



Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
Universidad Zaragoza

# **MODELADO DE UNIONES ATORNILLADAS SEMIRRÍGIDAS**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**INGENIERÍA MECÁNICA**



**Director: José Manuel Lou Pina**

**Codirector: Miguel Ángel Martínez Barca**

**Autor: Rodrigo Muñoz Zuara**





## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. RODRIGO MUÑOZ ZUARA,

con nº de DNI 73016689S en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo

de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la

Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)

INGENIERÍA MECÁNICA, (Título del Trabajo)

MODELADO DE UNIONES ATORNILLADAS SEMIRRÍGIDAS

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 21 de junio de 2016

Fdo: 



## Resumen

El estudio de las uniones en estructuras ha sido considerado a lo largo de los años de forma simplificada como totalmente rígido o articulado. Sin embargo, de un tiempo a esta parte, se han realizado un número importante de estudios sobre las uniones semirrígidas, modelándolas como elementos elásticos, obteniendo curvas que relacionan su rotación con el momento flector generado mediante diferentes modelos: experimentales, analíticos, empíricos...

El estudio de estas uniones semirrígidas se asemeja mucho más a las situaciones reales, ya que se consideran giros relativos entre barras, reestructuraciones de esfuerzos en la estructura...pero para que se ajuste lo máximo posible, hay que simular de la forma más exacta posible una unión a cómo va a ser cuando esté realmente construida.

En este trabajo se presenta un modelo numérico basado en el método de los elementos finitos, desarrollado con el software por ordenador Abaqus, tomando como base un modelo experimental previo que nos sirva de contraste, comprobándose finalmente que se reproduce correctamente el comportamiento real de la unión.

Igualmente, se presenta una base teórica que permite ampliar los conocimientos sobre los diferentes tipos de uniones, como diversos modelos de estudio para uniones semirrígidas desarrollados de manera experimental, empírica, analítica, mecánica y numérica.

Finalmente, se establecen una serie de conclusiones a raíz del estudio de las uniones semirrígidas y posibles trabajos futuros para continuar con su investigación. Como ejemplo, se incluyen estructuras reales donde se ha tenido en cuenta esta tipología en la fase de diseño y cálculo.



**ÍNDICE**

<b>1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS</b>	<b>5</b>
1.1. Resumen	5
1.2. Objetivo	6
1.3. Metodología	6
<b>2. CLASIFICACIÓN DE LAS UNIONES: RÍGIDAS, ARTICULADAS Y SEMIRRÍGIDAS</b>	<b>7</b>
2.1. Comportamiento de las uniones	7
2.2. Clasificación de las uniones	8
2.2.1. Uniones según rigidez	8
2.2.2. Uniones según resistencia	9
2.2.3. Uniones según capacidad rotacional	10
2.3. Importancia de las uniones semirrígidas	11
<b>3. ESTUDIO PREVIO DE LAS UNIONES SEMIRRÍGIDAS</b>	<b>12</b>
3.1. Tipología de uniones y curva momento-rotación	12
3.2. Modelos predictivos de la curva momento-rotación	14
3.2.1. Modelos experimentales	14
3.2.2. Modelos empíricos	16
3.2.3. Modelos analíticos	16
3.2.4. Modelos mecánicos	16
3.2.5. Modelos numéricos	16
<b>4. DISEÑO DE LA UNIÓN Y CÁLCULO MEDIANTE MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS</b>	<b>18</b>
4.1. Introducción	18

4.2. Modelo experimental T101.010	19
4.3. Modelo de los elementos finitos	22
4.4. Desarrollo	24
5. CONCLUSIONES	29
5.1. Introducción	29
5.2. Trabajo realizado	29
5.3. Conclusiones	29
5.4. Trabajos futuros	31
<b>ANEXO A. CLASIFICACIÓN DE LAS UNIONES SEGÚN EUROCÓDIGO 3</b>	<b>32</b>
A.1. Rigidez	32
A.2. Resistencia	33
A.3. Capacidad rotacional	33
<b>ANEXO B. CURVAS MOMENTO ROTACIÓN PARA DIVERSAS UNIONES</b>	<b>36</b>
B.1. Unión con angular o chapa simple al alma de la viga	36
B.2. Unión con dos angulares al alma de la viga	37
B.3. Unión con chapa de testa parcial	38
B.4. Unión con angulares a las alas de las vigas	38
B.5. Unión con angulares a las alas y alma de la viga	39
B.6. Unión con chapa de testa extendida	40
B.7. Unión con chapa de testa enrasada	41
B.8. Unión con perfiles en T	41
<b>ANEXO C. MODELOS PREDICTIVOS DE LA CURVA MOMENTO ROTACIÓN</b>	<b>42</b>
C.1. Modelos empíricos	42
C.1.1. Modelo de Frye-Morris	42
C.1.2. Modelo de Krihnamurthy	42
C.1.3. Modelo de Kukreti	43
C.1.4. Modelo de Attiogbe y Morris	44
C.2. Modelos analíticos	44
C.2.1. Modelo de Chen	44
C.2.2. Modelo de Yee y Melchers	45
<b>ANEXO D. MÉTODO DE LOS COMPONENTES SEGÚN EUROCÓDIGO 3</b>	<b>46</b>
D.1. Introducción	46

---

<b>D.2. Fuerzas de la unión</b>	48
<b>D.3. Resistencia y rigidez de los componentes</b>	49
<b>ANEXO F. EXPERIMENTO T101.010 CON MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS</b>	55
<b>F.1. Curvas tensión-deformación de los materiales</b>	55
<b>F.2. Tipos de elementos finitos</b>	55
<b>F.3. Discretización</b>	57
<b>F.4. Contacto entre superficies</b>	59
<b>F.5. Coeficiente de rozamiento</b>	60
<b>F.6. Modelo y obtención del giro</b>	61
<b>ANEXO G. APLICACIONES</b>	64
<b>Bibliografía</b>	68



# 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1. RESUMEN

Actualmente, la gran mayoría de estructuras metálicas que podemos encontrarnos están fabricadas en acero, ya que es un material muy diversificado, y ofrece posibilidades muy variadas dependiendo de los requerimientos que se necesiten. La elección de acero en lugar de otros materiales metálicos o incluso no metálicos (hormigón) para diferentes tipos de construcciones ofrece una serie de ventajas como son su fiabilidad y durabilidad a lo largo del tiempo, la gran cantidad de piezas estandarizadas o la relación entre resistencia y volumen/peso mucho mejor que para el hormigón.

Además, el amplio estudio que existe sobre las formas de unión entre elementos metálicos ofrece múltiples posibilidades para adaptarse a todo tipo de formas arquitectónicas que se quieran llevar a cabo. Es por ello que el cálculo de las uniones en una estructura representa una parte fundamental del estudio de la misma, del cual dependerá en buena medida su durabilidad.

Para analizar una estructura es necesario entonces definir los tipos de uniones que conectarán sus diferentes elementos (vigas, columnas, etc.), para lo cual hay que definir previamente las cargas que actúan y los esfuerzos, giros y desplazamiento que se van a generar, a raíz de los cuales se definirán unos u otros tipos de uniones, que tradicionalmente se han limitado a dos tipos: articuladas, donde idealmente se considera que la rigidez de dicha unión es nula y por tanto no se transmite momento flector; y rígidas, donde idealmente se considera que la rigidez es infinita y se transmite momento flector.

## 1.2. OBJETIVO

Es evidente que la división de uniones en dos tipos: articuladas y rígidas, es una situación idealizada que simplifica el análisis y diseño estructural para incluso poder realizarlo en ocasiones sin necesidad de ordenadores, pero no se considera el comportamiento real de las uniones, ya que cualquier unión, independientemente de su disposición constructiva, cuenta con una rigidez finita, lo cual hace necesario el estudio de un diseño intermedio al que denominados semirrígido o flexible.

El objetivo del presente trabajo es el análisis de las uniones semirrígidas en comparación con los dos tipos de uniones clásicas, presentando su mayor adecuación a los problemas en las estructuras reales, a través de su estudio cualitativo tanto en definición, como mediante estudios previamente realizados empírica y experimentalmente, para finalmente realizar un modelo experimental desarrollado mediante programa de elementos finitos (Abaqus en este caso) que nos permitan obtener una serie de resultados y concluir por qué se debe realizar este tipo de análisis, indicando las ventajas y desventajas de su estudio respecto a las uniones clásicas.

## 1.3. METODOLOGÍA

A lo largo del trabajo se hace referencia por una parte al Eurocódigo 3, que dedica un apartado exclusivamente al estudio de las uniones, haciendo referencia a las uniones semirrígidas, prediciendo su comportamiento a partir de las propiedades geométricas y mecánicas de los componentes que forman la unión a través del método de los componentes. Este método se detalla en los anexos aunque su estudio es algo complejo incluso cuando está ampliamente estudiado.

Por otra parte, también hay estudios empíricos del comportamiento de las uniones semirrígidas, con lo cual se hace referencia a los diferentes modelos. Además, también hay modelos experimentales que con el tiempo se han ido archivando en bases de datos que se pueden consultar para diferentes disposiciones constructivas, hipótesis de cargas, etc. También se hace referencia a estos estudios experimentales y uno de ellos es tomado como base para el estudio concreto de una unión.

Por último, se hace referencia a programas de cálculo por ordenador mediante el método de los elementos finitos, en este caso Abaqus, y se obtienen una serie de resultados en función de la hipótesis de carga planteada, basada en un experimento real para poder comparar los resultados obtenidos.

## 2. CLASIFICACIÓN DE LAS UNIONES: RÍGIDAS, ARTICULADAS Y SEMIRRÍGIDAS

### 2.1. COMPORTAMIENTO DE UNIONES

En una determinada estructura, las acciones exteriores que afectan sobre la misma generan una serie de esfuerzos sobre dicha estructura, que se transmiten entre sus diferentes elementos a través de las uniones, por lo tanto, estas han de ser capaces de desarrollar unos esfuerzos internos que contrarresten los externos. El diseño será correcto si al contrarrestar estos efectos externos las modificaciones de las propiedades o geometría inicial no son excesivas, es decir, que la resistencia y rigidez de la unión son adecuadas para cumplir la función para la que se diseñan. El hecho que se puede ver comparando estructuras más antiguas con las más actuales, es que los aceros han ido aumentando su resistencia de forma que el tamaño utilizado es menor, disminuyendo su rigidez, de donde podemos concluir que cada vez más la respuesta que nos da una estructura está influenciada por su rigidez, y es por ello que debemos tener en cuenta que la rigidez real no es nunca ni infinita ni cero. De aquí obtenemos que una tercera característica importante a tener en cuenta a la hora del diseño es la capacidad rotacional de una unión determinada. Para conocer el comportamiento de la unión se tienen en cuenta entonces:

*Rigidez rotacional ( $S_j$ ):* relación entre el momento transmitido por la unión y el giro relativo respecto a la disposición inicial entre elementos

*Momento resistente de cálculo ( $M_{j,Rd}$ ):* valor máximo del momento que la unión es capaz de absorber antes de llegar a su límite elástico, momento en que comienza la plastificación

*Capacidad rotacional de cálculo ( $\phi_{cd}$ ):* giro máximo producido por el momento resistente de cálculo de la unión

## 2.2. CLASIFICACIÓN DE LAS UNIONES

Dependiendo entonces de cómo se interpreten estas tres variables: rigidez, resistencia y capacidad de rotación, se dividirán los tipos de uniones en rígidas, articuladas o semirrígidas.

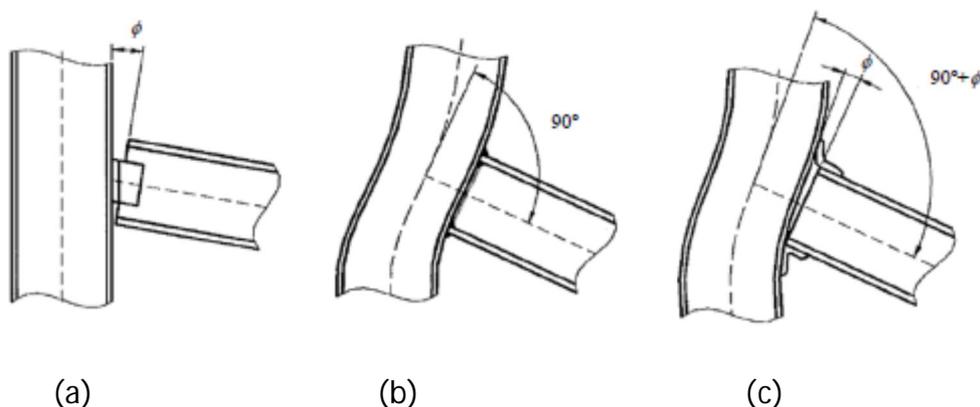
### 2.2.1. UNIONES SEGÚN RIGIDEZ

Atendiendo a la rigidez rotacional que presenta la unión, se clasifican como nominalmente articuladas, rígidas o semirrígidas:

*Nominalmente articulada:* La unión es capaz de transmitir las fuerzas internas (cortantes, axiales) sin desarrollar momentos significativos que afecten a los elementos de la unión o a la estructura, y permite los giros que se producen por las cargas aplicadas. En una situación ideal los momentos transmitidos son igual a cero.

