 y 3.16 se muestran la geometría de la conexión tipo árbol en la cual se puede observar que la viga es de mayor longitud que los modelos anteriores, esto debido a que la conexión se hace alejada de la columna y el muñón que va unido a ella hace que la trabe sea más larga.

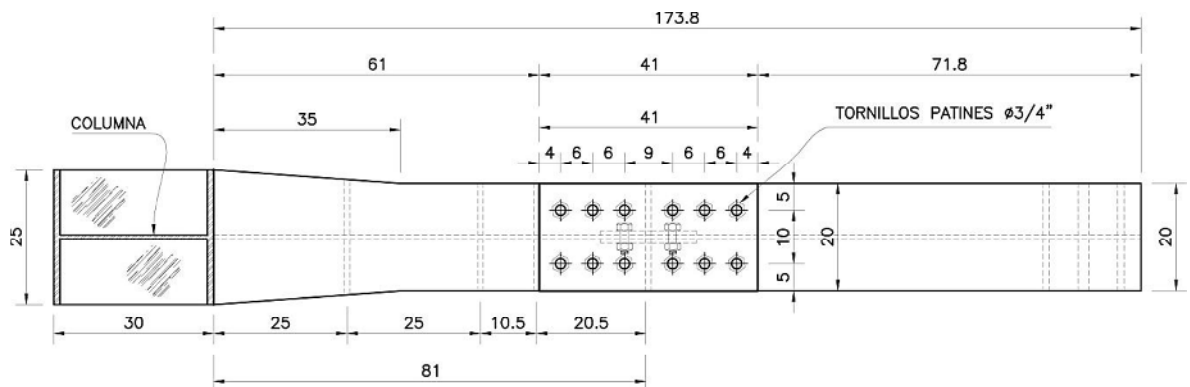


Figura 3.15 Vista en planta de la conexión tipo ÁRBOL, modelo BFP4

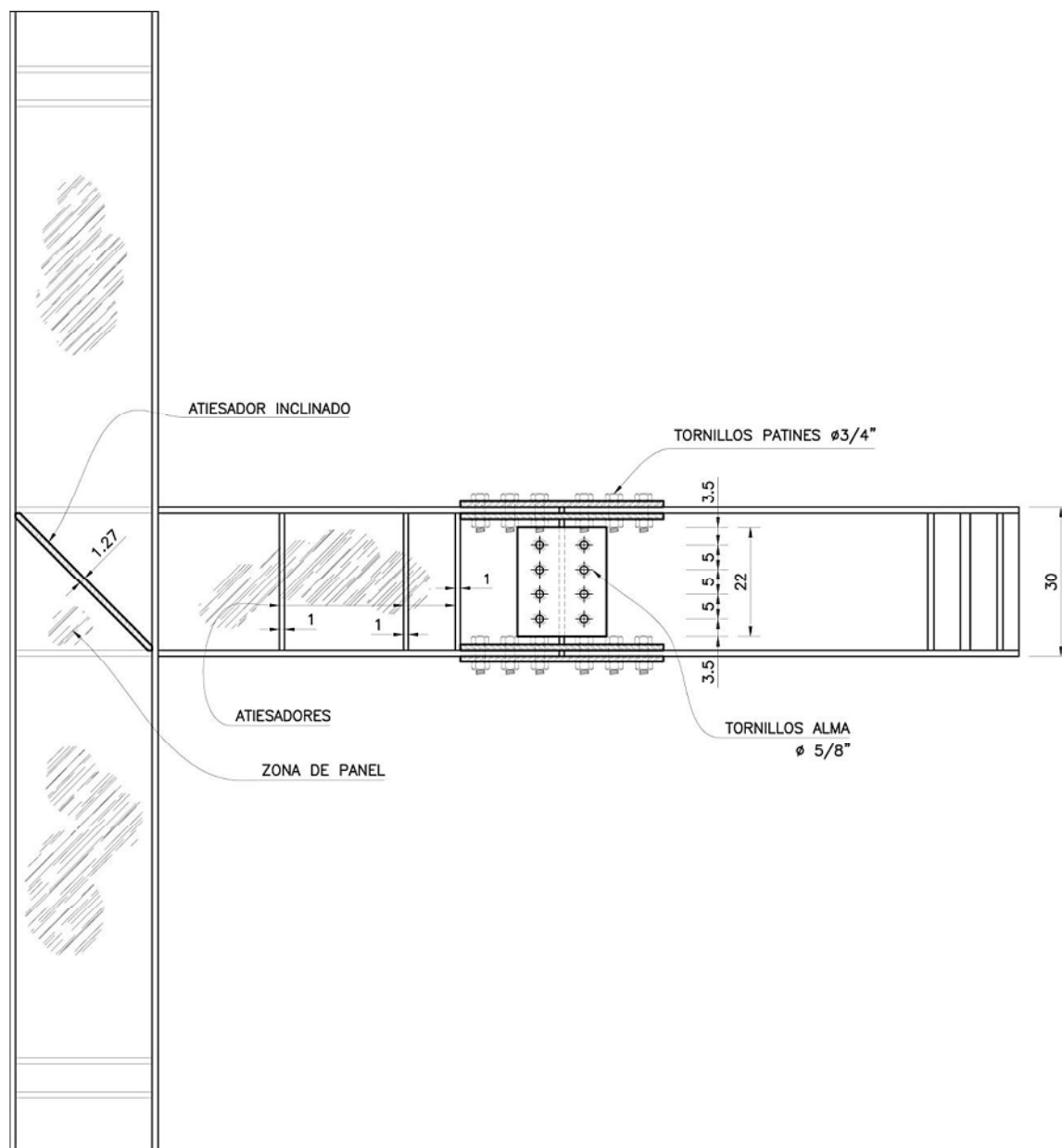


Figura 3.17 Conexión BFP5, vista en elevación

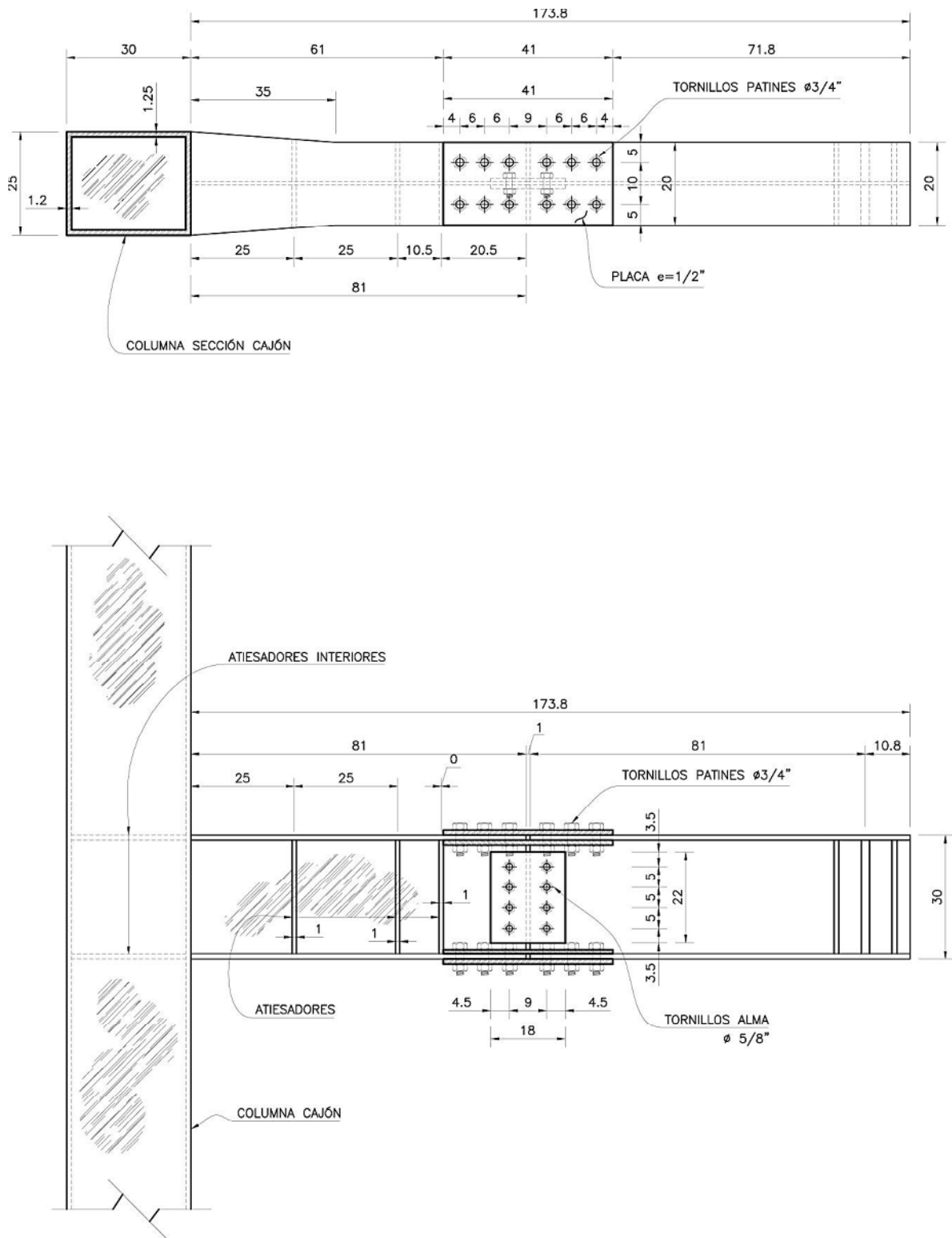


Figura 3.18 Conexión BFP6, en la parte superior vista en elevación y en la inferior la planta

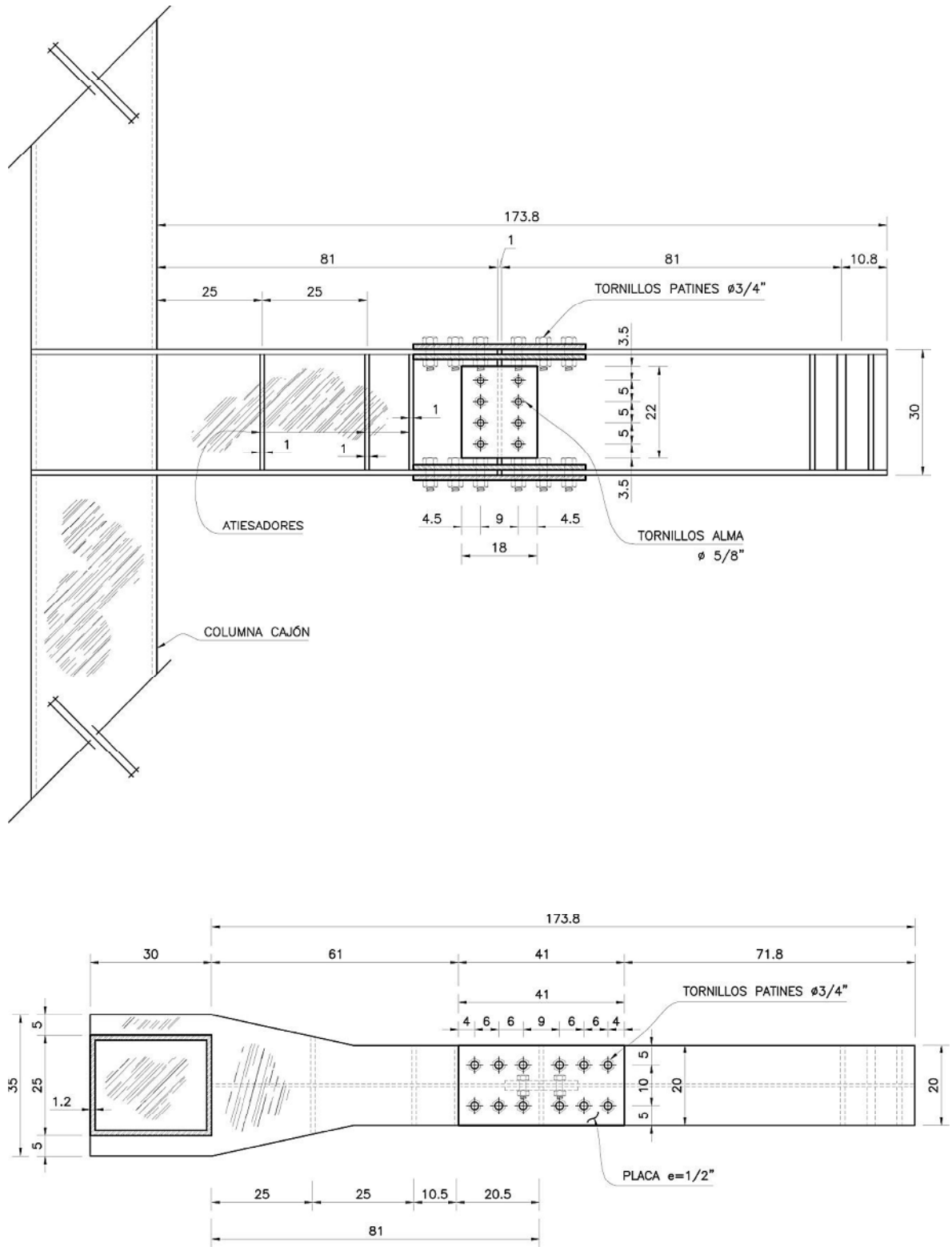


Figura 3.19 Conexión BFP7, vista en elevación y en planta

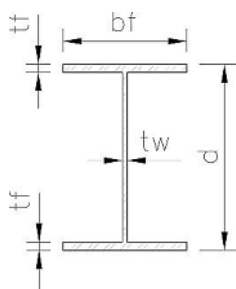
3.4. Resistencia de los modelos

Para calcular la resistencia de las conexiones se utilizaron las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño de Estructuras de Acero del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (NTCA-RCDF), las normas AISC y las normas FEMA-354, ya que no existen normas específicas que incluyan el diseño de cada uno de los elementos para los modelos en estudio. Las especificaciones AISC (2010) y las NTCA (2004) se usaron para clasificar el tipo de sección de la trabe y columna, obtener la separación, número y diámetro de tornillos, distancias libres mínimas al borde, dimensiones y espesores de placas, como se muestra en los detalles generales de los modelos, en las figuras anteriores.

Para las conexiones tipo BFP existen las recomendaciones FEMA-354, que proporcionan parámetros para el diseño de los elementos que las conforman, con la finalidad de tener una conexión precalificada; es decir, se obtiene un dimensionamiento de la conexión tal que tenga un comportamiento satisfactorio ante cargas sísmicas. Estas guías son elaboradas con base en resultados de estudios experimentales, de los que se obtienen ecuaciones y se formulan ayudas para no tener fallas como las que se presentaron anteriormente en esa conexión ante un sismo de gran intensidad, un ejemplo es el sismo ocurrido en Northridge California en 1994 en dónde la falla principal de las estructuras de acero, fue en las conexiones viga-columna.

Las normas FEMA-354 están vinculadas con el AISC (2005), y son las únicas especificaciones para las conexiones tipo BFP; por lo tanto se van a utilizar estos criterios para dimensionar las conexiones en estudio. Las conexiones tipo árbol se diseñan con las NTCA aplicando el criterio de placas y tornillos que marcan. Todos los cálculos se presentan en el apéndice A de este trabajo.

A continuación se obtiene el momento resistente teórico de la viga, que es el mismo para todas las conexiones. Las propiedades geométricas de la trabe son las siguientes:



$$bf := 20\text{cm}$$

$$d := 30\text{cm}$$

$$dw := d - tw = 29.2 \times \text{cm}$$

$$tf := 1.2\text{cm}$$

$$tw := 0.8\text{cm}$$

$$FR := 0.9$$

Clasificando el tipo de sección:

Para el alma de la trabe:

$$\frac{b_w}{t_w} = \frac{27.6}{0.8} = 34.5 < 2.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 2.45 \sqrt{\frac{210000}{2530}} = 70.58 \quad \square \text{ El alma es tipo 1}$$

Para los patines de la trabe:

$$\frac{b_f}{2 \cdot t_f} = \frac{20}{2 \cdot 1.2} = 8.333 < 0.32 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 9.22 \quad \square \text{ Los patines son tipo 1}$$

Por lo tanto la sección es tipo 1

El módulo de sección plástico:

$$Z_x := b_f \times t_f \times (d_w + t_f) + \frac{d_w^2 \times t_w}{4} = 900 \times \text{cm}^3$$

El momento plástico calculado:

$$M_p := Z_x \times F_y = 2277324 \times \text{kg} \cdot \text{cm} \quad M_p := Z_x \times F_y = 22773 \times \text{kg} \cdot \text{m}$$

Si se aplican las NTC el momento plástico resistente de la viga es:

$$M_{p_r} := \phi R \times M_p = 20496 \text{ kg} \times \text{m}$$

Para el cálculo de las resistencias de los elementos de las conexiones tipo BFP, se toman en cuenta sus principales mecanismos de fluencia y falla (ver fig 3.20); algunos son: la fluencia por flexión de la viga, fluencia por tensión de la placa de conexión de los patines, falla por fractura en la sección neta del patín o viga y fluencia por cortante de la zona de panel de la columna.

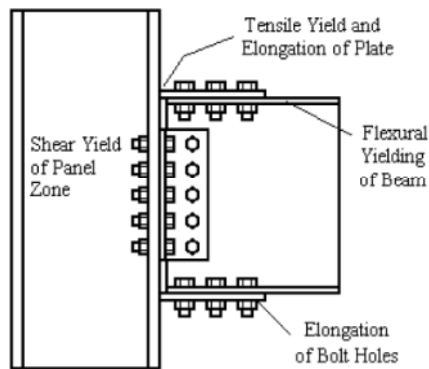


Figura 3.20 Mecanismos de fluencia para la conexión BFP

En la tabla 3.1 se muestran las resistencias a momento que fueron calculadas para los elementos de las conexiones, como son: el momento plástico teórico de la viga (M_{pv}), momento por deformación plástica en la viga (M_{db}), momento por fractura en la sección neta de las placas de los patines (M_{fp}), momento por fluencia en la zona de panel (M_{yp}), momento por fractura en la sección neta del patín de la viga (M_{yf}), momento por falla de cortante en los tornillos de los patines (M_{yb}), momento teórico plástico de la columna (M_{pc}) y el momento plástico teórico para el muñón (M_{pm}).

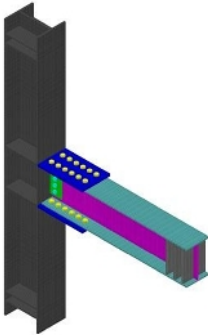
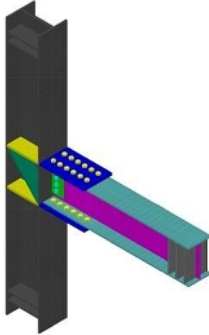
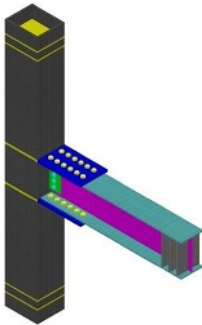
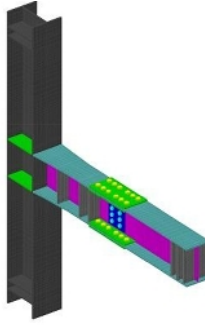
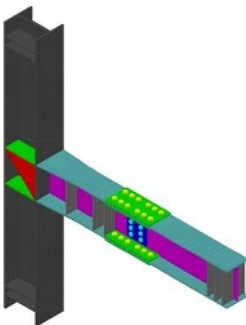
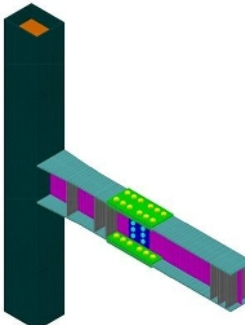
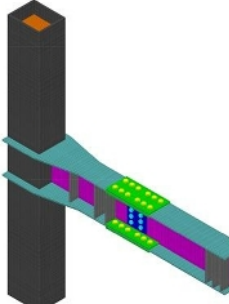
Tabla 3.1 Resistencias a momento esperadas para los elementos de las conexiones

Modelo	Momentos teóricos en Ton-m							
	M_{pv}	M_{db}	M_{fp}	M_{yp}	M_{yf}	M_{yb}	M_{pc}	M_{pm}
BFP1	22.77	29.75	44.01	8.84	30.90	43.30	27.39	----
BFP2	22.77	29.75	44.01	8.84	30.90	43.30	27.39	----
BFP3	22.77	29.75	44.01	----	30.90	43.30	33.42	----
BFP4	22.77	29.75	44.35	8.84	30.90	43.30	27.39	25.08
BFP5	22.77	29.75	44.35	8.84	30.90	43.30	27.39	25.08
BFP6	22.77	29.75	44.35	----	30.90	43.30	33.42	25.08
BFP7	22.77	29.75	44.35	----	30.90	43.30	33.42	25.08

3.5. Modelado de las conexiones

Son siete los modelos ensayados; sus características se resumen en la siguiente tabla (ver tabla 3.2).

Tabla 3.2 Denominación de los modelos

Modelo 1. BFP1	Modelo 2. BFP2
Conexión tipo placa atornillada en patines 	Conexión tipo placa atornillada en patines con atiesador inclinado 
Modelo 3. BFP3	Modelo 4. BFP4
Conexión tipo placa atornillada en patines con columna cajón 	Conexión tipo árbol 
Modelo 5. BFP5	Modelo 6. BFP6
Conexión tipo árbol con atiesador inclinado 	Conexión tipo árbol con columna cajón 
Modelo 7. BFP7	
Conexión tipo árbol con ampliación de la columna en la zona de unión viga-columna 	

3.5.1. Malla

Una malla consiste en dividir ya sean áreas, líneas o volúmenes, en un número finito de segmentos. Para construir un modelo en ANSYS es necesario hacer la malla de cada una de las partes que conforman la estructura que se va a analizar. Esto es debido a que este programa trabaja con el método del elemento finito. El programa tiene formas predefinidas para hacer mallas tal como: en forma libre, forma de tetraedros, en hexaedros y definido por el usuario; pero es más fácil hacerlo en forma independiente con un programa que maneje elementos en dos y tres dimensiones (2D y 3D).

En forma libre se refiere a crear una malla rápida y de forma automática. La malla definida por el usuario se hace con cualquier programa CAD que soporte los formatos de archivo que importa Ansys, los cuales se indican en la siguiente tabla (ver tabla 3.3).

Tabla 3.3 Tipos de formato de archivos soportados en Ansys

PAQUETERÍA CAD	TIPOS DE FORMATO	CONEXIÓN DE FUNCIONALIDAD PARA SU USO
CATIA 4.x and lower	.model o .dlv	CATIA
CATIA 5.x	.CATPart o .CATProduct	CATIA Version 5
Pro/ENGINEER	.prt	Pro/ENGINEER
Unigraphics	.prt	Unigraphics
Parasolid	.x_t o .xmt_txt	Parasolid
Solid Edge	.x_t o .xmt_txt	Parasolid
SolidWorks	.x_t	Parasolid
Unigraphics	.x_t o .xmt_txt	Parasolid
AutoCAD	.sat	SAT
Mechanical Desktop	.sat	SAT
SAT ACIS	.sat	SAT

El programa por utilizar será el AutoCAD por su entorno en 3D y, porque éste exporta en formato **SAT** que lo soporta Ansys, por lo tanto, la geometría de la malla de todos los modelos se va a hacer en AutoCAD para después exportar cada modelo al Ansys.

El siguiente paso es elaborar la malla de cada uno de los elementos que forman parte de la conexión como son: placas de unión, tornillos, atiesadores, trabe,

columna, etc. Para empezar la malla, primero se deben de definir el tipo de elemento y el refinamiento que se necesita. El refinamiento depende principalmente del nivel de precisión que se necesite, ya que según la documentación de ANSYS, entre más fina la malla, mejor exactitud se tendrá en los resultados; por lo que se deben identificar las zonas más importantes en el modelo, tales como: la unión entre la viga y columna, la zona de panel, los tornillos; para las cuales la geometría de la malla debe ser más refinada, por ser las zonas donde se presenta el comportamiento crítico (un gradiente elevado de esfuerzos); en el resto del modelo se hace una malla más gruesa para disminuir la cantidad de elementos. Por otra parte, es importante tener un equilibrio en el número de elementos ya que muchos implica mayor proceso de cómputo y pocos implica falta de precisión.

El tipo de malla que se escogió es mediante sólidos hexaédricos (ver fig 3.21), la razón es la siguiente, como se observa en la figura 3.22, existen dos mallas de un mismo elemento, en la figura 3.22 “a” la malla la realiza Ansys con tetraedros obteniendo 730 sólidos, y en la figura 3.22 “b” es con hexaedros con un total de 250 elementos, en conclusión los elementos se reducen hasta en un 65%, por lo tanto se emplean los hexaedros; además este tipo de elementos se utilizó en los estudios de Ruiz (2010).

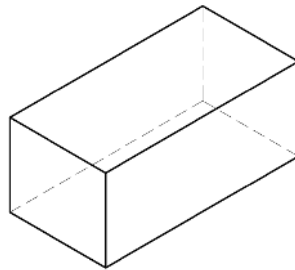


Figura 3.21 Elemento sólido de tipo hexaedro

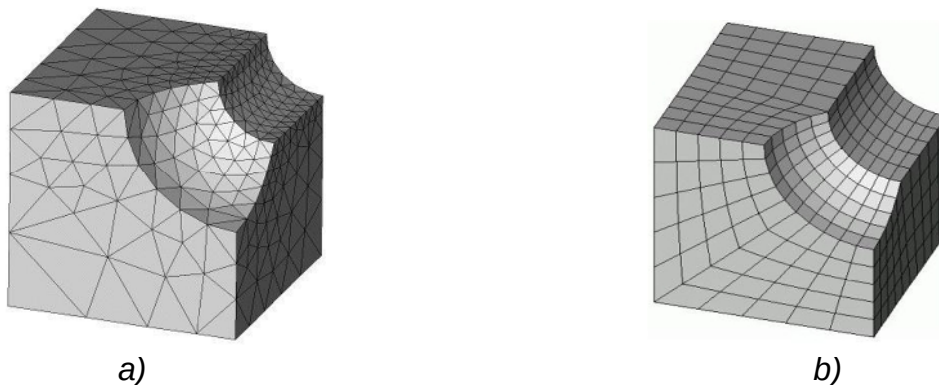


Figura 3.22 Malla, a) con tetraedros, b) con hexaedros

Un punto importante que se debe verificar al realizar la malla es que todos los elementos coincidan, es decir, la malla debe ser continua y cada uno de los elementos que la forman deben coincidir en los nodos, que son los puntos que tienen en común, para tener una malla tal como la que se observa en la Figura 3.23, en el que las líneas son continuas y concurrentes. La finalidad de elaborar la malla de esta forma es disminuir las iteraciones que hace ANSYS cuando se ejecuta el análisis del modelo; así la solución converge más rápido puesto que no existen nodos intermedios o discontinuidades que hagan que el programa realice iteraciones innecesarias.

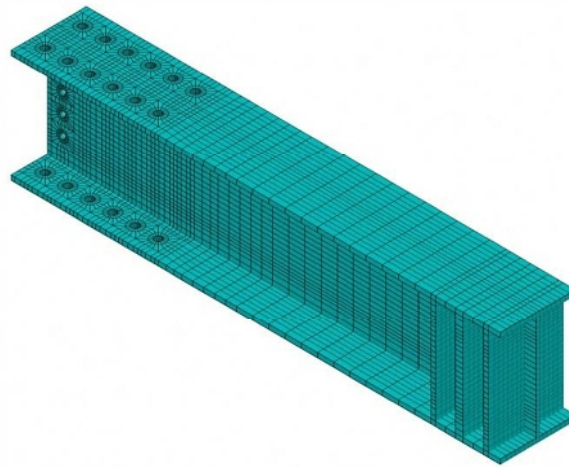


Figura 3.23 Malla de trabe

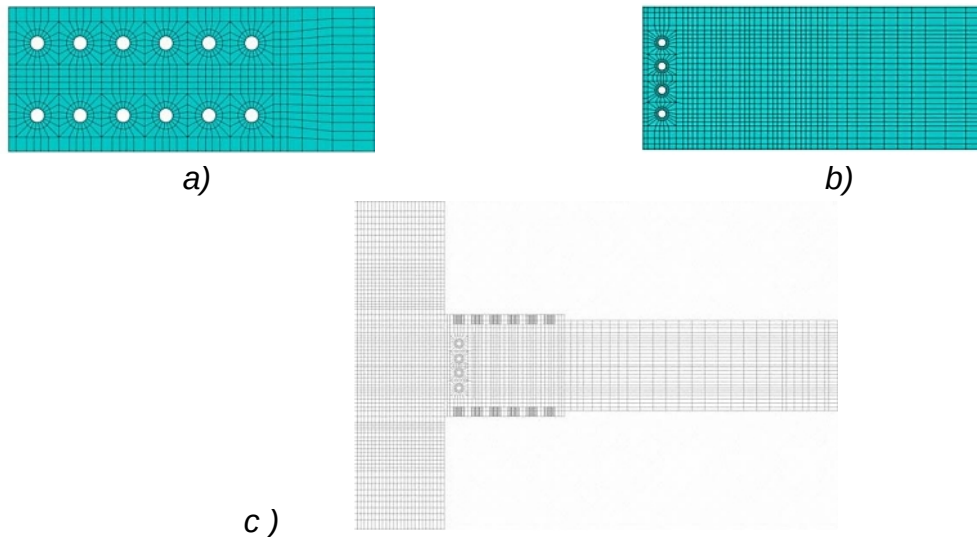


Figura 3.24 Malla de trabe, a) Vista en planta, b) Vista en elevación, c) Vista de zona de unión entre trabe y columna

En la Figura 3.23 y 3.24 se muestra la malla de la trabe en planta y elevación; se logra percibir que en la zona extrema dónde se localizan las perforaciones para los tornillos, la malla es más fina que en las demás zonas del elemento. De la misma forma se obtiene para todos los modelos; en la Figura 3.25 se observa la malla del modelo BFP1.

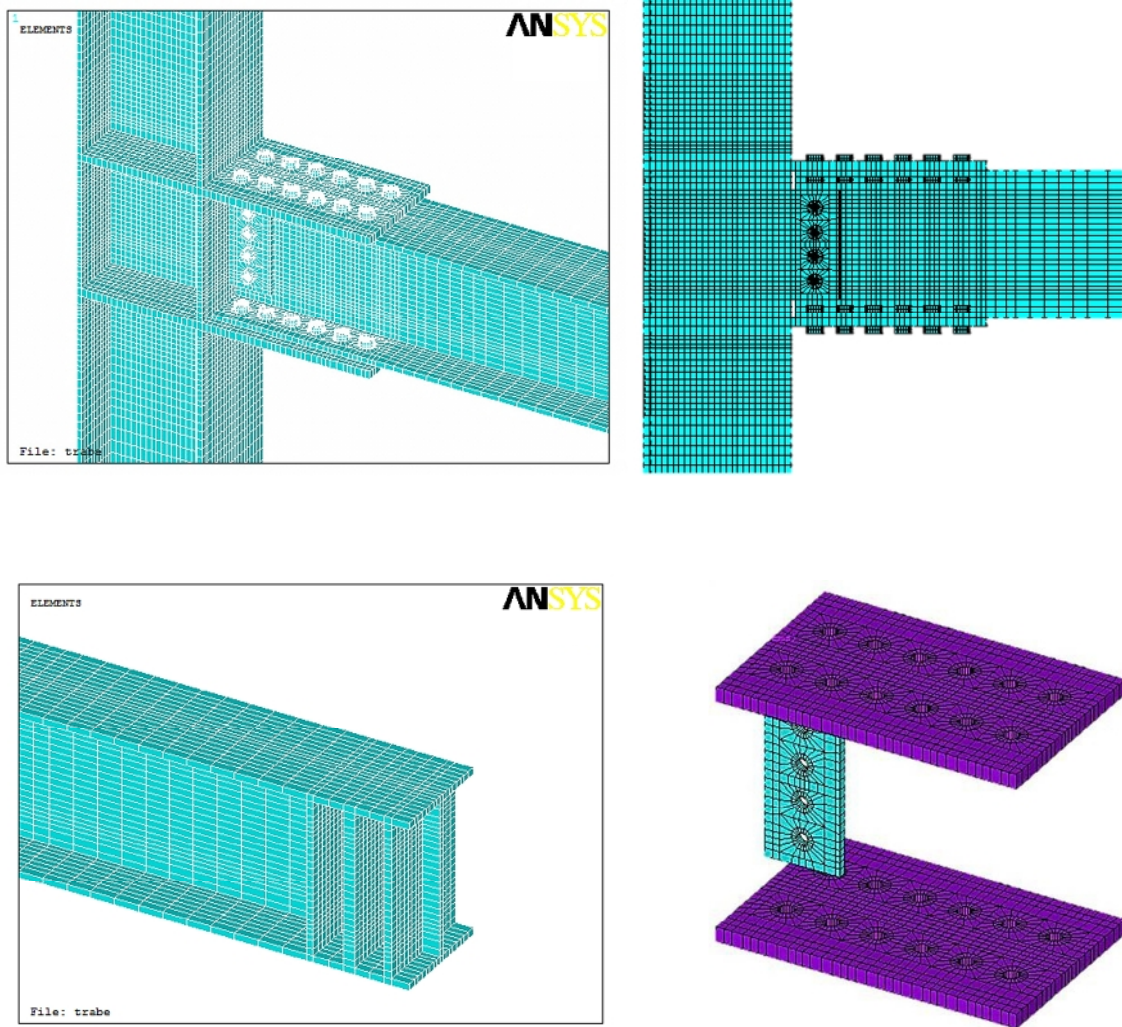


Figura 3.25 Malla del modelo BFP1

Algo muy importante que se debe cuidar al realizar la malla del tipo hexaédrico es la relación de aspecto de los elementos; según documentación de Ansys ésta no debe de exceder de 20, esto limita a hacer elementos con cierta geometría para un buen tamaño de la malla.

En la siguiente tabla (ver tabla 3.4) se registra el número total de elementos que resultaron de cada uno de los modelos.

Tabla 3.4 Número de elementos de todos los modelos

MODELO	NÚMERO DE ELEMENTOS
BFP1	30 131
BFP2	30 695
BFP3	32 826
BFP4	36 742
BFP5	37 282
BFP6	39 433
BFP7	39 115

3.5.2. Tipos de elementos

Debido a que las conexiones están constituidas por elementos sólidos tridimensionales se les tiene que asignar a cada uno de ellos una propiedad de acuerdo con el tipo de material y características del elemento para que sean capaces de reproducir el comportamiento que se quiere modelar, por ejemplo: los elementos pueden ser en dos o tres dimensiones tener propiedades elásticas, plásticas, de materiales hiperelásticos, cada uno de estos factores influyen en el tipo de elemento a utilizar. El programa Ansys cuenta con una gran cantidad de elementos en su biblioteca, y la elección de alguno de ellos dependerá de las características citadas anteriormente.

Se van a utilizar dos tipos de elementos denominados: *SOLID185* y *SOLID186*, que son los adecuados para modelar estructuras en 3D. Estos elementos tienen propiedades de plasticidad (requeridas en este estudio), porque se van a modelar las propiedades inelásticas del acero utilizando su curva completa esfuerzo deformación. Los elementos seleccionados son los recomendados por los trabajos de Shi et al (2008) y Ruiz (2010). A continuación se describen algunas de sus características.

El elemento *SOLID185* (ver fig 3.26) está definido por 8 nodos (un nodo en cada vértice) que tienen 3 grados de libertad en cada nodo: traslaciones en las

direcciones nodales X, Y y Z. El elemento soporta plasticidad, hiperelasticidad, endurecimiento por deformación, fluencia, grandes desplazamientos, y gran capacidad de deformación.

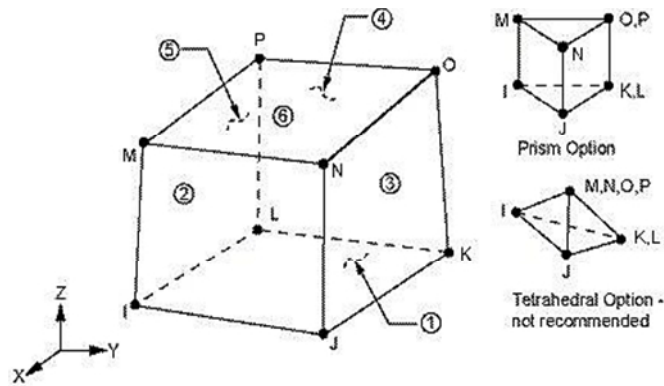


Figura 3.26 Geometría del elemento sólido estructural SOLID185

El elemento *SOLID186* (ver fig 3.27) es un elemento sólido 3-D de alto orden o con nodos intermedios. Este elemento está definido por 20 nodos (un nodo en cada vértice y nodos intermedios) con tres grados de libertad en cada nodo: traslaciones en las direcciones nodales X, Y y Z. El elemento soporta plasticidad, hiperelasticidad, fluencia, endurecimiento por deformación, grandes desplazamientos, gran capacidad de deformación y muestra comportamiento de segundo orden para desplazamientos.