*Rígida:* La unión es capaz de transmitir tanto las fuerzas internas (cortantes, axiales) como el momento flector calculado previamente. No se producen giros relativos en los extremos de las barras conectadas entre sí, sino que tras sufrir la estructura las deformaciones que se produzcan, el ángulo entre las barras se considera exactamente el mismo que antes de cargar la estructura.

*Semirrígida:* No se cumple ninguno de los criterios citados, ni la rotación relativa es cero, ni el momento flector transmitido es igual a cero. Esta unión queda definida por el diagrama momento-rotación ( $M_j - \phi$ ) al que se hace referencia a lo largo del trabajo, de forma que la unión transmite tanto fuerzas como momento flector, y se produce un giro relativo entre las barras conectadas



Clasificación de las uniones de acuerdo a su rigidez: (a) articulada; (b) rígida; (c) semirrígida

Como ya se ha indicado previamente, ni las uniones rígidas ni las articuladas corresponden a situaciones reales. El Eurocódigo 3 establece una serie

de límites a partir de los cuales se puede realizar la simplificación de unión rígida y articulada en función de la relación obtenida en un diagrama momento-rotación (incluso cuando se aprecia que la rigidez no es o infinita o cero), para el cual debemos saber previamente la rigidez inicial de la unión. Esto viene detallado en el Anexo 1.

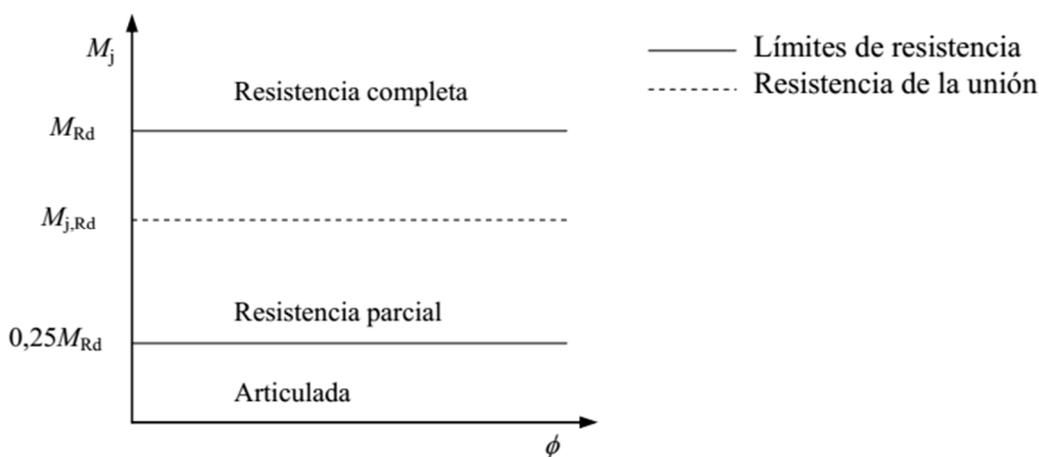
### 2.2.2. UNIONES SEGÚN RESISTENCIA

Cuando comparamos la resistencia de cálculo de la unión y la resistencia de los elementos a unir (caso general, viga y columna), las uniones pueden ser nominalmente articuladas, a resistencia completa o a resistencia parcial.

*Nominalmente articulada:* La unión es capaz de transmitir las fuerzas internas (cortantes, axiles) sin desarrollar momentos significativos que afecten a los elementos de la unión o a la estructura, y permite los giros que se producen por las cargas aplicadas. En una situación ideal los momentos transmitidos son igual a cero.

*Resistencia completa:* La resistencia de diseño de la unión es mayor o igual a la resistencia de los elementos unidos. Dependiendo de la relación existente entre el momento resistente y la resistencia plástica de los elementos de la unión, podremos considerar la unión como rígida o como semirrígida, en el caso rígido la resistencia de la unión es mayor que la resistencia de los elementos, pero cuando esta resistencia es 1 o aproximadamente 1, estamos en zona semirrígida.

*Resistencia parcial:* no cumple ninguno de los criterios anteriores. Al igual que en el caso anterior, se podrá considerar como rígida o semirrígida dependiendo de la relación entre los momentos.



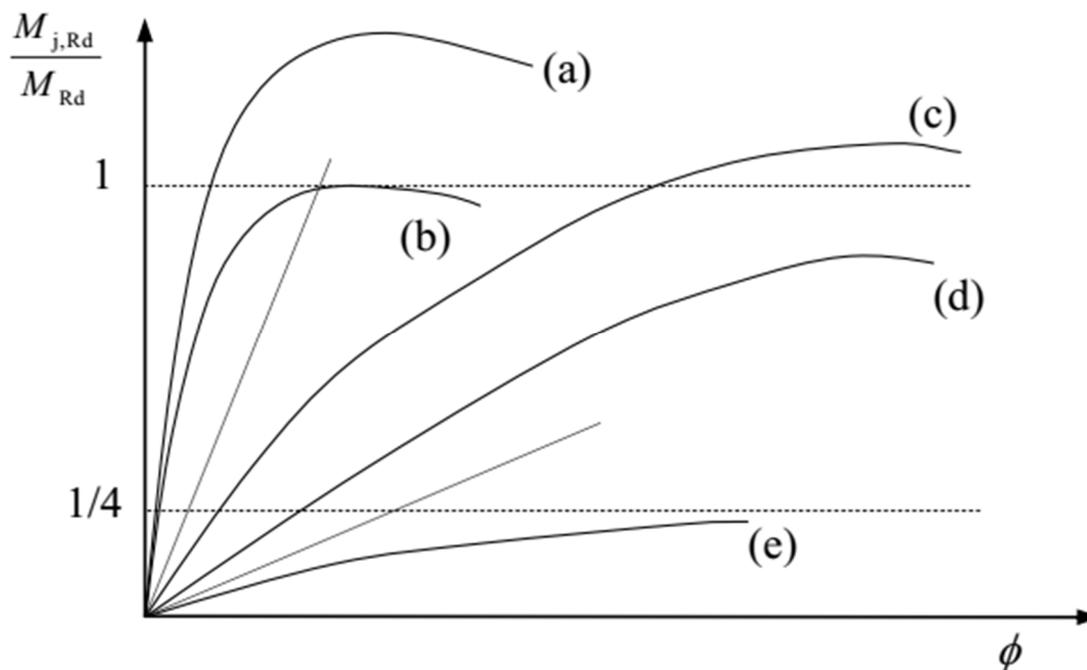
Límites para la clasificación de una unión en función de su resistencia

Estos límites están definidos cuantitativamente en el Eurocódigo 3, e indicados en el Anexo 2.

### 2.2.3. UNIONES SEGÚN CAPACIDAD ROTACIONAL

Esta tercera clasificación está solamente recogida a nivel cualitativo, de forma que se el Eurocódigo 3 se establece simplemente que a la hora de diseñar y calcular una unión dentro de una estructura realizando un análisis rígido-plástico global, dicha unión debe tener la suficiente capacidad de rotación. Esta base es muy teórica, pero nos muestra una gráfica donde se relaciona la rotación de una unión respecto a la relación que tienen el momento resistente de cálculo  $M_{j,Rd}$  y la resistencia plástica de cálculo de los elementos que forman la unión que se calcula. Cuando esta relación es mayor a 1.2, no es necesario comprobar la capacidad de rotación de dicha unión.

Observando la gráfica, también se ve que el comportamiento de una unión es complicado de definir, ya que frecuentemente, en la parte inicial podemos encontrarnos con un comportamiento semirrígido, pero en el tramo final nos acercamos mucho al comportamiento rígido.



*Clasificación de las uniones: (a) rígida de resistencia total; (b) rígida de resistencia parcial; (c) semirrígida de resistencia total; (d) semirrígida de resistencia parcial; (e) articulada*

### 2.3. IMPORTANCIA DE LAS UNIONES SEMIRRÍGIDAS

Tras el análisis por resistencia, rigidez o capacidad rotacional, tenemos por una parte la clasificación clásica de las uniones con sus simplificaciones respecto a la situación real:

*Uniones rígidas:* Consideran que la rigidez de la unión es infinita, los esfuerzos tanto cortantes, axiales como flectores se transmiten completamente, y no se produce ningún tipo de rotación diferencial entre las barras unidas, sino que el ángulo que tienen entre ellas antes y después de realizar el proceso de carga y la posible deformación de la estructura son los mismos.

*Uniones articuladas:* Consideran que la rigidez de la unión es igual a cero, se transmiten únicamente los esfuerzos axiales y cortantes, pero no se transmite momento flector.

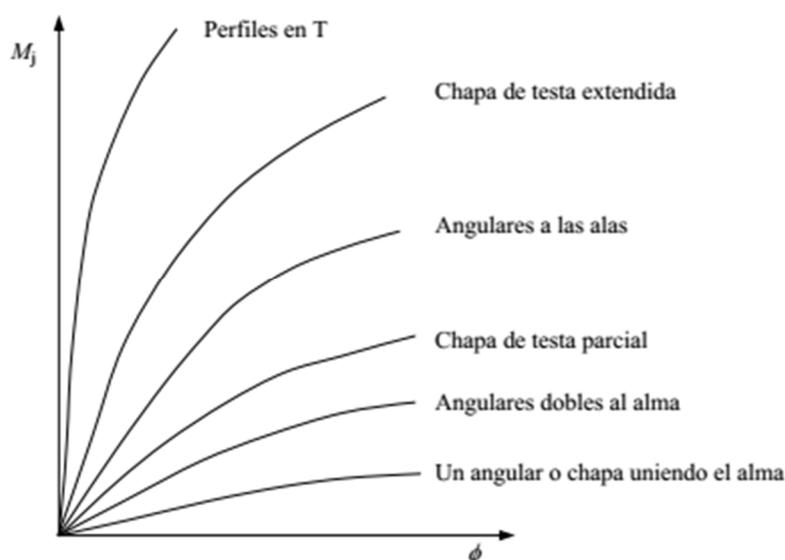
Este análisis simplificado no es el que debería llevarse a cabo, ya que en todas las situaciones reales se van a dar posiciones intermedias entre uno y otro caso, pero por el momento existe una problemática a la hora de considerar uniones intermedias, ya que su cálculo no es tan sencillo como el de estas, sino que el coste computacional necesario para realizar el cálculo de una unión semirrígida es muy elevado, pero como definición tenemos que:

*Unión semirrígida:* Considera que la rigidez de una unión es limitada (dependerá de muchos factores: robustez de los perfiles unidos, tipo de unión, elementos de unión, etc), se transmiten los esfuerzos axiales, cortantes y flectores y se genera una redistribución de los esfuerzos en la estructura completa, y dicha unión tiene una capacidad de rotación más allá del ángulo de unión entre las barras que conectan entre sí, lo que consideramos el giro relativo.

### 3. ESTUDIO PREVIO DE LAS UNIONES SEMIRRÍGIDAS

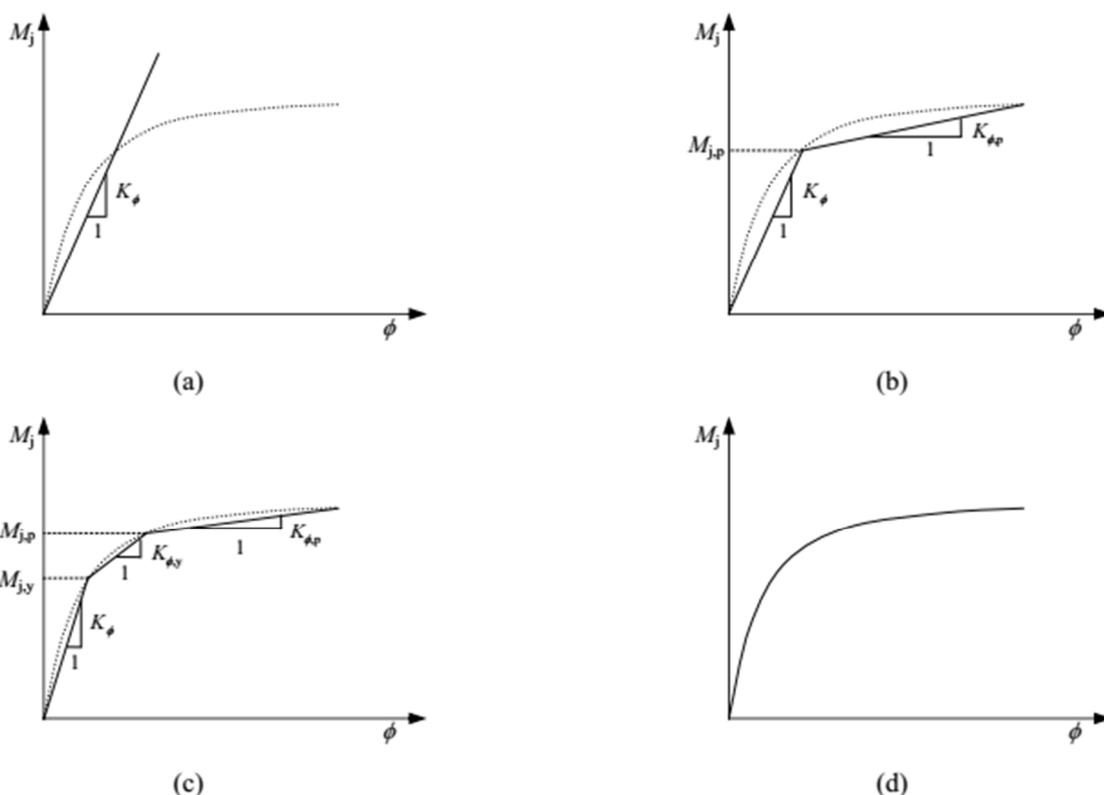
#### 3.1. TIPOLOGÍA DE UNIONES Y CURVA MOMENTO-ROTACIÓN

En el trabajo se estudia la tipología clásica de unión viga – columna más utilizada en las estructuras de acero. En adelante ya vamos a dejar de considerar que todas las uniones son idealmente rígidas o articulada, sino que son semirrígidas, y en concreto se van a estudiar a raíz de la curva momento – rotación para diferentes casos, ya que el momento flector es el esfuerzo transmitido de mayor relevancia a efectos resistivos (podemos considerarlo muy superior al efecto generado por cortante y axil). Uno de los trabajos de referencia es el de Chen (2000), en el cual encontramos multitud de uniones con sus respectivas curvas momento –rotación, que se pueden ver con detalle en el Anexo 2. Dependiendo del tipo de unión, nos encontramos con la siguiente gráfica que los divide:



Curva momento-rotación de uniones viga-columna. (Chen, 2000)

Esta gráfica está realizada a modo de resumen, y puede ser utilizado para ver una clasificación inicial de las uniones de manera común para realizar un primer cálculo estructural, de forma orientativa, ya que utilizando por ejemplo el Eurocódigo 3 la clasificación inicial es diferente. Por ejemplo, utilizando perfiles en T se puede ver con más claridad que el comportamiento es aproximado a una idealización rígida, pero utilizando la chapa de testa extendida o los angulares con alas el comportamiento es intermedio, esto es, semirrígido; sin embargo, el EC3 considera que la mayoría de casos se clasifica directamente como semirrígido. Esta discrepancia viene debido a que los diferentes textos tienen diversas maneras de representación de esta curva: lineal, bilineal, multilínea y no lineal:



Representaciones matemáticas de la curva momento-rotación: (a) lineal; (b) bilineal; (c) trilineal; (d) no lineal

La representación lineal es la más sencilla pero la más imprecisa, ya que sólo depende de la rigidez rotacional de la unión, pero considera una gran rigidez incluso cuando los giros son grandes y en realidad se ha comenzado a perder rigidez. La representación bilineal es mucho más precisa, pero tiene un punto en el que el cambio de rigidez es muy brusco, aunque los parámetros que intervienen son la rigidez rotacional, la resistencia plástica de la unión y la rigidez rotacional plástica (que es la rigidez tras alcanzar la plastificación).

Como alternativa a estos dos modelos simplificados, nos encontramos la representación trilineal, que tiene en cuenta tres zonas diferenciadas y cinco parámetros: la rigidez rotacional y resistencia elástica para una primera zona elástica; la rigidez rotacional elastoplástica, que aparece en una zona donde se ha alcanzado el límite elástico, pero sin llegar a plastificar; y la resistencia y rigidez rotacional plásticas, una vez se ha llegado a la plastificación. Esta alternativa trilineal es la que plantea el Eurocódigo 3.

Sin embargo, la alternativa que más se asemeja al comportamiento real de una unión es la representación no lineal, que tiene en cuenta el factor de forma de la unión, la rotación y la rigidez inicial. Hay formulaciones específicas para obtener matemáticamente la curva de manera no lineal, pero en nuestro caso lo obtendremos mediante simulación computacional por elementos finitos.

### **3.2. MODELOS PREDICTIVOS DE LA CURVA MOMENTO-ROTACIÓN**

Para modelar el comportamiento rotacional de nuestra unión, hay que tener modelos con los que poder predecir la curva momento-rotación para una unión dada. Hay 5 tipos de modelos: experimentales, empíricos, analíticos, mecánicos y numéricos. Adicionalmente, el EC3 desarrolla el método denominado de los componentes, que combina los modelos mecánico y analítico, y que se expone en un Anexo D.

#### **3.2.1. MODELOS EXPERIMENTALES**

Los modelos experimentales son los más fiables de todos a la hora de predecir el comportamiento de una estructura ya que permiten simular a escala una serie de hipótesis de carga, condiciones de contorno, etc que se van a dar en la estructura real. Uno de los grandes inconvenientes es el alto coste que supone realizar estos experimentos, con lo cual se suelen utilizar para validar resultados de los otros tipos de modelos predictivos.

Independientemente de su fiabilidad que ha sido probada, tiene limitaciones respecto a los modelos reales. Por una parte, el modelo experimental no reproduce la estructura completa sino sólo una parte, con lo cual la distribución de esfuerzos no es exactamente la misma que se va a dar en la realidad. Por otra parte, hay consideraciones que no se tienen en cuenta, como por ejemplo las tensiones residuales generadas por las soldaduras, las sobrecargas producidas durante la fabricación y montaje de la estructura, o las diversas condiciones de carga que tendrá dicha estructura en servicio.

No obstante, a lo largo de los años se han ido recopilando una gran cantidad de experimentos alrededor de todo el mundo, que se tabulan en diferentes bases de datos, incluyendo la información esencial de los experimentos que es: propiedades geométricas y mecánicas de los componentes, curva momento-rotación y responsables de los ensayos. Las principales bases de datos en la actualidad son:

### **SERICON**

Únicamente a nivel de ensayos realizados en países europeos. Creada por Arbed Recherches (Gerardy y Schleich, 1991) y la Universidad de Aachen (Weynand, 1992). Es de esta base de datos de donde vamos a tomar el ensayo a comprobar mediante elementos finitos, codificado como T101.010. Se puede consultar en ambas referencias en paréntesis.

### **GOVERDHAN**

La primera de todas en desarrollarse, en la cual se recogen ensayos únicamente de Estados Unidos llevados a cabo entre 1950 y 1983 y sólo para uniones atornilladas

### **NETHERCOT**

La primera realizada en Europa, donde se incluyen datos de ensayos realizados previamente por otros investigadores, como las uniones atornillas estudiadas por Goverdhan y uniones con perfiles en T y sin angulares en el alma de la viga.

### **STEEL CONNECTION DATA BANK (SCDB)**

Kishi y Chen ampliaron la base desarrollada por Goverdhan incluyendo ensayos realizados a nivel mundial entre 1936 y 1986 (Kishi y Chen, 1986), y adicionalmente desarrollaron el programa SCDB que proporciona una expresión matemática de la curva momento-rotación obtenida experimentalmente. En dicho programa se incluyen 396 ensayos agrupados en 7 tipologías de unión, que son las indicadas en el Anexo 2, prestando especial atención a las uniones con chapa de testa.

La importancia de estas bases de datos, y otras más pequeñas en menor medida, es imprescindible para validar modelos matemáticos y numéricos a partir de propiedades geométricas y mecánicas. Sin embargo, es limitado para el diseño de estructuras, ya que es complicado encontrar las uniones en concreto para estructuras concretas.

### 3.2.2. MODELOS EMPÍRICOS

Estos modelos relacionan mediante expresiones empíricas los parámetros que aparecen en la formulación matemática de la curva momento-rotación de la unión con las características geométricas y mecánicas de los componentes.

Estos modelos están limitados a los tipos de unión para los cuales se han calibrado, por tanto, como el comportamiento de una unión depende en gran parte de las propiedades geométricas y mecánicas, si la unión es diferente a la estudiada, no es aplicable. Hay diferentes modelos que se desarrollan en el Anexo D

### 3.2.3. MODELOS ANALÍTICOS

Aplican los conceptos del análisis estructuras a modelos simplificados viga-columna teniendo sólo en cuenta las zonas donde mayores deformaciones se producen. La gran ventaja es que predicen fielmente el comportamiento rotacional de la unión, tanto la rigidez inicial (análisis elástico del modelo) como el momento último resistente (análisis plástico del mecanismo de colapso). Se predice pues muy bien la parte inicial de la curva, pero si interesa tener más parte de la curva es necesario interpolar, calibrando con un factor de forma. Importante, los resultados obtenidos deben compararse con resultados experimentales para garantizar su fiabilidad. Hay dos modelos principales, indicados en el Anexo C, que son el de Chen y el de Yee y Melchers

### 3.2.4. MODELOS MECÁNICOS

También llamados de muelles, hacen aproximaciones fieles a las uniones semirrígidas, ya que la unión se representan mediante componentes rígidos y flexibles (muelles), de forma que la respuesta es no lineal y vienen dadas por las leyes inelásticas de los muelles. En este caso cada componente se caracteriza por relaciones empíricas, y tenemos la ventaja de que se obtienen curvas multilíneas completas, con lo cual no hay que ajustar la curva con factores de forma ni interpolar. El proceso de definición de los modelos mecánicos sería identificar los diferentes componentes de la unión, obtener las leyes de comportamiento de cada uno de ellos y ensamblarlos entre sí para obtener la curva momento-rotación de la unión.

No tiene limitación en tipología de unión, y se pueden introducir efectos como el pretensado de tornillos o el endurecimiento por deformación plástica.

### 3.2.5. MODELOS NUMÉRICOS

Este es el análisis en que se centra el trabajo, el de elementos finitos, que se adecua mejor que ningún otro para el estudio de la respuesta rotacional de las uniones, pese a conllevar un alto coste computacional. Este alto coste es debido a

que la curva momento-rotación se obtiene a partir de la interacción entre todos los elementos de la unión, que es muy compleja puesto que se requiere introducir:

- No linealidades geométricas
- Pretensado de los tornillos (si son tornillos de este tipo)
- Interacciones entre tornillos y chapa, teniendo en cuenta vástago, cabeza, tuerca, arandela...)
- Contacto entre chapas
- Deslizamiento entre chapas por holgura entre tornillo y taladro
- Cordones de soldadura
- Diversas imperfecciones

Mediante elementos finitos podemos introducir grandes deformaciones y desplazamientos, plasticidad, endurecimiento por deformación plástica e inestabilidad, contactos, etc. Por ello, este es el análisis óptimo para predecir y analizar el comportamiento semirrígido de uniones tanto soldadas como atornilladas

## **4. DISEÑO DE LA UNIÓN Y CÁLCULO MEDIANTE MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS**

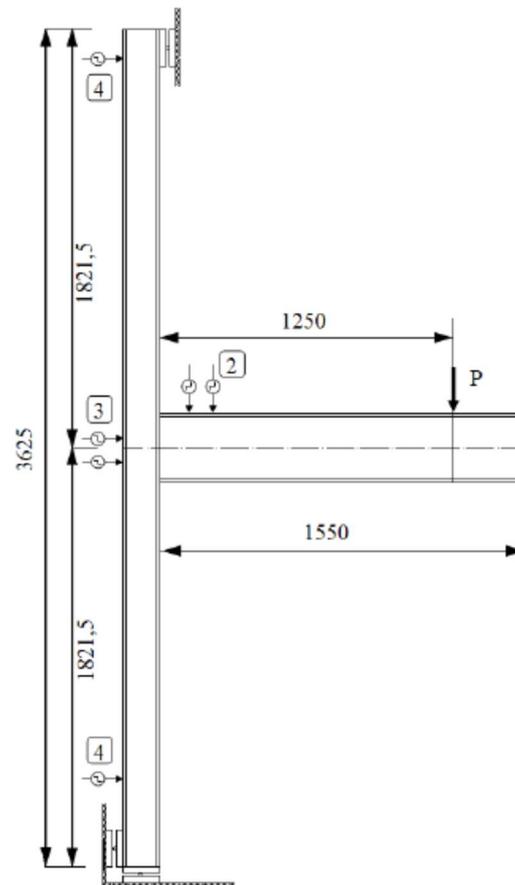
### **4.1. INTRODUCCIÓN**

La tipología de unión que nos ocupa, las semirrígidas, se pueden simular mediante modelos numéricos basados en el Método de los Elementos Finitos (MEF), permitiendo visualizar el comportamiento real de las uniones, con la gran ventaja de que es más económico y sencillo que realizar ensayos experimentales. Pese a ello, las hipótesis básicas de este método hacen que los resultados deban ser contrastados con los obtenidos con métodos experimentales, para garantizar la precisión del modelo. Es por esta razón que la unión diseñada ya está ensayada experimentalmente, para poder contrastar los resultados mediante el modelo numérico. La unión seleccionada es un modelo experimental sacado de la base SERICON y codificado como T101.010, y se puede establecer la comparación entre ambos modelos, e incluso con el mismo modelo realizado en otros estudios mediante el método de los componentes del EC3.