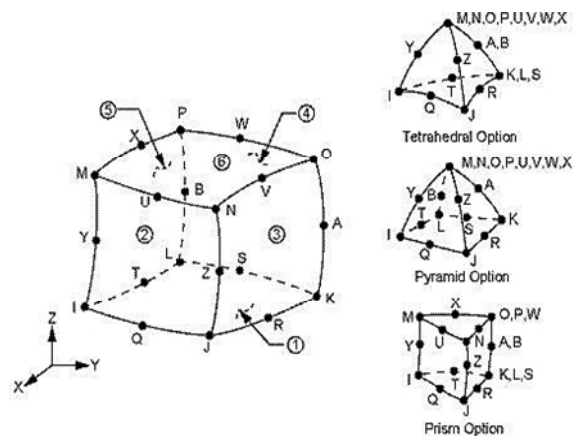


Figura 3.27 Geometría del elemento sólido estructural SOLID186

Se pueden tener varios tipos de elementos en un modelo, siempre y cuando exista compatibilidad entre ellos, como se describe a continuación.

El elemento SOLID185 se empleó para la trabe, columna y atiesadores en todas las conexiones y el SOLID186 para los tornillos y las placas de conexión (ver fig 3.28).

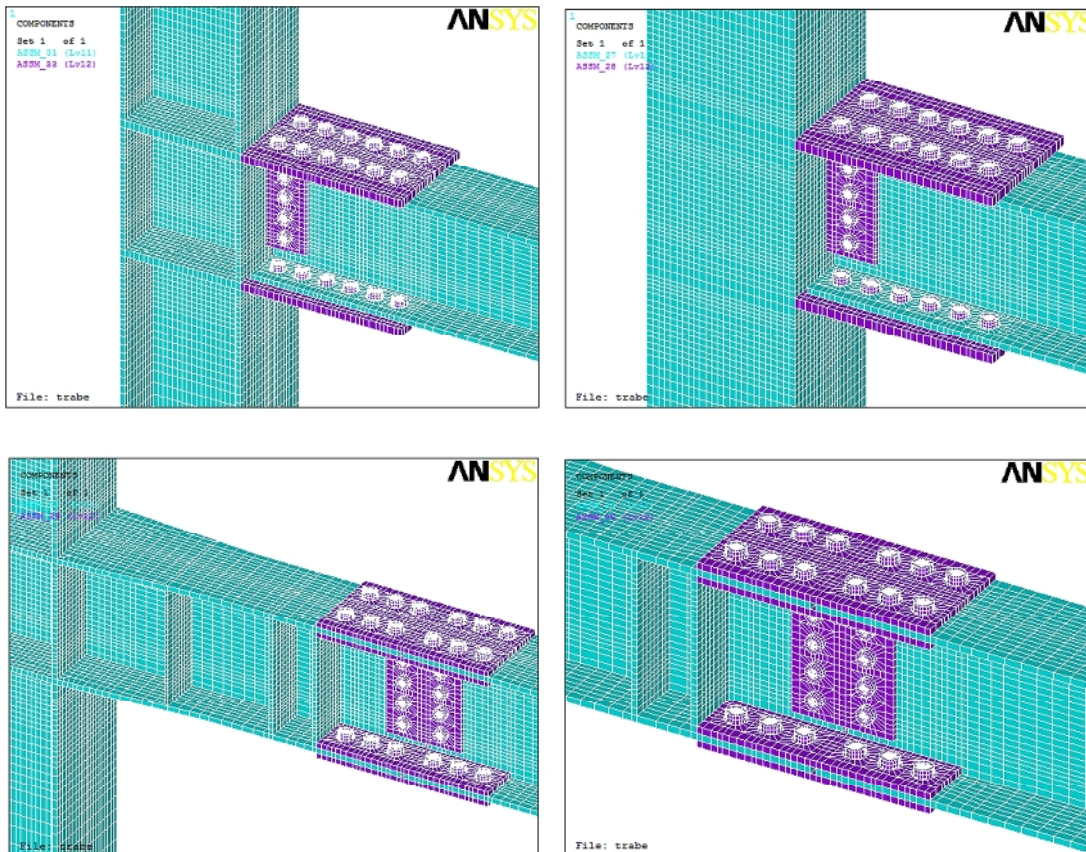


Figura 3.28 Elementos SOLID185 y SOLID186 en los modelos

En la tabla 3.5 se encuentran los valores de número total de nodos y grados de libertad de cada modelo derivado del uso de los elementos *SOLID185* y *186*. Cabe mencionar que entre más elementos de tipo *SOLID186* se tengan, mayores serán los grados de libertad para el modelo, y por lo tanto mayor el número de iteraciones, más tiempo de cálculo, pero mejor exactitud en los resultados. Como se observa en las figuras 3.24, 3.25 y 3.28, la malla en las zonas de interés (definidas con anterioridad) es más pequeña en comparación a otras partes del modelo, para ello se realizó una prueba para determinar la influencia al utilizar el *SOLID186* en toda la zona de contacto entre las placas de conexión, los tornillos y la porción de la trabe que corresponde (ver fig 3.29),

contra un modelo que tenga únicamente el *SOLID186* en la zona de contacto entre las placas de conexión y los tornillos como se muestra en la figura 3.28, los resultados mostraron que no existe una variación significativa entre los modelos (diferencia entre un 2 y 3%). Por lo tanto, se llegó a la conclusión de utilizar elementos *SOLID186* en la parte de contacto entre placas y tornillos y *SOLID185* en las partes restantes de los modelos, también por el ahorro considerable de tiempo de análisis del modelo.

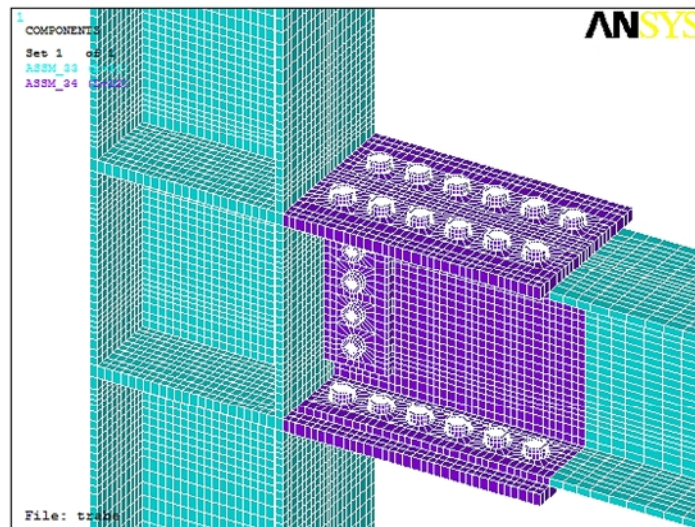


Figura 3.29 Elementos *SOLID186* en toda la zona de unión

Tabla 3.5 Grados de libertad en los modelos

MODELO	NÚMERO DE ELEMENTOS	NÚMERO DE NODOS	GRADOS DE LIBERTAD
BFP1	30 131	395 920	1 187 760
BFP2	30 695	400 432	1 201 296
BFP3	32 826	417 480	1 252 440
BFP4	36 742	459 824	1 379 472
BFP5	37 282	464 144	1 392 432
BFP6	39 433	481 352	1 444 056
BFP7	39 115	478 808	1 436 424

3.5.3. Elementos de contacto

Todos los modelos en la zona de unión (ver fig 3.30) están constituidos por placas de conexión y tornillos; estas partes están en contacto unas con otras; por ejemplo: las placas de conexión están en contacto con el patín y alma de la trabe, los tornillos con la trabe y placa. Para modelar este tipo de uniones, se utilizan en el Ansys los elementos de contacto, que sirven para simular la fricción y penetración que puedan existir entre las partes unidas; su uso depende del comportamiento que se quiera reproducir.

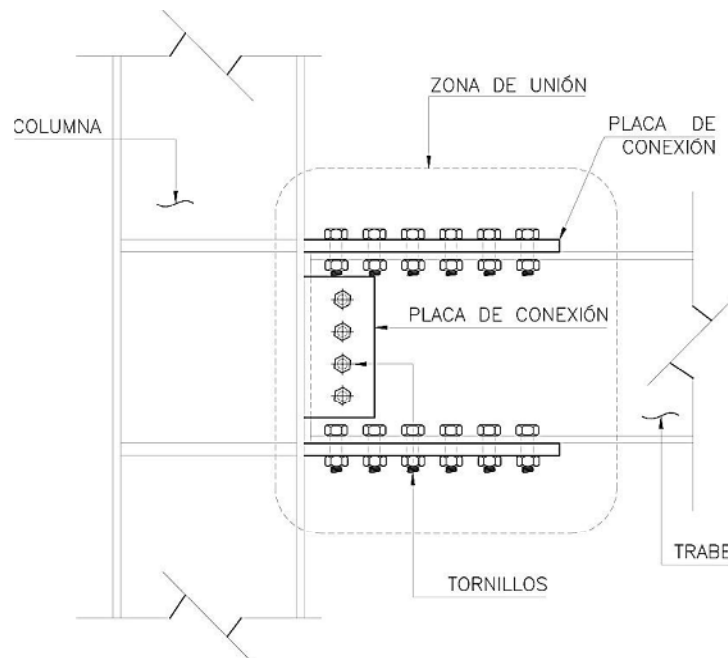


Figura 3.30 Zona de conexión en los modelos

Para modelar un contacto, es preciso establecer el tipo de región o superficie que se encuentra en contacto en la conexión; pueden ser los siguientes de acuerdo con la documentación de Ansys:

- Nodo – Nodo
- Nodo – Superficie
- Superficie – Superficie
- Línea – Línea
- Línea – Superficie

Como en los modelos, los elementos que entran en contacto son áreas entre placas de conexión de patines y alma de la trabe, entonces la modalidad de contacto es superficie a superficie. En la documentación de Ansys se definen dos tipos de superficies:

- Rígido - Flexible
- Flexible – Flexible

Para las conexiones el tipo de superficie es *flexible a flexible* pues se trata del mismo material. El modelo de contacto queda definido entonces como **Superficie – Superficie del tipo Flexible – Flexible**.

Para generar el contacto en el programa se tienen que crear dos superficies, una objetivo (TARGET) y otra contacto (CONTACT). La superficie objetivo es modelada con el elemento *TARGE169* o *TARGE170* y el contacto con *CONTA171*, *CONTA172*, *CONTA173* o *CONTA174*; como la modelación es tridimensional y se van a utilizar propiedades inelásticas en el acero, entonces los elementos compatibles según la documentación de Ansys son: *TARGE170* para la superficie objetivo y para el contacto *CONTA174*. A continuación se explican algunas características de los elementos por utilizar.

El elemento de contacto *CONTA174* (ver fig 3.31) es utilizado para representar el deslizamiento y contacto entre superficies objetivo en 3D y superficies deformables. Este elemento se localiza en superficies de sólidos 3D o elementos “shell” con nodos intermedios. Tiene las mismas características geométricas de la cara del sólido, o “shell”, con el cual es conectado. Este elemento está definido por 8 nodos, y se puede reducir a 6, dependiendo de la forma del sólido o “shell” subyacente.

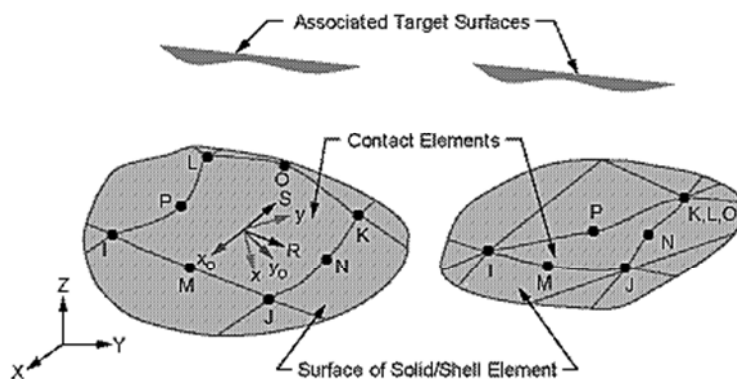


Figura 3.31 Geometría del elemento CONTA174

El elemento TARGE170 se utiliza para representar diversas superficies objetivo tridimensionales que se encuentran asociadas a un elemento de contacto; en la figura 3.32 se muestra su geometría.

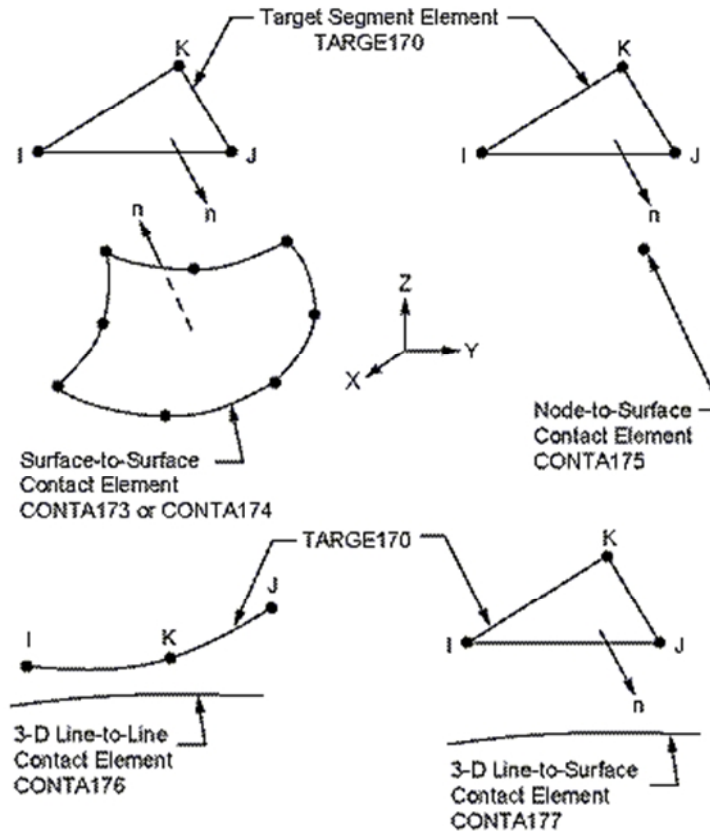


Figura 3.32 Geometría del elemento TARGE170

Para el contacto del tipo flexible-flexible, la elección de cuál superficie se designa como objetivo y cuál de contacto es difícil; vale mucho la experiencia, ya que si se eligen superficies al azar, o la malla no es adecuada, puede ocurrir que exista mucha penetración entre las placas o que la solución no converja, que el programa haga demasiadas iteraciones y se pueda afectar la precisión de los resultados. Para que no suceda lo anterior en el manual de Ansys se emiten las siguientes recomendaciones para escoger estas superficies:

- Si una superficie tiene una malla fina y la otra más gruesa, la malla fina será la superficie de contacto.
- Si una superficie es más rígida que otra la menos rígida será la superficie de contacto.
- Si el tamaño de una superficie es más grande que otra la mayor será la superficie objetivo.

Si se han aplicado las recomendaciones anteriores y se tiene duda acerca de que superficie designar, se puede utilizar el contacto simétrico. La tecnología de CONTACTO SIMÉTRICO se refiere a asignar cada superficie para ser ambas un objetivo y contacto, es decir se van a generar dos pares de contacto entre las superficies que se encuentran en contacto. Obviamente, el contacto simétrico es menos eficiente que el asimétrico; sin embargo, muchos análisis requieren de su uso cuando se tienen situaciones específicas como cuando la distinción entre el contacto y objetivo no es clara o ambas superficies tienen mallas muy gruesas. El CONTACTO ASIMÉTRICO es aquel que tiene todos los elementos de contacto en una superficie y todos los elementos objetivos en la otra superficie. Esta es la forma más eficiente de modelar contactos superficie a superficie. Por las razones antes expuestas en trabajo se emplea el CONTACTO ASIMÉTRICO.

Un aspecto importante de los contactos es establecer su comportamiento de acuerdo con lo que se quiere simular; se tiene que elegir el adecuado para las características intrínsecas del modelo, es decir, se debe asignar el comportamiento a cada uno de los contactos que se encuentren en el modelo de acuerdo con los que proporciona ANSYS y son los siguientes:

- a) Estándar (standard): modelos de contacto unilateral estándar; es decir, la presión normal es igual a cero si se produce una separación.
- b) Rugoso (rough): modelos de rozamiento perfecto, donde no hay deslizamiento. Este caso corresponde a un coeficiente de fricción infinito y se ignora la propiedad del material MU.
- c) No separación (no separation): modelos sin separación del contacto en el que están vinculados el objetivo y la superficie de contacto (aunque se permite el deslizamiento para el resto del análisis, una vez establecido el contacto).
- d) Unido (bonded): modelos de contacto “unido”, en la que las superficies contacto y objetivo se unen en todas las direcciones (una vez establecido el contacto) para el resto del análisis.

Se identifican dos categorías de superficies de contacto en el modelo; la primera es de **placa a placa de conexión** (ver fig 3.33), que se presenta en las placas de conexión entre patines y trabe, y placas entre alma y trabe; la segunda es el contacto que existe entre los **tornillos y las placas** que se produce en los tornillos de los patines, placas y patín de trabe y, tornillos del alma, placas de conexión y alma de trabe (ver fig 3.34).

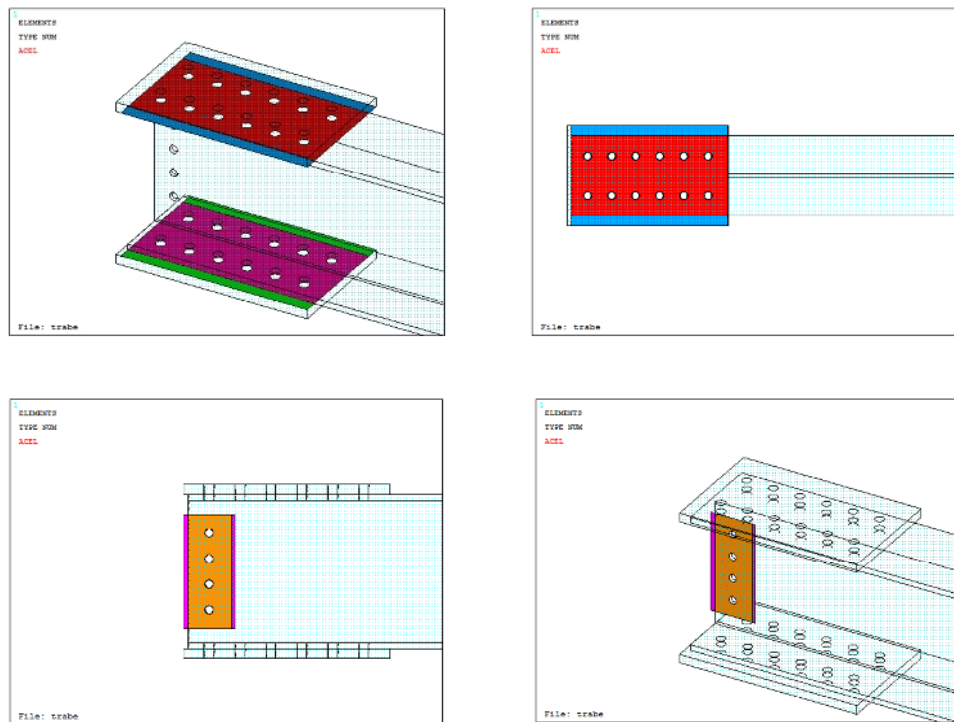


Figura 3.33 Superficies de contacto entre placas, comportamiento estándar

Para el contacto entre placas y placas se utilizó el comportamiento **estándar** y para los tornillos con placas el comportamiento de **no separación** (los tornillos no se separan de las placas), pues se considera que el tornillo es un cuerpo que se encuentra libre, lo único que lo restringe son las placas que une entonces tiene un comportamiento de la superficie diferente que la primera categoría. Se utilizan estos comportamientos porque como se explica en los párrafos siguientes son compatibles con los algoritmos de contacto que ANSYS tiene, y de la buena elección de éstos dependerá la convergencia o no convergencia de la solución, además de ser las recomendadas en Ruiz (2010).

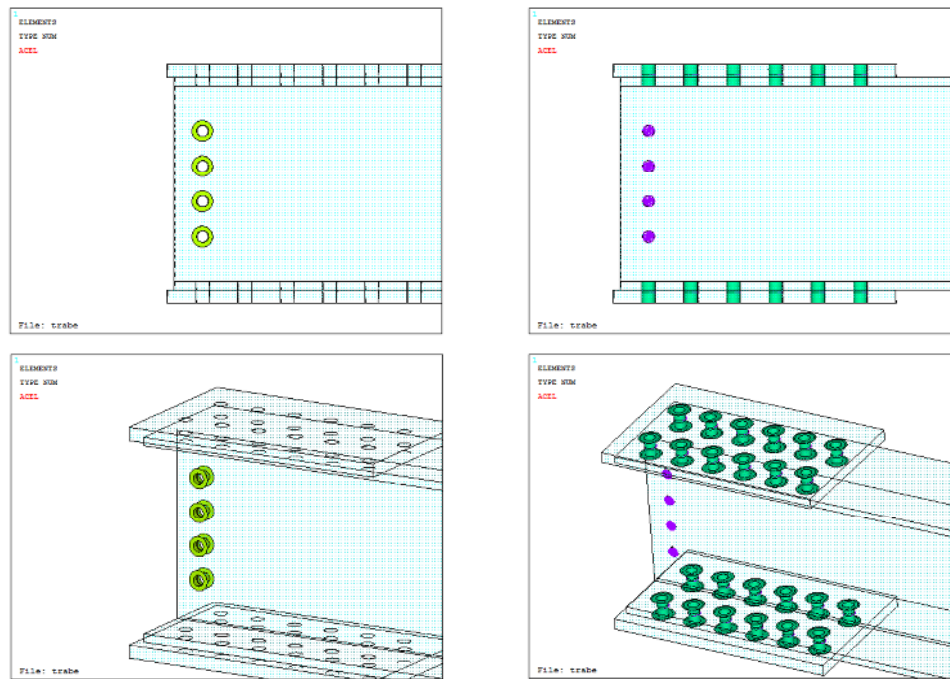


Figura 3.34 Superficies de contacto tornillos, comportamiento no separación

Los algoritmos de contacto que Ansys ofrece son los siguientes:

- a) Método de Lagrange Aumentado
- b) Método de Penalización
- c) Algoritmo MPC
- d) Método de Lagrange y penalización
- e) Método de Lagrange

Para la elección del método a adoptar hay que considerar que debe haber compatibilidad entre éste y el comportamiento del contacto, porque algunos métodos son más sensibles que otros y trabajan mejor con ciertos tipos de comportamientos. En este trabajo se escogieron dos algoritmos: el *Método de Penalización* y el *Método de Lagrange Aumentado*, que son los más apropiados para estos comportamientos, según Ruiz (2010) ayudan a que la convergencia en la solución del modelo sea rápida.

En los métodos de Penalización y Lagrange, se tienen que definir las rigideces de contacto normal y tangencial. La cantidad de penetración entre el contacto y superficies objetivo depende de la rigidez normal. La cantidad de deslizamiento depende de la rigidez tangencial. Un valor de rigidez muy grande disminuye la penetración o deslizamiento, pero puede conducir a una mala condición de la

matriz de rigidez y a dificultades de convergencia. Valores de rigidez bajos llevan a una cierta cantidad de penetración o deslizamiento y producen una solución no tan exacta. Idealmente, se necesita una rigidez alta para que la penetración sea pequeña y aceptable, pero también una baja rigidez para que el modelo tenga un buen comportamiento en términos de convergencia.

Existen varios parámetros de los elementos de contacto que se pueden configurar para obtener el comportamiento que se quiere modelar. Se configuraron dos parámetros importantes que son sensibles para los algoritmos utilizados; esto, para tener un mejor comportamiento, reducir la penetración y disminuir el número de iteraciones.

- a) FKN (Normal contact stiffness); este factor define la rigidez normal de contacto y su valor por default es de 1; el valor según Ansys está entre 0.1 a 1, entre menor el valor muy poca penetración y rápida convergencia. El primer valor utilizado fue de 0.1, pero existía demasiada penetración y no había convergencia, cuando se cambió el valor a 1, la penetración fue admisible y la convergencia muy rápida por lo cual se optó por este valor.
- b) FTOLN (Allowable Penetration Tolerance), es un factor basado en el espesor del elemento, el cual es usado para calcular la penetración admisible. El valor preestablecido es 1, y aumentarlo o reducirlo no afecta mucho en los resultados.

En resumen, todas las variables explicadas con anterioridad se presentan en la tabla 3.6, cada una con la configuración para que exista una convergencia rápida en los modelos.

Tabla 3.6 Parámetros de los elementos de contacto

Tipo de contacto	Comportamiento	Algoritmo	FKN	FTOLN	Fricción
Placa-placa (Flexible – flexible)	Estándar	Metodo de Penalización	0.1	1	0.44
Tornillos-placa (Flexible – flexible)	No Separación	Método de Lagrange Aumentado	0.1	1	

3.5.4. Modelo del tornillo

Los tornillos necesitan una malla especial porque se le tiene que dar una pretensión, por lo tanto la malla tiene que pasar justo al centro del tornillo para que se pueda generar una superficie de pretensión. La razón de la malla especial está relacionada con los hexaedros que integran la malla, si se utilizará una hecha por el programa entonces no es prescindible hacer que ésta pase por el centro del tornillo porque en lugar de crear una superficie de pretensión el programa en forma automática crea una malla de pretensión en la que está inmersa la superficie. Para crearla en el programa Ansys se utiliza el comando PSMESH, este define la sección y genera los elementos de pretensión; en forma automática se corta el tornillo en dos partes y se insertan los elementos de pretensión (ver fig 3.35).

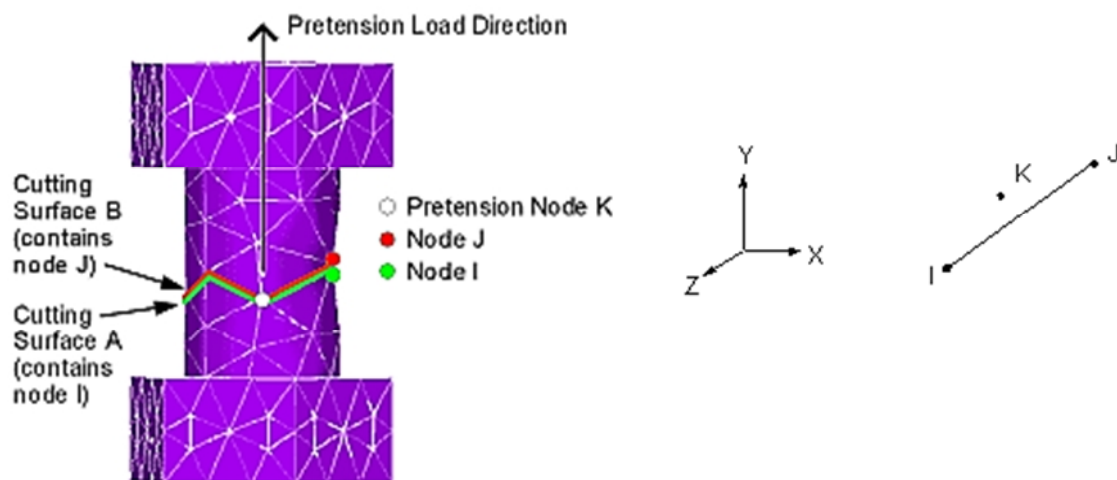


Figura 3.35 Definición de pretensión en Ansys

La dirección de aplicación de la carga en el tornillo es normal a la superficie de pretensión como se observa en la figura 3.35. Un nodo de pretensión (K) es usado como control y monitor de las cargas totales de tensión. Todos los elementos de pretensión en una sección específica deben usar la misma sección, y deben tener el mismo nodo de pretensión K. El nodo K es la tercera posición para la definición de elementos de pretensión.

Por lo tanto la malla para los tornillos de los patines queda como se muestra en la figura 3.36, con un total de 432 elementos, 8 640 nodos, 25 920 grados de libertad, y para los tornillos del alma (ver fig 3.37) también se tienen 432 elementos. Se tuvo mucho cuidado con la malla porque si no, la superficie de pretensión no llega a generar; el tipo de elementos con que se modelaron es con

SOLID186 de 20 nodos, de acuerdo con las recomendaciones del estudio de Ruiz (2010).

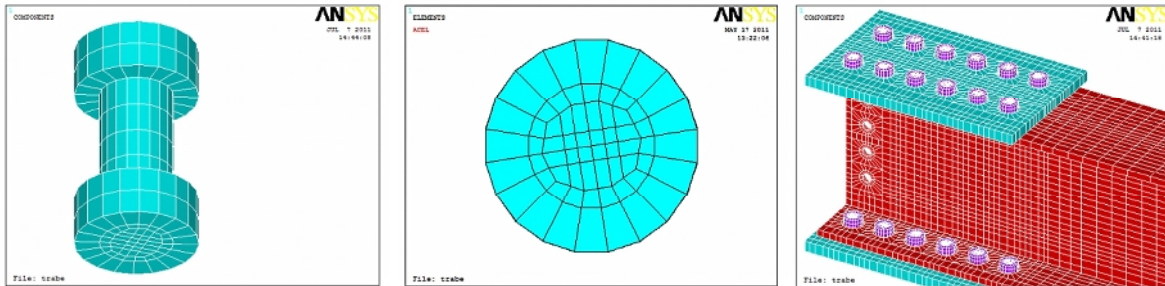


Figura 3.36 Malla tornillos de patines de diámetro 3/4"

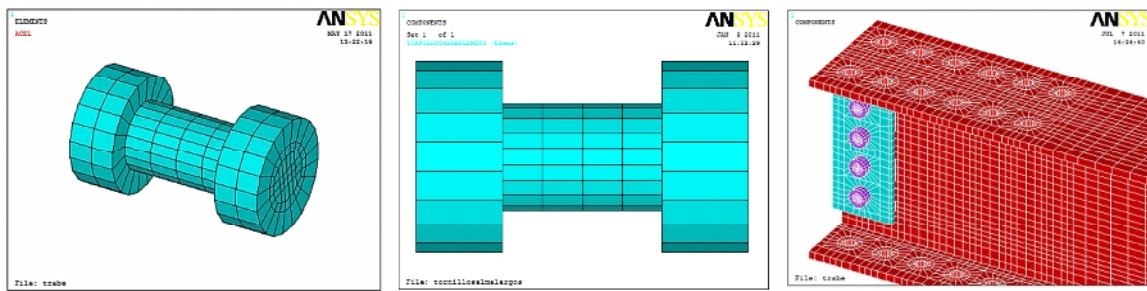


Figura 3.37 Malla de los tornillos del alma, diámetro 5/8"

La pretensión es automática al momento de generarse la sección, solo hay que especificar la carga. El valor de la carga aplicada corresponde al recomendado por las NTC para tornillos de alta resistencia, para el caso de los tornillos de los patines de diámetro 3/4" el valor es de 12 700 Kg y los tornillos del alma de 5/8" es de 8600 Kg.

3.6. Propiedades de los materiales

El acero utilizado para las placas de conexión, atiesadores, trabe, tornillos y columna es el que se empleó en el trabajo de Ruiz (2010) y tiene las siguientes características:

- Para las placas de conexión, atiesadores, trabes y columna es A-36 se especificó un esfuerzo de fluencia de $F_y = 2,530 \text{ kg/cm}^2$ y un esfuerzo a la

falla $F_u = 4,080 \text{ kg/cm}^2$, un módulo de elasticidad, $E = 2,050,000 \text{ kg/cm}^2$ y una relación de Poisson de 0.3.

- Para los tornillos de alta resistencia A-325 en alma y patines, la resistencia a la fluencia es de $F_y = 6,330 \text{ Kg/cm}^2$ y el esfuerzo a la ruptura de $8,440 \text{ Kg/cm}^2$ y el módulo de elasticidad $E = 2,110,000 \text{ Kg/cm}^2$.

3.7. Modelado del material

La curva esfuerzo-deformación del acero, en el Ansys se simula con una curva multilineal denominada de endurecimiento isotrópico multilineal (*MISO Multilinear Isotropic Hardening*). La curva MISO es la recomendada en Ruiz (2010) cuando se efectúa un análisis bajo carga monotónica, por lo tanto se utilizará esta curva para hacer únicamente los análisis monótonos.

Para los análisis cíclicos se debe utilizar otro tipo de curva, según Ruiz (2010) es la denominada de endurecimiento cinemático multilineal (*KINH Multilinear Kinematic Hardening*) debido a que ésta curva toma en cuenta el efecto Baushinger que se presenta cuando se aplican cargas reversibles o cíclicas.

En las figuras 3.38 y 3.39 se muestran las curvas esfuerzo- deformación de los materiales modelados en Ansys.

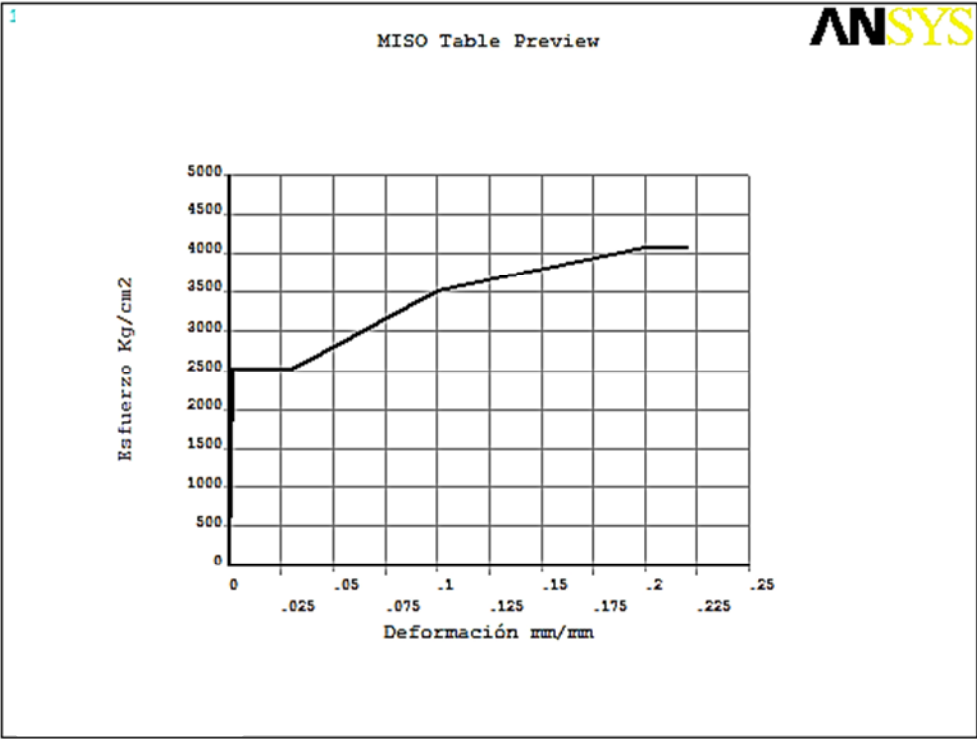


Figura 3.38 Curva esfuerzo deformación Acero A-36

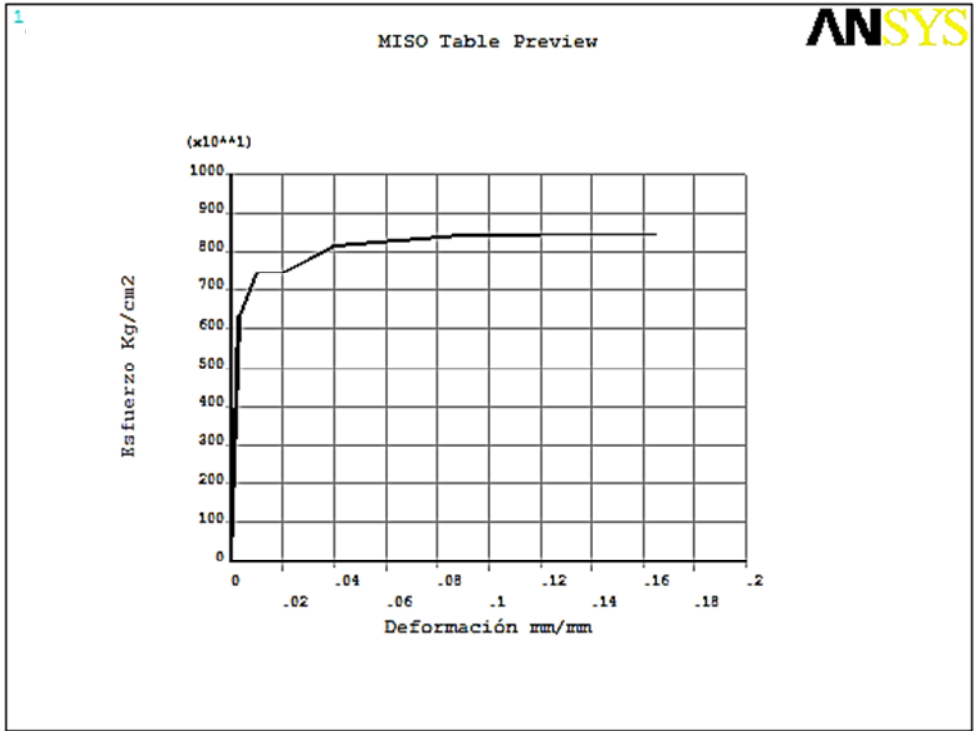


Figura 3.39 Curva esfuerzo deformación para el Acero A-325 de los tornillos

3.8. Cargas

El comportamiento de las conexiones va a ser estudiado para dos tipos de carga:

- Carga monótona
- Carga cíclica

El protocolo de carga que se sigue es el definido en Ruiz (2010) aplicando los mismos incrementos de tiempo y magnitud de carga. Al cual se le anexan más intervalos de carga debido a que algunas conexiones soportan más que los considerados en ese estudio.