En resumen, para asegurar la fiabilidad del modelo numérico, hay que tener en cuenta un gran número de factores, como la posible plastificación de las chapas, el contacto entre componentes, deformaciones, etc. En este trabajo se utiliza el programa ABAQUS para el análisis de esta unión atornillada, y las características del modelo están brevemente indicadas en la memoria, pero desarrolladas más a fondo en el anexo E.

## 4.2. MODELO EXPERIMENTAL T101.010

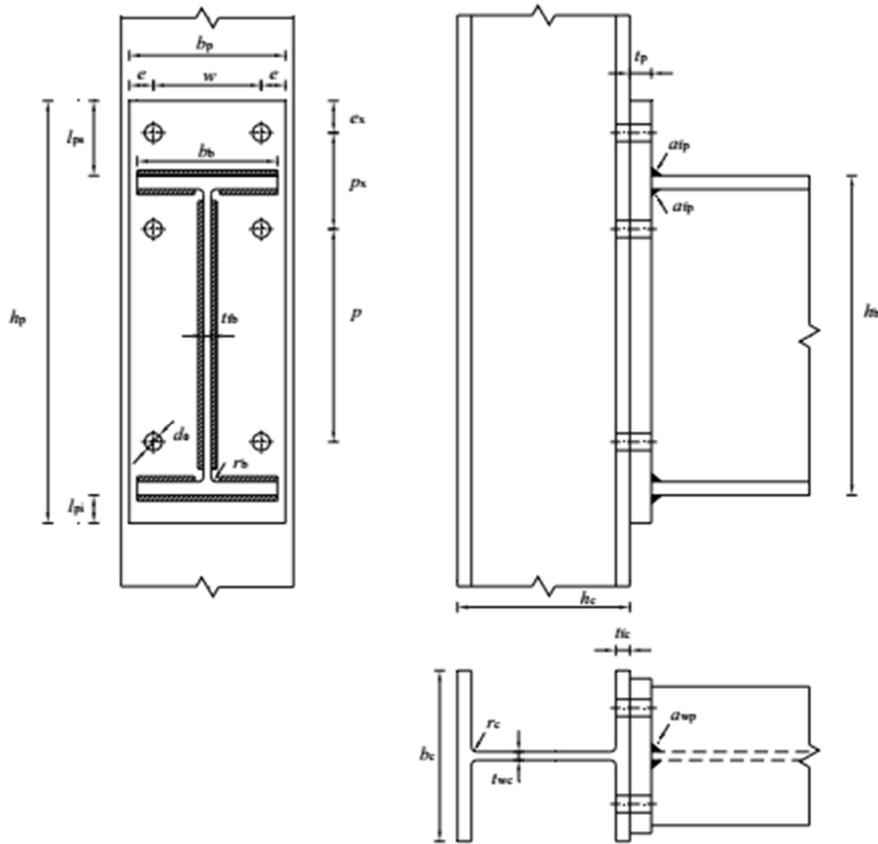
Este modelo sacado de la base SERICON corresponde a una unión viga-columna con chapa de testa extendida en zona de tracción (consideramos que es una edificación donde no hay posibilidad de sismo) atornillada sometida a una carga estática en el extremo de la viga:



*Modelo experimental T101.010*

En el ensayo, se va aumentando la carga hasta alcanzar el colapso de la conexión o conseguir el desplazamiento máximo en el extremo de la viga de 200 mm. Los tornillos utilizados son de alta resistencia 10.9 pretensados al 80 % de la tensión de fluencia de los mismos. La columna no se encuentra rigidizada y el coeficiente de rozamiento es de 0.5.

La base de datos SERICON no es accesible para todo el mundo, con lo cual los datos están tomados la referencia de Faella et al. (2000) y Rodrigues (2003), que realizó un estudio previo de esta unión. A continuación, se muestran las características de la unión junto con los datos numéricos que se le asignaron en el experimento:



- $d_r$       diámetro resistente de los tornillos
- $f_{y,fc}$     límite elástico del ala de la columna
- $f_{y,wc}$     límite elástico del alma de la columna
- $f_{u,fc}$     tensión de rotura del ala de la columna
- $f_{u,wc}$     tensión de rotura del alma de la columna
- $f_{y,fb}$     límite elástico del ala de la viga
- $f_{y,wb}$     límite elástico del alma de la viga
- $f_{u,fb}$     tensión de rotura del ala de la viga
- $f_{u,wb}$     tensión de rotura del alma de la viga
- $f_{y,p}$      límite elástico de la chapa de testa
- $f_{u,p}$      tensión de rotura de la chapa de testa
- $f_{y,b}$      límite elástico de los tornillos
- $f_{y,wc}$     tensión de rotura de los tornillos

Columna (HE160B)		Viga (IPE300)		Chapa de testa	
$h_c$	162,5	$h_b$	298,8	$h_p$	380,0
$t_{wc}$	8,5	$t_{wb}$	7,3	$b_p$	150,0
$t_{fc}$	12,6	$t_{fb}$	10,8	$t_p$	20,0
$b_c$	160,1	$b_b$	150,9		
$r_c$	15,0	$r_b$	15,0		

*Propiedades geométricas de columna, viga y chapa de testa*

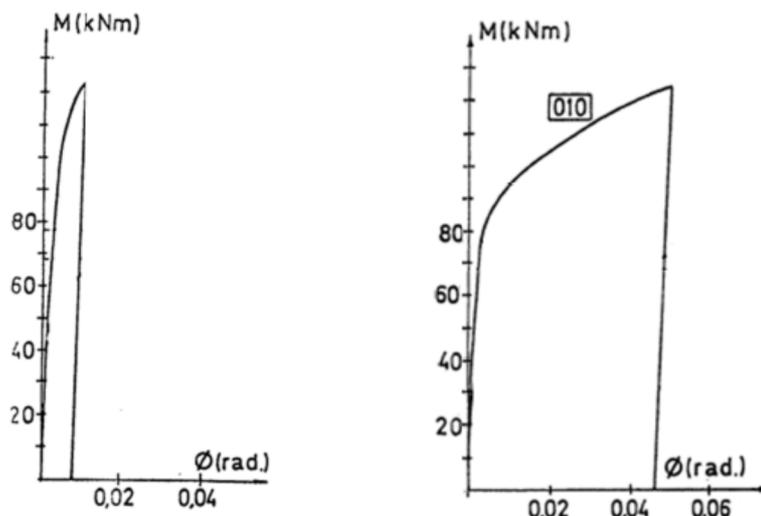
Soldadura		Tornillos (M20)		Disposición geométrica			
$a_{wp}$	4,0	$d_b$	20,0	$l_{ps}$	70,0	$e_x$	30,0
$a_{fp}$	6,0	$d_0$	22,0	$l_{pi}$	11,2	$p_x$	90,0
		$d_r$	17,6	$e$	30,0	$p$	200,0
				$w$	90,0		

*Propiedades geométricas de las soldaduras y los tornillos*

Columna (HE160B)		Viga (IPE200)		Chapa de testa		Tornillos	
$E$	210000,0	$E$	210000,0	$E$	210000,0	$E$	210000,0
$f_{y,fc}$	280,0	$f_{y,fb}$	303,0	$f_{y,p}$	291,5	$f_{y,b}$	900,0
$f_{y,wc}$	298,8	$f_{y,wb}$	314,0	$f_{u,p}$	463,4	$f_{u,b}$	1000,0
$f_{u,fc}$	422,3	$f_{u,fb}$	447,0				
$f_{u,wc}$	422,0	$f_{u,wb}$	443,0				

*Propiedades mecánicas de los materiales (MPa)*

El experimento tratado por los dos autores indicados arroja finalmente una gráfica momento-rotación tanto si nos referimos a la unión como si lo hacemos a la conexión. La diferencia entre ambos conceptos es que la unión engloba los elementos conectados entre sí más la zona de influencia de las acciones (por ejemplo, el alma de la columna, alma de la viga...). Además, incluso utilizando la misma base de datos como referencia, los resultados a los que llegan los autores Faella et al. (2000) y Rodrigues (2003) difieren.



Curva momento rotación para la conexión (izda) y unión (dcha)

	según Faella et al. (2000)	según Rodrigues (2003)
Rigidez inicial ( $S_{j,ini}$ )	25318 kNm/rad	27932 kNm/rad
Momento último ( $M_{j,u}$ )	124,60 kNm	124 kNm
Momento resistente ( $M_{j,Rd}$ )	96,36 kN	96 kNm

Discrepancia en los resultados según Faella y Rodrigues

### 4.3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

El modelo geométrico generado con ABAQUS tiene que representar lo más fielmente posible el experimento T101.010 para que las diferencias en los resultados sean las mínimas posibles. Para ello, en el Anexo F se detalla el tipo de elementos y consideraciones a la hora de seleccionarlos, pero en resumen el modelo es el siguiente:

- **Componentes:**  
Viga, columna, chapa de testa, apoyos de la columna, cordones de soldadura, tornillos y chapa rigidizadora en el punto de aplicación de carga.

- **Elementos finitos ABAQUS:**

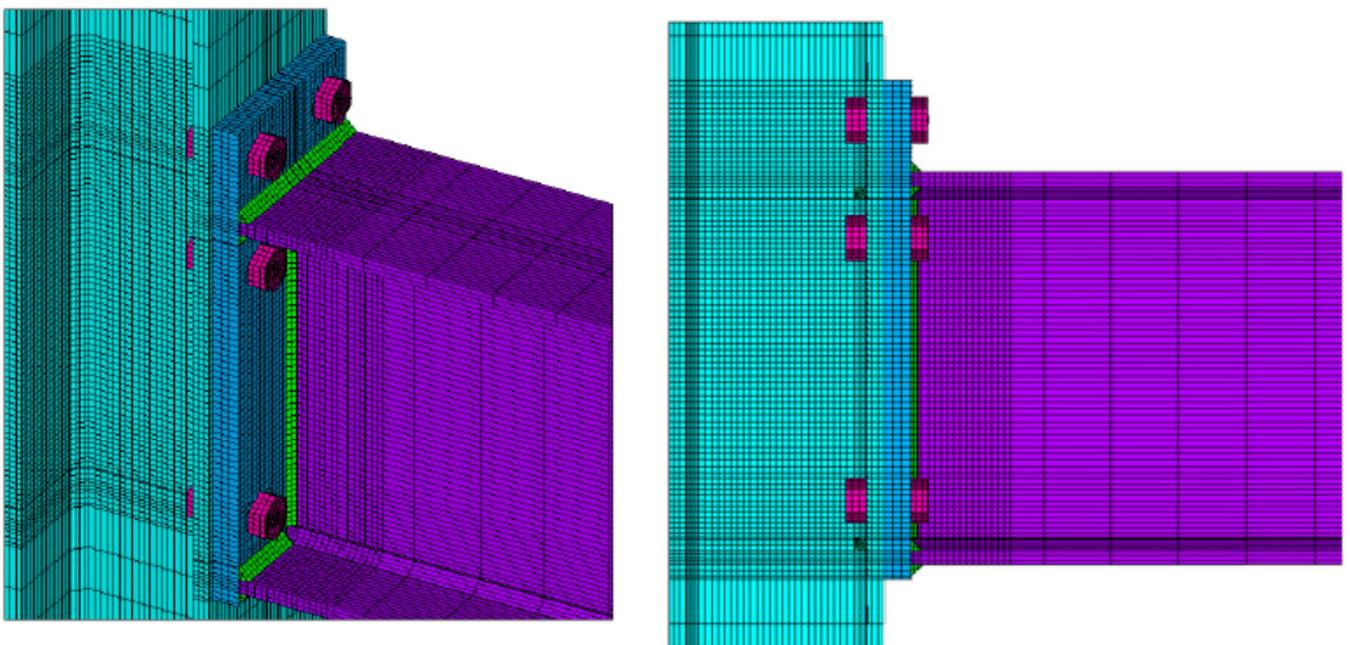
Se utilizan elementos sólidos hexaédricos de primer orden con ocho nodos e integración completa con funciones de forma auxiliares incompatibles.