El protocolo de carga se refiere a los intervalos o pasos de carga aplicados al modelo hasta llegar a la carga máxima soportada por la conexión o cuando falla alguno de sus elementos.

La carga se aplica en el extremo de la trabe en el área del atiesador intermedio como se muestra en la figura 3.40, esto para que no exista pandeo local en el alma o patín de la trabe. La carga tanto para los análisis monótonos como para los cíclicos se va a aplicar gradualmente, según los protocolos mostrados en las tablas 3.6 y 3.7.

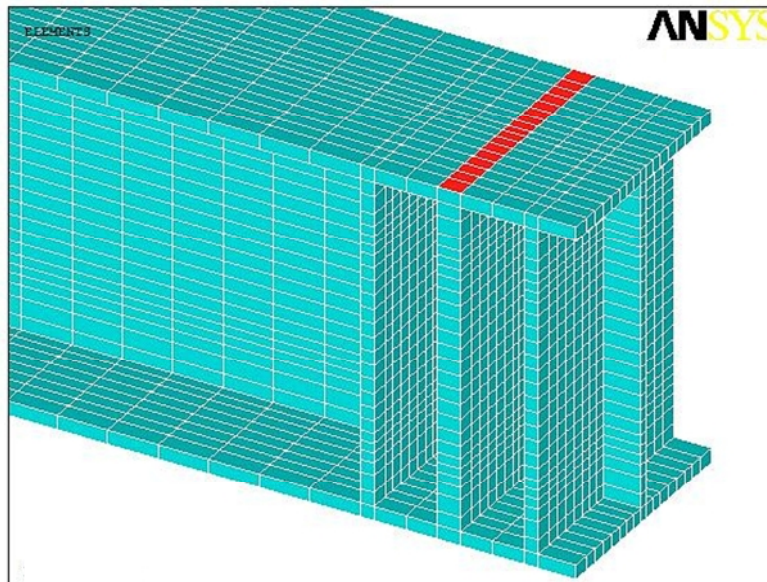


Figura 3.40 Área de aplicación de las cargas

3.8.1. Carga monótona

La secuencia de aplicación de carga es por pasos o intervalos; el número de pasos varia para cada modelo, dado que cada uno resiste una carga diferente. Los intervalos se definieron como sigue: en el primer paso se aplica la pretensión a los tornillos y el peso propio, que corresponde a un tiempo final de aplicación de dos segundos dividido en cinco subpasos de 0.4 segundos, es decir, la carga se va aplicando en facciones de 1/5 hasta llegar a la magnitud total. Después de aplicado este paso se sigue con las cargas en la viga, el procedimiento es el mismo, lo único que varía es la cantidad de subpasos. Para cada carga se utilizan un mínimo de 5 y máximo de 10. El número de subpasos depende de la exactitud que se requiera en los resultados, sin embargo, se debe tener en cuenta que entre mayor número de pasos mayor es el tiempo computacional y mejor la precisión en los resultados y, a menor número de pasos menor tiempo pero se puede llegar a no convergencia en la solución de algún subpaso y a resultados no tan confiables. En la tabla 3.7 y 3.8 se muestran las secuencias de carga aplicadas para los ensayos monótonos.

Tabla 3.7 Protocolo de carga monótona para las conexiones BFP1, BFP2 y BFP3

Modelo	Pasos de carga	Subpasos		Carga		Tiempo	Momento	
		mín	máx	Kg/cm ²	Puntual	s	Ton-m	kN-m
BFP1	1	5		Pretensión v Po.Po.		2		
	2	5	10	75	3000	4	3.6	35.28
	3	5	10	150	6000	6	7.2	70.56
	4	5	10	225	9000	8	10.8	105.84
	5	5	10	300	12000	10	14.4	141.12
	6	5	10	375	15000	12	18.0	176.40
	7	5	10	450	18000	14	21.6	211.68
	8	5	10	500	20000	15	24.0	235.20
	9	5	10	525	21000	16	25.2	246.96
	10	5	10	550	22000	17	26.4	258.72
	11	5	10	575	23000	18	27.6	270.48
	12	5	10	600	24000	19	28.8	282.24
	13	5	10	625	25000	20	30.0	294.00
	14	5	10	650	26000	21	31.2	305.76
	15	5	10	675	27000	22	32.4	317.52
BFP3	16	5	10	700	28000	23	33.6	329.28
BFP2	17	5	10	750	30000	24	36.0	352.80

Tabla 3.8 Protocolo de carga monótona para las conexiones BFP4, BFP5, BFP6 y BFP7.

Modelo	Pasos de carga	Subpasos		Carga		Tiempo	Momento	
		mín	máx	Kg/cm ²	Puntual	s	Ton-m	kN-m
BFP7	1	5		Pretensión y Po.Po.		2		
	2	5	10	95	3800	4	6.19	60.66
	3	5	10	140	5600	6	9.13	89.47
	4	5	10	185	7400	8	12.06	118.19
	5	5	10	235	9400	10	15.32	150.14
	6	5	10	280	11200	12	18.26	178.95
	7	5	10	330	13200	14	21.52	210.90
	8	5	10	350	14000	15	22.8	223.44
	9	5	10	375	15000	16	24.45	239.61
BFP4, BFP5, BFP6	10	5	10	400	16000	17	26.08	255.58

3.8.2. Carga cíclica

Este tipo de carga se aplica por ciclos (ver fig 3.41), que se forman cuando se aplica una carga o desplazamiento de cierta magnitud hacia abajo o en la dirección que actúa la gravedad (-) y después se aplica la misma carga en la dirección opuesta (+). El número de ciclos promedio para los modelos es de 12.

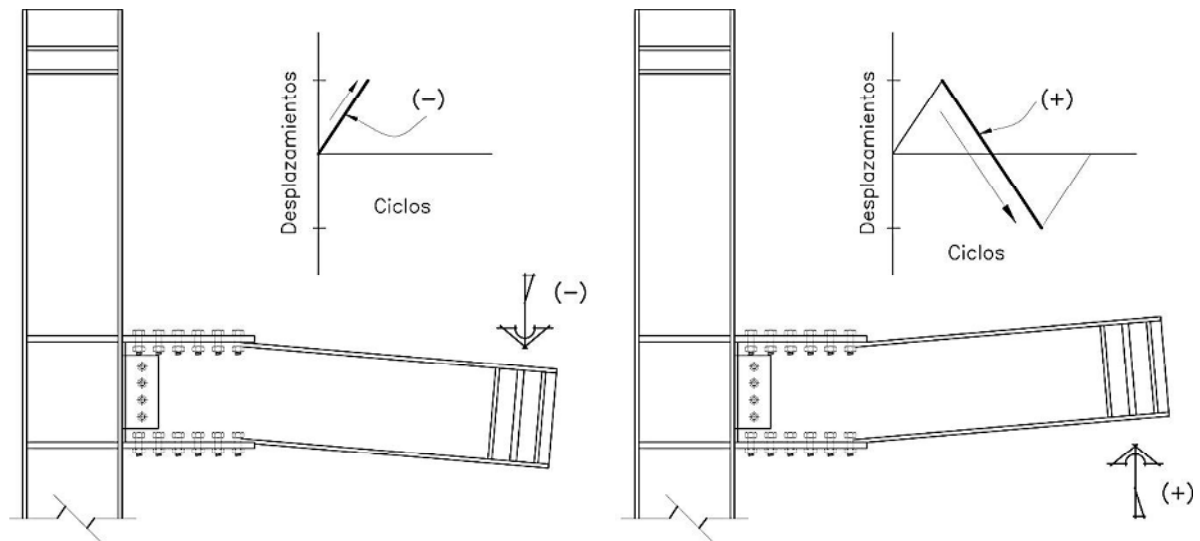


Figura 3.41 Definición de un ciclo de carga

Los modelos analizados con carga cíclica son los siguientes el BFP1, BFP2, BFP3, BFP4 y BFP7. En la figura 3.42 se muestra una gráfica tipo de esta carga para el modelo BFP1.

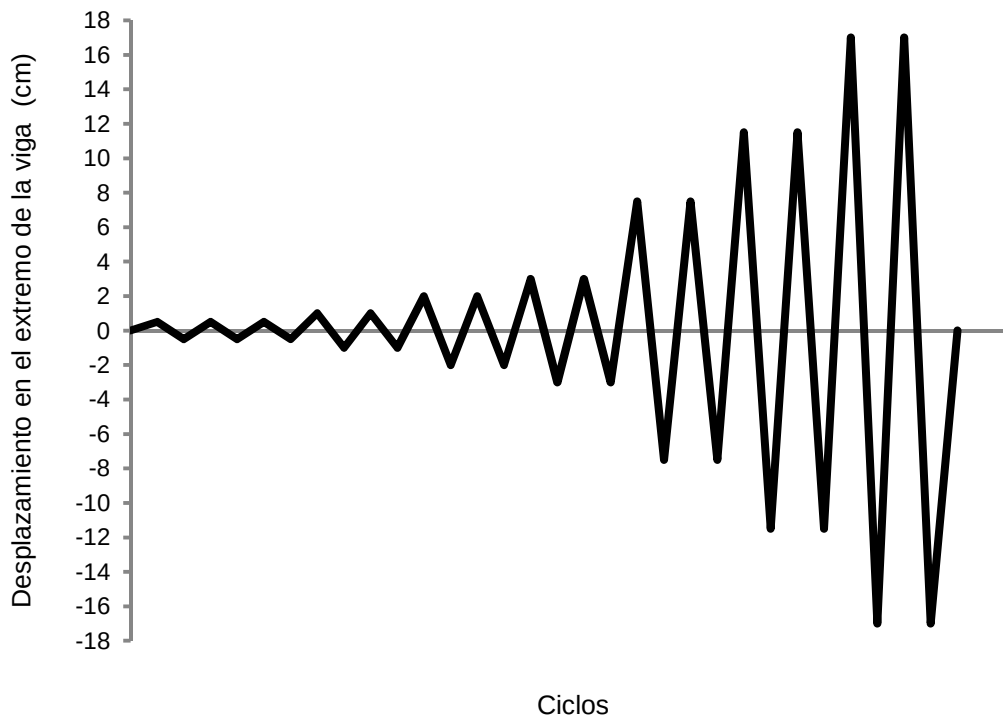


Figura 3.42 Ciclos para el modelo BFP1

A continuación, en la figura 3.43 se encuentran tablas que proporcionan el número de ciclos con su respectiva carga para cada modelo analizado. En el primer ciclo de carga se incluye la pretensión en los tornillos y el peso propio, cada ciclo está compuesto por 40 pasos de carga (20 para la carga y 20 para la descarga).

BFP1			
CICLOS	DESPL cm	C PUNTUAL Ton	C DIST Kg/cm ²
3	0.50	8.40	210.00
2	1.00	13.20	330.00
2	2.00	17.00	425.00
2	3.00	19.10	477.50
2	7.50	20.20	505.00
2	11.50	21.10	527.50
2	17.00	22.50	562.50

BFP2			
CICLOS	DESPL cm	C PUNTUAL Ton	C DIST Kg/cm ²
3	0.50	8.60	215.00
3	1.00	17.00	425.00
2	1.50	24.20	605.00
2	3.50	26.50	662.50
2	5.00	27.30	682.50
2	7.50	28.20	705.00

BFP3			
CICLOS	DESPL cm	C PUNTUAL Ton	C DIST Kg/cm ²
3	0.50	4.40	110.00
3	1.00	8.90	222.50
2	2.00	15.00	375.00
2	3.00	15.25	381.25
2	4.50	15.43	385.75

BFP4			
CICLOS	DESPL cm	C PUNTUAL Ton	C DIST Kg/cm ²
2	0.50	3.25	81.25
2	1.00	6.80	170.00
2	1.50	8.20	205.00
2	2.00	9.10	227.50
2	3.00	10.50	262.50
2	4.50	12.20	305.00
2	6.00	12.60	315.00
1	10.00	13.00	325.00

BFP7			
CICLOS	DESPL cm	C PUNTUAL Ton	C DIST Kg/cm ²
3	0.50	3.90	97.50
2	1.00	8.00	200.00
2	1.50	9.80	245.00
2	2.50	11.00	275.00
2	4.00	11.60	290.00
2	7.00	12.50	312.50

Figura 3.43 Tablas de desplazamientos y cargas asociadas para los análisis cíclicos

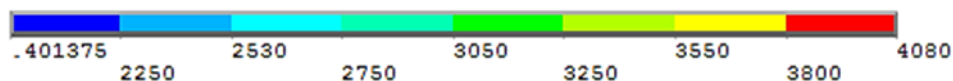
Capítulo 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

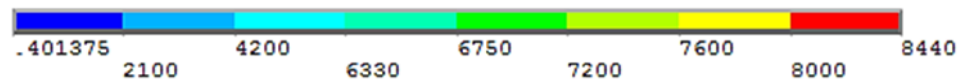
Para estudiar el comportamiento de las conexiones de acuerdo con los dos tipos de carga a que fueron sometidas, se obtienen curvas carga contra desplazamiento en el extremo de la trabe y momento contra rotación de la zona de panel, en las que se pueden estudiar parámetros como rigidez y ductilidad. Además se identifican patrones y formas de falla mediante isovalores de esfuerzos por Von Mises para las distintas partes de las conexiones.

Las escalas de isovalores de esfuerzos para los análisis monótonos y cíclicos son las siguientes:

Para el acero A-36:



Para el acero A-325:



4.1. Comportamiento ante carga monótona

En cada modelo se presenta su correspondiente curva carga-desplazamiento y momento-rotación. Los parámetros más importantes de éstas curvas son la carga (P) y el desplazamiento obtenido (Δ), así como, el momento (M) que se produce debido a la aplicación de la carga y su correspondiente rotación (Φ), por lo tanto, en la figura 4.1 se presenta la forma en que se obtiene el desplazamiento y el ángulo de rotación en los modelos para generar las curvas citadas.

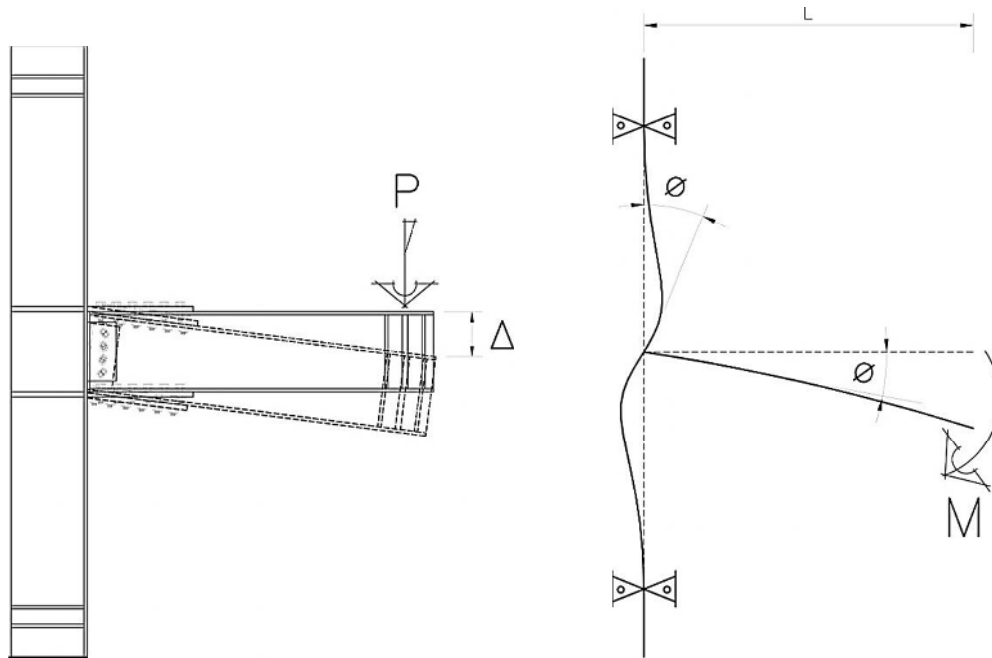


Figura 4.1 De izquierda a derecha, desplazamiento y rotación de los modelos

En las figuras 4.1 y 4.2 se muestran las curvas carga-desplazamiento y momento-rotación para la conexión BFP1. En las curvas momento-rotación se observan líneas horizontales que representan parámetros de resistencia de algunos componentes de la conexión y se muestran en la tabla 4.1. Un modelo se dice que falla cuando se alcanzan los esfuerzos máximos registrados en las escalas de isovalores de esfuerzos, definidos con anterioridad para cada material.

Tabla 4.1 Resistencia de trabe y columna en los modelos

Línea	Parámetro	Etiqueta
1	Momento plástico teórico de la viga	Mpv
2	Momento por deformación plástica en la viga	Mdb
3	Momento por fractura en la sección neta de las placas de los patines	Mfp
4	Momento por fluencia en la zona de panel	Myp
5	Momento por fractura en la sección neta del patín de la viga	Myf
6	Momento por falla de cortante en los tornillos de los patines	Myb
7	Momento plástico teórico de la columna	Mpc
8	Momento plástico teórico para el muñón	Mpm

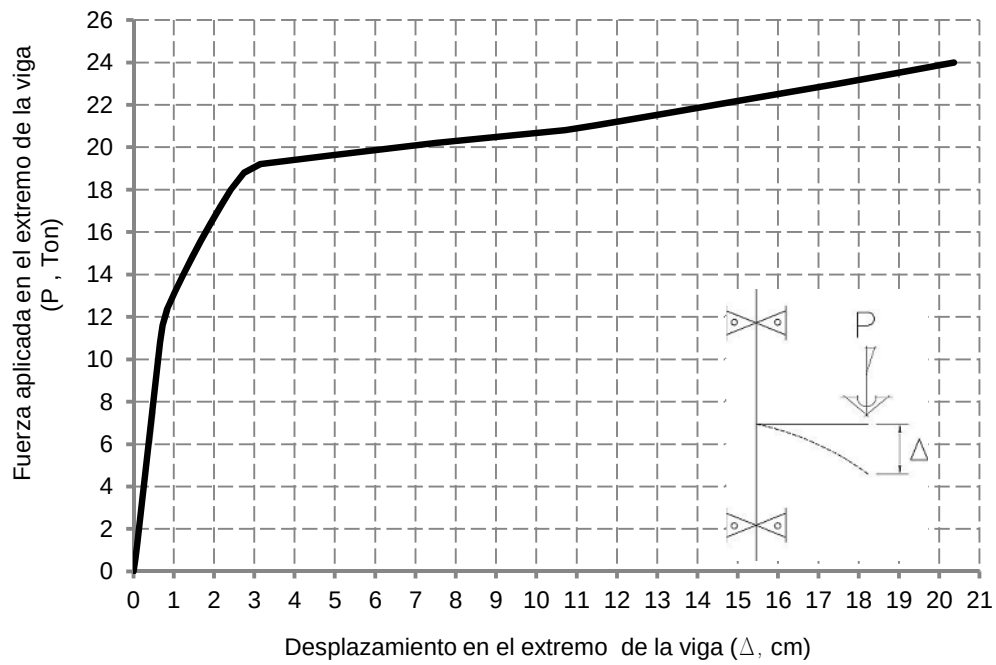


Figura 4.2 Curva carga-desplazamiento para el modelo BFP1

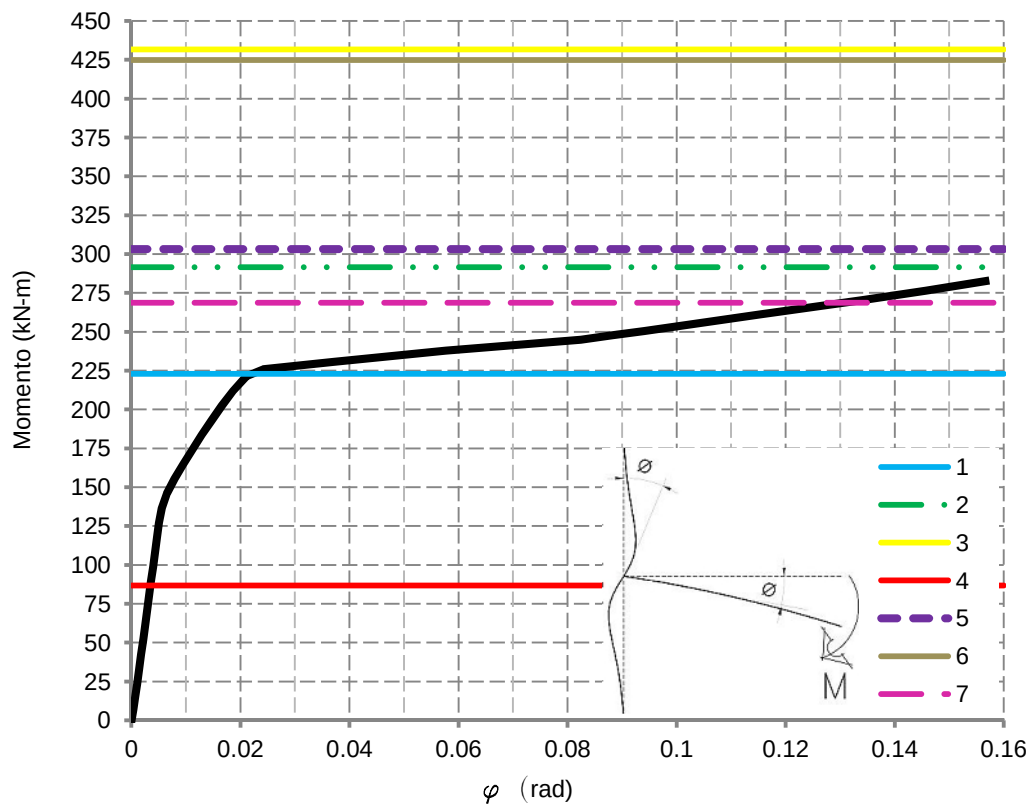


Figura 4.3 Curva momento-rotación para el modelo BFP1

El modelo BFP1 (ver figs 4.2 a 4.5) falló a causa de la plastificación de la zona de panel y el pandeo de los patines de la columna. En la figura 4.5a se observa la gran concentración de esfuerzos que sufre esta zona debido a las fuerzas de compresión y tensión que las placas de conexión de los patines transmiten a la columna, siendo mayores en la esquina inferior izquierda. En la gráfica fuerza contra desplazamiento se distingue la gran área de plastificación que se tiene en relación con la poca rigidez de esta zona, por lo tanto la viga tiene grandes desplazamientos debido a la disminución de rigidez del panel. Para tener un parámetro de resistencia, en la gráfica momento-rotación (ver fig 4.3) se definen los momentos plásticos teóricos de la viga y columna. Como se observa, la trabe no tiene grandes esfuerzos plásticos (esfuerzos según la escala de isovalores definida), permaneciendo todos los esfuerzos elásticos (ver fig 4.5b). Las placas de los patines y del alma no tienen esfuerzos considerables, lo cual significa que tienen una rigidez adecuada, pues en la curva momento rotación la línea 3 que representa su resistencia no es alcanzada. En el tornillo que se señala en la figura 4.5b se tiene una ligera concentración de esfuerzos, esto por causa de que el patín superior de la trabe lo presiona hacia abajo por la flexión, ya que al ser esta zona más rígida, la trabe se deforma ligeramente en el extremo donde termina la placa de conexión de los patines.

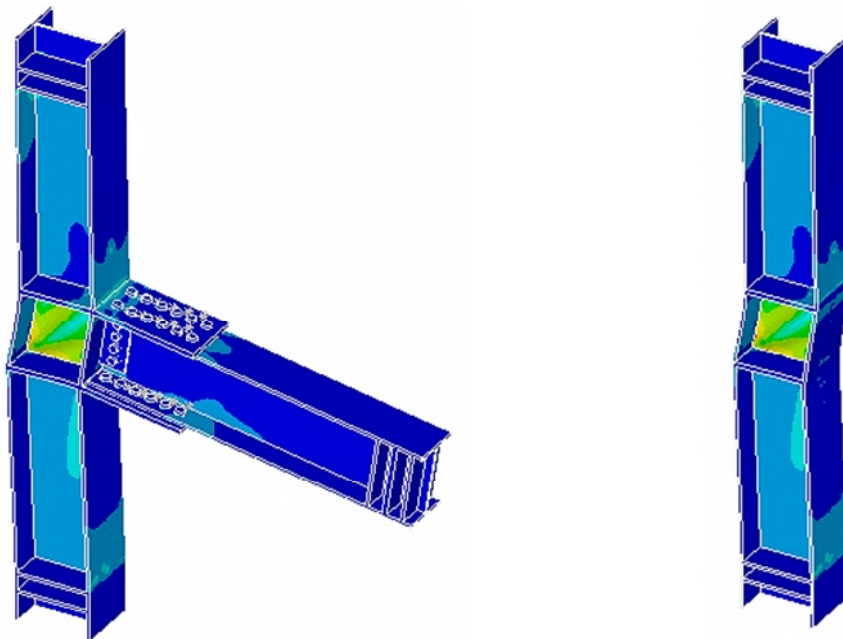


Figura 4.4 Vista general de esfuerzos en conexión y columna del modelo BFP1

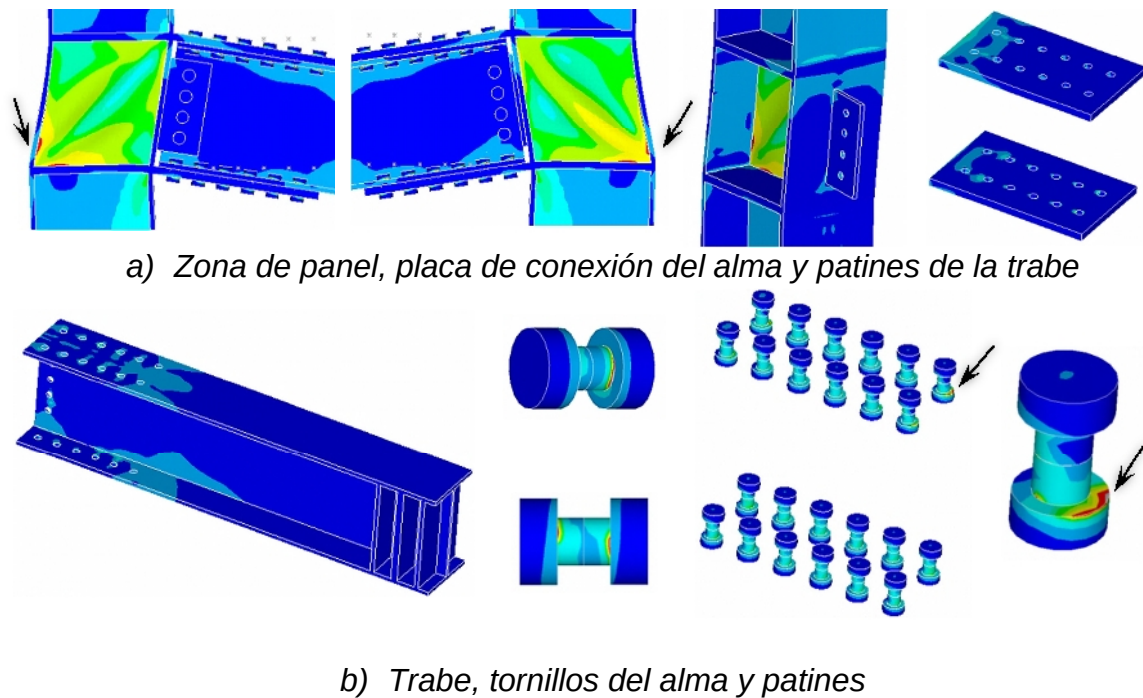
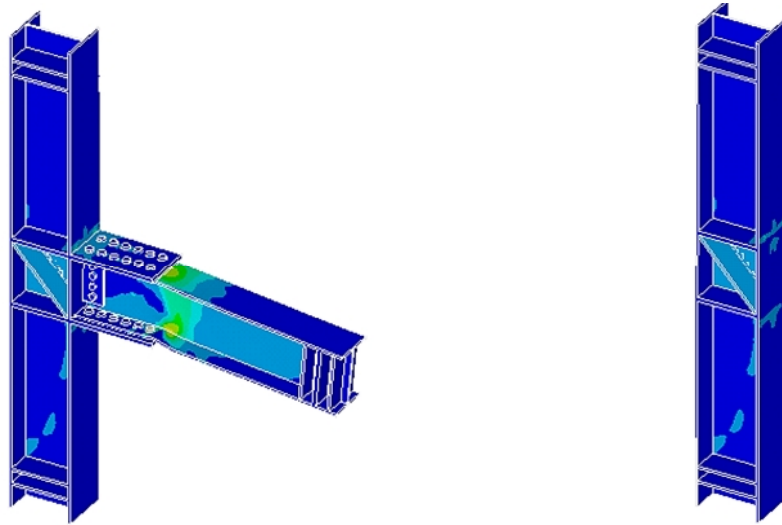
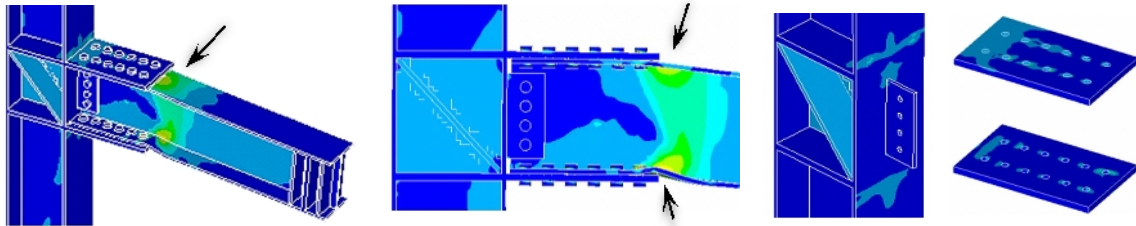


Figura 4.5 Esfuerzos en el modelo BFP1

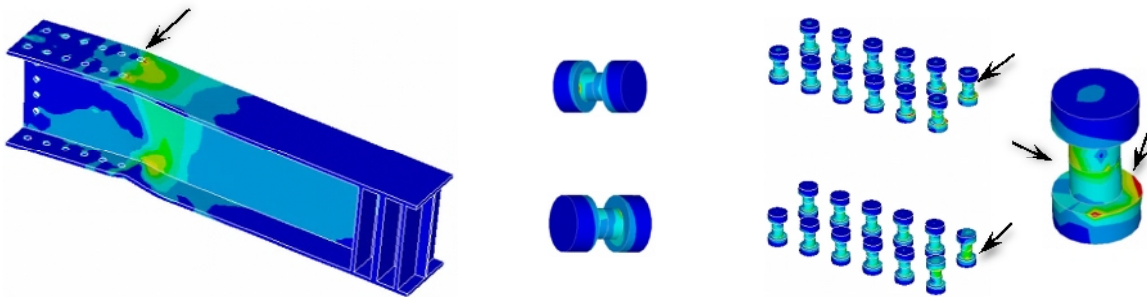
En el modelo BFP2 (ver figs 4.6 a 4.8) la concentración de esfuerzos se da principalmente en los patines y alma de la trabe por la restricción que le dan las placas y por la rigidización de toda esta zona a causa de los atiesadores y tornillos, por lo tanto, como se observa en la figura 4.6 la articulación plástica se forma en la trabe. En la gráfica carga-desplazamiento (ver fig 4.7) se aprecia que los desplazamientos son pequeños antes de la fluencia, en comparación al modelo BFP1, pues se tiene un aumento en la capacidad de carga de hasta un 30%. En consecuencia, las rotaciones del panel son menores ya que permanece dentro del rango de esfuerzos elásticos no presentándose la formación de alguna articulación plástica. Ni la columna, ni los atiesadores horizontales y atiesador inclinado presentan alguna deformación importante. En la figura 4.6 b, se observa que en la última fila de agujeros para los tornillos en el patín superior de la trabe, se genera la mayor concentración de esfuerzos inelásticos; por lo tanto, se alcanza la resistencia en la sección neta del patín superior a tensión de la viga que corresponde a la línea 5. En el caso de los tornillos del patín a tensión y compresión, se observó una concentración de esfuerzos en el rango plástico, esto debido a la fuerza que les induce el patín, sin embargo, no se alcanza la resistencia a cortante de los tornillos indicada por la línea 6.



a) Vista general de la conexión y de la columna



a) Isométrico, zona de panel, columna y placa de conexión de patines



b) Trabe, tornillos de alma y tornillos de patines

Figura 4.6 Esfuerzos en el Modelo BFP2

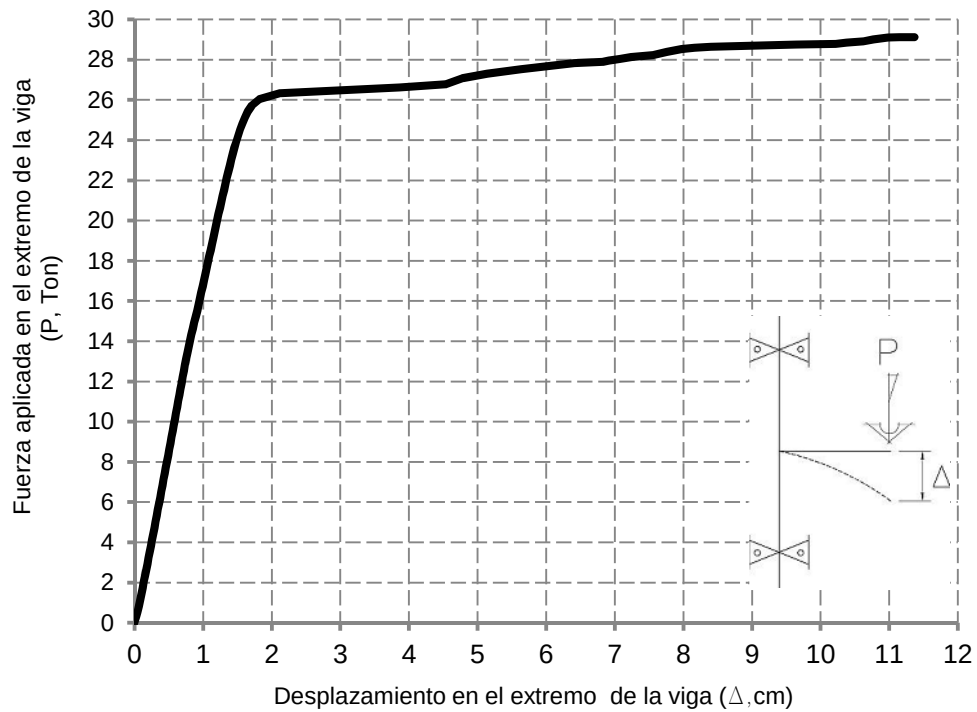


Figura 4.7 Curva carga-desplazamiento para el modelo BFP2

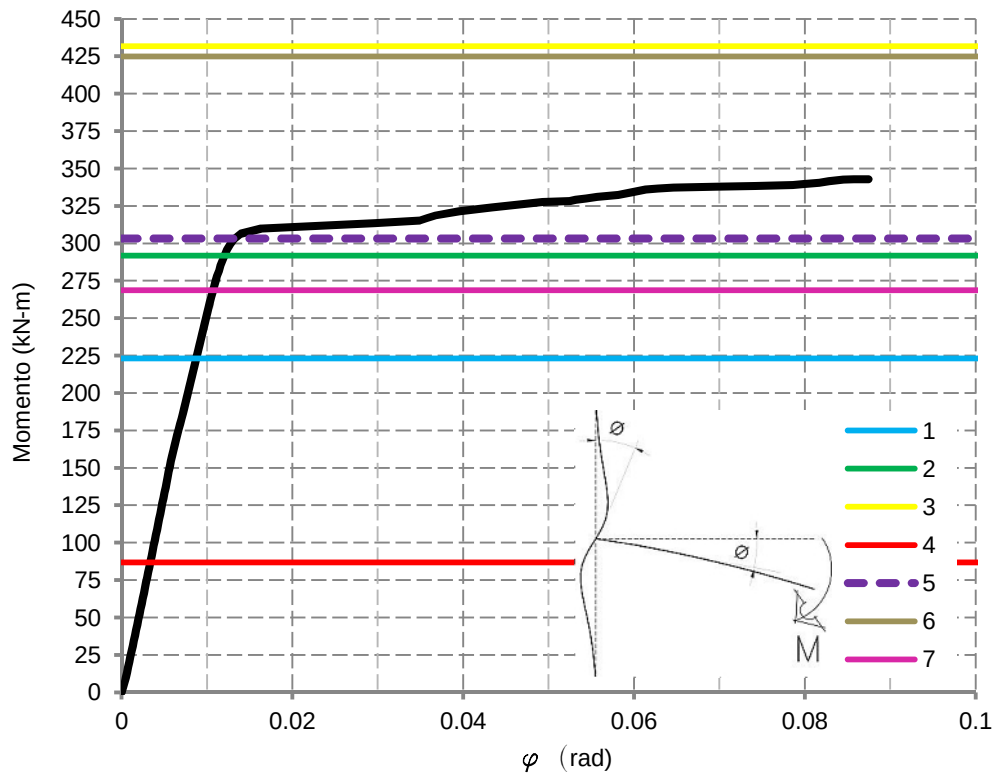


Figura 4.8 Curva momento-rotación para el modelo BFP2

El modelo BFP3 (ver figs 4.9 a 4.12) tiene un modo de falla similar al modelo BFP2. La plastificación se produce en la trabe justo en la zona donde terminan las placas de conexión de los patines (ver fig 4.10 a), se observa una gran concentración de esfuerzos en el patín a compresión de la trabe y se alcanza su momento plástico teórico (línea 2) en la curva momento-rotación. De la misma forma que en la conexión anterior, la mayor concentración de esfuerzos se produce en los agujeros del patín a tensión de la trabe y también se alcanza la resistencia calculada (línea 5). La columna (ver fig 4.9) muestra algunos esfuerzos producidos por las fuerzas que le inducen las placas de los patines pero son elásticos y no presentan ningún problema para la estabilidad de ésta. Las gráficas carga-desplazamiento del modelo BFP2 y BFP3 son similares en comportamiento y rotación, cuando se alcanza el límite elástico son muy parecidas ya que la rotación es de 0.008 para el modelo BFP2 y 0.007 para el modelo BFP3. Las placas de los patines se mostraron rígidas pues no alcanzan a desarrollar su resistencia total según lo marca la línea 3; al igual que la última fila de tornillos en los patines que son los que tienen mayor concentración de esfuerzos inelásticos. Los tornillos del alma no presentan deformaciones ni esfuerzos importantes.

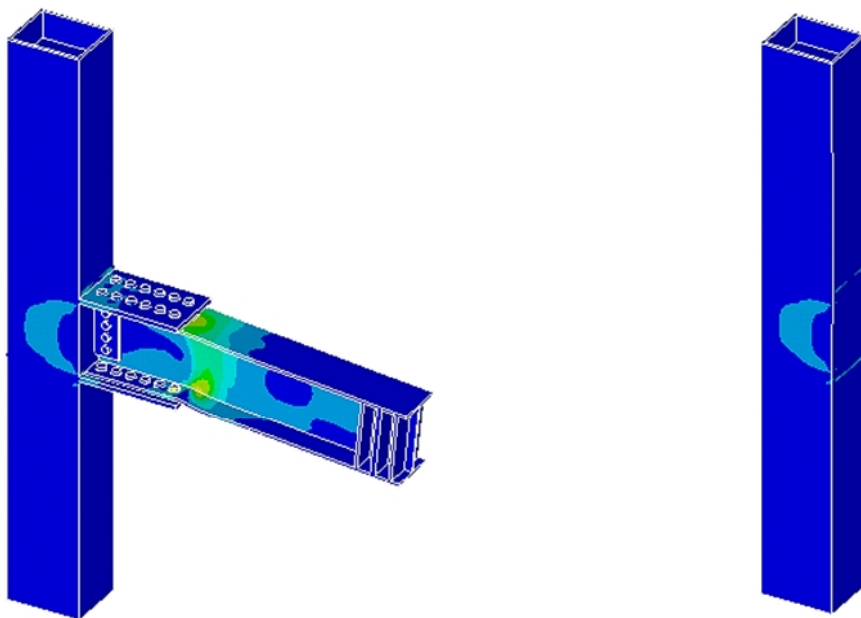
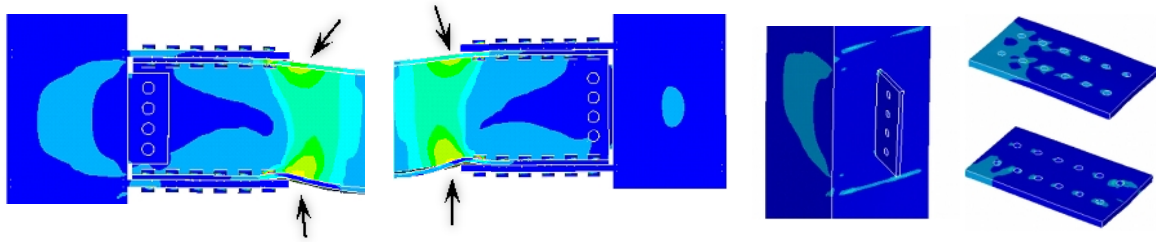
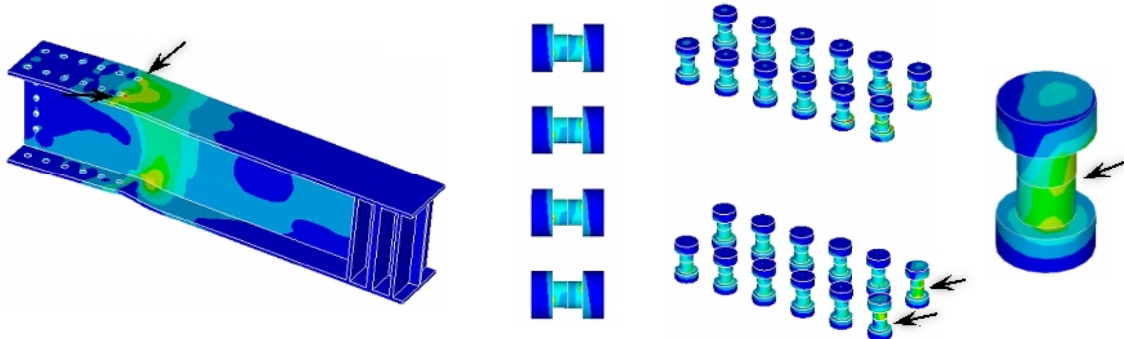


Figura 4.9 Vista general de esfuerzos en conexión y columna del modelo BFP3



a) Zona de panel, placa de conexión del alma y patines de la trabe



b) Vista en isométrico de la trabe, tornillos del alma y patines

Figura 4.10 Esfuerzos en el Modelo BFP3 (continuación)

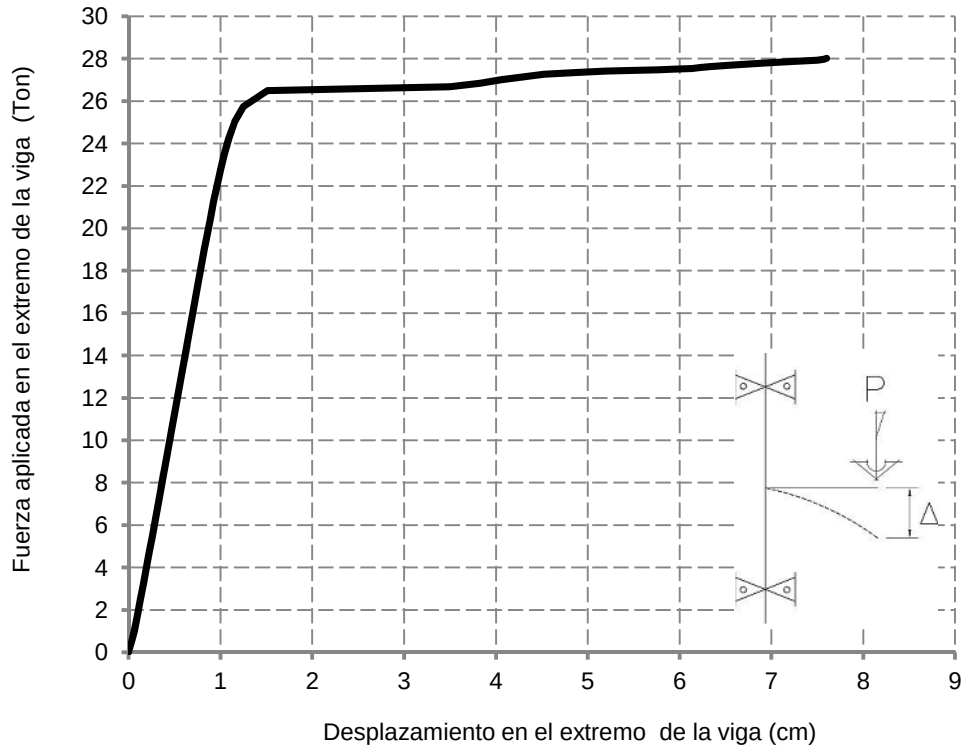


Figura 4.11 Curva carga desplazamiento para el modelo BFP3

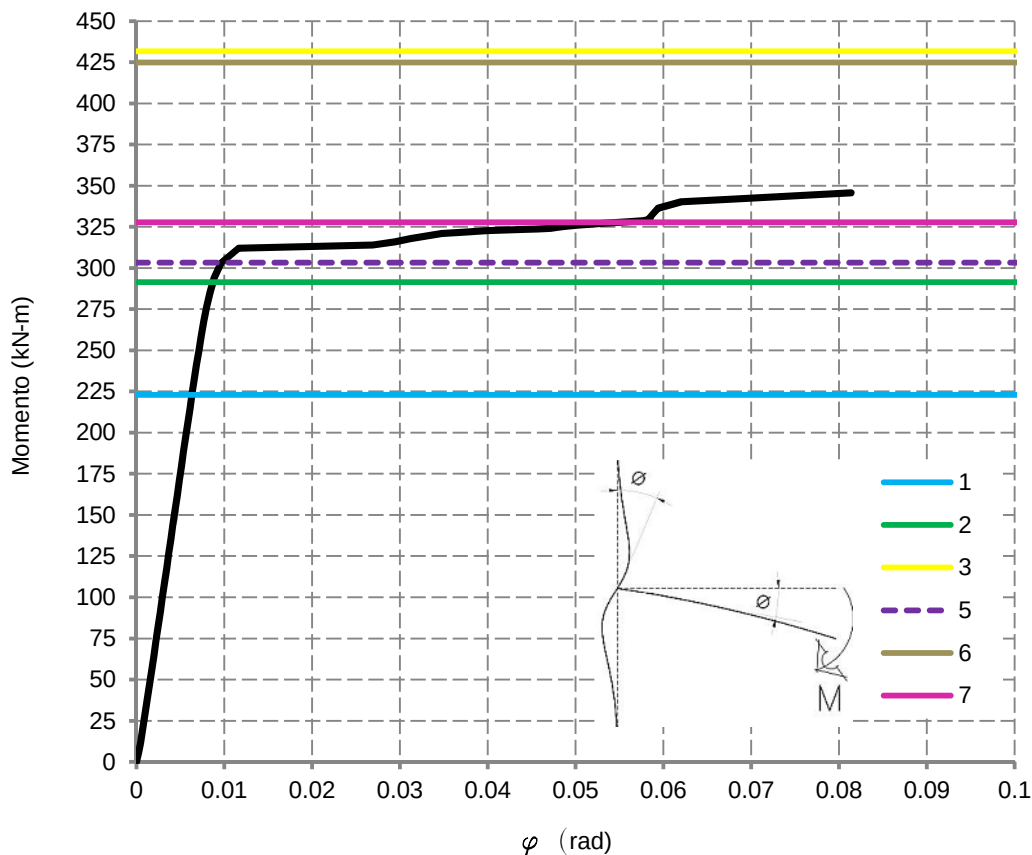


Figura 4.12 Curva momento rotación para el modelo BFP3

Para el modelo BFP4 (ver figs 4.13 a 4.16) se observó que la zona del panel tiene la mayor concentración de esfuerzos inelásticos y que son mayores en la zona intermedia como se aprecia en la figura 4.13 b, esto probablemente porque el muñón es más rígido ya que no se alcanza su resistencia calculada (línea 8), entonces transmite a la columna, a través de los atiesadores, fuerzas que hacen que el patín de la columna se pandee. También se observa la aparición de articulaciones plásticas en el muñón, dónde se une con el paño de la columna, en los patines superior e inferior de éste, siendo mayor en el patín de compresión (ver fig 4.13 b). La trabe no tiene esfuerzos importantes. Tal como se muestra en la figura 4.13c, solo se logran observar algunas concentraciones, que se marcan con flechas, en la última fila de los agujeros para los tornillos de los patines y no se rebasa la capacidad marcada por la línea 5, que corresponde a la resistencia en la sección neta del patín de la viga. También se ve que el momento plástico de la columna no es alcanzado (línea 7). En las placas de conexión superiores del muñón, se forman unas pequeñas concentraciones de esfuerzos en la holgura que existe entre la trabe y el muñón que se mantienen

en el rango elástico sin representar problema alguno. Los tornillos más esforzados son los que se señalan en la figura 4.14 d, con concentración de esfuerzos en la zona de la unión del cuerpo del tornillo con la cabeza. Es importante mencionar que las líneas 3 y 6 que corresponden a la capacidad de los tornillos y las placas de conexión de los patines, no aparecen en la gráfica momento-rotación porque el valor es superior al momento último desarrollado por el modelo.

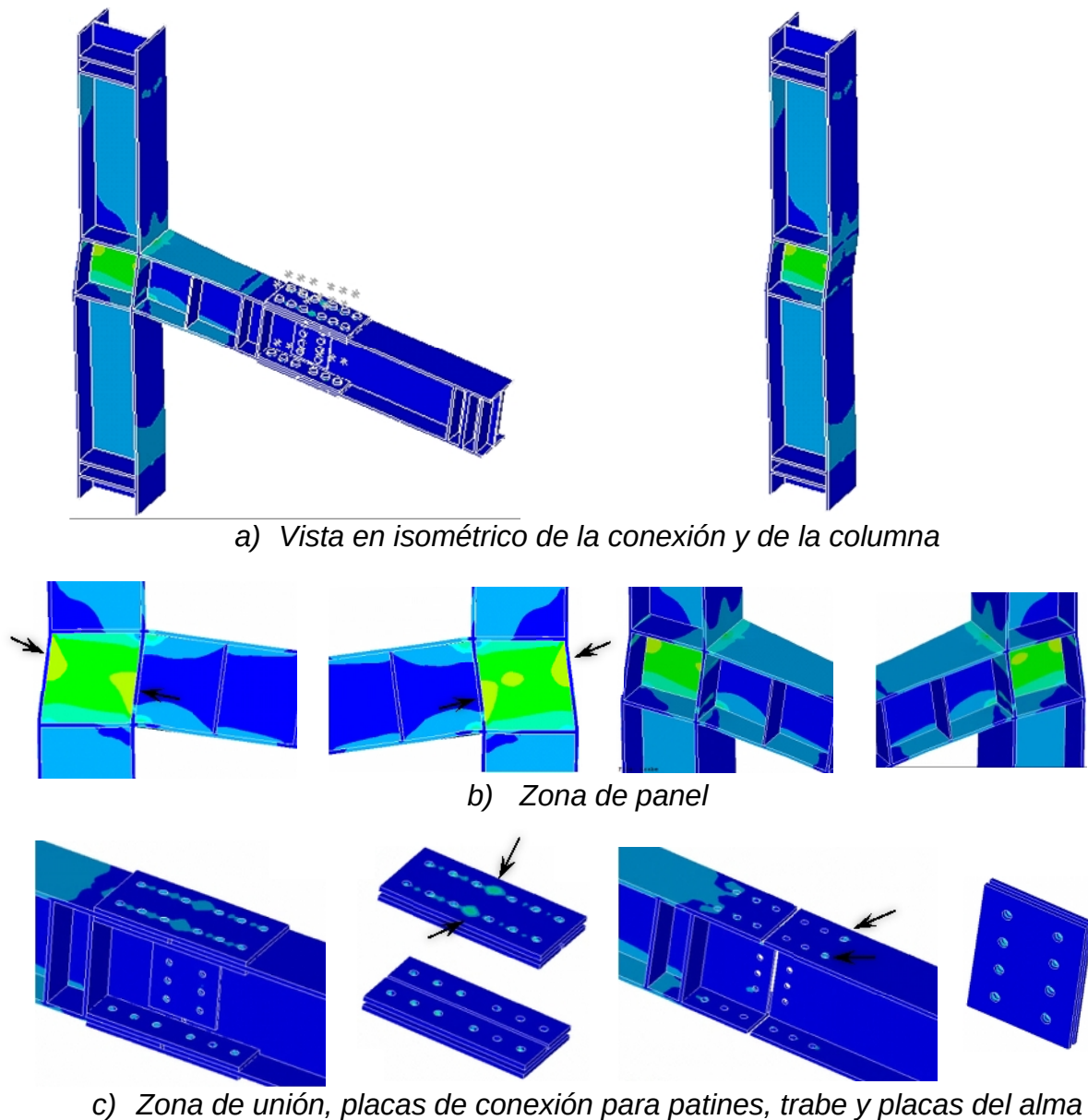
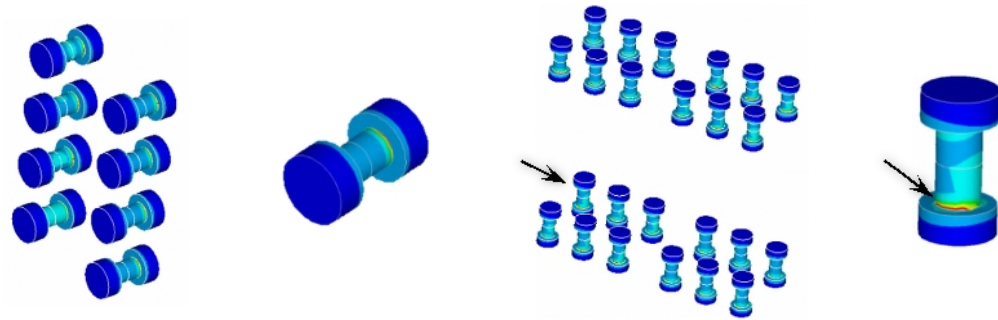


Figura 4.13 Esfuerzos en el modelo BFP4



d) Tornillos del alma y patines

Figura 4.14 Esfuerzos en el Modelo BFP4 (continuación)

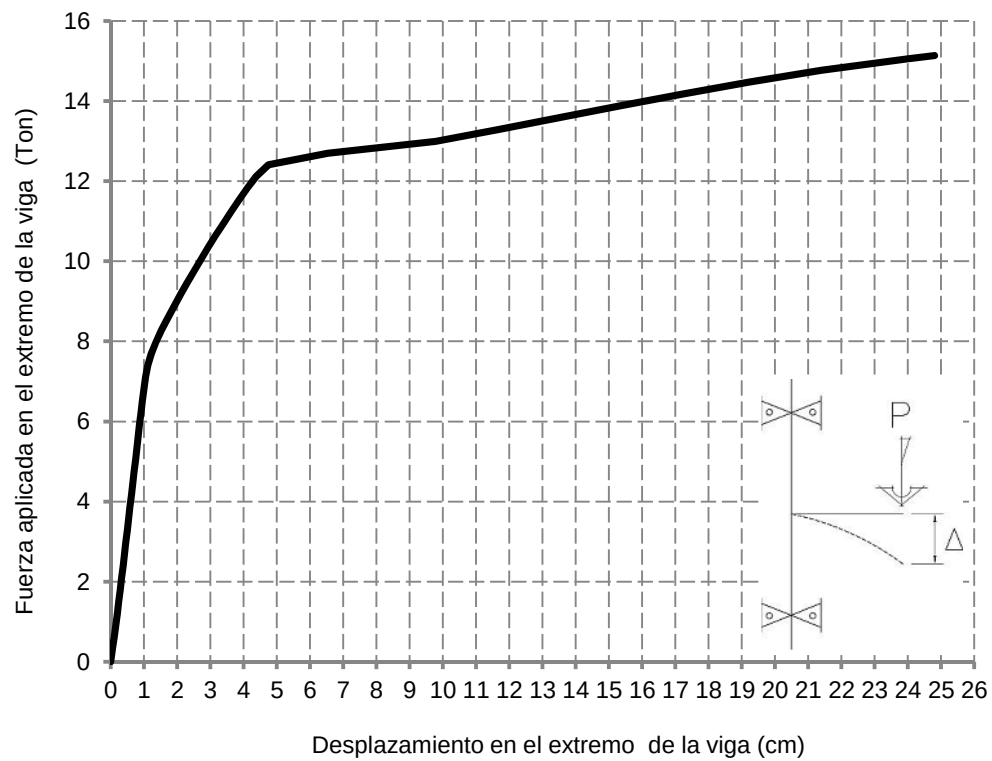


Figura 4.15 Curva carga-desplazamiento para el modelo BFP4

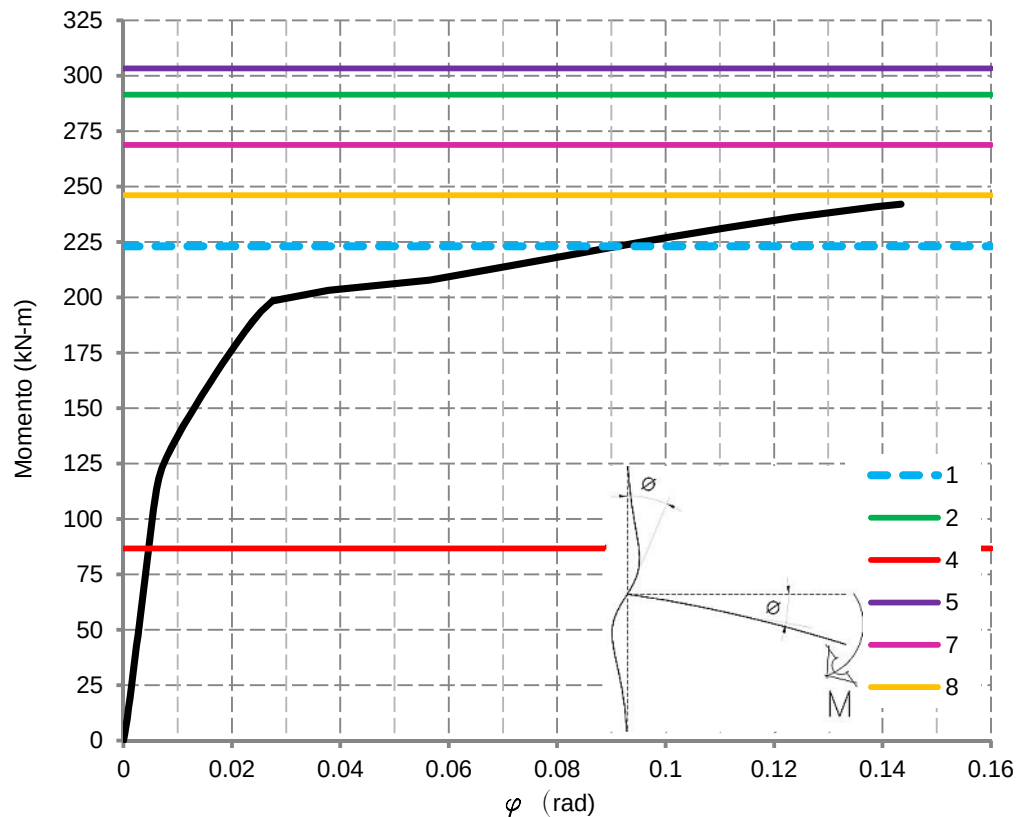
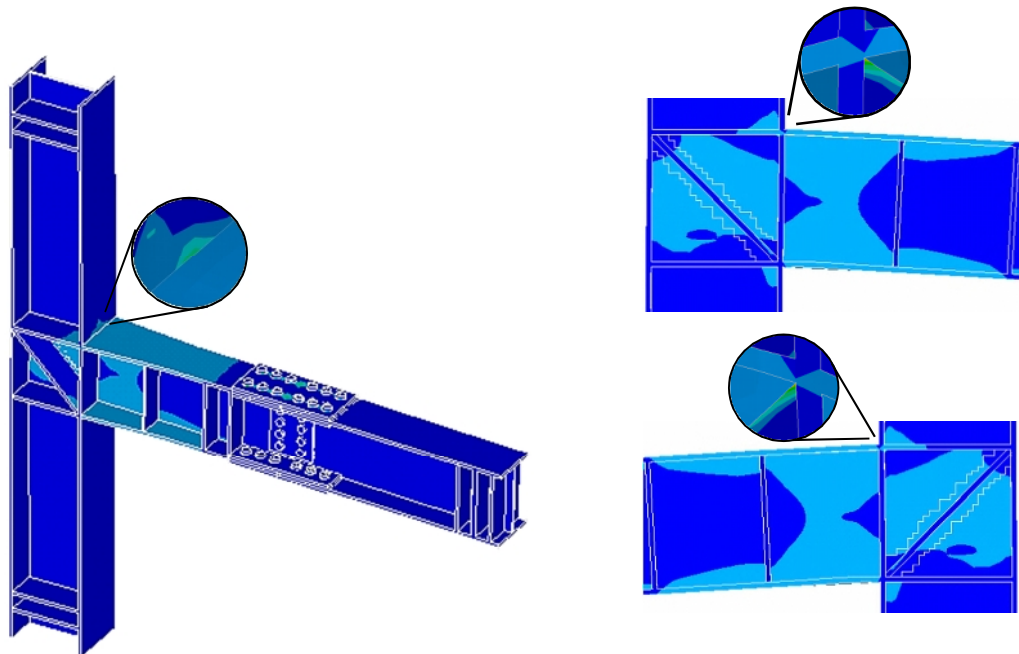
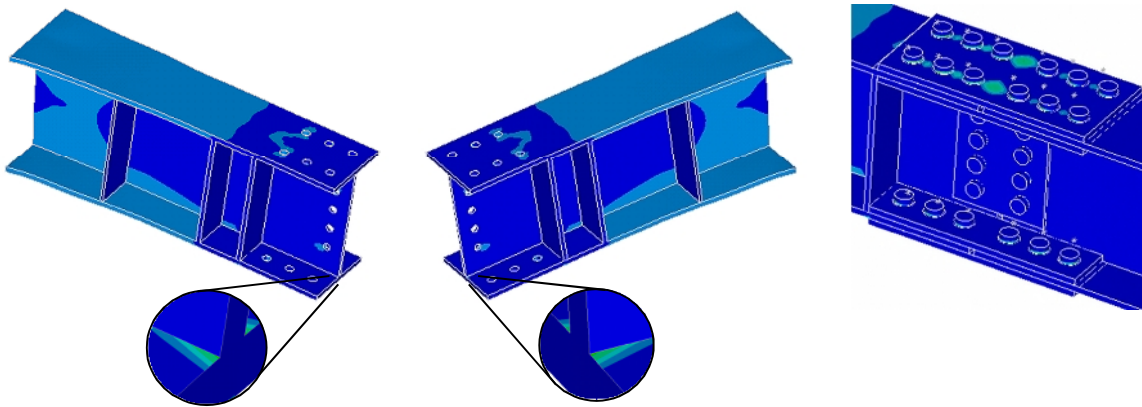


Figura 4.16 Curva momento-rotación para el modelo BFP4

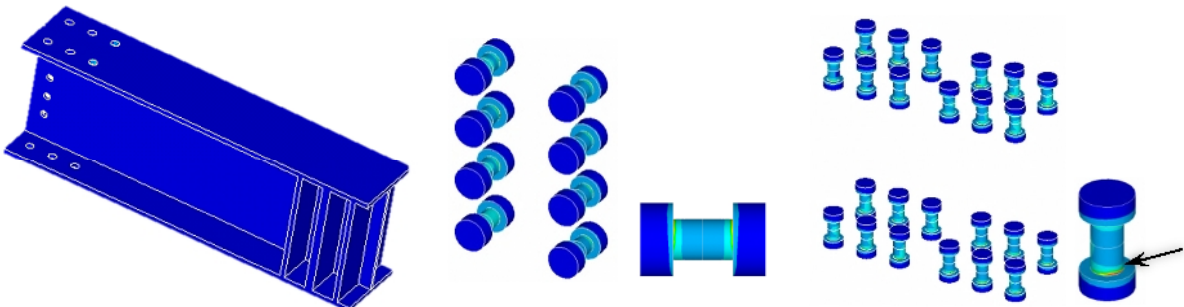
En el modelo BFP5 (ver figs 4.17 a 4.19) se observó que los esfuerzos inelásticos se concentran en el patín de la columna y el muñón, siendo mayores en la zona de unión de éste y la columna (ver fig 4.17 a); esto probablemente por el atiesador inclinado que tiene la zona de panel. La capacidad calculada que se indica por la línea 8, que representa la resistencia del muñón es apenas alcanzada. En esta conexión, se concentran esfuerzos en el rango inelástico en la unión del alma y patín inferior del muñón tal vez provocados por las fuerzas inducidas por las placas de conexión de los patines (ver fig 4.17 b). El momento plástico de la columna no es alcanzado (línea 7), pero en el modelo se forman concentraciones de esfuerzos inelásticos en el patín, cuya resistencia no es calculada ya que no existe alguna expresión que la determine. El comportamiento de las placas de conexión para los patines es similar al modelo anterior. Para las líneas 2 y 5 no fueron alcanzadas ya que la viga no incurrió en el rango plástico y no presenta deformación importante. Los tornillos del patín presentan una concentración de esfuerzos en la unión de la cabeza y el vástago sin presentar algún problema; su resistencia no se muestra por ser ésta mayor que el momento último soportado por el modelo.



a) Vista en isométrico de la conexión y zona de unión en trabe y columna



b) Muñón y conexión de la trabe



c) Trabe, tornillos de alma y de patines

Figura 4.17 Esfuerzos en el Modelo BFP5

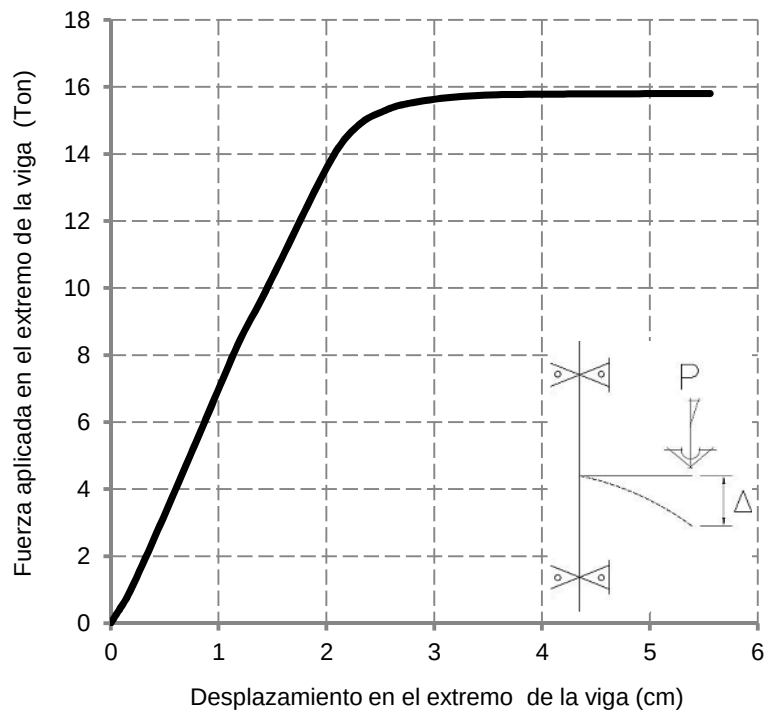


Figura 4.18 Curva carga-desplazamiento para el modelo BFP5

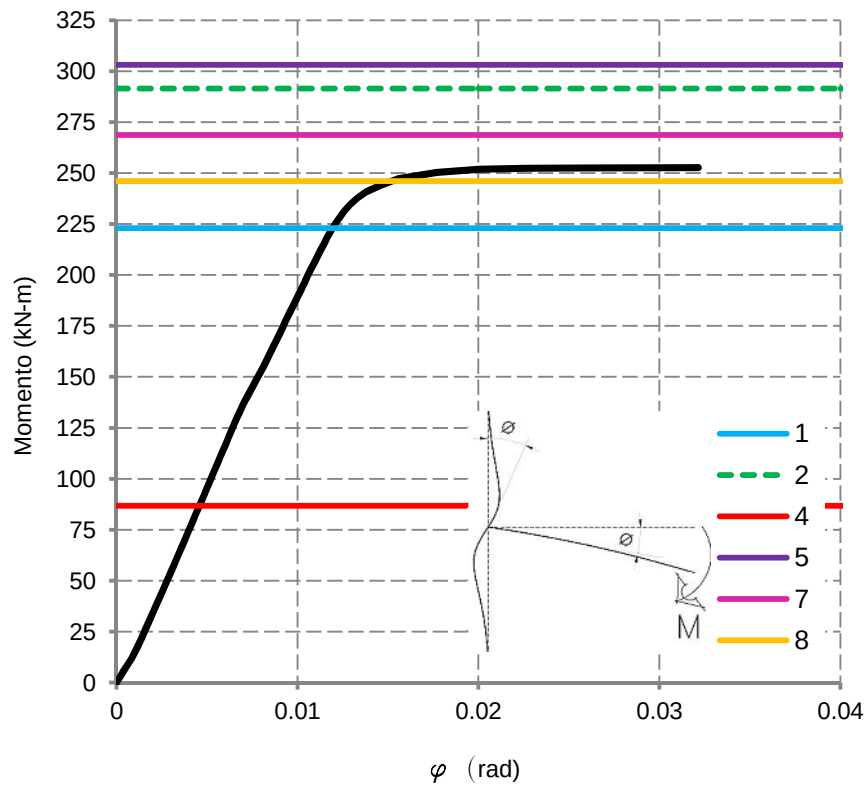


Figura 4.19 Curva momento-rotación para el modelo BFP5

El modelo BFP6 (ver fig 4.20 a 4.23) tiene un modo de falla similar al modelo BFP5, debido a que la mayoría de los esfuerzos se localizan en el patín de la columna y muñón. En esta conexión, la concentración de esfuerzos inelásticos es mayor en la unión de los patines del muñón con la columna; se observa que se forman articulaciones plásticas en la zona del patín de la columna adyacente a los patines superior e inferior del muñón, como se marca en la figura 4.20 b. Para los tornillos del alma y patines (ver fig 4.21 d), se observan concentraciones de esfuerzos inelásticos sin llegar a la falla (línea 6). Las placas de conexión de los patines de la trabe se mantuvieron rígidas, sin tener una concentración importante de esfuerzos, y no se muestra su resistencia calculada por ser mayor al momento último desarrollado por la conexión (al igual que la línea 6). El comportamiento de las curvas carga-desplazamiento y momento-rotación es parecido al modelo anterior, y se observa en la curva momento-rotación de este modelo, que la rotación para el límite elástico es menor en comparación con la del modelo BFP5; esto indica que la conexión es más rígida. El momento plástico de la columna no es desarrollado, según la resistencia calculada, indicada por la línea 7. No existió mayor exigencia para la viga ya que no incurrió en el rango inelástico, al igual que las expresiones correspondientes a las líneas 2 y 5 lo señalan.