Elementos de contacto 3D con 4 nodos representando contacto y deslizamiento, y elementos para representar la superficie asociada al elemento de contacto

De pretensado, para generar dimisión 3D pretensada con 1 grado de libertad en la dirección del pretensado.

- **Malla**

Para obtener los mejores resultados la malla debería ser lo más fina posible, pero para este caso hay zonas donde el comportamiento no nos interesa, como por ejemplo los extremos de las vigas, de forma que está hecho con diferentes densidades de malla, siendo más gruesa en los extremos, fina en las zonas de interacción, y de tamaño intermedio en las zonas de transición



*Modelo de los elementos finitos*

- **Condiciones de contorno**

Simetría en las almas de viga y columna (plano XZ), impidiendo el desplazamiento en Y. Condiciones de apoyo en los nodos: en el apoyo inferior desplazamiento en Z y X restringido, y en el apoyo superior en Y, con la viga en voladizo.

- **Contactos**

- Contacto entre chapa de testa y tornillos

- Contacto entre ala de columna y chapa de testa

- Contacto entre ala de columna y tuercas

- Contacto entre vástagos y taladros (tanto en chapa de testa como en ala de columna)

- **Cargas**

- Se aplica una carga vertical a una distancia de la unión de 1250 mm desde la chapa de testa. Para evitar cualquier tipo de inestabilidad local se coloca una chapa rigidizadora en el punto de aplicación.

#### 4.4. DESARROLLO

La carga en un principio es indeterminada, ya que el objetivo no es llegar a la plastificación del material, sino llegar a un estado límite a raíz del cual podamos obtener una curva momento-rotación que permita validar el modelo experimental en el que nos basamos.

Para ello, en el modelo numérico, antes hemos de determinar la rigidez inicial de la unión  $S_{j,ini}$  para obtener el momento resistente de la unión. El cálculo de la rigidez inicial aparece detallado y se puede consultar según Girao et al (2004) y otros trabajos de referencia como Huber y Tschemmerneegg (1998) y Kameshi y Saka (2001). Se realiza un proceso de carga de la estructura mediante el cual se atraviesan los estados límite: una vez que se llega al límite elástico, se descarga la estructura, y se vuelve a cargar hasta sobrepasar el límite plástico de la unión. Para obtener el momento resistente de la unión  $M_{j,Rd,EC3}$  se puede consultar también directamente el método de los componentes del EC3-1-8:2005 :

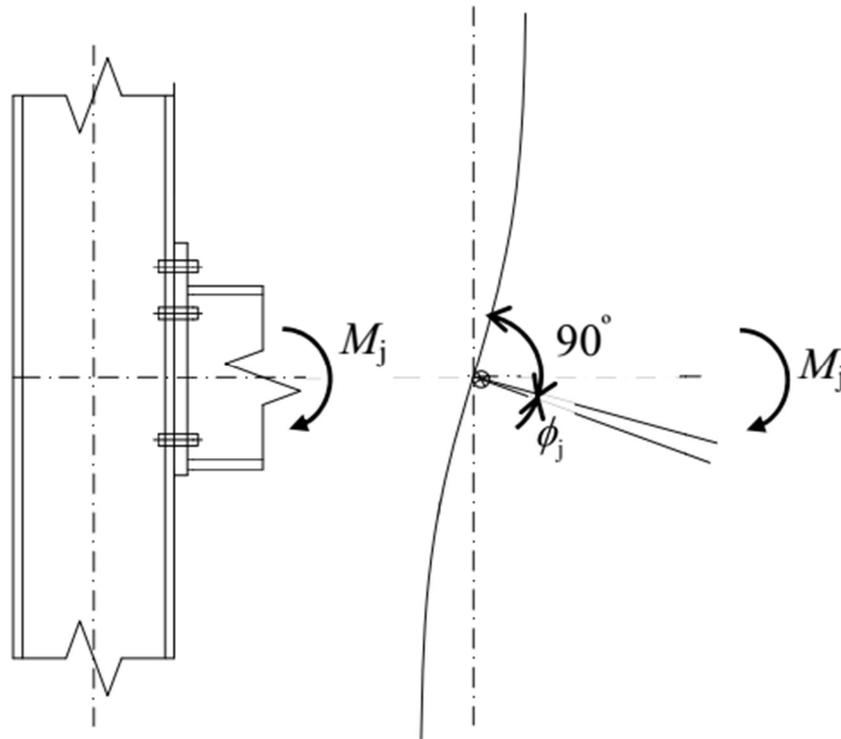
- 1.- La carga inicial es  $P = M_{j,Rd,EC3}/L$

- 2.- Se realiza una descarga hasta  $P = 0$

- 3.- Nueva carga, se aumenta llegando ya a la zona plástica, hasta que la solución no converge (limitamos hasta que la carga sea 1.5 veces la carga inicial)

Obtenida la rigidez inicial, el proceso para obtener la curva momento-rotación que estamos buscando consiste en resolver un problema manifiestamente no lineal en el que se van realizando iteraciones, que como resultado nos dan una actualización de la rigidez del contacto hasta que dicha rigidez no varíe entre una iteración y la siguiente.

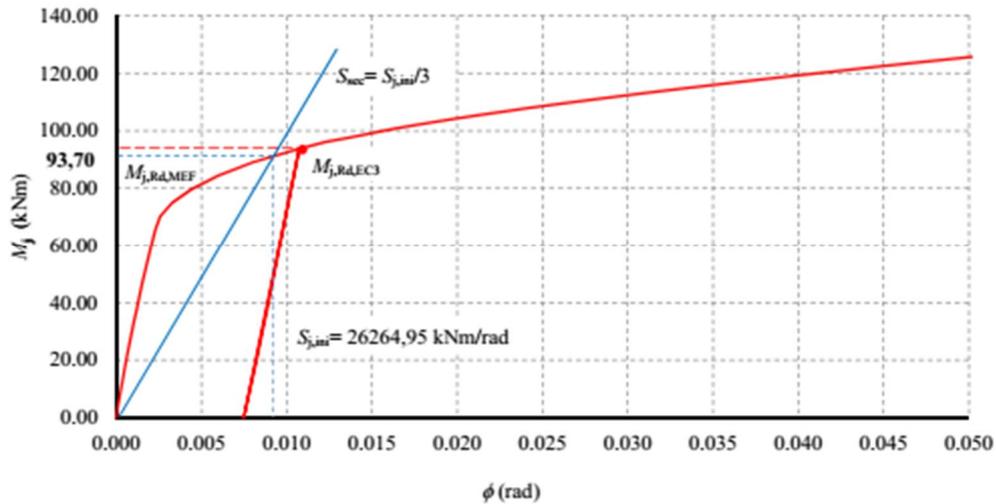
La curva que finalmente se obtiene que relacione el momento con la rotación tiene como momento el producto de la carga por la distancia a la que está aplicada, y como giro el giro relativo conforme se aumenta la carga respecto al propio desfase que hay en la unión de partida. Esto es:



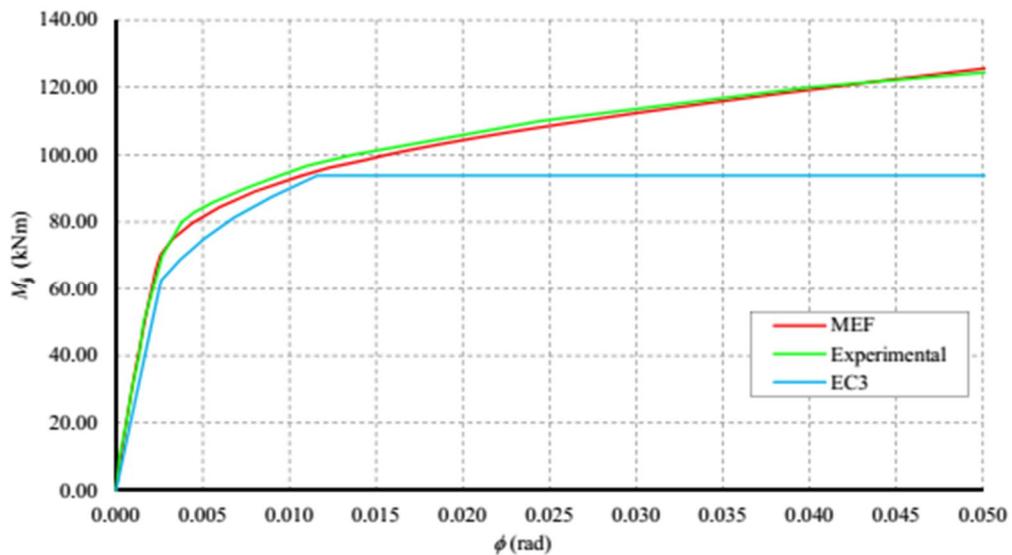
*Giro relativo en la estructura*

Inicialmente el ángulo entre los ejes de las barras es de  $90^\circ$ , sin embargo, conforme se carga la estructura y se produce el giro, este ángulo va aumentando diferencialmente, y es el objetivo que persigue el estudio de una unión semirrígida: no considerar este giro despreciable y entender que esto hace que no se transmita completamente el momento flector de un elemento a otro de la unión, sino que podría decirse que una parte del momento se transmite pero otra es absorbida y se generan deformaciones en la unión.

En el anexo el proceso completo está más detallado, pero como resumen, tras obtener una curva momento-rotación, en la que la rotación relativa es el aumento del giro respecto al ángulo inicial entre barras, se muestra por una parte sólo la curva del modelo experimental con los datos relevantes obtenidos y por otra se compara con el modelo experimental y también con el método de los componentes que describe el EC3 para este mismo modelo T101.010, y se comprueba que el ajuste es bastante adecuado entre los modelos numérico y experimental en la unión.