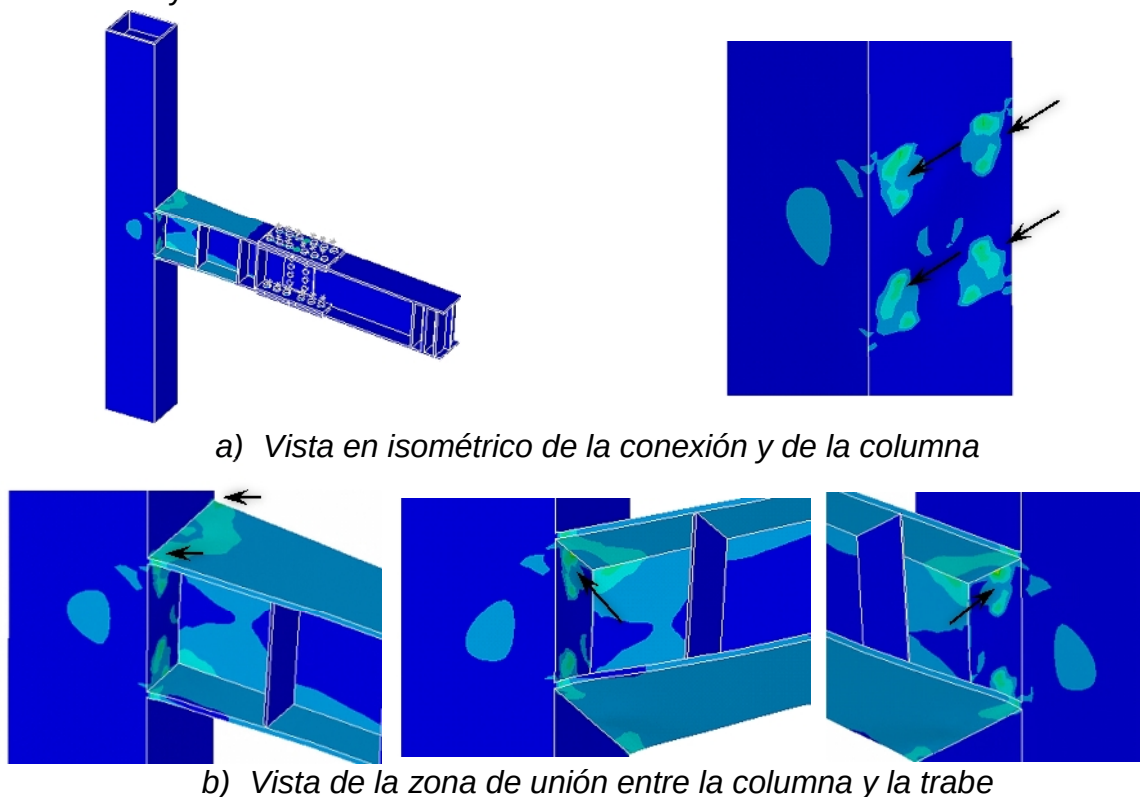
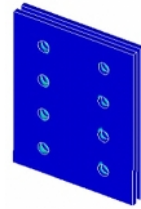
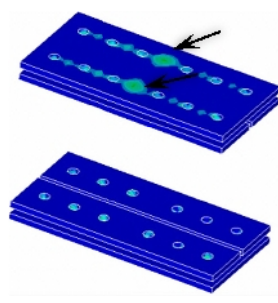
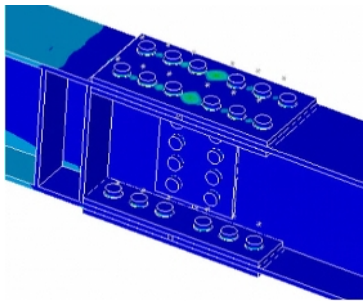
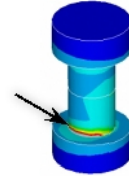
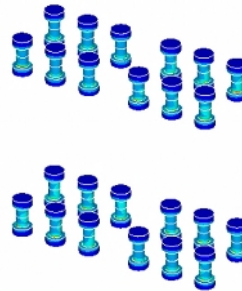
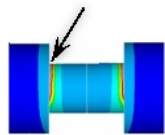
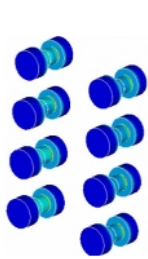


Figura 4.20 Esfuerzos en el modelo BFP6



c) Conexión en la trabe, placas de patines y placas del alma



d) Tornillos del alma y patines de la trabe

Figura 4.21 Esfuerzos en el Modelo BFP6 (continuación)

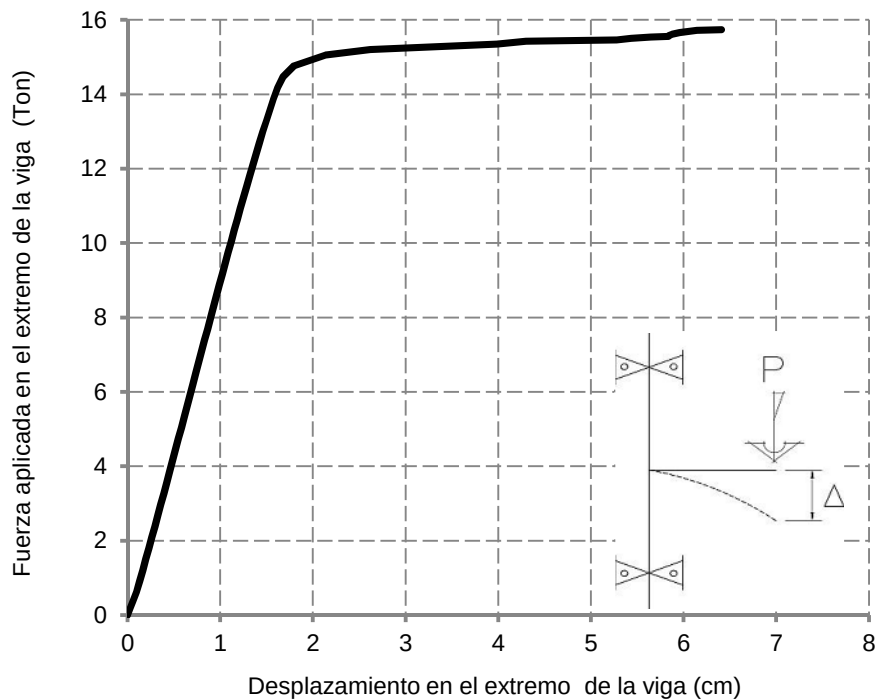


Figura 4.22 Curva carga-desplazamiento para el modelo BFP6

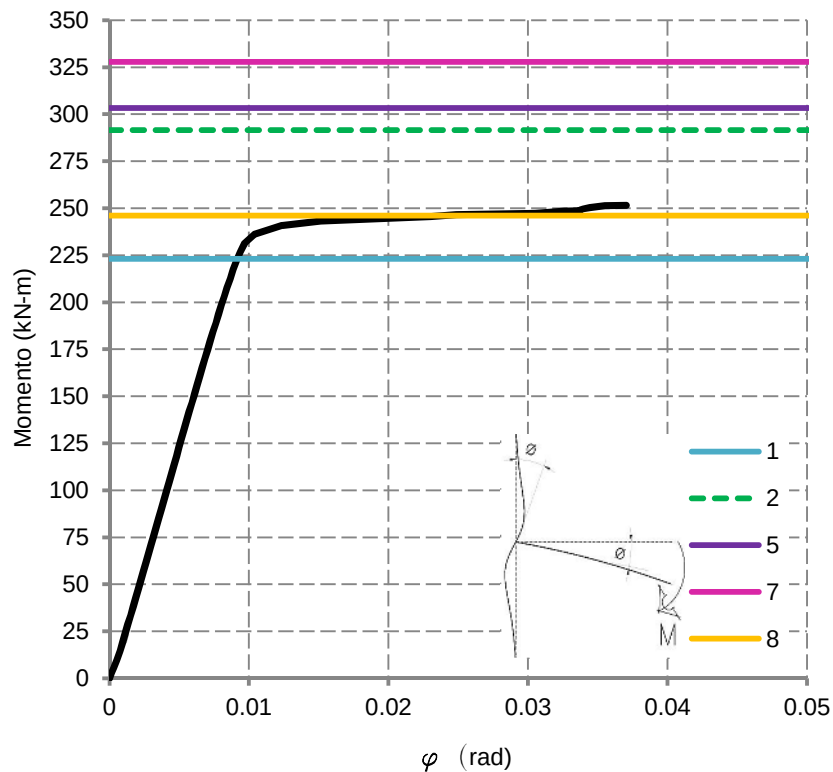


Figura 4.23 Curva momento-rotación para el modelo BFP6

El modelo BFP7 (ver figs 4.24 a 4.26) mostró una falla definida por la plastificación del patín a tensión y pandeo del patín a compresión del muñón (ver fig 4.24), también se observan concentraciones de esfuerzos dentro del rango inelástico en los 4 puntos marcados en la figura 4.24 a, que corresponden al lugar donde las almas de la columna atiesan el patín de la misma ya que al no existir atiesadores interiores que rigidicen en toda la longitud al patín, los esfuerzos se transmiten a esos puntos, distribuyéndose como se observa en la figura 4.24 b mediante la formación de puntales de compresión y tensores a través del patín y almas de la columna. Las líneas 1, 2, 5, 7 y 8 que representan las capacidades a momento de elementos de la conexión no son rebasadas; ya que los demás componentes no sufren daños considerables.

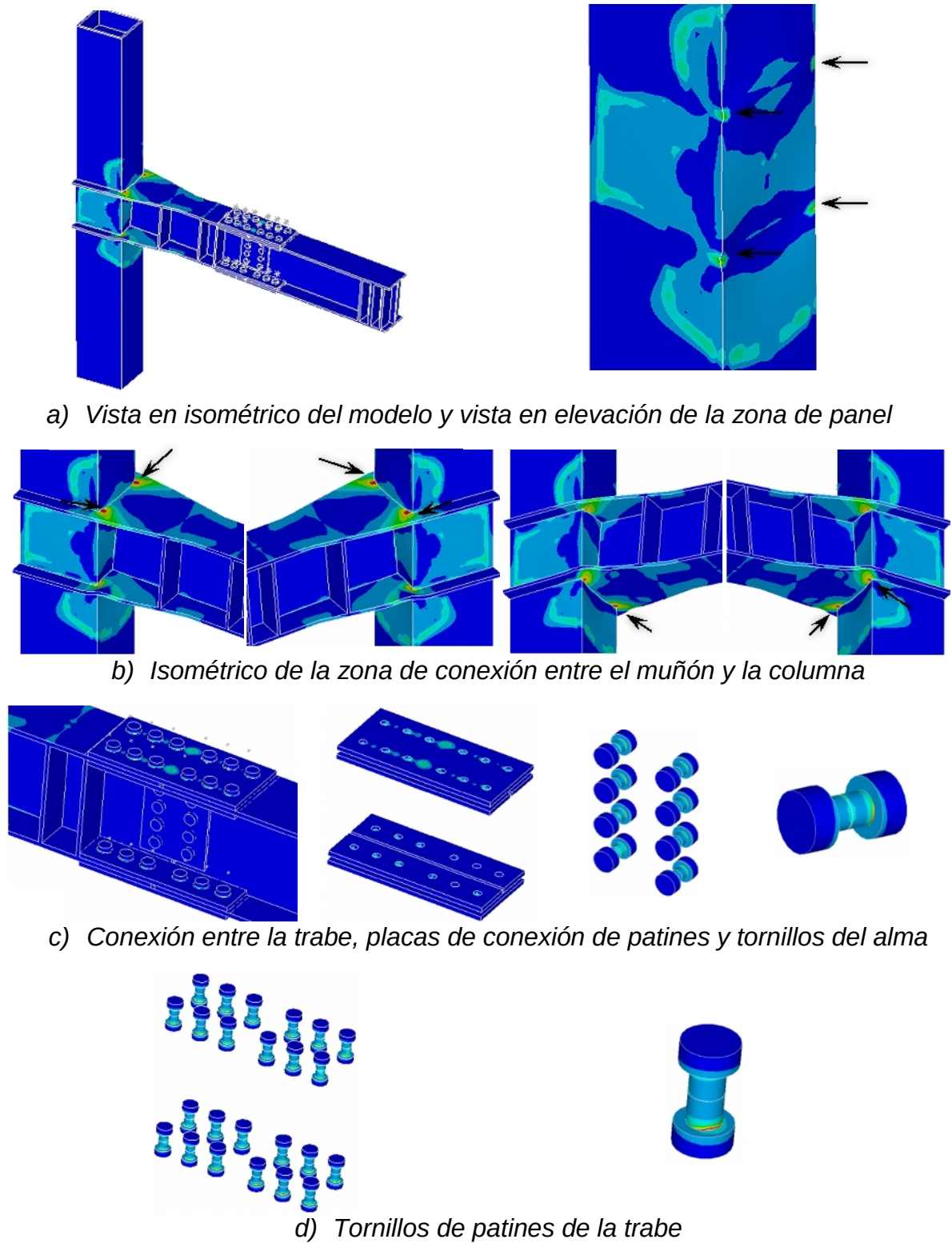


Figura 4.24 Esfuerzos en el Modelo BFP7

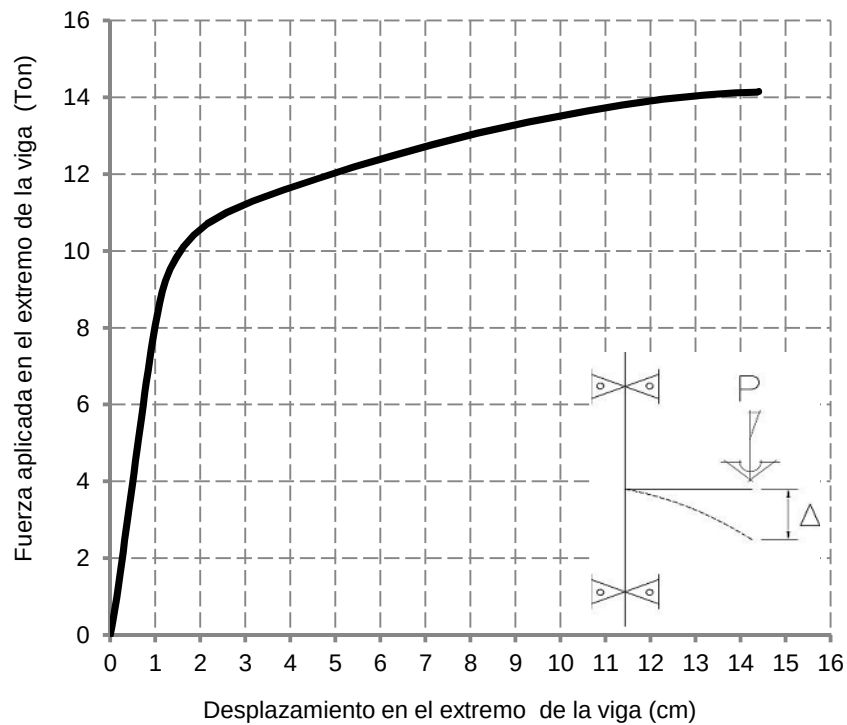


Figura 4.25 Curva carga-desplazamiento para el modelo BFP7

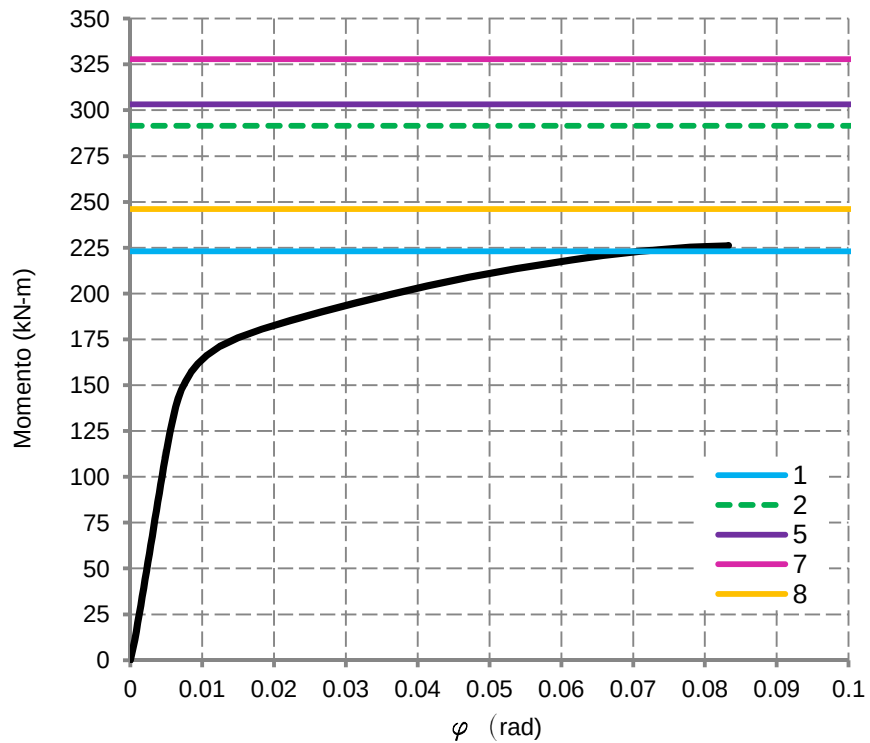


Figura 4.26 Curva momento-rotación para el modelo BFP7

A continuación se presenta un resumen de las curvas momento-rotación de todos los modelos, para observar en forma esquemática las diferencias que existen entre ellas (ver fig 4.27).

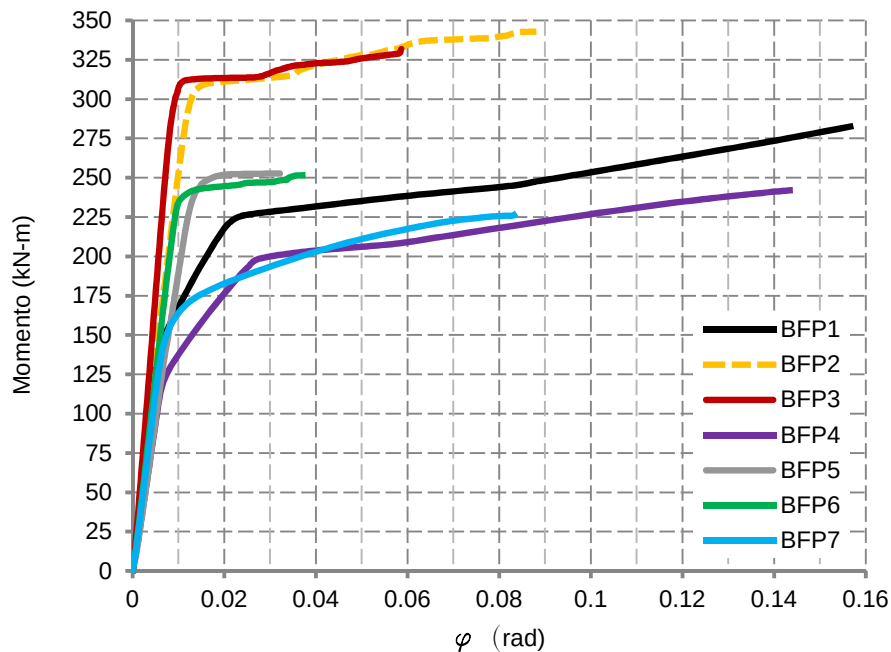


Figura 4.27 Curvas momento-rotación de todos los modelos de conexiones

Se comparan las curvas mostradas en la figura 4.27, empezando con los modelos BFP1, BFP2 y BFP3 que son del mismo tipo de conexión; el modelo BFP1 que falla por plastificación de la zona de panel experimenta una rotación grande como lo muestra la gráfica, mientras que, el modelo BFP2, al ser más rígido en esa zona, tiene rotaciones mucho menores y una capacidad de momento mayor, y su curva es parecida a la del modelo BFP3, la cual muestra un ligero aumento de rigidez, tal vez por la columna de sección cajón de esta conexión. El grupo que falta de los modelos BFP4, BFP5, BFP6 y BFP7 son conexiones similares de tipo árbol; para el modelo BFP4 su curva es parecida a la del modelo BFP1, ya que falla también en la zona de panel y por lo tanto las rotaciones son grandes. En el BFP5 y BFP6 se observa en su curva una tendencia similar a los modelos BFP2 y BFP3 producto de la rigidización de la zona de panel en estos modelos. Finalmente el modelo BFP7 por la falla que experimenta tiene un comportamiento igual que los modelos BFP1 y BFP4, ya que existe plastificación de las placas del muñón.

En la tabla 4.2 se encuentran las rigideces, rotaciones plásticas y elásticas para cada uno de los modelos, también una relación entre el momento último y el momento plástico teórico de la viga, con la finalidad de estudiar los parámetros más importantes de las curvas momento-rotación.

Tabla 4.2 Rigideces elásticas y plásticas con su correspondiente rotación para todos los modelos

DATOS CARACTERÍSTICOS DE LAS CURVAS MOMENTO ROTACIÓN							
	ϕ_y	M_y	ϕ_u	M_u	K_e	K_i	M_u/M_p
	rad	kN-m	rad	kN-m	kN-m/rad	kN-m/rad	
BFP1	0.0051	127.14	0.1567	282.53	25,119.97	509.07	1.27
BFP2	0.0058	154.51	0.0875	342.83	26,712.91	500.77	1.54
BFP3	0.0063	223.67	0.0814	345.58	35,254.61	529.53	1.55
BFP4	0.0055	104.13	0.1434	241.95	18,836.09	393.20	1.08
BFP5	0.0066	129.54	0.0321	252.72	19,500.40	335.19	1.13
BFP6	0.0067	165.38	0.0370	251.58	24,850.41	404.38	1.13
BFP7	0.0047	105.23	0.0833	226.24	22,625.42	261.01	1.01

En dónde:

ϕ_y Rotación en el límite elástico

M_y Momento en el límite elástico

ϕ_u Rotación a la falla

M_u Momento último

K_e Rigidez de la zona elástica

K_i Rigidez del endurecimiento en la zona plástica

Analizando la rigidez para la parte elástica (K_e) de las conexiones tipo *Bolted Flange Plate*, en el modelo BFP1 se nota que es menor que en los modelos BFP2 y BFP3, y que ésta va aumentando para cada uno de ellos, por lo tanto, la rigidez de la columna y principalmente del panel es muy importante, ya que se tiene un aumento de rigidez de un 6% para el modelo BFP2 (modelo con atiesador inclinado) y de hasta 40% para el BFP3 (modelo con columna cajón). En consecuencia, el modelo con menor rigidez elástica, es el que tiene menor resistencia y corresponde al modelo BFP1. En relación con el momento último, para las conexiones BFP1 y BFP2 la diferencia es de 20% debido a que se cambió el modo de falla con el atiesador inclinado; para el BFP2 y BFP3 el momento es casi igual con un 0.8% de diferencia porque el modo de falla que tienen es semejante.

Para las conexiones del tipo árbol, en los modelos BFP4 y BFP5 (con atiesador inclinado), se observa que la rigidez elástica es mayor para el BFP5 aproximadamente un 3.5%, lo que indica que la rigidez elástica de estos modelos está también influida por la zona de panel puesto que ambos tienen atiesadores longitudinales. Así también, para el modelo BFP6 que tiene una columna de sección cajón la diferencia es de hasta un 30% de la rigidez comparada con el BFP4. Para el momento último, en los modelos BFP4 y BFP5 mostraron una diferencia aproximada del 5%, esto porque el modo de falla se concentra en la unión del muñón y la columna y no en el panel.

Haciendo referencia a la geometría de los modelos, cabe mencionar que el modelo BFP7 no tiene atiesadores interiores en la columna, y esto se refleja en su rigidez elástica pues es menor, aproximadamente un 10% al modelo BFP6 que si cuenta con ellos. La diferencia entre el momento último también es del 10% debido que la falla principal es entre la unión del muñón y la columna y no depende mucho de la rigidez del panel.

4.2. Efecto de la carga axial en la columna

Para estudiar el efecto que tiene la carga axial en la columna sobre la rotación del panel (ver fig 4.28), al modelo BFP1 se le aplica la carga axial, la intensidad de ésta es en función de P_y (P_y es la fuerza axial que produce la plastificación), se utiliza un 30% como el valor considerado en la sección 6.2.1.2 de las NTCA que dice: *cuando las columnas sean consideradas elementos críticos en el nudo y son tipo I, la carga axial factorizada no será mayor de 0.3 A F_y* . A continuación se muestra el procedimiento para el cálculo de P_y :

Se calcula el área de la columna y después se multiplica por el esfuerzo de fluencia del acero:

$$A_{col} := (2 \times 25\text{cm} \times 1.2\text{cm}) + (27.6\text{cm} \times 0.8\text{cm}) = 82.08\text{cm}^2$$

$$P_y = A_{col} \times F_y \quad P_y := (82.08\text{ cm}^2) \times \left(2530 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) = 207662.4\text{kg}$$

La carga axial para aplicar en la columna es:

$$0.3 \times P_y = 62298.72\text{kg}$$

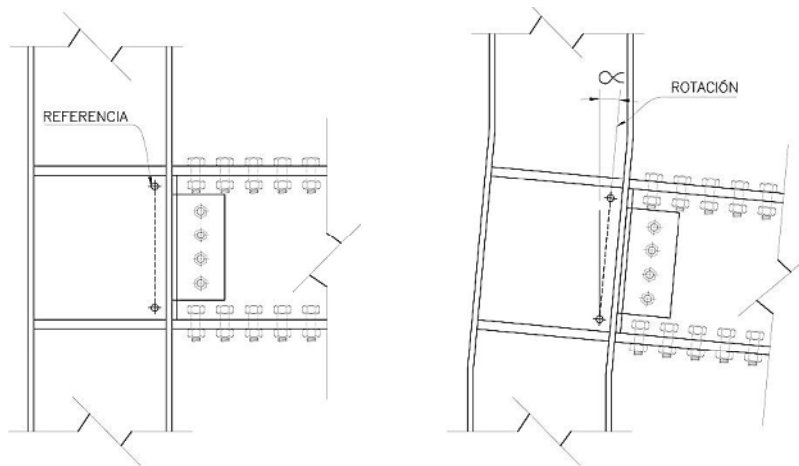


Figura 4.28 Rotación de la zona de panel en la columna

Para hacer la comparación de la rotación del panel, se hacen dos curvas momento-rotación, la primera del modelo BFP1 sin carga axial y la segunda el mismo modelo pero con carga axial. La rotación se obtiene mediante dos puntos de referencia que se colocan en el panel para determinar cuánto se desplazan después de que ha aplicado la carga y finalmente obtener la rotación que ha sufrido (ver fig 4.28). A continuación se presentan las gráficas de las dos curvas en donde se analizan los resultados.

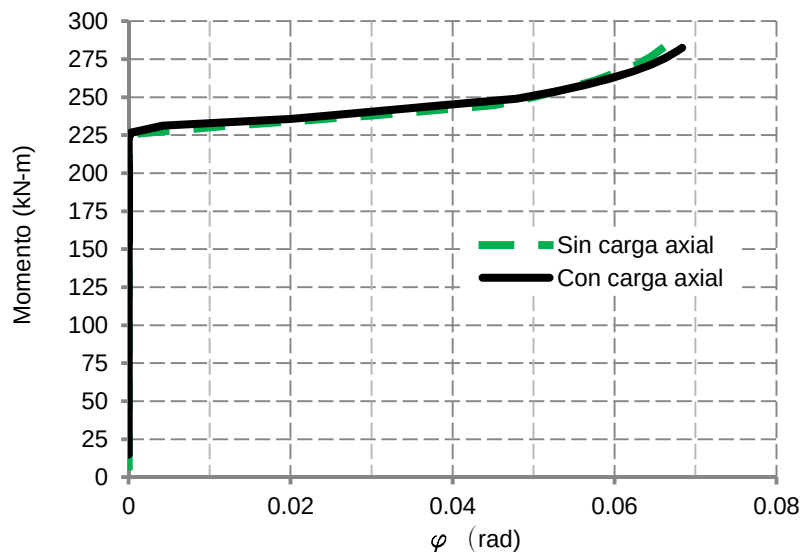


Figura 4.29 Curvas momento rotación de la zona de panel

En la figura 4.29 se muestra con línea discontinua la curva del modelo BFP1 con carga axial y la curva continua es con carga axial, se observa que el

comportamiento es similar. Se concluye que la carga axial en la columna no tiene un efecto significativo en la rotación que sufre el panel por el efecto de las cargas aplicadas en el extremo de la trabe. Adicionalmente se presentan en la figura 4.30 las curvas carga contra desplazamiento sin y con carga axial sin mostrar grandes diferencias. Esto tal vez, porque la rigidez del panel influye mucho en el comportamiento que se presenta y la carga axial no contribuye sustancialmente.

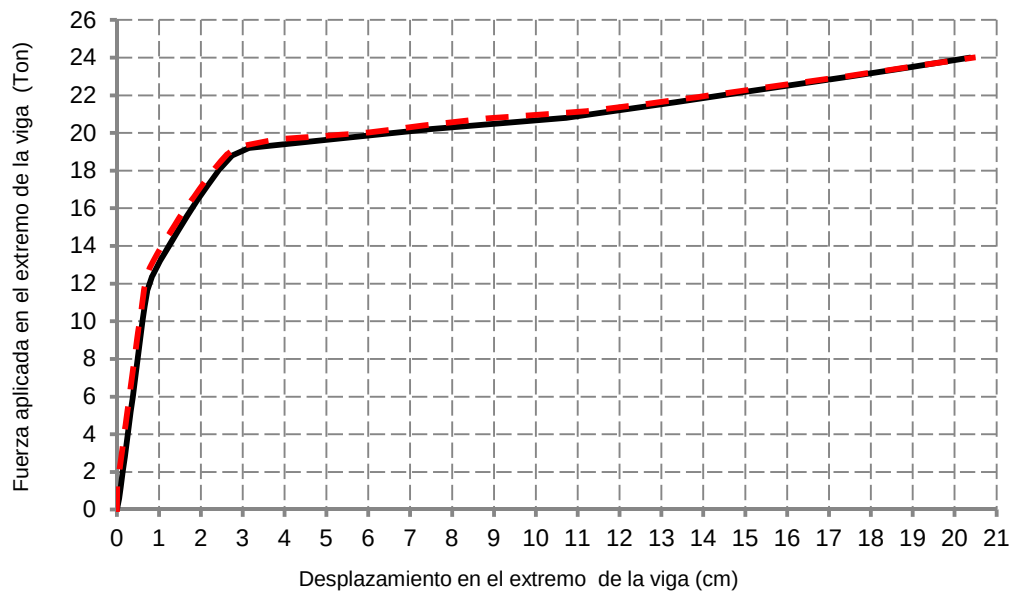


Figura 4.30 Curvas carga desplazamiento, línea discontinua con carga axial y la continua con carga axial

4.3. Comparación del comportamiento monótono entre modelos del tipo bolted flange plate

Estas conexiones están conformadas por los modelos BFP1, BFP2 y BFP3; la finalidad es estudiar el comportamiento que experimentan al contar con y sin un atiesador inclinado y una columna de diferente sección. En la figura 4.31 se muestra el modo de falla de cada uno de los modelos. Es evidente la influencia que tiene el atiesador inclinado (BFP2) sobre la conexión que no lo tiene (BFP1) ya que el modo de falla cambia completamente. Esto se puede notar en el aumento del momento elástico que es aproximadamente un 20%, al igual que para el momento último que es del mismo valor, debido principalmente a que la falla no se genera en el panel y ahora la trabe es la que desarrolla su capacidad en el rango plástico, formando una falla que se aleja de la columna y así no se pone en riesgo la estabilidad de ésta.

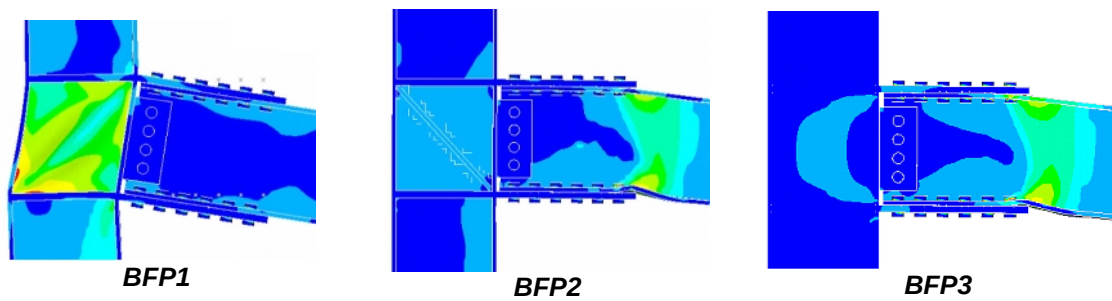


Figura 4.31 Modos de falla en las conexiones tipo “bolted flange plate”

De la misma manera sucede con el modelo con columna cajón (BFP3) pues la falla es igual al modelo BFP2, con un aumento en su resistencia para el momento elástico de hasta un 75% comparada con el modelo BFP1 y de un 20% para el momento último (similar al modelo BFP2), porque la falla es por plastificación de la viga. Por lo tanto, se puede decir que el atiesador inclinado en el panel o una mayor rigidez del alma en la columna (columna cajón) contribuye a que la falla cambie y se desarrolle la capacidad plástica de la viga, protegiendo así a la columna. A continuación se presentan gráficas con el objetivo de realizar de forma más clara una comparativa entre el daño en zona de panel (en función del máximo esfuerzo registrado), el momento último desarrollado y la rotación inelástica de estos modelos. Los valores están en porcentaje tomando como el 100% la cantidad que sea mayor.

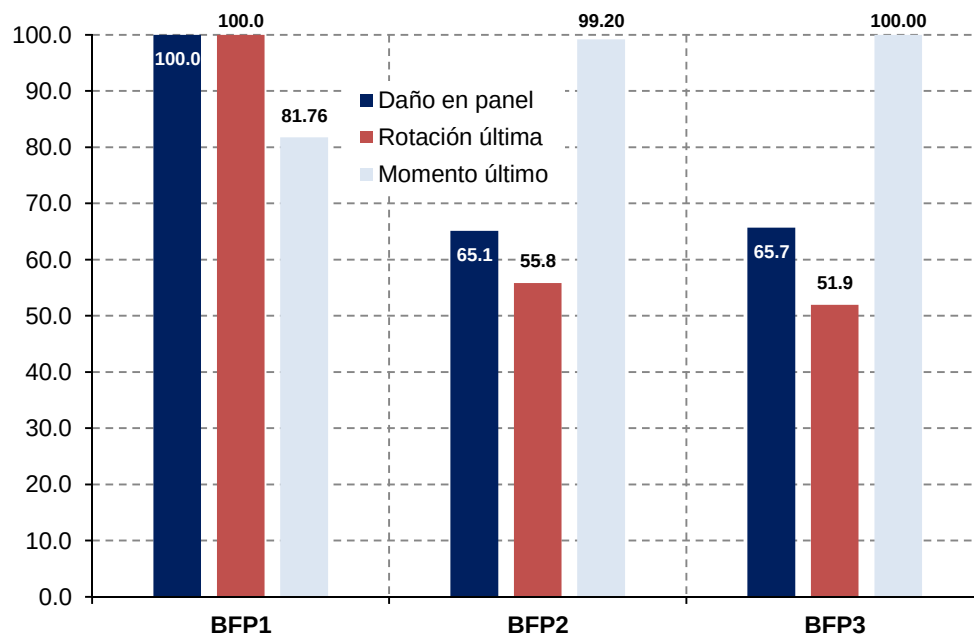


Figura 4.32 Comparación entre modelos “bolted flange plate” en carga monótona

Como se observa en la figura 4.32, el mejor desempeño es para los modelos BFP2 y BFP3.

4.4. Comparación del comportamiento monótono entre modelos del tipo árbol

Este tipo de conexiones está integrado por los modelos BFP4, BFP5, BFP6 y BFP7 que tienen el propósito de estudiar el efecto que tiene no hacer la conexión directamente en la columna y alejarla mediante un muñón. El modelo BFP7 es diferente, tiene la intención de estudiar el efecto que provoca la ausencia del atiesador interior en la columna. El uso de atiesadores inclinados y de una mayor rigidez en el alma de la columna, mostró cambios importantes en el modo de falla, la cual no se presentó en la zona de panel como el modelo que no los tiene, y provocó la aparición de articulaciones plásticas en el patín de la columna y del muñón en la zona de unión con ésta, tal y como se puede observar en la figura 4.33.

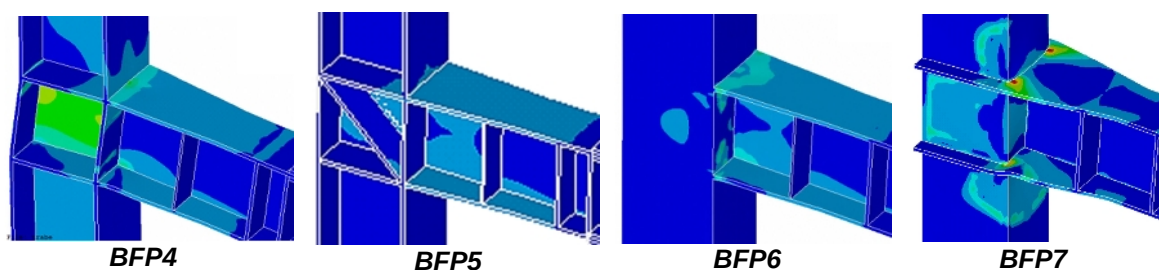


Figura 4.33 Modos de falla en las conexiones tipo “árbol”

En el modelo BFP4 se observó una falla similar a su análogo en conexión tipo “bolted flange plate” sin atiesador inclinado. En cambio, en las conexiones BFP5 y BFP6 se desarrolló un comportamiento diferente, en las que se acentúa la concentración de esfuerzos inelásticos en el patín de la columna cercanos a los patines superior e inferior del muñón. También los patines del muñón tienen mayores esfuerzos; lo que indica que los atiesadores son fundamentales para el comportamiento, al igual que las almas de la columna (columna cajón). Finalmente para el modelo BFP7 se puede decir que el atiesador interior tiene mucha influencia en la conexión pues la mayoría de los esfuerzos se concentran en el alma y patines de la columna y principalmente en los patines del muñón. En la figura 4.34 se hace la comparación en forma gráfica, observándose que las conexiones BFP5 y BFP6 son las que tienen un mejor desempeño en cuanto a daño en panel y momento último desarrollado.

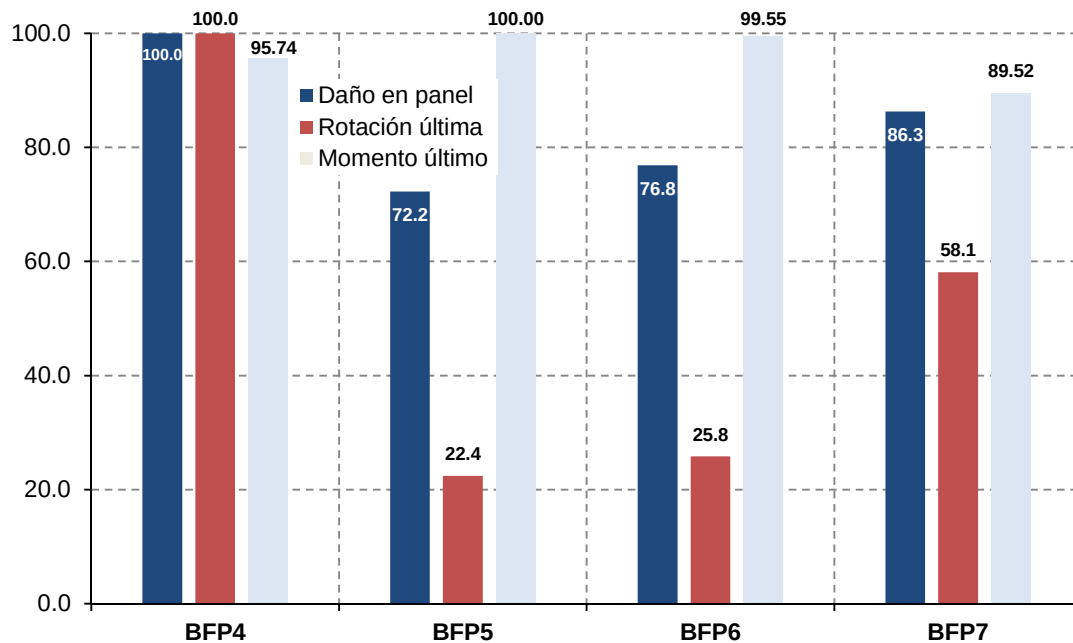


Figura 4.34 Comparación entre modelos de tipo “árbol” en carga monótona

4.5. Comparación del comportamiento entre modelos del tipo árbol y bolted flange plate

Para hacer una comparación, se escogen los modelos que tuvieron un mejor desempeño en cuanto a menor daño en zona de panel, mayor rotación inelástica y mayor momento último, los cuales son para los tipo “bolted flange plate” los modelos BFP2 y BFP3; para los tipo “árbol” los BFP5 y BFP6.

De la misma manera que las gráficas anteriores, el daño en la zona de panel de la columna es evaluado según el esfuerzo máximo registrado. Los valores también están en porcentaje, tomando como referencia aquel valor que sea el máximo tanto para el panel, el momento y la rotación en todos los modelos que se consideran.

En la figura 4.35 se hace el resumen de todos los datos anteriores, se observó que el daño en la zona de panel es similar para todos los modelos, solo se muestran diferencias en el momento último y rotación inelástica en dónde los modelos del tipo *bolted flange plate* BFP2 y BFP3 mostraron mayor resistencia y mejor comportamiento.

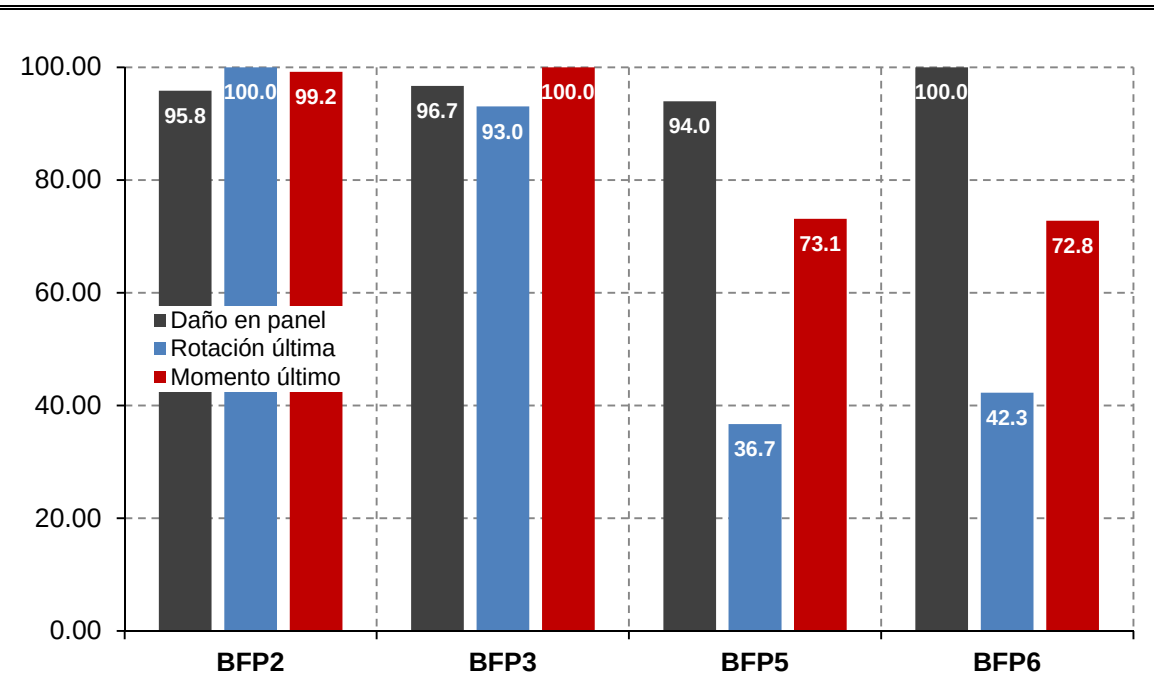


Figura 4.35 Comparación entre modelos de tipo árbol y tipo “bolted flange plate”

A continuación se hace una comparación en la tabla 4.3 entre el número de tornillos y placas de conexión de cada uno de los modelos, observándose que las conexiones del tipo “bolted flange plate” tienen menor número de tornillos y placas de conexión, lo que repercute en menor cantidad de acero y menor peso. Aparte de que la conexión tipo árbol tienen el muñón y éste cuenta con atiesadores y más placas.

Tabla 4.3 Numero de tornillos y placas en las modelos

Modelo	Tornillos patines	Tornillos alma	Tornillos totales	Placas de conexión		Placas totales
				alma	patines	
BFP1	12 (3/4")	4 (5/8")	16	1	2	3
BFP2	12 (3/4")	4 (5/8")	16	1	2	3
BFP3	12 (3/4")	4 (5/8")	16	1	2	3
BFP4	12 (3/4")	10 (5/8")	22	2	6	8
BFP5	12 (3/4")	10 (5/8")	22	2	6	8
BFP6	12 (3/4")	10 (5/8")	22	2	6	8
BFP7	12 (3/4")	10 (5/8")	22	2	6	8

4.6. Comportamiento ante carga cíclica

Los modelos analizados con carga cíclica (ver fig 4.36) se eligieron con base en los resultados observados en los análisis de carga monótona, debido a que las conexiones más rígidas, es decir, los modelos con atiesadores inclinados en la zona de panel y con columna sección cajón, tuvieron un modo de falla alejado de la columna, tales como los modelos BFP2, BFP3 y también el modelo BFP1, que no tiene atiesador inclinado, para comparar.

Así también, se escogió el modelo BFP4 que tiene una falla similar al BFP1 y el modelo BFP7 que no tiene atiesadores en la zona interior de la columna para observar su comportamiento ante este tipo de carga.

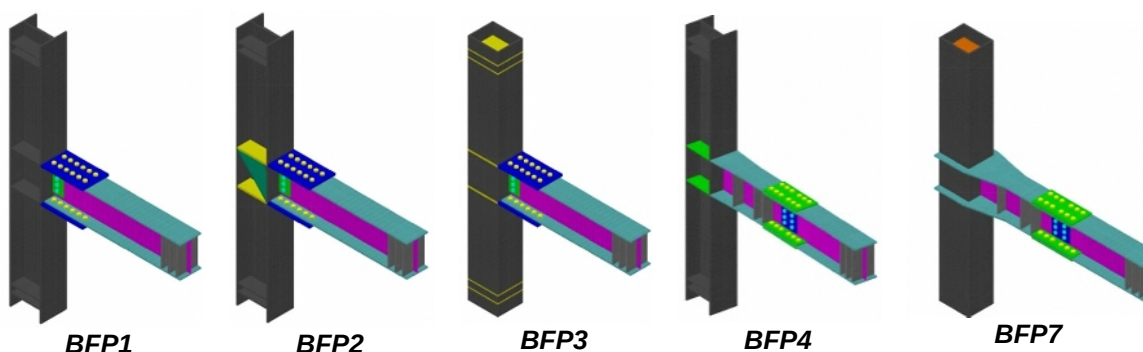


Figura 4.36 Modelos analizados con carga cíclica

El comportamiento, al igual que en los análisis monótonos, será evaluado con curvas momento-rotación cíclicas que servirán para clasificar las conexiones y según se detalla en el AISC (2005) se dividen en marcos especiales a momento (*SMF Special Moment Frames*) y marcos intermedios (*IMF Intermediate Moment Frames*) en relación con las rotaciones inelásticas máximas que se presentan a un 80% del momento teórico plástico. Para los SMF las rotaciones deben de ser por lo menos de 0.04 radianes y para los IMF de 0.02 radianes como mínimo. Sin embargo, el AISC indica que las conexiones que tengan un desempeño con rotaciones dentro del intervalo elástico para rotaciones de 0.01 radianes, pueden tener un nivel de ocupación inmediata. Para evaluar los esfuerzos se utilizan los mismos criterios de los análisis anteriores considerando las mismas escalas de isovalores para el acero de los tornillos y placas.

Analizando las rotaciones de todos los modelos dentro del rango elástico se observa que estas se mantuvieron menores de 0.01, lo que indica un comportamiento satisfactorio. En la tabla 4.4 se muestran las rotaciones y

momento elásticos de cada conexión así como el momento y la rotación plástica desarrollados en el último ciclo aplicado.

Tabla 4.4 Clasificación y rotaciones en el rango plástico y elástico de los modelos sometidos a carga cíclica

Modelo	ϕ_{eu}	Me	ϕ_{pu}	Mp	ϕ_{pu}/ϕ_{eu}	TIPO
BFP1	0.0051	119.39	0.079	237.79	15.19	SMF
BFP2	0.0073	224.26	0.063	331.97	8.63	SMF
BFP3	0.0074	267.81	0.056	335.50	7.57	SMF
BFP4	0.0056	108.73	0.077	199.56	13.75	SMF
BFP7	0.0054	126.35	0.041	196.20	7.59	SMF

ϕ_{eu} Rotación en el límite elástico

Me Momento en el límite elástico

ϕ_{pu} Rotación inelástica en el último ciclo desarrollado

Mp Momento en el último ciclo desarrollado

En las rotaciones máximas inelásticas mostradas en la tabla 4.4 se observa la similitud entre el modelo BFP1 y BFP4, esto por la falla en la zona de panel que tienen ambas. Con relación a las rotaciones se ve que pueden desarrollar más de diez veces su rotación elástica, clasificándolas como lo indica el AISC en el grupo de marcos especiales a momento puesto que también las rotaciones inelásticas (ϕ_{pu}) son mayores de 0.04 radianes. Por las rotaciones finales inelásticas que experimentaron todos los modelos, se pueden clasificar como marcos especiales a momento.

A continuación se describen brevemente algunos modos de falla observados de acuerdo con los esfuerzos que se presentaron durante la aplicación de los ciclos de carga y también la curva momento-rotación cíclica correspondiente a cada modelo.

El modelo BFP1 (ver figs 4.37 a 4.38) presenta un modo de falla similar al modelo analizado con carga monótona, con deterioro rápido de la zona de panel e incursión en esfuerzos inelásticos, por lo tanto, empieza a disipar energía en una etapa muy temprana tal y como se puede observar en su curva momento rotación. Se logran ver zonas de pandeo del alma de la columna en la zona de panel (ver fig. 4.34), esto debido probablemente a la aplicación de los ciclos de carga y por ser ésta la zona que tiene mayor concentración de esfuerzos. La

trabe muestra mayores concentraciones de esfuerzos que su análogo en carga monótona, en cuanto a tornillos, los más esforzados son las hileras que se encuentran en los extremos de los patines, debido las fuerzas que son inducidas por la trabe, pero sin llegar a fallar.

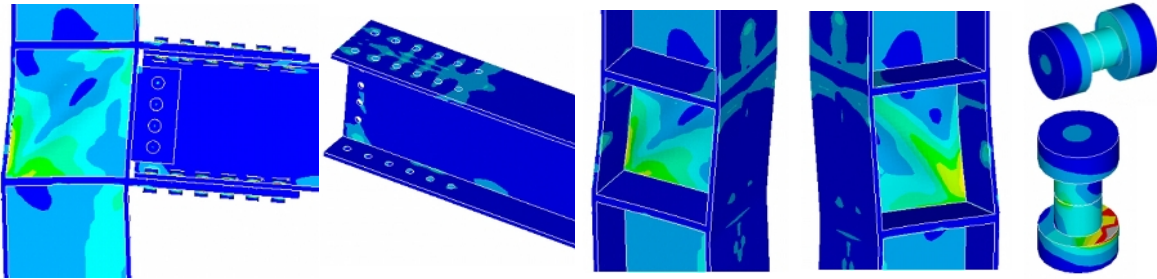


Figura 4.37 Esfuerzos en modelo BFP1, zona de panel, trabe, isométrico de columna en zona de panel, tornillo del alma y tornillo de patín

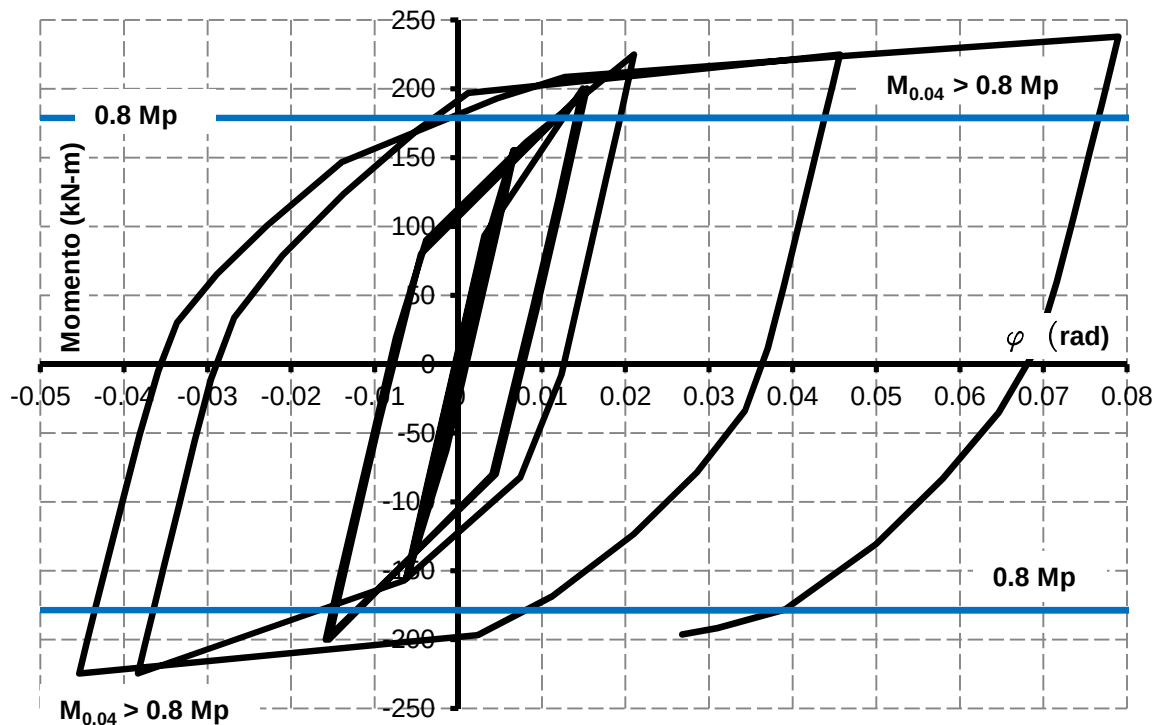
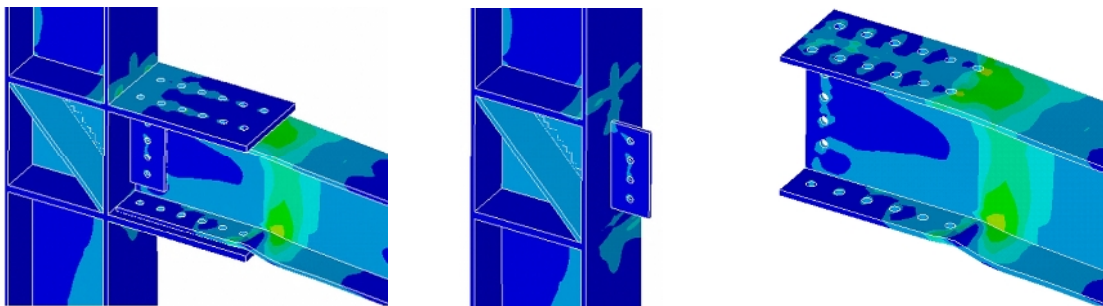
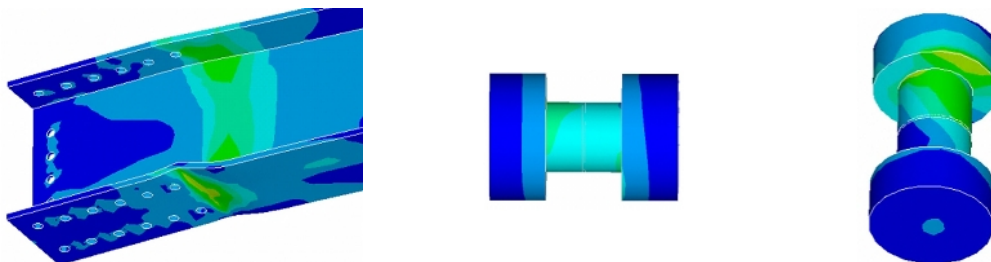


Figura 4.38 Curva de historia momento-rotación para la conexión BFP1

El modelo BFP2 (ver figs 4.39 y 4.40) cuyo panel tiene un atiesador inclinado y por lo tanto más rígido, presenta daño mínimo, por tal razón como se observa en su curva momento-rotación, que las rotaciones son menores y el modelo se mantiene rígido para una carga mayor de lo que soporta el modelo BFP1. La falla principal se da por la aparición de la articulación plástica en la trabe, que es parecida a su análogo en carga monótona y, por lo tanto la columna y los demás elementos tienen esfuerzos menores que el modelo BFP1, los tornillos de los patines (ver fig 4.39 b) tienen una fuerte concentración de esfuerzos inelásticos, principalmente los de las hileras extremas dónde termina la placa de conexión de los patines. La concentración se da entre la unión de la cabeza del tornillo y el vástago, por la fuerza de tensión que ejercen sobre ellos los patines superior e inferior de la trabe, además de aparecer un marcado patrón de esfuerzos en forma diagonal al tornillo. En la curva momento-rotación (ver fig 4.40) se nota que la conexión tiene mayor capacidad de momento llegando hasta 300 kN-m mientras que en el modelo BFP1 el momento máximo alcanzado fue de 240 kN-m y como la conexión presenta rotaciones cercanas a 0.04 radianes, se clasifica según el AISC (2005) como SMF.



a) *Isométrico de conexión, vista de columna en zona de panel, vista superior de trabe*



b) *Vista inferior de trabe, tornillos de alma y tornillo de patines*

Figura 4.39 Esfuerzos en el modelo BFP2 en carga cíclica

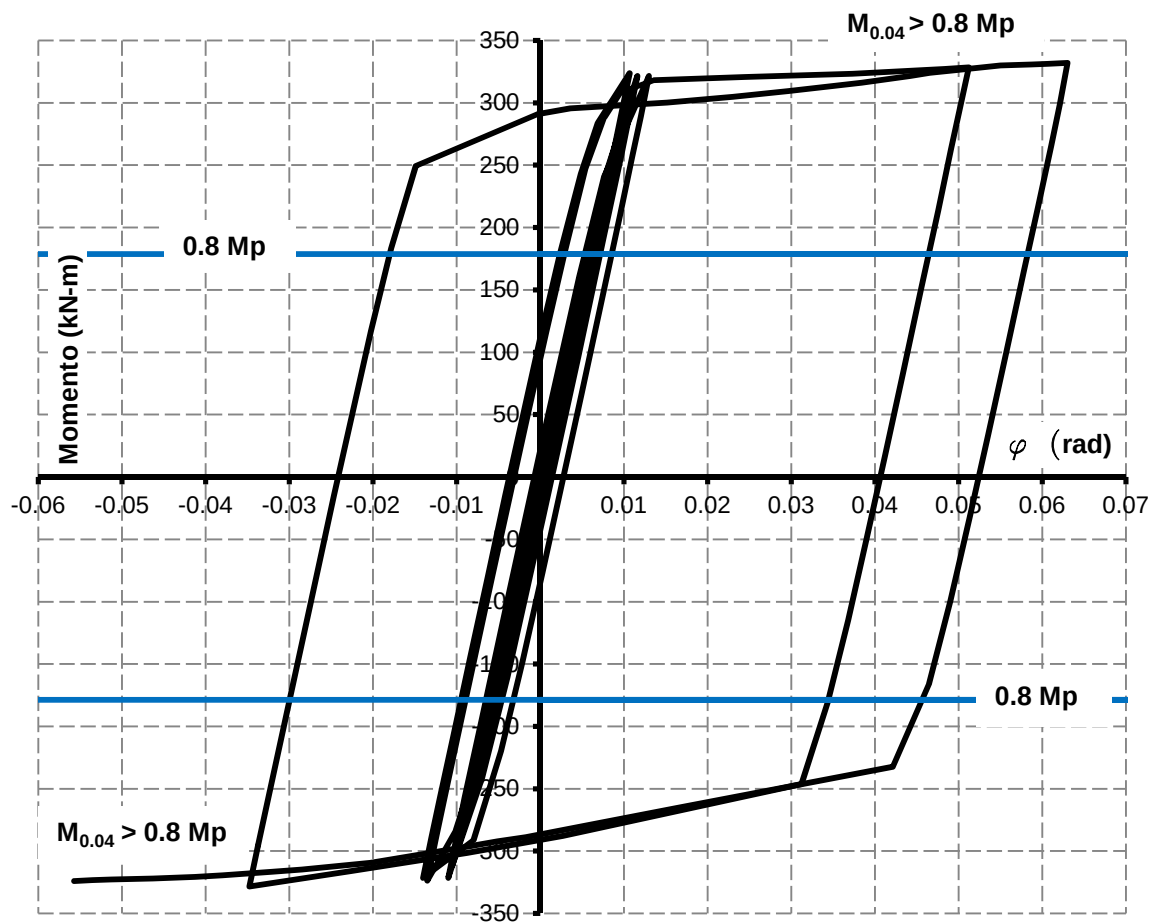
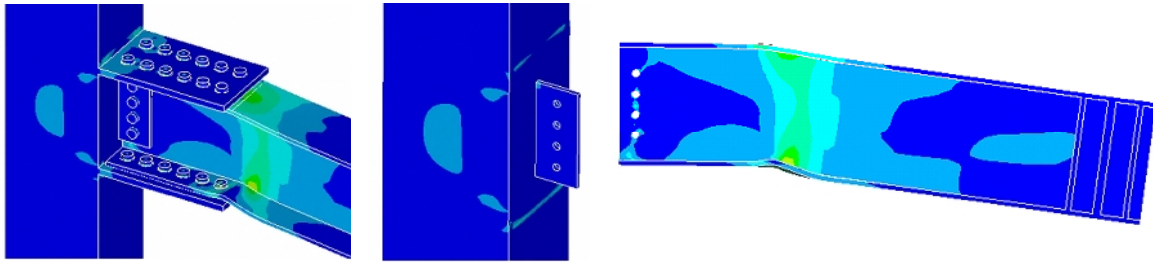
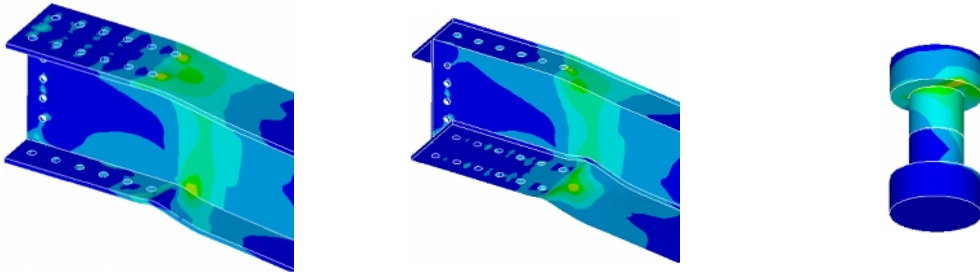


Figura 4.40 Curva de historia momento-rotación para la conexión BFP2

Modelo BFP3 (ver figs 4.41 a 4.42); tiene comportamiento y modo de falla parecidos al modelo BFP2. La cual se da por la formación de la articulación plástica en la viga. También contribuye a la falla por la incursión en el rango plástico, la hilera de tornillos exteriores del patín inferior y superior de la viga, justo donde termina la placa de conexión. El tornillo del patín inferior como se ve en la figura 4.41 b, tiene una concentración de esfuerzos entre la cabeza del tornillo y el vástago ocasionada por el patín de la viga. Aquí la columna tiene menor concentración de esfuerzos en el alma que en el modelo anterior.



a) Isométrico de conexión, vista de columna, elevación de trabe



b) Vista superior de trabe, vista inferior de trabe, tornillo de patín

Figura 4.41 Esfuerzos en el modelo BFP3 en carga cíclica

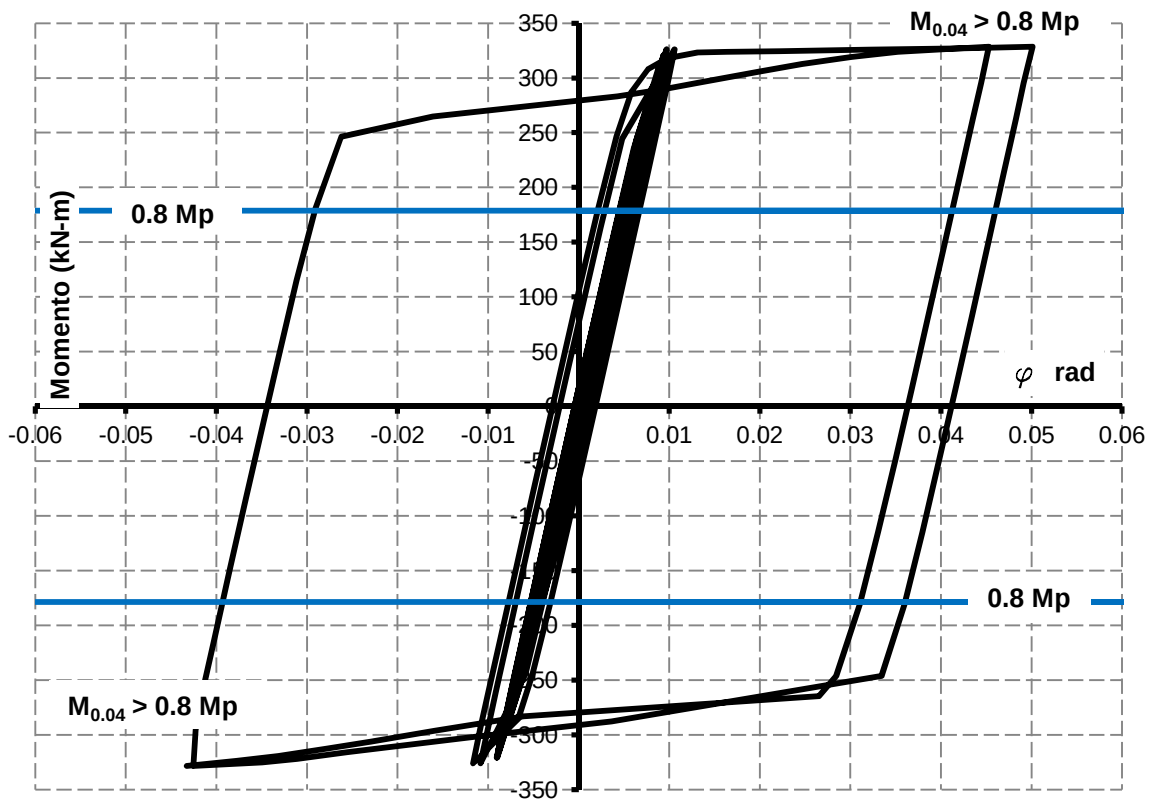
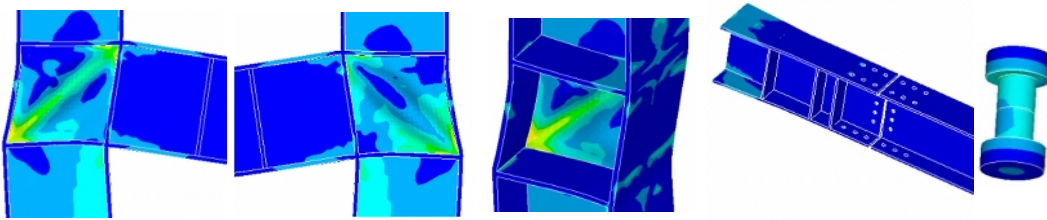


Figura 4.42 Curva de historia momento-rotación para la conexión BFP3

Modelo BFP4 (ver fig 4.43 a 4.44); la falla principal ocurre en la zona de panel formándose un patrón de esfuerzos en diagonal resultado de las fuerzas inducidas por el muñón; se observa en la figura 4.43 que el alma se pandea como resultado de los ciclos de carga aplicada y los esfuerzos inelásticos importantes en el alma de la columna cerca del patín de inferior de la trabe y justo por debajo del panel provocados por la compresión que le generan el patín inferior de la trabe y el atiesador del panel. Los demás elementos de la conexión no sufren daños considerables tienen un buen comportamiento.



a) Vista zona de panel, de columna, isométrico de trabe y tornillo de patín

Figura 4.43 Esfuerzos en el modelo BFP4 en carga cíclica

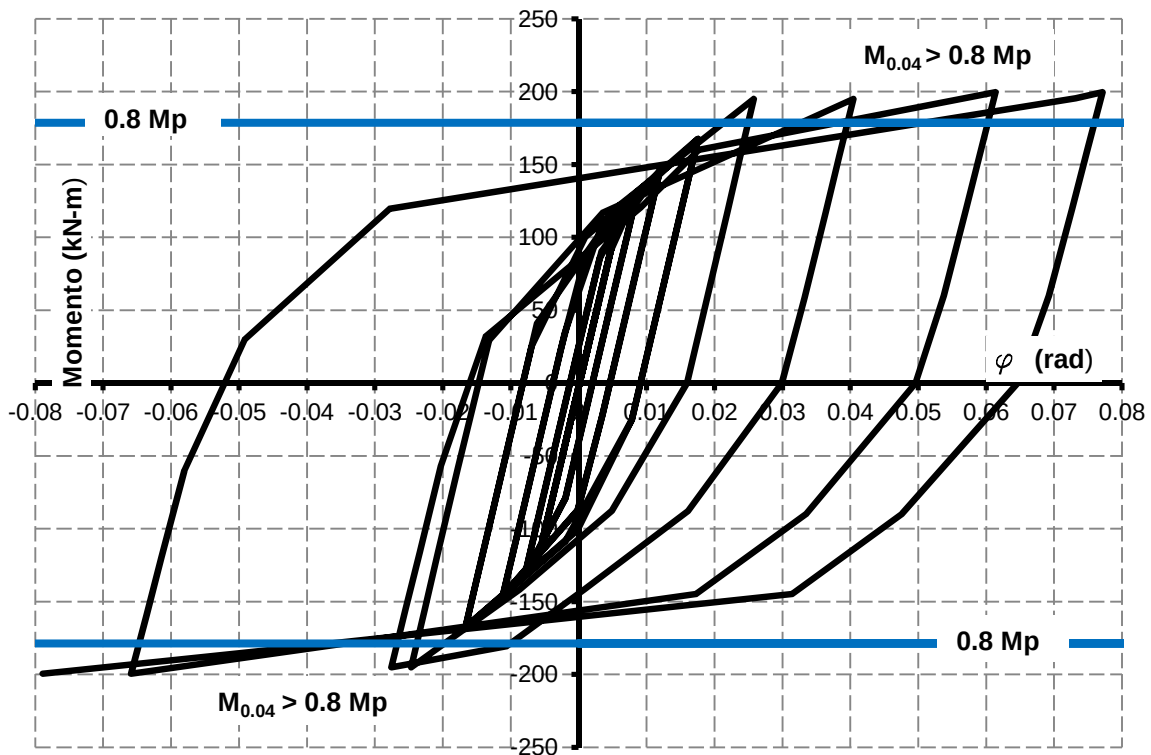
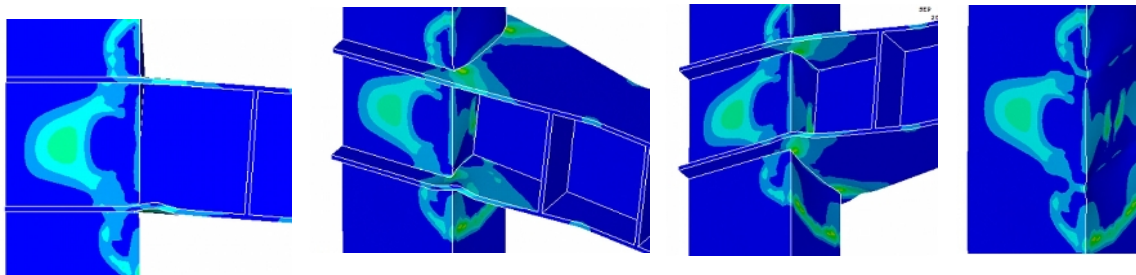
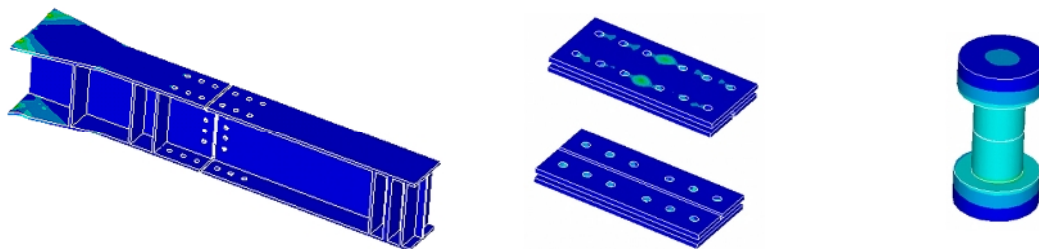


Figura 4.44 Curva de historia momento-rotación para la conexión BFP4

Modelo BFP7 (ver figs 4.45 y 4.46); en este modelo la falla se produce en el muñón y la columna, específicamente el mayor daño se concentra en las almas y patín de la columna formándose esfuerzos de orden inelástico en el centro del panel y la plastificación del patín en una zona situada aproximada a diez centímetros debajo del muñón, esto se atribuye a la ausencia de atiesadores interiores en la columna. También se observa que los patines del muñón se plastifican en los vértices de la columna provocando que disminuya rápidamente la rigidez de la conexión. Los elementos restantes como las placas de conexión de los patines y alma y tornillos permanecen estables y sin mostrar deterioro importante en su rigidez.



a) Vistas en planta e isométrico de la zona de panel y vista de columna



b) Isométrico de trabe, placas de conexión de patines y tornillo de patines

Figura 4.45 Esfuerzos en el modelo BFP7 en carga cíclica

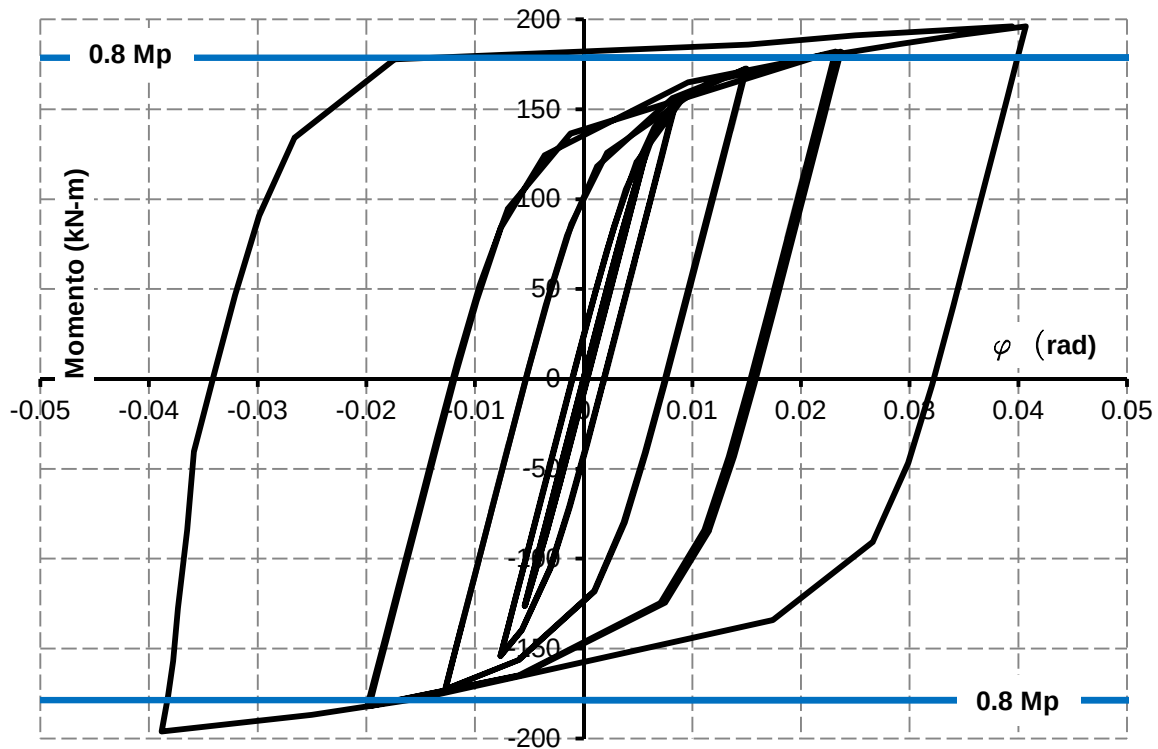


Figura 4.46 Curva de historia momento-rotación para la conexión BFP7

4.7. Comparación del comportamiento cíclico entre modelos del tipo Bolted Flange Plate

En cuanto a rotaciones inelásticas máximas desarrolladas, se tuvo un mayor desempeño para la conexión BFP1 siendo esta de 0.079 radianes, pero bajo la plastificación de la zona de panel en la columna; en cambio la conexión BFP2 obtiene rotaciones de 0.063 radianes mostrando un mejor comportamiento, con la ventaja de que se desarrolla la capacidad de la viga en el rango inelástico y la estabilidad de la columna no se pone en riesgo. Para la conexión BFP3 la rotación última es del orden de 0.056 radianes también con una falla análoga al modelo BFP2. Ahora comparando a los 3 modelos, evidentemente el BFP2 y BFP3 mostraron un mejor comportamiento desarrollando la articulación plástica en la viga (ver fig 4.47) y con un daño menor en la zona de panel, clasificándose como conexiones aptas para marcos especiales a momento.