Curva momento-rotación del modelo T101.010 con Abaqus



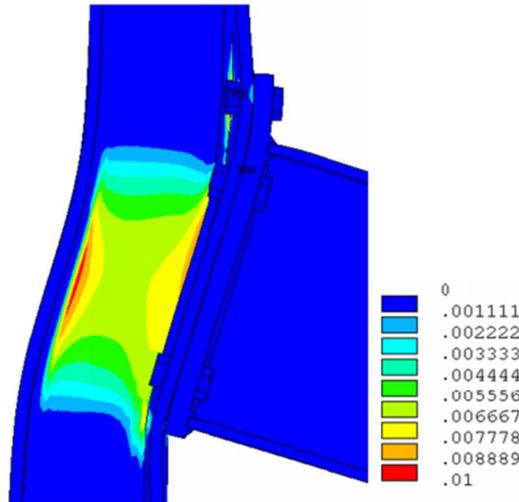
Comparación de las curvas momento-rotación para el modelo experimental (Jans et al.1987), modelo numérico Abaqus y EC3

En la gráfica de la curva momento-rotación sólo del modelo numérico, se obtiene el valor de la rigidez inicial y el momento resistente de la unión a partir del cual se comienza el proceso de carga como se ha indicado previamente. Tras varias iteraciones la rigidez que hay que tomar inicialmente para la unión va variando en poca medida. Comparativamente se muestra en la siguiente tabla las diferencias existentes entre los datos obtenidos para la rigidez inicial y el momento para el modelo experimental, el EC3 y el método de los elementos finitos:

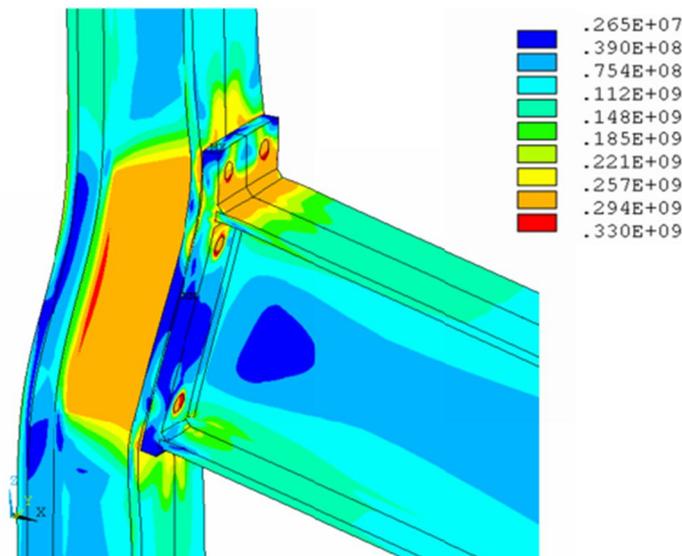
	Elementos finitos	Experimental	EC3
$S_{j,ini}$ (kNm/rad)	26264.95	25316	24181.36
$M_{j,Rd}$ (kNm)	93.7	96.36	93.78

*Resultados para el modelo T101.010*

Se muestra a continuación también, para este estado en el que se llega a comenzar a plastificar, nos encontramos con los siguientes estados de deformaciones plásticas y las tensiones equivalentes de Von Mises:



*Deformaciones plásticas*



*Tensiones equivalentes de Von Mises*

Se ve claramente que la zona de plastificación se encuentra concentrada en el alma de la viga, donde precisamente no se habían colocado rigidizadores para

Llegar a este estado límite. En caso de haber colocado rigidizadores, nos encontraríamos con una unión notablemente más rígida, en la cual el giro relativo disminuiría y nos encontraríamos con una curva en la que si merecería la pena aproximarla a tipo de unión rígida y evitar todo el cálculo por ordenador.

## 5. CONCLUSIONES

### 5.1. INTRODUCCIÓN

A continuación, se exponen tanto las líneas del trabajo como las conclusiones y posibles trabajos futuros que se podrían ir implementando.

### 5.2. TRABAJO REALIZADO

Para la realización del presente trabajo ha sido clave la información externa acerca del tipo de uniones a estudiar y múltiples referencias de otros autores a lo largo del tiempo:

- Revisión bibliográfica de artículos, libros, normativa...relacionada con el estudio de este tipo de uniones
- Estudio de los diferentes modelos predictivos de la curva momento-rotación
- Estudio del Eurocódigo 3 y su método de los componentes
- Desarrollo de una unión mediante el método numérico de los elementos finitos.

A raíz de toda la información se ha llegado hasta un resultado y comparación final entre diversos modelos y el método de los elementos finitos, arrojando una serie de conclusiones desarrolladas en el siguiente apartado.

### 5.3. CONCLUSIONES

A la vista del último cuadro que compara los resultados obtenidos mediante el método de los elementos finitos con los obtenidos mediante el Eurocódigo 3 y el modelo experimental, se aprecia ligera diferencia entre ellos, de alrededor de un 3.7 en rigidez y un 2.7 % en resistencia (comparativa entre modelo de elementos

finitos y modelos experimental), resultando que el modelo de elementos finitos es algo más rígido, pero algo menos resistente.

Esto puede deberse tanto a imprecisiones en el modelo en ABAQUS como en el modelo experimental. Las del método de elementos finitos más reseñables serían:

- Al modelar, no se tienen en cuenta factores como la tensión residual generada por la soldadura sobre la estructura de estudio.
- Diferencias en el ajuste de la curva momento-rotación

Para el modelo experimental:

- El montaje que se realiza puede tener deficiencias, y, aunque no las tuviera, nunca va a tener la misma exactitud que un modelo generado por ordenador.
- La geometría en un experimento nunca tiene la exactitud de un modelo de ordenador. Las alas nunca van a ser simétricas ya que son elementos que se obtienen de laminación y siempre hay que contar con imperfecciones.
- La homogeneidad del material no es perfecta como sí se considera en un modelo numérico.
- El ajuste de la curva influye para las diferencias con el modelo numérico.

En definitiva, se observa que las situaciones ideales consideran que no hay giros relativos en los procesos de carga de las estructuras, pero el estudio de las uniones semirrígidas tiene en cuenta que las situaciones reales no son problemas lineales, se generan giros relativos durante los procesos de carga y se produce una redistribución de esfuerzos en toda la estructura.

Tanto en el modelo experimental como en el numérico, se comprueba que existe un giro relativo de la sección respecto a su posición inicial, y esto, además de producir deformaciones con las que no se cuenta en los modelos clásicos, genera que los esfuerzos transmitidos no sean los calculados según el análisis común de estructuras. Por ejemplo, una unión rígida transmite todo el momento flector sin producirse giro, mientras que considerar que existe un giro relativo genera una redistribución de esfuerzos, de forma que la estructura se deforma de diferente manera. En este caso el estudio era entre una viga y una columna, pero en una estructura con mayor número de elementos como puede ser un edificio de varias plantas, el considerar todas las uniones como semirrígidas va a producir que no sea válido el considerar un modelo rígido o articulado porque los esfuerzos no son los reales.

Sin embargo, al idealizar una estructura como rígida o articulada, siempre se calcula por el lado de la seguridad, ya que en el caso rígido los esfuerzos se

transmiten completamente, y las vigas quedan sobredimensionadas, mientras que, al considerar caso articulada, no se transmiten los momentos, con lo cual en el centro de los vanos la flexión es mayor que lo que debería e igualmente queda sobredimensionado. En el caso semirrígido, podría decirse que lo que se aumenta de esfuerzos, por una parte, se disminuye por otra, con lo cual algunas partes se alivian mientras que otras se estresan, simulándose más fielmente el comportamiento real que tiene una estructura en servicio.

Al realizar las comparaciones entre modelo experimental y numérico, concluimos claramente que el modelo de los elementos finitos es adecuado para el estudio de las estructuras y simula muy bien el comportamiento semirrígido. Sin embargo, el coste computacional para realizar las simulaciones es muy alto, incluso cuando aquí sólo se ha realizado simulación de una unión. En el momento en que entre en juego una estructura entera, donde se considera que todas las uniones tienen mayor o menor influencia entre sí, el tiempo de cálculo para una sola iteración va a ser enorme. Conforme el desarrollo de los ordenadores vaya siguiendo su curso, es previsible que se facilite este tipo de cálculos y a lo largo de los años termine imponiéndose el cálculo semirrígido frente al clásico rígido o articulado.

#### **5.4. TRABAJOS FUTUROS**

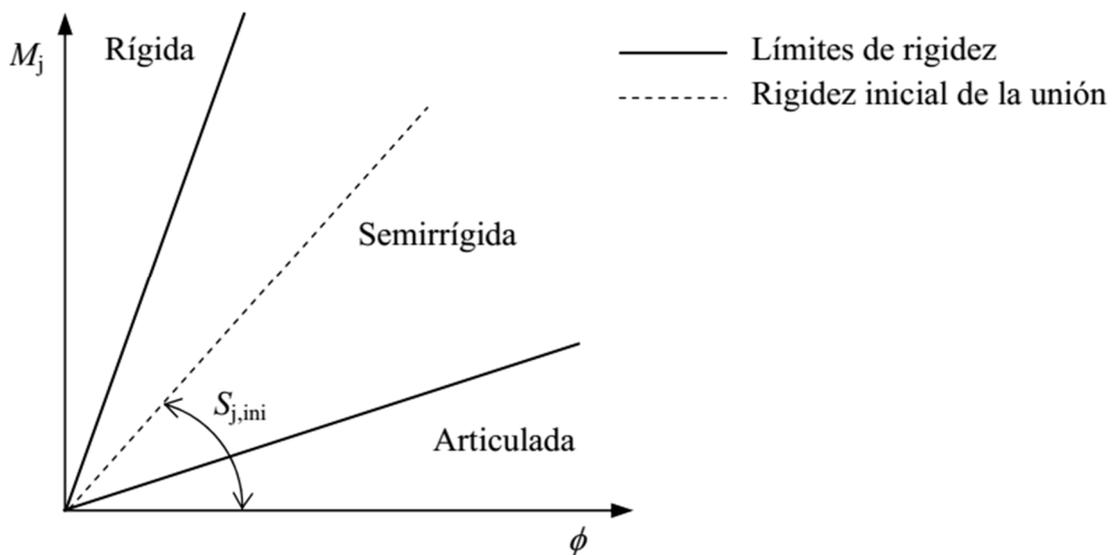
Tomando como base este trabajo, se podría intentar optimizar más el estudio por elementos finitos para que la curva momento-rotación se ajuste todavía más a los modelos experimentales. Esto podría conseguir si se introdujeran en el modelo las tensiones residuales de las soldaduras o las imperfecciones geométricas del material, ahora bien, esto sería altamente laborioso, ya que las imperfecciones no son homogéneas, sino que varían dependiendo del punto en que nos encontremos o de la barra de la estructura. Además, habría que tener en cuenta si merece la pena introducir estas imperfecciones, ya que sin introducirlas el modelo ya está muy ajustado al experimental.

Podría tomarse como referencia de estudio una estructura en 3 dimensiones para profundizar en el método de los elementos finitos, pero actualmente y tal como se indica en una de las conclusiones, el coste computacional sería enorme.

## ANEXO A. CLASIFICACIÓN DE UNIONES SEGÚN EUROCÓDIGO 3

En la memoria se realiza una clasificación inicial de uniones dependiendo de la rigidez, resistencia y capacidad rotacional de las uniones. El Eurocódigo 3 establece, dependiendo de las características mecánicas y geométricas de los elementos, unos límites a partir de los cuales se consideran las uniones como rígidas, articuladas o semirrígidas.

### A.1. RIGIDEZ



*Límites de la clasificación de una unión en función de la rigidez*

La *unión rígida* cumple:

$$S_{j,ini} \geq k_b EI_b / L_b$$

Donde

$S_{j,ini}$  es la rigidez inicial de la unión

$k_b=8$  para estructuras arriostradas: aquellas cuyo sistema de arriostramiento reduce al menos en un 80% los desplazamientos horizontales

$k_b=25$  para estructuras no arriostradas, teniendo en cuenta que para una edificación de varios pisos, en cada planta se debe cumplir que  $K_b \geq 0.1$ . En caso de que sea menor a 0.1, entonces la unión se puede definir como semirrígida, siendo:

$K_b = I_b / L_b$  el cociente entre la inercia y la longitud de la viga superior de esa planta

$K_c = I_c / L_c$  el cociente entre la inercia y la longitud de la columna de esa planta

La *unión semirrígida* cumple:

$$0.5 EI_b / L_b < S_{j,ini} < k_b EI_b / L_b$$

Opcionalmente, cualquier unión incluida en la zona articulada o rígida se puede tratar como unión semirrígida.

De acuerdo a la clasificación de las uniones rígidas, si el cociente para  $k_b$  es menor de 0.1, también se considera directamente semirrígida.