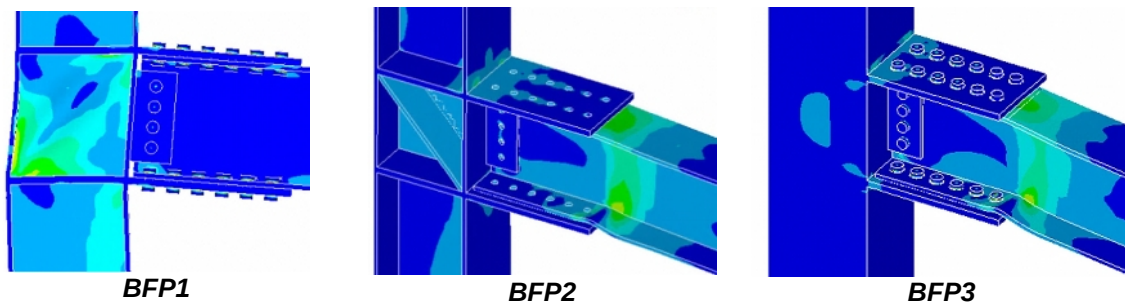


Figura 4.47 Modos de falla con carga cíclica en conexiones bolted flange plate

A continuación se presenta de forma gráfica en la figura 4.48 una comparación de los tres modelos en relación con el momento último, rotación última y esfuerzo máximo desarrollado en la zona de panel, en porcentaje, tomando como base el mayor valor.

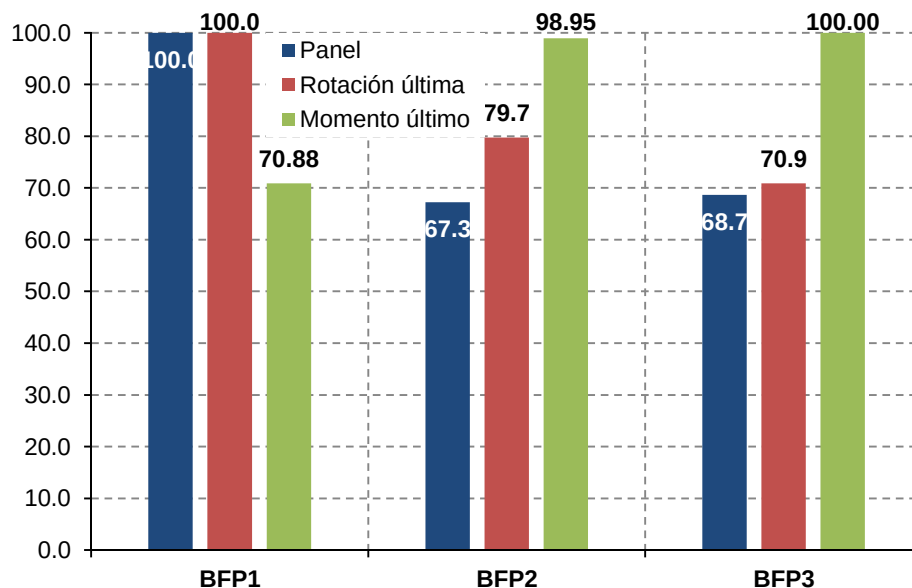


Figura 4.48 Comparación de modelos bolted flange plate en carga cíclica

Se observa en la figura 4.48 que el mejor comportamiento es el descrito por los modelos BFP2 y BFP3.

4.8. Comparación del comportamiento cíclico entre modelos del tipo árbol

Estas conexiones mostraron un comportamiento similar en cuanto a momento último, con una diferencia de menos del 2%, la cual se puede observar en la

figura 4.49. Existen diferencias en la rotación y resistencia del panel porque el modo de falla no es similar y la cual se puede observar en la figura 4.50.

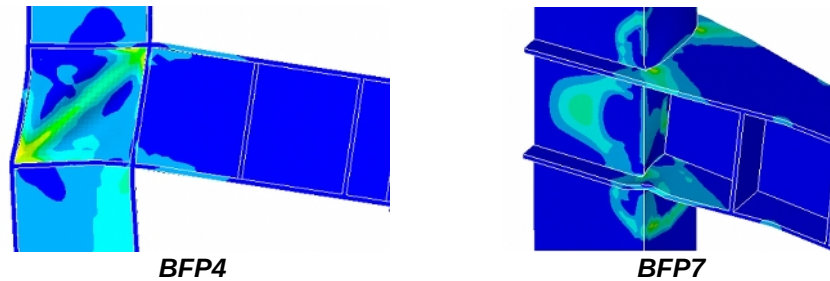


Figura 4.49 Modos de falla con carga cíclica en conexiones tipo árbol

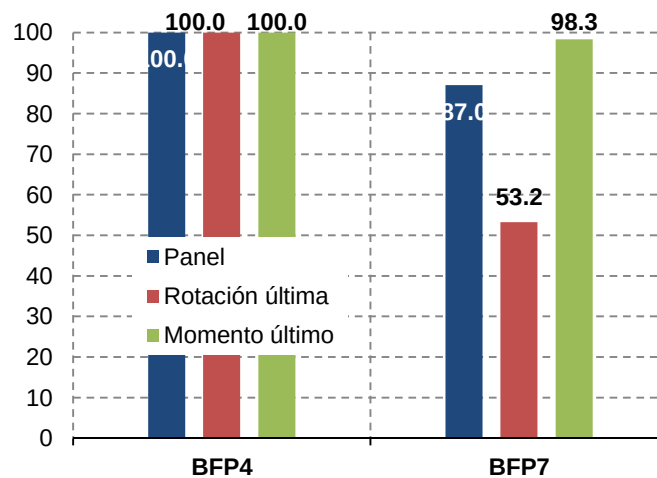


Figura 4.50 Comparación de modelos tipo árbol en carga cíclica

Por lo tanto, la característica que hace que el modelo BFP4 tenga un mejor desempeño en cuanto a momento último y menor daño en el panel es el atiesador inclinado, así como el atiesador interior para la columna en el modelo BFP7.

4.9. Comparación entre modelos de carga monótona y cíclica

A continuación se presenta en la tabla 4.5 un resumen de las rotaciones elásticas e inelásticas con su correspondiente momento, de los modelos analizados con carga monótona y cíclica, así también se muestran las gráficas de historia momento-rotación para los análisis cíclicos con su curva de análisis monótono que les corresponde.

Tabla 4.5 Relaciones entre curvas de análisis cíclicos y monótonos

Modelo	My			ϕ_y			Mu			ϕ_u		
	Mono	Cic	Radio	Mono	Cic	Radio	Mono	Cic	Radio	Mono	Cic	Radio
BFP1	127.14	119.39	0.94	0.0051	0.0051	1.00	282.53	237.79	0.84	0.1572	0.0790	0.50
BFP2	154.51	200.12	1.30	0.0058	0.0064	1.10	342.83	331.97	0.97	0.0875	0.0630	0.72
BFP3	223.67	267.81	1.20	0.0063	0.0074	1.17	345.58	335.50	0.97	0.0814	0.0560	0.69
BFP4	104.13	108.73	1.04	0.0055	0.0056	1.02	241.95	199.56	0.82	0.1434	0.0770	0.54
BFP7	105.23	126.35	1.20	0.0047	0.0054	1.15	226.24	196.20	0.87	0.0833	0.0410	0.49

En dónde:

ϕ_y Rotación en el límite elástico

My Momento en el límite elástico

ϕ_u Rotación a la falla

Mu Momento último

El modelo BFP1 (ver fig 4.51). Clasificado como SMF, tiene un comportamiento similar en la fase monótona y cíclica en relación con el momento y la rotación en la zona elástica. Analizando el área inelástica, se llega a un 80% del momento último y un 50% de la rotación de los valores alcanzados en la fase monótona, esto es debido a que el panel se plastifica y por la repetición de carga que sufre, la resistencia también disminuye proporcionalmente. Se puede observar en la figura 4.37 que el modelo cíclico tiene mayor daño en el panel que el monótono.

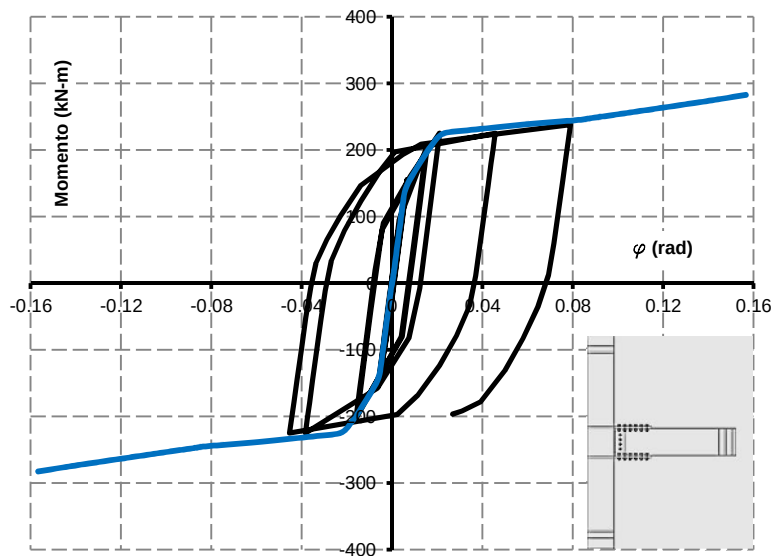


Figura 4.51 Curvas momento- rotación de carga cíclica y monótona para el modelo BFP1

El modelo BFP2 (ver fig 4.52). Se observó con diferencias para la parte elástica e inelástica en ambas fases de carga, con un 30% en el momento y un 10% en la rotación elástica. Para la parte inelástica el momento se logró del 97% y la rotación del 72%, la diferencia es pequeña en el momento, porque corresponde a la parte dónde la trabe se plastifica tal y como se observa en la figura 4.52, sin embargo, la diferencia es mayor en las rotaciones, porque la pendiente de la curva es pequeña por lo que a un ligero aumento de carga las rotaciones son más grandes debido a que la rigidez es proporcional a la pendiente de la curva. Este modelo muestra una falla parecida en los dos tipos de carga que se analizó.

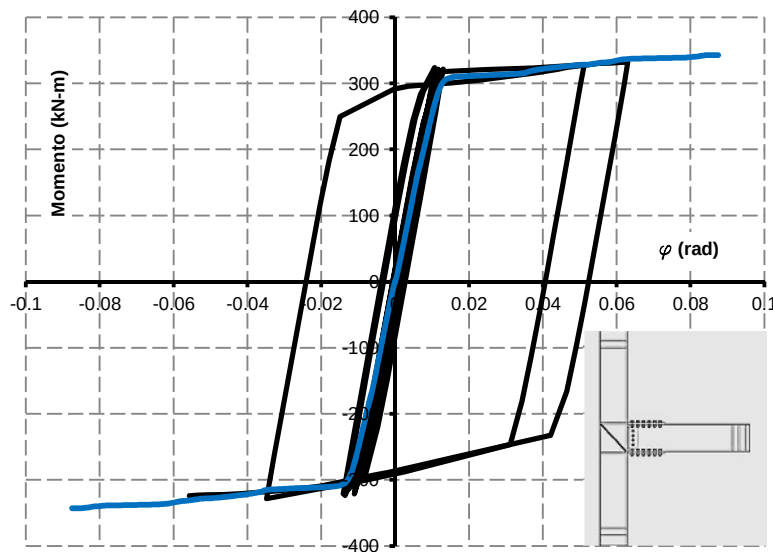


Figura 4.52 Curvas momento- rotación de carga cíclica y monótona para el modelo BFP2

Modelo BFP3 (ver fig 4.53). Tiene un comportamiento similar al modelo BFP2 en ambas fases de carga, se observa la semejanza entre las gráficas de los modelos en las figuras 4.52 y 4.53. En la zona elástica el momento y las rotaciones muestran diferencias en 20% y 10% respectivamente. En cuanto al momento último se observó muy similar ya que se alcanzó un 97% del desarrollado en la fase monótona y solo se alcanza un 69% de la rotación por la misma razón que en el modelo BFP2. En las dos fases de carga se logra que la viga se plastifique, tal afirmación se observa claramente en su curva momento rotación en dónde los últimos ciclos le corresponden a la trabe.

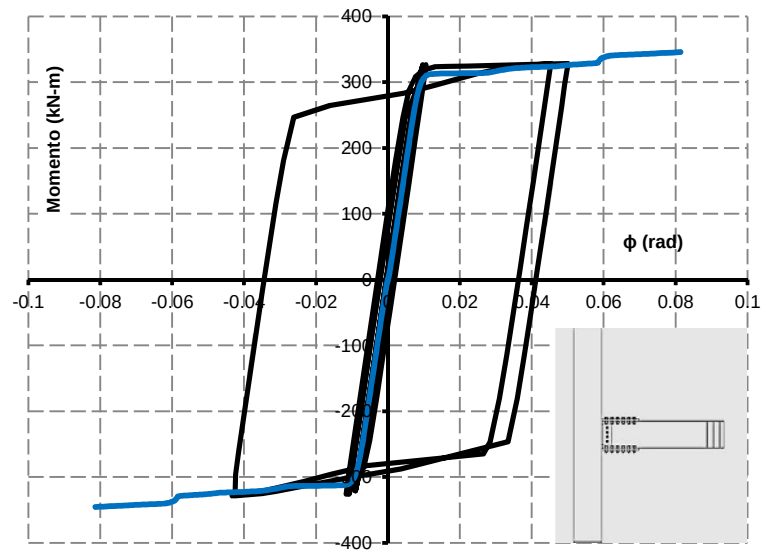


Figura 4.53 Curvas momento-rotación de carga cíclica y monótona para el modelo BFP3

Modelo BFP4 (ver fig 4.54). Por las rotaciones inelásticas que desarrolla se clasifica como SMF, en esta conexión se observó un tipo de falla semejante al modelo BFP1, ésta es por plastificación del alma de la columna en la zona de panel. En el intervalo elástico las rotaciones y el momento son muy similares apenas con una diferencia de 3% en promedio. En la fase inelástica el momento último alcanzado es del 80% del desarrollado en la fase monótona y la rotación correspondiente de 54%.

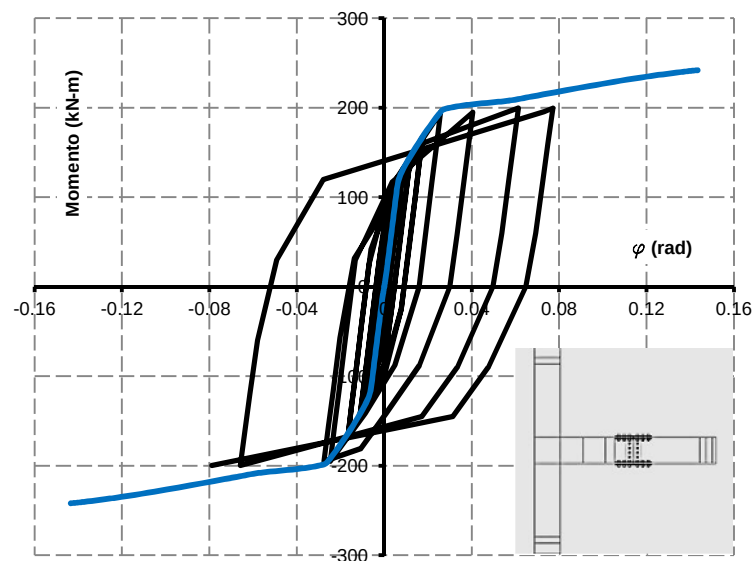


Figura 4.54 Curvas momento-rotación de carga cíclica y monótona para el modelo BFP4

Modelo BFP7 (ver fig 4.55). Mostró patrones de esfuerzos y falla semejantes a su análogo en carga monótona, la diferencia en la zona elástica para momento y rotación es de 20 y 15% respectivamente. Para la parte plástica se alcanzó un momento último de 87% y una rotación inelástica de 49%, la diferencia se debe principalmente a la poca resistencia que ofrece esta conexión ante el aumento de momento, como se puede verificar en su gráfica momento-rotación ya que cada ciclo de histéresis es más grande que el anterior con un aumento pequeño del momento.

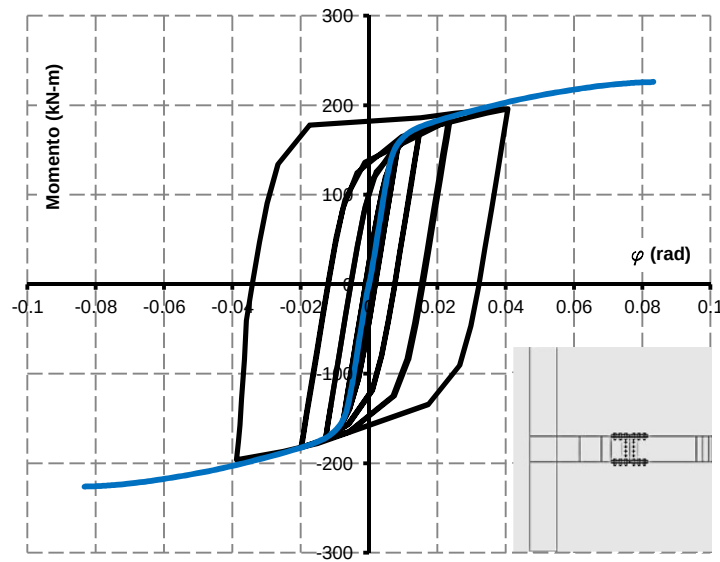


Figura 4.55 Curvas momento rotación de carga cíclica y monótona, a) Modelo) BFP7

4.10. Comparación entre conexiones tipo end-plate y las conexiones tipo bolted flange plate en carga monótona

Como se mencionó en capítulos anteriores los modelos aquí analizados tienen las mismas características en cuanto a dimensiones de trabe y columna, tipo de material para las placas y los tornillos que los utilizados en el trabajo de Ruiz (2010), el cual analiza ocho configuraciones de conexiones denominadas placa-tope (end-plate) con carga cíclica y monótona. En este trabajo, la variante es el tipo de conexión en cuanto a placas y número de tornillos. Por lo tanto, la comparación se hace con el fin de observar que conexiones tienen un mejor comportamiento en lo referente al momento máximo desarrollado para la zona elástica y el momento último alcanzado a través de los dos tipos de carga a que fueron sometidos los modelos, siendo éstas la monótona y la cíclica.

Adicionalmente se presenta la tabla 4.6 en donde se resumen las características de todos los modelos analizados en Ruiz (2010).

Tabla 4.6 Resumen de características en modelos del trabajo de Ruiz (2010)

Modelo	Designación AISC	Alejada patín de columna	Refuerzo de patín de columna	Espesor de placa de extremo (mm)	Diametro del tornillo (mm)	Numero de tornillos por patín	Rigidizador de Columna	Cartabón
CNV	4E	no	si	20	20	4	si	no
CN1	4E	no	no	20	20	4	no	no
CN2	4E	no	no	20	20	4	si	no
CN3	4ES	no	no	20	20	4	si	si
CN4	8ES	no	no	20	20	8	si	si
CN5	8E-4W	si	no	20	20	8	si	no
CN2V	4E	no	si	20	20	4	si	no
CN3V	4ES	no	si	20	20	4	si	si
CN4V	8ES	no	si	20	20	8	si	si

En la figura 4.56 se encuentran los modelos tipo “end-plate” analizados por Ruiz (2010), solo se muestran los que desarrollaron mayor resistencia, los cuales van a ser comparadas y son los siguientes: CN3, CN4, CN3V y CN4V. Para las conexiones de tipo “bolted flange plate” las elegidas son: BFP2, BFP3, BFP4, BFP5 y BFP6; sin embargo, las conexiones BFP3 y BFP6 no se pueden comparar porque tienen columna de diferente sección, pero se muestran con fines ilustrativos.

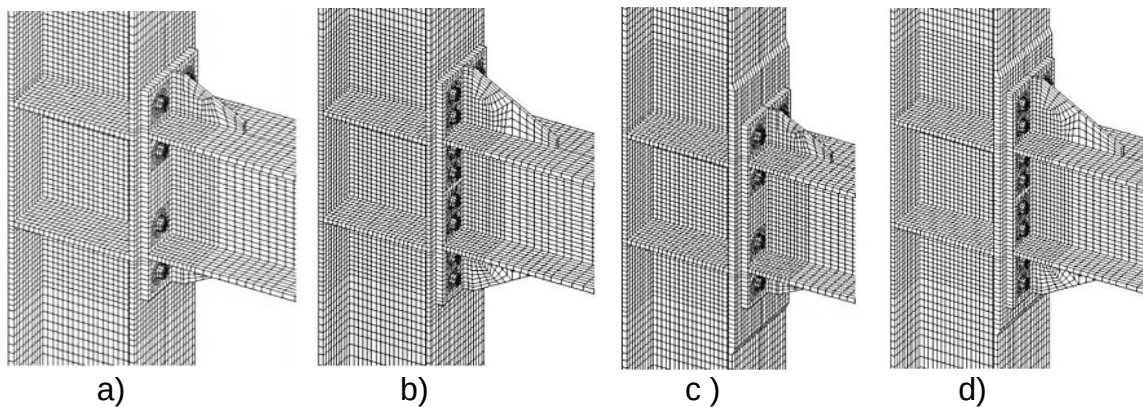


Figura 4.56 Modelos tipo end-plate, a) CN3, b) CN4, c) CN3V, d) CN4V

La comparación se realiza de la misma forma que se ha hecho en temas anteriores, mediante graficas expresadas en porcentaje, tomando como máximo o como el 100% aquel valor que sea mayor para cada uno de los parámetros que se estudian, tales como: momento elástico y plástico en carga monótona, momento elástico y plástico en carga cíclica para ambos tipos de conexiones.

A continuación se muestran en la figura 4.57 las gráficas de los momentos para la zona elástica; observándose que la conexión BFP3 (columna cajón) tiene el

mayor valor. Para los demás modelos la variación del valor es aproximadamente del 8%.

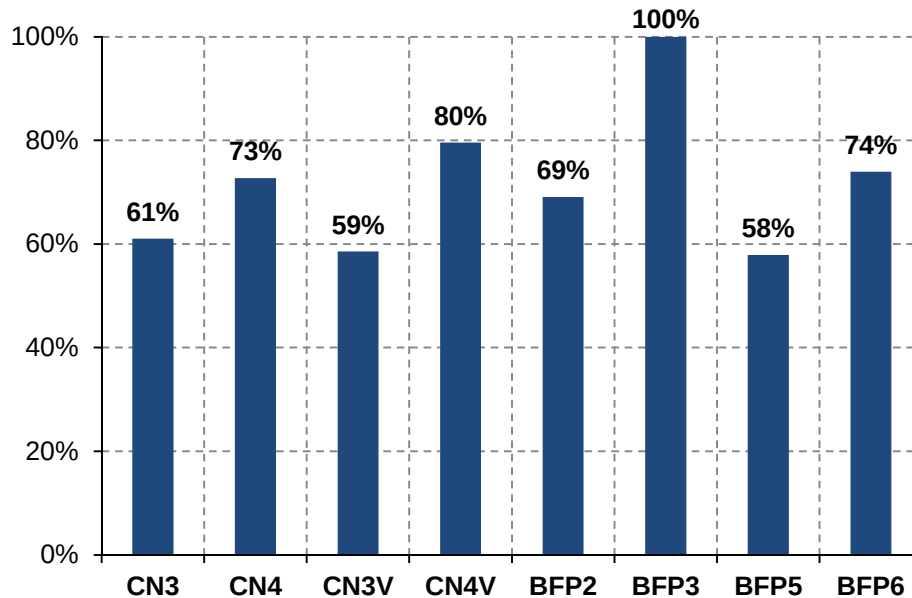


Figura 4.57 Comparación en la zona elástica para los análisis monótonos

En la figura 4.58 se observa la gráfica del momento último desarrollado por las conexiones y se nota que los modelos BFP2 y BFP3 del tipo “bolted flange plate” poseen la mayor capacidad sobre los demás. Por lo tanto, para la zona elástica e inelástica las conexiones “bolted flange plate” han tenido mayor capacidad.

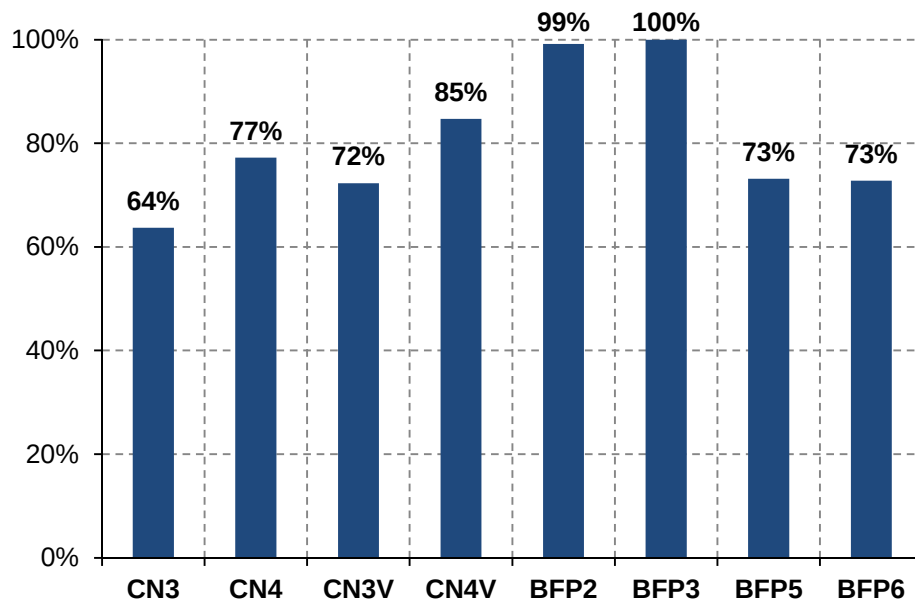


Figura 4.58 Comparación del momento último para los análisis monótonos

Todo lo anterior fue solo para la carga monótona, ahora se examina la parte cíclica tomando en consideración los parámetros usados en la fase anterior. En las siguientes gráficas se muestran la parte elástica y de momento último de los modelos analizados con carga cíclica que corresponden a las figuras 4.59 y 4.60 respectivamente.

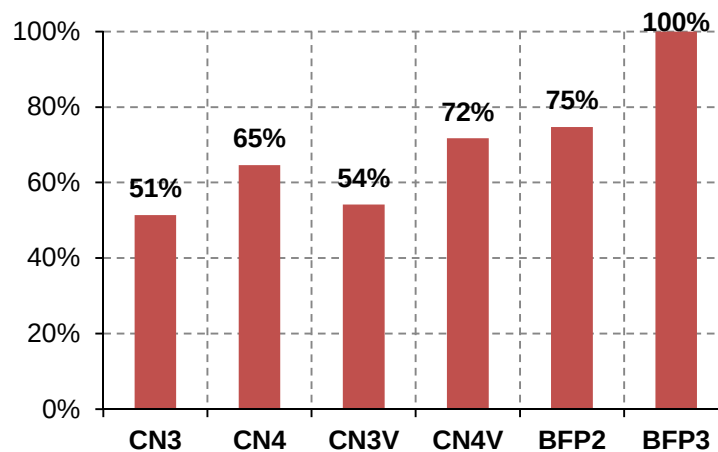


Figura 4.59 Momentos en la zona elástica para los análisis cíclicos

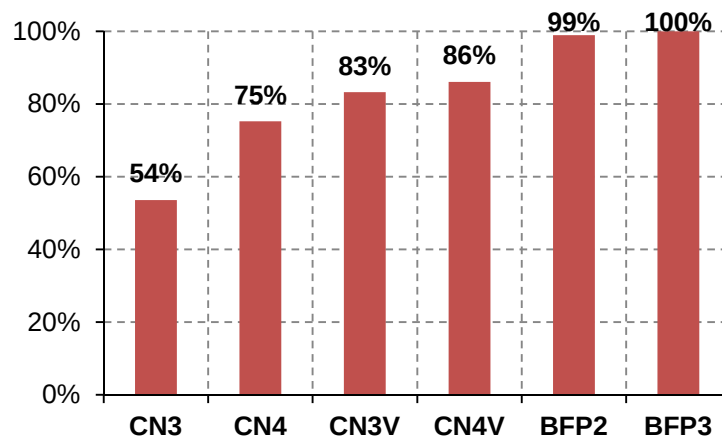


Figura 4.60 Momento último desarrollado para los análisis cíclicos

Las gráficas para el momento en zona elástica y plástica indican que las conexiones BFP2 y BFP3 son superiores en resistencia sobre la tipo “end-plate”. Por lo tanto, según los datos analizados se infiere que la conexión tipo “bolted flange plate” es dominante sobre la tipo “end-plate”, además de que la articulación plástica se forma en la trabe y el daño es menor en el panel de la columna.

Capítulo 5

5. CONCLUSIONES

Se determinó el comportamiento de las conexiones tipo “brida” (bolted flange plate) y tipo “árbol”, mediante curvas carga-desplazamiento y momento-rotación para carga monótona y cíclica, también se observó el modo de falla experimentado mediante esfuerzos máximos en cada una de las partes de las conexiones.

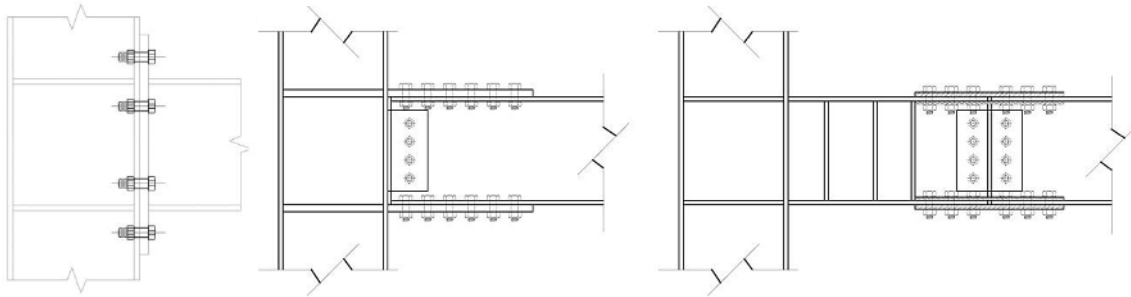
Los modelos de las conexiones fueron validados mediante un modelo del tipo “end-plate” que fue generado y comparado con un modelo del estudio de Ruiz (2010). Ya que se obtuvieron resultados con buena exactitud y precisión, los algoritmos y parámetros configurados fueron extrapolados para realizar los nuevos modelos del tipo brida y árbol.

En lo que respecta al comportamiento desarrollado por los modelos debido a la aplicación de carga monótona y cíclica se comenta lo siguiente:

En general, en todos los modelos analizados la rigidez de la columna juega un papel muy importante y principalmente la del **panel**, que es la que define el comportamiento final de la conexión. En los modelos sin atiesadores inclinados en la zona de panel, como el BFP1 y BFP4, el modo de falla fue semejante, dado que la conexión falló por plastificación de esta zona, al contrario de los modelos que sí contaban con ellos, como el BFP2 y BFP5. En estos últimos, el tipo de falla cambió completamente, puesto que ahora el alma no se plastifica, sino que la articulación plástica se forma en la trabe y se aleja del paño de la columna, además aumenta sustancialmente la capacidad a momento. Lo mismo sucede con los modelos que cuentan con columna de sección cajón, como el BFP3 pues la resistencia a momento aumenta y el panel se mantiene sin daños considerables en cuanto a que la concentración de esfuerzos inelásticos y la falla se producen en la trabe.

A continuación se hacen comentarios más específicos acerca del tipo de conexiones analizadas y la respuesta en cada una de ellas. En las siguientes figuras se muestran de izquierda a derecha los distintos tipos de conexiones,

empezando con la tipo “end-plate” (placa –tope), tipo “brida” (bolted flange plate) y tipo “árbol”.



Conexiones de tipo bolted flange plate

El modelo BFP1 (sin atiesadores en la zona de panel en la columna), experimenta una falla marcada por la plastificación del panel y se observó que el uso de atiesadores inclinados proporciona un mejor comportamiento y un aumento de resistencia a momento de la conexión en más de un 20%, sobre el modelo que no los tiene (BFP1). Lo anterior tanto para el modelo con columna en sección I (BFP2), como en la de sección cajón (BFP3); debido a que la falla en ambos casos fue por plastificación de la viga. En todos los casos la ecuación que predice la resistencia en la sección neta de la viga tiene una buena exactitud. El comportamiento en carga monótona y cíclica fue similar para los modelos BFP2 y BFP3, mostrando la misma forma de falla. Por las rotaciones inelásticas que desarrollaron se clasifican dentro de los marcos especiales a momento.

Se concluye que al rigidizar el alma de la columna en la zona de panel por medio de atiesadores o con una columna de sección cajón, cambia el comportamiento y modo de falla de la conexión. Se aumenta la capacidad a momento, se obtiene el comportamiento deseado que corresponde a un modo de falla más dúctil, debido a que la articulación plástica se forma en la trabe y no en la columna.

Conexiones del tipo árbol

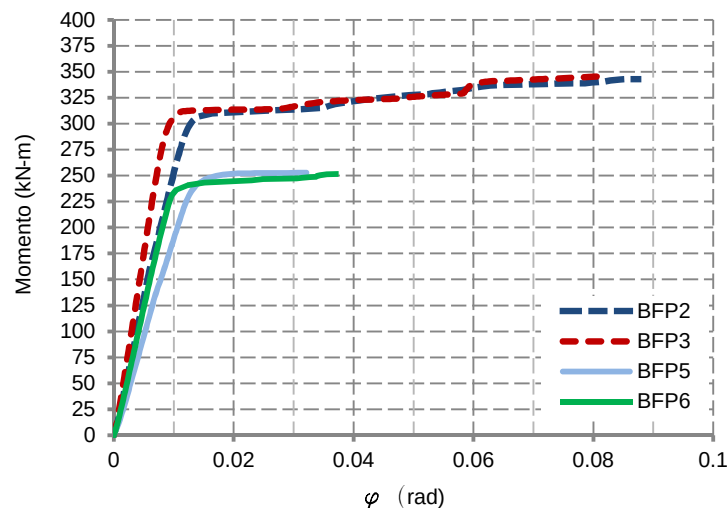
En este tipo de conexiones también se notó la influencia de la rigidez del panel en el comportamiento de la conexión debido a que el modelo BFP4, que no cuenta con atiesadores, falló por plastificación del alma, en cambio de los BFP5 y BFP6 que sí los tienen tuvieron un modo de falla distinto.

Esta configuración de conexión desarrolló la mayor parte de daño en la unión del muñón con el patín de la columna y el patín de la columna, sin que los demás elementos tuvieran problemas.

En el modelo BFP7 que no tiene atiesador interior en la columna, se observó un comportamiento diferente al de los modelos anteriores pues ahora las almas y patines de la columna son los que reciben mayor daño, así también por el pandeo que sufren las placas de los patines del muñón, lo cual indica que es necesario el uso de este tipo de atiesadores para cambiar el modo de falla en la conexión.

Comparación entre las conexiones tipo “brida” (bolted flange plate) y tipo “árbol”

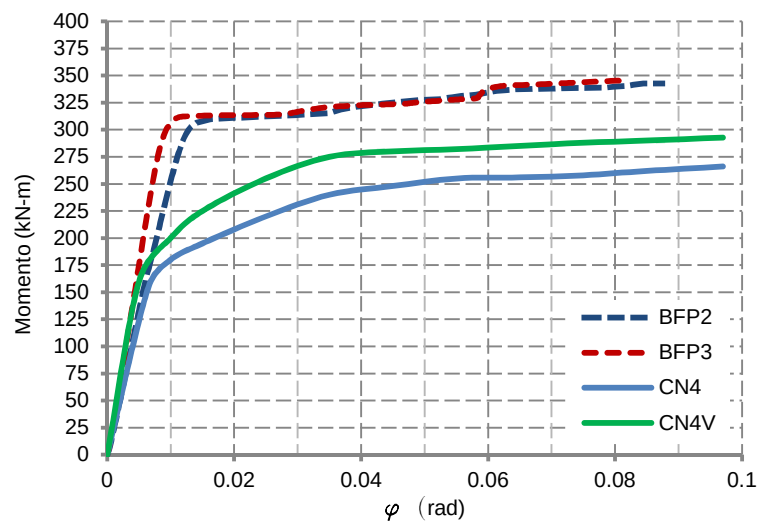
Los modelos tipo “brida” con mayor rigidez en el panel (BFP2, BFP3) fueron los que tuvieron mejor comportamiento sobre los modelos del tipo “árbol”, en cuanto a mayor momento desarrollado (aproximadamente un 30% más), mayores rotaciones inelásticas y un modo de falla que hace que la articulación se forme lejos de la columna y ésta se presente en la trabe. Los tornillos en el alma no presentaron ningún problema y los de los patines, principalmente la hilera extrema en las conexiones tipo “brida”, son los que tuvieron mayores esfuerzos. En la siguiente figura se muestran de forma ilustrativa las curvas momento-rotación de los dos tipos de conexiones.



En relación con detalles geométricos y constructivos de las conexiones, se observó que las conexiones “brida” utilizan menor cantidad de placas de conexión y tornillos, al contrario de las tipo “árbol”, lo que repercute en disminución del costo.

Comparación entre conexiones “brida” (conectada en la trabe) y “end-plate” (conectada en el extremo)

En los análisis monótonos y cíclicos las conexiones “brida”, específicamente los modelos BFP2 y BFP3 tuvieron un mejor comportamiento, desarrollando más capacidad a momento (aproximadamente un 20 %) sobre las más resistentes de las tipo “end-plate”. Por su capacidad de rotación inelástica, los marcos con el primer tipo de conexión se clasifican de acuerdo con el AISC como marcos especiales a momento. Los tornillos mayormente esforzados son los de las conexiones tipo “end-plate”, pues algunos de ellos incluso llegaron a la falla y los de las conexiones “brida” solo tuvieron esfuerzos inelásticos y concentraciones provocadas por los patines de la trabe, pero sin que alguno de ellos fallara. En la siguiente gráfica se muestran las curvas momento –rotación de ambos tipos de conexiones.



Por lo tanto y de acuerdo con los resultados obtenidos, se recomiendan las conexiones tipo brida con atiesadores inclinados, pues fueron las que tuvieron mejor comportamiento y un buen modo de falla, desarrollado la capacidad plástica de la viga y alejándose la articulación plástica de la columna.

REFERENCIAS

AISC (1999), “Stiffening of Wide-Flange Columns at Moment Connections: Wind and Seismic Applications, Steel Design Guide 13”, *American Institute of Steel Construction*, Inc., Chicago, IL.

AISC (2003), “Flush and extended Multiple-row End-Plate Moment End-Plate Connections, Steel Design Guide 16”, *American Institute of Steel Construction*, Inc., Chicago, IL.

AISC (2004), “Extended End-Plate Moment Connections Seismic and Wind Applications, Steel Design Guide 4”, Second Edition, *American Institute of Steel Construction*, Inc., Chicago, IL.

AISC (2005), “Steel construction manual”, *American Institute of Steel Construction*, Inc. 13a Ed., Chicago IL.

AISC (2005a), “Seismic Provisions for Structural Steel Buildings”, *American Institute of Steel Construction*, Inc., Chicago, IL.

AISC (2005b), “Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications”, *American Institute of Steel Construction*, Inc., Chicago, IL.

AISC (2009), “Supplement No. 1 to Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications”, *American Institute of Steel Construction*, Inc., Chicago, IL.

AISC (2005c), “Specification for structural steel buildings”, *American Institute of Steel Construction*, Inc., Chicago, IL.

AISC (2010), “Design examples Version 13.1”, *American Institute of Steel Construction*, Inc., Chicago, IL.

ANSYS Release 11.0 Documentation (2007), Ansys Inc. Theory Reference.

ANSYS Release 11.0 Documentation (2007), Ansys Inc. Structural Analysis Guide.

ANSYS Release 11.0 Documentation (2007), Ansys Inc. Contact Technology Guide.

ASM International (2002), “Atlas of Stress – Strain Curves”, *American Society of Metals*.

Beer, F. P., Johnston (2007), “Mecanica de Materiales. McGraw Hill, cuarta edicion.

Chou, C. et al (2006), “Weakened and Strengthened Steel Moment Connections”, *4th International Conference on Earthquake Engineering Journal of Structural Engineering Taiwan*, (paper 152).

De Buen, O. (1980), “Estructuras de acero, Comportamiento y Diseño”, *Limusa*, México, D. F., 1980.

Departamento del Distrito Federal (2004), “Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras Metálicas”, *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Mexico, D.F.

FEMA (2000a), FEMA-350, “Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings”, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.

FEMA (2000b), FEMA-351, “Recommended Seismic Evaluation and Upgrade Criteria for Welded Moment-Resisting Steel Frame Structures”, *Federal Emergency Management Agency*, Washington, DC.

FEMA (2000c), FEMA-352, “Recommended Post-Earthquake Evaluation and Repair Criteria for Welded Moment-Resisting Steel Frame Structures”, *Federal Emergency Management Agency*, Washington, DC.

FEMA (2000d), FEMA-353, "Recommended Specifications and Quality Assurance Guidelines for Steel Moment-Frame Construction for Seismic Applications", *Federal Emergency Management Agency*, Washington, DC.

FEMA (2000d), FEMA-355D, "State of the Art Report on Connection Performance", *Federal Emergency Management Agency*, Washington, DC.

Kent, L., "ANSYS Tutorial Release 7.0", SDC Publication, University of Texas.

Kulak, G.L., J.W. Fisher and J.H.A. Struik (1987), "Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints", Second Edition, *John Wiley & Sons*, New York, NY.

Manual de Construcción en Acero, Instituto Mexicano de la Construcción en Acero, A.C., *Limusa*, México,

Mazzolani, F (2000), "Moment Resistant Connections of Steel Frames in Seismic Areas, Design and Reliability", Taylor & Francis, USA.

RCSC (2009), "Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts, *Research Council on Structural Connections*, Chicago, IL.

Ruiz, D (2010), "Comportamiento de conexiones tipo placa-tope bajo carga cíclica y monótona mediante análisis de elemento finito", tesis de maestría, *Instituto de Ingeniería, UNAM*, México, DF, 143 pp

Salmon, C. G. y Johnson J. E. (1990), "Steel structures. Design and behavior", *Prentice Hall*, 4a ed., New Jersey, EUA.

Shi, Gang et al (2006), "Behaviour of End-Plate Moment Connections under Earthquake Loading", *Engineering Structures*, 29, pp. 703-716

Shi, Gang et al (2008), "Numerical simulation of Steel Pretensioned Bolted End-Plate Connections of Different Types and Details", *Engineering Structures*, 30, pp. 2677-2686.

Timoshenko, S. P. y Gere, J. M. (1990), "Mechanics of Materials" . PWS-KENT Publishing Company, Third Edition.

ÁPENDICE A

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE LAS CONEXIONES TIPO BOLTED FLANGE PLATE (BFP)

Datos para la trabe :

$$\begin{aligned}bf &:= 20\text{cm} & d &:= 30\text{cm} \\tf &:= 1.2\text{cm} & tw &:= 0.8\text{cm} \\FR &:= 0.9 & dw &:= d - tw = 29.2\cdot\text{cm}\end{aligned}$$

Cálculo del momento plástico probable segun el AISC :

$$M_{PR} = C_{pr} \cdot R_y \cdot Z_e \cdot F_y$$

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y}$$

$$F_y := 2530 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad F_u := 4080 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad F_y = 35985.059 \cdot \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \quad F_u = 58031.241 \cdot \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

$$C_{pr} := 1.2 \quad R_y := 1 \quad R_t := 1.2 \quad db := 30\text{cm} \quad db = 11.811\cdot\text{in}$$

$$Z_e := 900.13\text{cm}^3 \quad Z_e = 54.929\cdot\text{in}^3 \quad bp := 25\text{cm} \quad bp = 9.843\cdot\text{in}$$

$$M_{PR} := C_{pr} \cdot R_y \cdot Z_e \cdot F_y = 2371961.013 \cdot \text{lb} \cdot \text{in}$$

$$M_f := M_{PR} = 2371961.013 \cdot \text{lb} \cdot \text{in} \quad M_{PR} = 27327.947 \text{ m} \cdot \text{kg}$$

$$M_yf = C_y \cdot M_f \quad M_c := M_{PR} = 2371961.013 \cdot \text{lb} \cdot \text{in}$$

$$S_b := 757\text{cm}^3 \quad S_b = 46.195\cdot\text{in}^3$$

$$C_y := \frac{1}{C_{pr} \cdot \frac{Z_e}{S_b}} = 0.701$$

$$M_yf := C_y \cdot M_f = 1662328.855 \cdot \text{lb} \cdot \text{in} \quad M_yf = 19152.1 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}$$

CÁLCULO DEL NÚMERO DE TORNILLOS PARA LOS MODELOS TIPO BOLTED FLAGE PLATE

$$F := \frac{M_{PR}}{db} = 91093.156 \text{ kg}$$

Proponiendo tornillos de alta resistencia A-325:

$$F_v := 4220 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad A_r := \frac{F \cdot 1.15}{F_v \cdot 0.75} = 33.099 \cdot \text{cm}^2$$

Proponiendo tornillos de diámetro 3/4" :

$$N_{\text{tornillos}} := \frac{A_r}{2.85 \text{ cm}^2} = 11.614 \quad \text{se proponen 12 tornillos de 3/4" de diámetro}$$

CÁLCULO DEL ESPESOR MÍNIMO DE LA PLACA DE CONEXIÓN DE LOS PATINES

$$t_{pl} := \frac{db - \sqrt{db^2 - \frac{4.4Myf}{F_y \cdot bp}}}{2} = 1.155 \cdot \text{cm}$$

Se propone una placa de 20 x 40 x 3/4"

Revisión al aplastamiento de la placa :

$$R_N := 2.4 \cdot 1.9 \text{ cm} \cdot 1.27 \text{ cm} \cdot F_u = 23628.096 \text{ kg}$$

$$F_R := 0.75$$

$$\text{Resistencia} := F_R \cdot R_N = 17721.072 \text{ kg}$$

$$\text{Fuerza por tornillo} := \frac{F}{12} = 7591.096 \text{ kg} \quad \text{OK}$$

Revisión a tensión de la placa por flujo plástico en el área total :

$$F_t = F_R \cdot F_y \cdot A_g \quad F_R := 0.9$$

$$F_t = F_R \cdot F_y \cdot A_g \quad F_t := F_R \cdot F_y \cdot (25 \text{ cm} \cdot 1.9 \text{ cm}) = 108157.5 \text{ kg}$$

Revisión a tensión de la placa en la sección neta :

$$F_t = F_R \cdot F_u \cdot A_e \quad F_R := 0.75$$

$$A_e := 0.85 \cdot 1.9 \text{ cm} \cdot [25 \text{ cm} - [2 \cdot (1.9 \text{ cm} + 0.2 \text{ cm})]] = 33.592 \cdot \text{cm}^2$$

$$F_t := F_R \cdot F_u \cdot A_e = 102791.52 \text{ kg} \quad \text{RIGE ES MAYOR QUE LA FUERZA DE LOS PATINES OK}$$

CÁLCULO DEL ESPESOR PARA LA PLACA DE CONEXIÓN DEL ALMA

Revisión de la capacidad a cortante de la viga :

$$V_N = 0.6 \cdot F_y \cdot A_w \quad FR := 0.9$$

$$V_N := 0.6 \cdot F_y \cdot (t_w \cdot d_w) = 35460.48 \text{ kg} \quad \text{Resistenciacort} := FR \cdot V_N = 31914.432 \text{ kg}$$

Cálculo del número de tornillos para el alma :

$$A_{nec} := \frac{\text{Resistenciacort}}{0.75 \cdot F_v} = 10.084 \cdot \text{cm}^2$$

Proponiendo tornillos de diámetro 3/4" :

$$N_{\text{tor}} := \frac{A_{nec}}{2.85 \text{ cm}^2} = 3.538 \quad \text{se proponen 4 tornillos}$$

Proponiendo una placa de 5/16" de espesor

Revisión al aplastamiento de la placa :

$$R_N := 2.4 \cdot 1.9 \text{ cm} \cdot 0.79 \text{ cm} \cdot F_u = 14697.792 \text{ kg}$$

$$FR := 0.75$$

$$\text{Resistencia} := FR \cdot R_N = 11023.344 \text{ kg}$$

OK

$$\text{Fuerza por tornillo} := \frac{\text{Resistenciacort}}{4} = 7978.608 \text{ kg}$$

Revisión a tensión de la placa por flujo plástico en el área total :

$$F_t = FR \cdot F_y \cdot A_g \quad FR := 0.9$$

$$F_t = FR \cdot F_y \cdot A_g \quad F_t := FR \cdot F_y \cdot (26 \text{ cm} \cdot 0.8 \text{ cm}) = 47361.6 \text{ kg} \quad \text{RIGE OK}$$

Revisión a tensión de la placa en la sección neta :

$$F_t = FR \cdot F_u \cdot A_e \quad FR := 0.75$$

$$A_e := 0.85 \cdot 1.9 \text{ cm} \cdot [26 \text{ cm} - [4 \cdot (1.9 \text{ cm} + 0.2 \text{ cm})]] = 28.424 \cdot \text{cm}^2$$

$$F_t := FR \cdot F_u \cdot A_e = 86977.44 \text{ kg}$$

MOMENTO EN LA CARA DE LA COLUMNA POR FALLA DE CORTANTE DE LOS TORNILLOS PARA LAS CONEXIONES BFP

$$M_{\text{failbolts}} = 2N \cdot Ab \cdot (F_{\text{vbolt}}) \cdot db \cdot L_{\text{TF1}} \quad L := 1.2\text{m} = 47.244 \cdot \text{in} \quad dc := 30\text{cm} = 11.811 \cdot \text{in}$$

$$F_{\text{vbolt}} := 4220 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 60022.509 \cdot \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \quad d_b := 0.75\text{in} \quad Ab := \frac{\pi \cdot d_b^2}{4} = 0.442 \cdot \text{in}^2 \quad N := 6 \quad db = 11.811 \cdot \text{in}$$

$$S_1 := 5\text{cm} = 1.969 \cdot \text{in} \quad S_3 := 30\text{cm} = 11.811 \cdot \text{in}$$

$$F_{\text{vbolt}} = 4220 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$L_{\text{TF1}} := \frac{L - dc}{L - dc - (2S_1 + S_3)} = 1.8$$

$$M_{\text{failbolts}} := 2N \cdot Ab \cdot (F_{\text{vbolt}}) \cdot db \cdot L_{\text{TF1}} = 77941.238 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}$$

$$\frac{M_{\text{failbolts}}}{L_{\text{TF1}}} = 43.301 \cdot \text{Ton} \cdot \text{m}$$

$$\text{Valor1} := \frac{M_{\text{failbolts}}}{L_{\text{TF1}}} \cdot 9.81 = 424.78 \cdot \text{Ton} \cdot \text{m}$$

MOMENTO EN LA CARA DE LA COLUMNA POR FRACTURA EN LA SECCION NETA DE LA PLACA DEL PATÍN

$$M_{\text{failFP}} = 0.85 \cdot F_{\text{upl}} \cdot [b_p - 2 \cdot (d_{\text{bthole}} + 0.062)] \cdot t_{\text{pl}} \cdot (db + t_{\text{pl}}) \cdot L_{\text{TF2}}$$

$$d_{\text{bthole}} := 0.75\text{in} \quad b_p := 25\text{cm} = 9.843 \cdot \text{in} \quad t_{\text{pl}} := 0.75\text{in} \quad F_{\text{upl}} := F_u = 58031.241 \cdot \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \quad d_b = 0.75 \cdot \text{in}$$

$$L_{\text{TF2}} := \frac{L - dc}{L - dc - 2S_1} = 1.125$$

$$M_{\text{failFP}} := 0.85 \cdot F_{\text{upl}} \cdot [b_p - 2 \cdot (d_{\text{bthole}} + 0.062\text{in})] \cdot t_{\text{pl}} \cdot (db + t_{\text{pl}}) \cdot L_{\text{TF2}} = 49500.85 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}$$

$$\text{Valor2} := \frac{M_{\text{failFP}}}{L_{\text{TF2}}} \cdot 9.81 = 431.647 \cdot \text{Ton} \cdot \text{m}$$

MOMENTO DE FUENCIA PARA LA VIGA

$$M_{\text{yieldflexure}} = S \cdot F_{yb} \cdot \frac{L - dc}{L - dc - 2(S_1 + S_3)}$$

$$S_b = 46.195 \cdot \text{in}^3 \quad F_{yb} := 36000 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \quad dc = 11.811 \cdot \text{in} \quad L = 47.244 \cdot \text{in} \quad S_1 = 1.969 \cdot \text{in} \quad S_3 = 11.811 \cdot \text{in}$$

$$M_{\text{yieldflexure}} := S_b \cdot F_{yb} \cdot \frac{L - dc}{L - dc - 2(S_1 + S_3)} = 86220.235 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}$$

MOMENTO EN LA CARA DE LA COLUMNA POR LA ELONGACIÓN DE LOS AGUJEROS DE LOS TORNILLOS

$$M_{\text{fail}} = T_n \cdot \left(db + \frac{t_{PLt} + t_{PLb}}{2} \right) \cdot L_{TF1}$$

T_n es el menor de los siguientes valores =

$$T_{n1} = 2.4 \cdot F_{ub} \cdot (S_3 + S_1 - c) \cdot t_{fb}$$

$$T_{n2} = 2.4 \cdot F_{upl} \cdot (S_3 + S_4) \cdot t_{pl}$$

$$F_{ub} := F_u = 58031.241 \cdot \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \quad F_{upl} = 58031.241 \cdot \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \quad c := 1 \text{ cm} = 0.394 \cdot \text{in} \quad S_3 = 11.811 \cdot \text{in}$$

$$S_1 = 1.969 \cdot \text{in} \quad S_4 := 5 \text{ cm} = 1.969 \cdot \text{in} \quad t_{PLt} := 0.75 \text{ in} \quad t_{PLb} := 0.75 \text{ in} \quad L_{TF1} = 1.8$$

$$db = 11.811 \cdot \text{in} \quad t_{fb} := 1.2 \text{ cm} = 0.472 \cdot \text{in} \quad t_{pl} = 0.75 \cdot \text{in}$$

$$T_{n1} := 2.4 \cdot F_{ub} \cdot (S_3 + S_1 - c) \cdot t_{fb} = 399513.6 \text{ kg}$$

$$T_{n2} := 2.4 \cdot F_{upl} \cdot (S_3 + S_4) \cdot t_{pl} = 652881.6 \text{ kg}$$

$$M_{\text{fail}} := T_{n1} \cdot \left(db + \frac{t_{PLt} + t_{PLb}}{2} \right) \cdot L_{TF1} = 229436.665 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}$$

$$\text{Valor5} := \frac{M_{\text{fail}}}{L_{TF1}} \cdot 9.81 = 1250.43 \cdot \text{Ton} \cdot \text{m}$$

MOMENTO EN LA CARA DE LA COLUMNA PARA LA FRACTURA DE LA SECCIÓN NETA DEL PATIN DE LA VIGA

$$M_{failflange} = F_{ub} \cdot [Z_b - 2(d_{bthole} + 0.062in)t_{fb} \cdot (db - t_{fb})] \cdot L_{TF3}$$

$$F_{ub} = 58031.241 \cdot \frac{lb}{in^2} \quad Z_b := 900.13cm^3 = 54.929 \cdot in^3 \quad d_{bthole} = 0.75 \cdot in \quad t_{fb} = 0.472 \cdot in \quad db = 11.811 \cdot in$$

$$L_{TF3} := \frac{L - dc}{L - dc - 2(S_1 + S_3)} = 4.5$$

$$M_{failflange} := F_{ub} \cdot [Z_b - 2(d_{bthole} + 0.062in)t_{fb} \cdot (db - t_{fb})] \cdot L_{TF3} = 139090.106 \cdot kg \cdot m$$

$$Valor3 := \frac{M_{failflange}}{L_{TF3}} \cdot 9.81 = 303.216 \cdot Ton \cdot m$$

DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN LA VIGA

$$M_{failbeamflexure} = Z_b \cdot \left(\frac{F_y + F_u}{2} \right)$$

$$F_y = 2530 \cdot \frac{kg}{cm^2} \quad F_u = 4080 \cdot \frac{kg}{cm^2} \quad Z_b = 900.13 \cdot cm^3$$

$$M_{failbeamflexure} := Z_b \cdot \left(\frac{F_y + F_u}{2} \right) = 29.749 \cdot Ton \cdot m$$

$$Valor4 := M_{failbeamflexure} \cdot 9.81 = 291.841 \cdot Ton \cdot m$$

MOMENTO DE FLUENCIA EN LA VIGA

$$F_y = 2530 \cdot \frac{kg}{cm^2} \quad S_b = 757 \cdot cm^3$$

$$M_{yieldflexurebeam} := F_y \cdot S_b = 19.152 \cdot Ton \cdot m$$

$$Valor6 := M_{yieldflexurebeam} \cdot 9.81 = 187.882 \cdot Ton \cdot m$$

MOMENTO DE FLUENCIA EN LAS PLACAS DE CONEXIÓN DE LOS PATINES

$$F_y = 2530 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad t_{pl} = 1.905 \cdot \text{cm} \quad b_p = 25 \cdot \text{cm} \quad d_b = 30 \cdot \text{cm}$$

$$M_{\text{yieldflangeplate}} := F_y \cdot t_{pl} \cdot b_p \cdot (d_b + t_{pl}) = 38.443 \cdot \text{Ton} \cdot \text{m}$$

$$\text{Valor7} := M_{\text{yieldflangeplate}} \cdot 9.81 = 377.123 \cdot \text{Ton} \cdot \text{m}$$

MOMENTO DE FLUENCIA EN LA ZONA DE PANEL

$$h := 200 \text{cm} \quad L = 120 \cdot \text{cm} \quad d_b = 30 \cdot \text{cm} \quad t_{wc} := 0.8 \text{cm} \quad F_y = 2530 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad d_c = 30 \cdot \text{cm}$$

$$M_{\text{yieldpanelzone}} := 0.55 \cdot d_b \cdot F_y \cdot d_c \cdot t_{wc} \cdot \left(\frac{L - d_c}{L} \right) \cdot \left(\frac{h}{h - d_b} \right) = 8.84 \cdot \text{Ton} \cdot \text{m}$$

$$\text{Valor8} := M_{\text{yieldpanelzone}} \cdot 9.81 = 86.722 \cdot \text{Ton} \cdot \text{m}$$

Valor1 = 424.78 · Ton · m Momento de falla por cortante en los tornillos

Valor2 = 431.647 · Ton · m Momento por fractura en la sección neta de la placa de conexión de los patines

Valor3 = 303.216 · Ton · m Momento de fractura en la sección neta del patín de la viga

Valor4 = 291.841 · Ton · m Momento por deformación plástica en la viga

Valor5 = 1250.43 · Ton · m Momento por elongación en los agujeros de los tornillos

Valor6 = 187.882 · Ton · m Momento por fluencia de la viga

Valor7 = 377.123 · Ton · m Momento por fluencia de la placa de conexión de los patines

Valor8 = 86.722 · Ton · m Momento por fluencia de la zona de panel

OBTENCIÓN DE LOS MOMENTOS PLÁSTICOS TEÓRICOS PARA LA TRABE, MUÑON Y COLUMNA

Para la trabe :

$$\begin{aligned} b_f &:= 20\text{cm} & d &:= 30\text{cm} & F_y &:= 2530 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \\ t_f &:= 1.2\text{cm} & t_w &:= 0.8\text{cm} \\ F_R &:= 0.9 & d_w &:= d - t_w = 29.2\cdot\text{cm} \end{aligned}$$

$$Z_{xt} := b_f \cdot t_f \cdot (d_w + t_f) + \frac{d_w^2 \cdot t_w}{4} = 900.13 \cdot \text{cm}^3$$

$$M_p := Z_{xt} \cdot F_y = 22773 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}$$

$$M_{p_r} := F_R \cdot M_p = 20496 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}$$

Para la columna sección I :

$$\begin{aligned} b_f &:= 25\text{cm} & d &:= 30\text{cm} & F_y &:= 2530 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \\ t_f &:= 1.2\text{cm} & t_w &:= 0.8\text{cm} \\ & & d_w &:= d - t_w = 29.2\cdot\text{cm} \end{aligned}$$

$$Z_{xc} := b_f \cdot t_f \cdot (d_w + t_f) + \frac{d_w^2 \cdot t_w}{4} = 1083 \cdot \text{cm}^3$$

$$M_{pcol} := Z_{xc} \cdot F_y = 2738796 \cdot \text{kg} \cdot \text{cm}$$

$$M_{pcol} = 27387.958 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}$$

Momento plástico de la columna sección cajón :

$$t := 1.2\text{cm} \quad b := 25\text{cm} \quad d = 30\cdot\text{cm} \quad d_w := d - t - t = 27.6\cdot\text{cm}$$

$$Z_{xb} := t \cdot \left[b \cdot (d_w + t) + \frac{d_w^2}{2} \right] = 1321.056 \cdot \text{cm}^3$$

$$M_{pcajon} := Z_{xb} \cdot F_y = 33422.717 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}$$

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE LAS CONEXIONES TIPO ÁRBOL

Datos para la trabe :

$$bf := 20\text{cm}$$

$$d := 30\text{cm}$$

$$tf := 1.2\text{cm}$$

$$tw := 0.8\text{cm}$$

$$FR := 0.9$$

$$dw := d - tw = 29.2\text{cm}$$

Cálculo del momento plástico probable segun el AISC :

$$M_{PR} = C_{pr} \cdot R_y \cdot Z_e \cdot F_y$$

$$C_{pr} = \frac{F_y + F_u}{2F_y}$$

$$F_y := 2530 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$F_u := 4080 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$F_y = 35985.059 \cdot \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

$$F_u = 58031.241 \cdot \frac{\text{lb}}{\text{in}^2}$$

$$C_{pr} := 1.2$$

$$R_y := 1$$

$$R_t := 1.2$$

$$db := 30\text{cm}$$

$$db = 11.811\text{in}$$

$$Z_e := 900.13\text{cm}^3$$

$$Z_e = 54.929\text{in}^3$$

$$bp := 25\text{cm}$$

$$bp = 9.843\text{in}$$

$$M_{PR} := C_{pr} \cdot R_y \cdot Z_e \cdot F_y = 2371961.013 \cdot \text{lb} \cdot \text{in}$$

$$M_f := M_{PR} = 2371961.013 \cdot \text{lb} \cdot \text{in}$$

$$M_yf = C_y \cdot M_f$$

$$M_c := M_{PR} = 2371961.013 \cdot \text{lb} \cdot \text{in}$$

$$S_b := 757\text{cm}^3$$

$$S_b = 46.195\text{in}^3$$

$$C_y := \frac{1}{C_{pr} \cdot \frac{Z_e}{S_b}} = 0.701$$

$$M_yf := C_y \cdot M_f = 1662328.855 \cdot \text{lb} \cdot \text{in}$$

$$M_yf = 19152.1 \cdot \text{kg} \cdot \text{m}$$

CÁLCULO DEL NÚMERO DE TORNILLOS

$$F := \frac{M_{PR}}{db} = 91093.156 \text{ kg}$$

Proponiendo tornillos de alta resistencia A-325:

$$F_v := 4220 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad A_r := \frac{F \cdot 1.15}{F_v \cdot 0.75} = 33.099 \cdot \text{cm}^2$$

Proponiendo tornillos de diámetro 3/4" :

$$N_{\text{tornillos}} := \frac{A_r}{2 \cdot 2.85 \text{ cm}^2} = 5.807$$

se proponen 6 tornillos de 3/4" de diámetro en cada lado del patín (trabajan a cortante doble los tornillos)

CÁLCULO DEL ESPESOR DE LA PLACA DE CONEXIÓN DE LOS PATINES

Se proponen placas de 1/2" de espesor

Revisión al aplastamiento de la placa :

$$R_N := 2.4 \cdot 1.9 \text{ cm} \cdot 1.27 \text{ cm} \cdot F_u = 23628.096 \text{ kg}$$

$$F_R := 0.75$$

$$\text{Resistencia} := F_R \cdot R_N = 17721.072 \text{ kg}$$

$$F_{\text{uerzaportornillo}} := \frac{F}{12} = 7591.096 \text{ kg}$$

OK

Revisión a tensión de la placa por flujo plástico en el área total :

$$F_t = F_R \cdot F_y \cdot A_g \quad F_R := 0.9$$

$$F_t = F_R \cdot F_y \cdot A_g \quad F_t := 2 F_R \cdot F_y \cdot (20 \text{ cm} \cdot 1.27 \text{ cm}) = 115671.6 \text{ kg}$$

Revisión a tensión de la placa en la sección neta :

$$F_t = F_R \cdot F_u \cdot A_e \quad F_R := 0.75$$

$$A_e := 0.85 \cdot 1.27 \text{ cm} \cdot [20 \text{ cm} - [2 \cdot (1.9 \text{ cm} + 0.2 \text{ cm})]] = 17.056 \cdot \text{cm}^2$$

$$F_t := F_R \cdot F_u \cdot A_e \cdot 2 = 104383.332 \text{ kg} \quad \text{RIGE ES MAYOR QUE LA FUERZA DE LOS PATINES OK}$$

CÁLCULO DEL ESPESOR PARA LA PLACA DE CONEXIÓN DEL ALMA

Revisión de la capacidad a cortante de la viga :

$$V_N = 0.6 \cdot F_y \cdot A_w \quad FR := 0.9$$

$$V_N := 0.6 \cdot F_y \cdot (t_w \cdot d_w) = 35460.48 \text{ kg} \quad \text{Resistenciacort} := FR \cdot V_N = 31914.432 \text{ kg}$$

Cálculo del número de tornillos para el alma :

$$A_{nec} := \frac{\text{Resistenciacort}}{0.75 \cdot F_v} = 10.084 \cdot \text{cm}^2$$

Proponiendo tornillos de diámetro 5/8" :

$$N_{tor} := \frac{A_{nec}}{2 \cdot 2.01 \text{ cm}^2} = 2.508 \quad \text{se proponen 4 tornillos en cada alma}$$

Proponiendo placas de 5/16" de espesor

Revisión al aplastamiento de la placa :

$$R_N := 2.4 \cdot 1.6 \text{ cm} \cdot 0.79 \text{ cm} \cdot F_u = 12377.088 \text{ kg}$$

$$FR := 0.75$$

$$\text{Resistencia} := FR \cdot R_N = 9282.816 \text{ kg}$$

OK

$$\text{Fuerzaportornillo} := \frac{\text{Resistenciacort}}{4 \cdot 2} = 3989.304 \text{ kg}$$

Revisión de la placa por flujo plástico en el área total :

$$F_t = FR \cdot F_y \cdot A_g \quad FR := 0.9$$

$$F_t = FR \cdot F_y \cdot A_g \quad F_t := FR \cdot F_y \cdot (18 \text{ cm} \cdot 0.8 \text{ cm}) = 32788.8 \text{ kg} \quad \text{RIGE OK}$$

Revisión de la placa en la sección neta :

$$F_t = FR \cdot F_u \cdot A_e \quad FR := 0.75$$

$$A_e := 0.85 \cdot 1.6 \text{ cm} \cdot [18 \text{ cm} - [4 \cdot (1.6 \text{ cm} + 0.2 \text{ cm})]] = 14.688 \cdot \text{cm}^2$$

$$F_t := FR \cdot F_u \cdot A_e = 44945.28 \text{ kg}$$

MOMENTO POR FALLA DE CORTANTE DE LOS TORNILLOS

$$M_{failbolts} = 2N \cdot Ab \cdot (F_{vbolt}) \cdot db \cdot L_{TF1} \quad L := 1.2m = 47.244 \cdot in \quad dc := 30cm = 11.811 \cdot in$$

$$F_{vbolt} := 4220 \frac{kg}{cm^2} = 60022.509 \cdot \frac{lb}{in^2} \quad d_b := 0.75in \quad Ab := \frac{\pi \cdot d_b^2}{4} = 0.442 \cdot in^2 \quad N := 6 \quad db = 11.811 \cdot in$$

$$S_1 := 5cm = 1.969 \cdot in \quad S_3 := 30cm = 11.811 \cdot in$$

$$M_{failbolts} := 2N \cdot Ab \cdot (F_{vbolt}) \cdot db = 43300.688 \cdot kg \cdot m$$

MOMENTO POR FRACTURA EN LA SECCION NETA DE LA PLACA DEL PATÍN

$$M_{failFP} = 0.85 \cdot F_{upl} \cdot [b_p - 2 \cdot (d_{bthole} + 0.062)] \cdot t_{pl} \cdot (db + t_{pl}) \cdot L_{TF2}$$

$$d_{bthole} := 0.75in \quad b_p := 20cm = 7.874 \cdot in \quad t_{pl} := 0.5in \quad F_{upl} := Fu = 58031.241 \cdot \frac{lb}{in^2} \quad d_b = 0.75 \cdot in$$

$$M_{failFP} := 0.85 \cdot F_{upl} \cdot [b_p - 2 \cdot (d_{bthole} + 0.062in)] \cdot t_{pl} \cdot (db + t_{pl}) = 21863.794 \cdot kg \cdot m$$

MOMENTO DE FUENCIA PARA LA VIGA

$$M_{yieldflexure} = S \cdot F_{yb}$$

$$S_b = 46.195 \cdot in^3 \quad F_{yb} := 36000 \frac{lb}{in^2} \quad M_{yieldflexure} := S_b \cdot F_{yb} = 19160.052 \cdot kg \cdot m$$

MOMENTO PARA LA FRACTURA DE LA SECCIÓN NETA DEL PATIN DE LA VIGA

$$M_{failflange} = Fu \cdot [Z_b - 2 \cdot (d_{bthole} + 0.062in) \cdot t_{fb} \cdot (db - t_{fb})] \cdot L_{TF3}$$

$$Fu = 58031.241 \cdot \frac{lb}{in^2} \quad Z_b := 900.13cm^3 = 54.929 \cdot in^3 \quad d_{bthole} = 0.75 \cdot in \quad t_f = 0.472 \cdot in \quad db = 11.811 \cdot in$$

$$M_{failflange} := Fu \cdot [Z_b - 2 \cdot (d_{bthole} + 0.062in) \cdot t_f \cdot (db - t_f)] = 30908.912 \cdot kg \cdot m$$

DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN LA VIGA

$$M_{failbeamflexure} = Z_b \cdot \left(\frac{F_y + F_u}{2} \right)$$

$$F_y = 2530 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad F_u = 4080 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad Z_b = 900.13 \cdot \text{cm}^3$$

$$M_{failbeamflexure} := Z_b \cdot \left(\frac{F_y + F_u}{2} \right) = 29.749 \cdot \text{Ton} \cdot \text{m}$$

$$\text{Valor4} := M_{failbeamflexure} \cdot 9.81 = 291.841 \cdot \text{Ton} \cdot \text{m}$$

MOMENTO DE FLUENCIA EN LA VIGA

$$F_y = 2530 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad S_b = 757 \cdot \text{cm}^3$$

$$M_{yieldflexurebeam} := F_y \cdot S_b = 19.152 \cdot \text{Ton} \cdot \text{m}$$

$$\text{Valor6} := M_{yieldflexurebeam} \cdot 9.81 = 187.882 \cdot \text{Ton} \cdot \text{m}$$

MOMENTO DE FLUENCIA EN LAS PLACAS DE CONEXIÓN DE LOS PATINES

$$F_y = 2530 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad t_{pl} = 1.27 \cdot \text{cm} \quad b_p := 20 \text{cm} \quad d_b = 30 \cdot \text{cm}$$

$$M_{yieldflangeplate} := 2F_y \cdot t_{pl} \cdot b_p \cdot (d_b + t_{pl}) = 40.189 \cdot \text{Ton} \cdot \text{m}$$