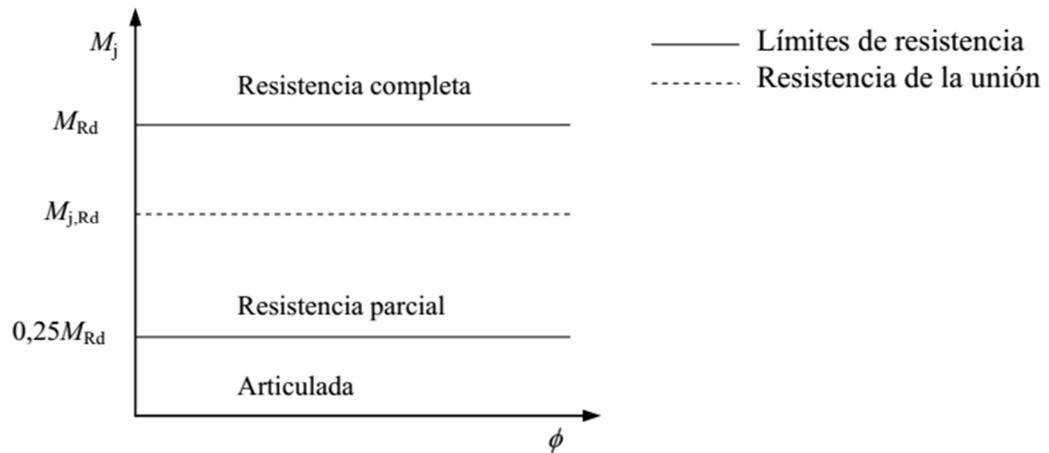
La *unión nominalmente articulada* cumple:

$$S_{j,ini} \leq 0.5 EI_b / L_b$$

## A.2. RESISTENCIA.

En la memoria se ha hecho referencia a la gráfica indicada por el Eurocódigo 3 donde se relaciona la resistencia de cálculo de una unión con la resistencia de los elementos a unir (viga y columna). La clasificación de esta unión en función de su resistencia viene de comparar el momento de cálculo de la unión  $M_{j,Rd}$  con los

límites de resistencia completa y nominalmente articulada. Estos límites son establecidos en el EC3-1-8:2005, en resumen:



*Resistencia completa:*

$$M_{j,Rd} \geq M_{Rd}$$

Donde  $M_{Rd}$  es el mayor valor de

$$M_{Rd} \geq \min (M_{pl,b,Rd}, M_{pl,c,Rd})$$

si la columna no es continua, pero en caso de que sea continua será:

$$M_{Rd} \geq \min (M_{pl,b,Rd}, 2M_{pl,c,Rd})$$

siendo  $M_{pl,b,Rd}$  el momento resistente plástico de la viga y  $2M_{pl,c,Rd}$  el momento resistente plástico de la columna

*Resistencia parcial:*

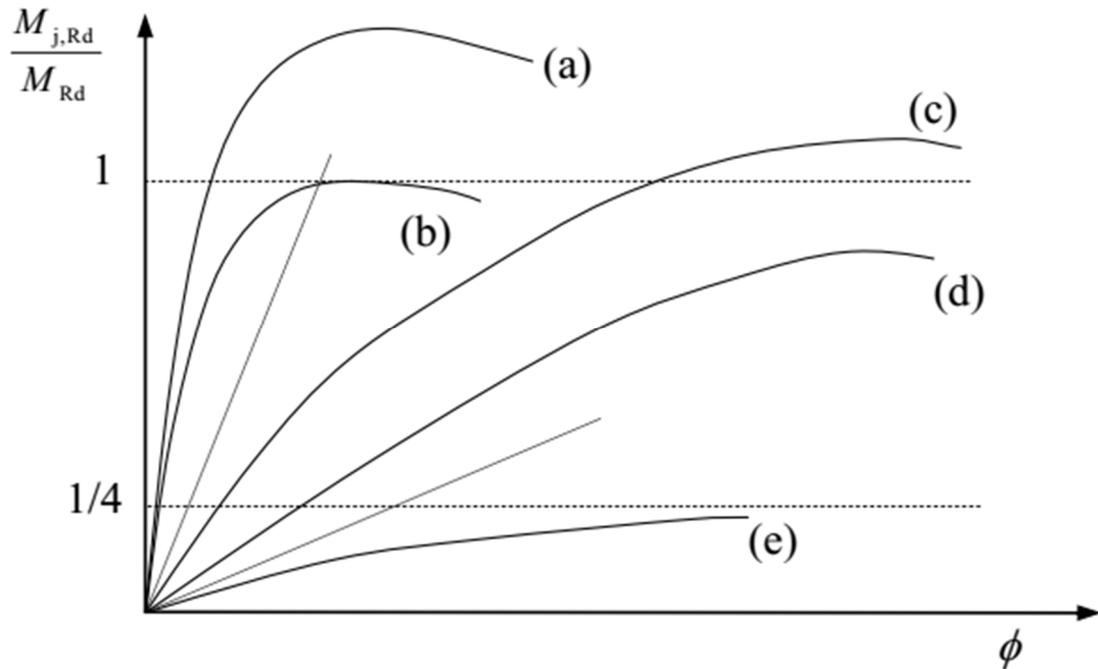
$$0.25 M_{R,d} < M_{j,Rd} < M_{Rd}$$

*Nominalmente articulada:*

$$M_{j,Rd} \leq 0.25M_{Rd}$$

**A.3. CAPACIDAD ROTACIONAL**

La gráfica de referencia utilizada en la memoria era la siguiente.



Donde se relacionaba el cociente entre  $M_{j,Rd}$  y  $M_{Rd}$  de forma que gráficamente se puede intuir que cuando dicho cociente es relevante (a partir de  $\frac{1}{4}$  aproximadamente) se considera unión semirrígida de resistencia parcial o total dependiendo de si respectivamente dicho cociente pasa de 1 o no. Podría decirse que una unión que trabaja a resistencia total es aquella en la que el momento flector soportado por la unión es igual o mayor al momento soportado por los elementos que conectan la unión, mientras que cuando es menor, está trabajando a resistencia parcial.

En cualquier caso, seguimos comprobando, como a lo largo de todo el trabajo, que incluso cuando simplificamos una unión como rígida, esta no tiene una rigidez infinita y sí que se produce una rotación diferencial; y cuando simplificamos como unión articulada, esta transmite momento flector a través de la unión.

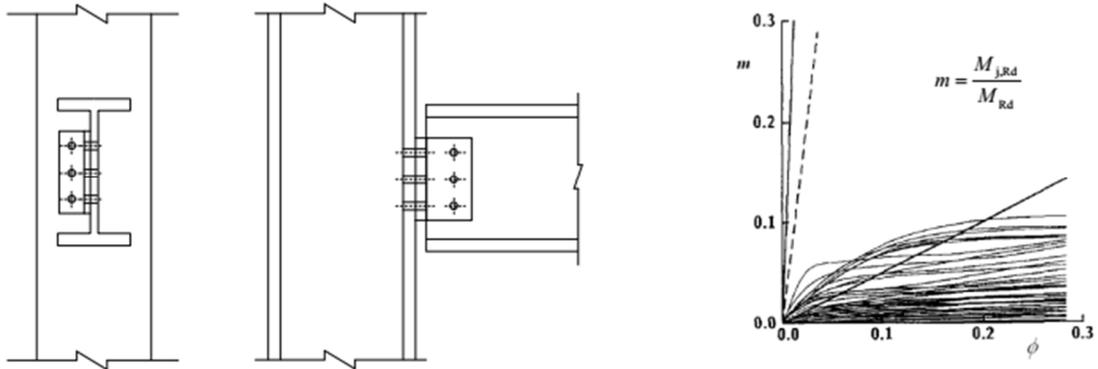
## **ANEXO B. CURVAS MOMENTO – ROTACIÓN PARA DIVERSAS UNIONES**

Como se ha visto en el apartado 3 de la memoria, uno de los trabajos que aquí se usan como referencia es el de Chen (2000) para obtener gráficas momento-rotación aproximadas que permiten aproximar el comportamiento de una unión basándose en experimentos y datos empíricos. También como referencia está el trabajo de Kishi et al (1997) para una gran cantidad de uniones y experimentos que arrojan muchas gráficas a partir de las cuales, dependiendo de la disposición constructiva elegida, nos permiten considerar las uniones más aproximadas a comportamiento rígido, articulado, o semirrígido. Por último, se tienen también en cuenta las consideraciones establecidas por el AISC (American Institute of Steel Construction)

### **B.1. UNIÓN CON ANGULAR O CHAPA SIMPLE AL ALMA DE LA VIGA**

La unión entre viga y pilar se realiza a través de un único angular atornillado o soldado, o una chapa simple en vez de un angular. Según el dibujo y la respectiva gráfica, puede verse directamente que la rigidez que ofrece es pequeña con lo cual se han considerado tradicionalmente articuladas. Los resultados obtenidos por Kishi y et al (1997), mostrados en la gráfica, muestran que, en un gran número de ocasiones, nos encontramos inicialmente en la zona semirrígida, pero conforme aumenta el giro entramos en la zona articulada. De esta forma inicialmente deberíamos considerar su comportamiento semirrígido, pero cuando se aumenten las cargas pasaríamos a considerarlo articulado.

Su máxima capacidad resistente al momento flector está en torno a  $0.1M_{Rd}$ , más bajo que el  $0.25M_{Rd}$  que el EC3 establece como límite, con lo cual la unión se puede considerar articulada.

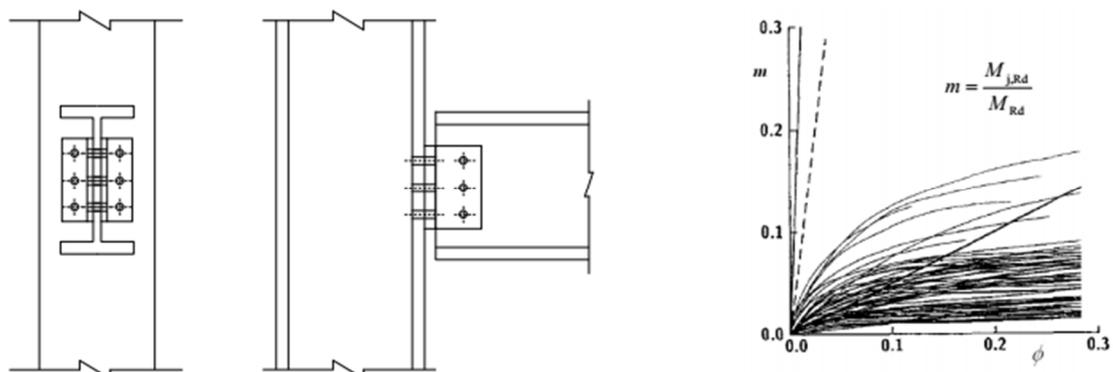


*Unión con angular al alma de la viga*

**B.2. UNION CON DOS ANGULARES AL ALMA DE LA VIGA**

La disposición constructiva es similar al caso anterior, pero en este hay un angular por cada lado del alma de la viga, bien soldado, bien atornillado. Parece bastante lógico que la rigidez en este caso va a ser el doble que en el anterior, pero viendo la gráfica se comprueba que en la mayoría de los casos esta unión sigue estando en la zona articulada. De aquí podemos deducir que cualquiera de estas dos opciones no nos va a servir para estudiar en profundidad el comportamiento semirrígido. Además, el AISC considera también este tipo de unión como articulada.

Su máxima capacidad resistente al momento flector está en torno a  $0.2M_{Rd}$  pero sigue por debajo del límite establecido en el EC3.

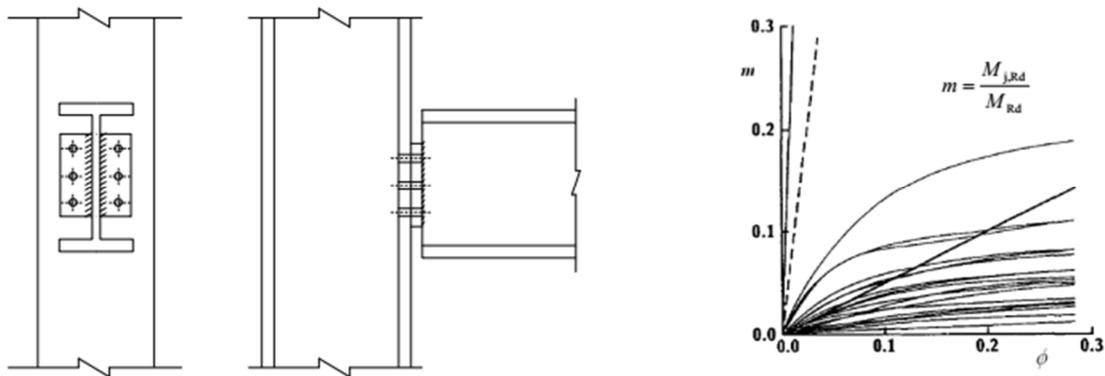


*Unión con dos angulares al alma de la viga*

### B.3. UNIÓN CON CHAPA DE TESTA PARCIAL

En este caso, la chapa de testa ha de ir obligatoriamente soldada al canto de la viga, pero sin ocupar en su totalidad dicho canto, no llega ni siquiera a las alas.

Pese a que su rigidez es muy similar al caso de la unión con dos angulares al alma, se encuentran las primeras discrepancias entre el AISC, que la considera semirrígida, y los datos de Kishi y el EC3, ya que al ser el momento resistente menor al límite de  $0.25 M_{Rd}$  y la capacidad rotacional es muy elevada, nos encontramos en la zona articulada de las gráficas. Esta unión se suele considerar para transmitir esfuerzos cortantes, pero no para transmitir flectores.



*Unión con chapa de testa parcial*

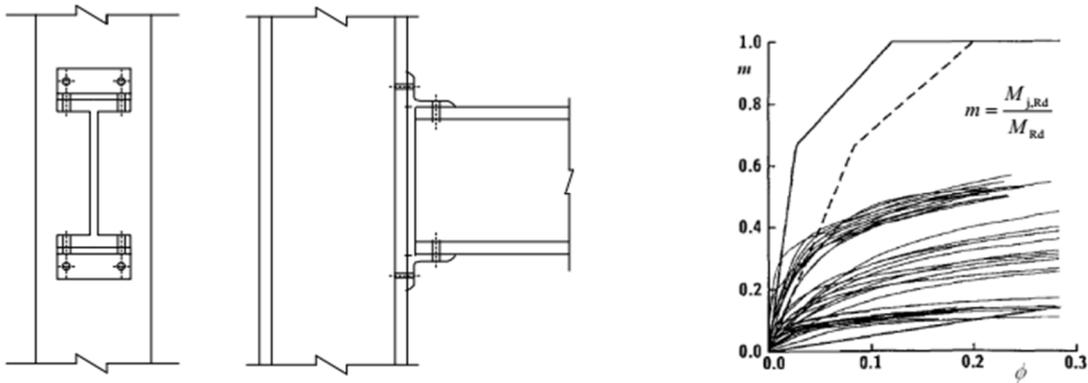
### B.4. UNIÓN CON ANGULARES A LAS ALAS DE LAS VIGAS

Se une el ala superior con un angular y el ala inferior con otro angular a la columna, ya sea atornillando o soldando a las alas. Al angular inferior se le denomina angular de asiento.

A priori, la unión visualmente parece más robusta, ya que los angulares impiden el movimiento de las alas, con lo cual el momento debería transmitirse en mayor medida que en los casos anteriores, produciéndose la deformación de los angulares en casos de grandes cargas. Sin embargo, el AISC considera igualmente estas uniones como articuladas, pues considera que el angular de asiento sirve para transmitir el esfuerzo cortante, mientras que la función del superior no es resistiva ni de transmisión de esfuerzos, sino que estabiliza lateralmente el conjunto.

Por otra parte, los modelos de Kishi demuestran que en muchos casos la zona de la gráfica corresponde al comportamiento semirrígido, oscilando el momento entre  $0.1 M_{Rd}$  y  $0.5m_{Rd}$  aproximadamente, de forma que en los primeros momentos de carga la unión podría considerarse rígida, pero conforme aumenta el

comportamiento es semirrígido, por tanto es bastante arriesgado considerar esta tipología como articulada.

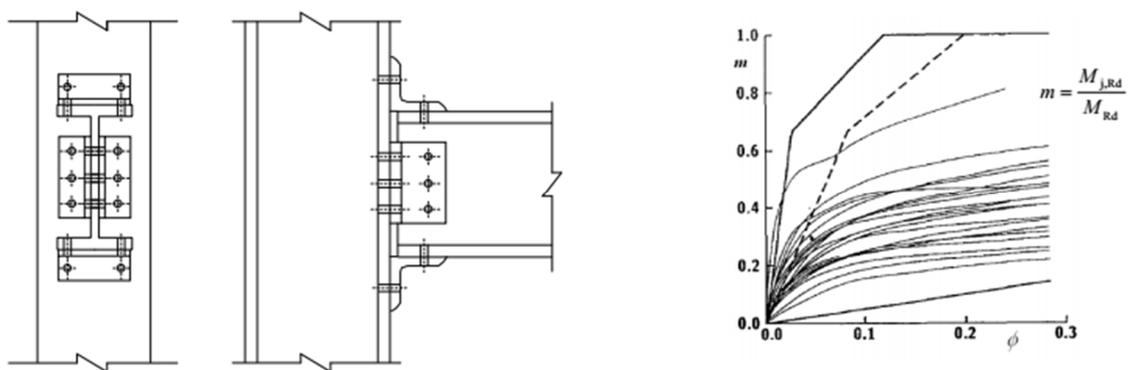


*Unión con angulares a las alas de la viga*

**B.5. UNIÓN CON ANGULARES A LAS ALAS Y ALMA DE LA VIGA**

Es una combinación de las uniones con angulares a las alas y las uniones con angulares al alma de la viga. Además de aportar un notable aumento de la rigidez, al combinar estos dos tipos se pretende que la transmisión del esfuerzo cortante se realice mejor.

Gráficamente, el momento transmitido se ve que ya varía entre  $0.2M_{Rd}$  y  $0.8M_{Rd}$  aproximadamente, de forma que, en la práctica totalidad de los casos, el comportamiento es sin duda semirrígido. Incluso dependiendo de cómo se realice físicamente esta disposición constructiva, algunos casos tendrán comportamiento mixto rígido-semirrígido.

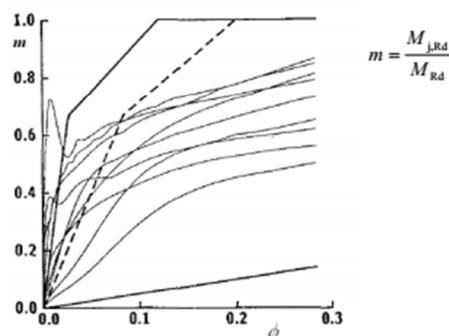
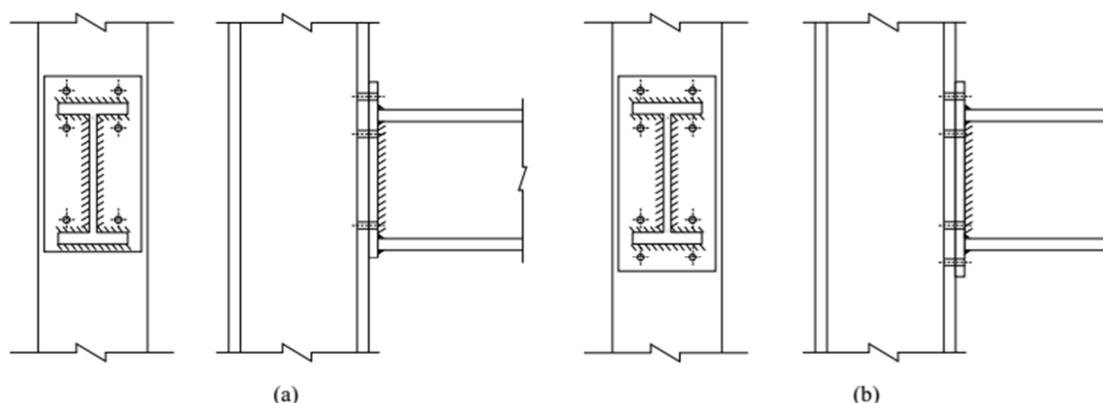


*Unión con angulares a las alas y alma de la viga*

### B.6. UNIÓN CON CHAPA DE TESTA EXTENDIDA

La chapa de testa extendida, igual que en la parcial, es una chapa que obligatoriamente va soldada a la viga, pero en este caso abarca también hasta las alas de la viga y se extiende más allá de ellas, de forma que se puede atornillar a la columna tanto en la zona del alma de la viga, como por la parte superior e inferior de las alas. Se puede dividir en dos casos, uno que es la chapa de testa extendida únicamente en la zona de tracción, y otra extendida en ambos lados. Como se indica en la memoria, el caso para el estudio elegido es la chapa de testa extendida en la zona de tracción (superior) debido a que hay una única hipótesis de carga y la parte superior de la viga va a ser siempre la zona de tracción. Sin embargo, hay situaciones en que la zona de tracción y compresión no se mantiene estable en el tiempo, sino que puede intercambiarse, como puede suceder en caso de sismo en el que se invierten los esfuerzos. Para este caso se utiliza la chapa de testa extendida en ambos lados, aunque no ha de ser necesariamente por esa razón, sino que por simplicidad y homogeneidad constructiva se puede decidir realizar así, ya que combina la sencillez de soldadura en taller y de montaje en obra. Es por ello que lleva usándose muy extendidamente desde hace años.

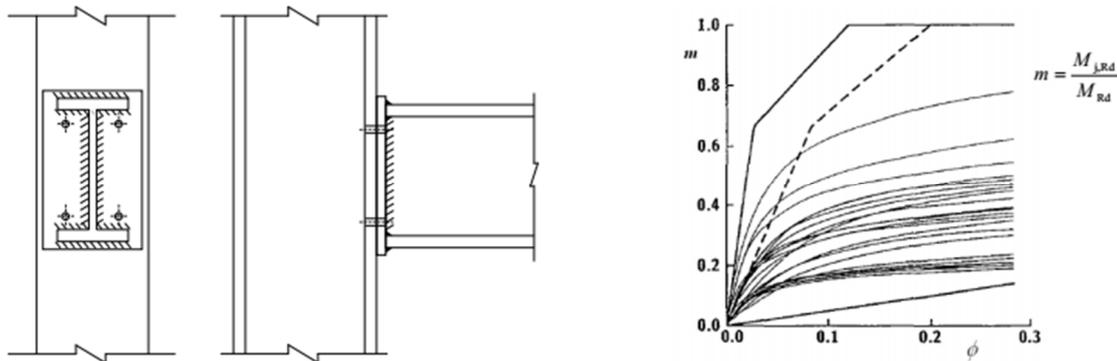
Es la unión con más rigidez de todas las estudiadas por Kishi. ya que inicialmente tiene mucha rigidez, y al aumentar la carga la capacidad rotacional es considerable sin llegar a bajar en exceso dicha rigidez, es por ello que esta tipología debería ser siempre considerada como semirrígida a efectos prácticos.



Uniones con chapa de testa extendida

### B.7. UNIÓN CON CHAPA DE TESTA ENRASADA

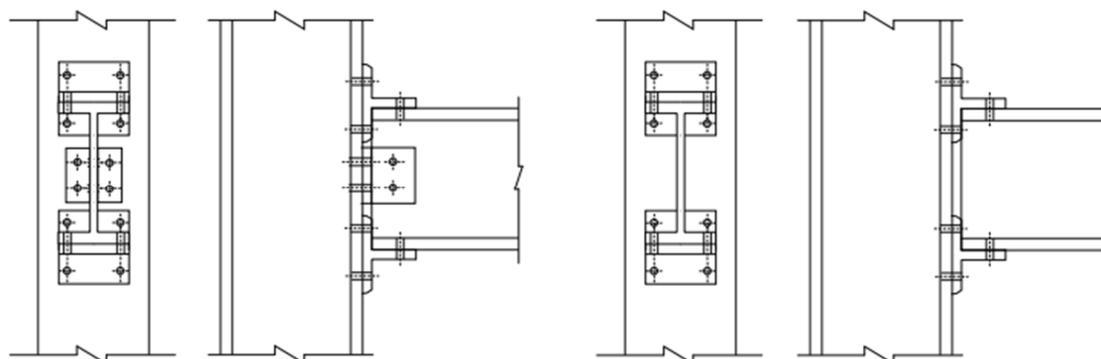
Similar al caso anterior, pero la chapa de testa no sobresale de la viga ni por la zona de tracción ni por la de compresión, sino que muere en las alas de la viga. La rigidez evidentemente es menor que para la chapa de testa extendida, pero la capacidad resistente se encuentra entre  $0.2$  y  $0.8M_{Rd}$  por lo que se pueden clasificar como semirrígidas.



*Unión con chapa de testa enrasada*

### B.8. UNIÓN CON PERFILES EN T

La disposición constructiva es de perfiles en T uniendo las alas de la viga a la columna, y angulares uniendo el alma de la viga a la columna. Presenta una ventaja importante respecto a la unión de las alas con angulares, y es que en este caso queda unida tanto la parte superior de las alas, como la parte interna donde está el alma, de forma que es uno de los casos más rígidos que podemos encontrarnos, y quizá el más válido para simplificarlo como unión completamente rígida.



*Unión con perfiles en T, con y sin angular en el alma*

## ANEXO C. MODELOS PREDICTIVOS DE LA CURVA MOMENTO ROTACIÓN

### C.1. MODELOS EMPÍRICOS

#### C.1.1. MODELO DE FRYE-MORRIS

Este modelo es de 1975 y se caracteriza porque representa la curva momento-rotación mediante un polinomio de potencias impares

K depende directamente de las propiedades geométricas y mecánicas de la unión, y las constantes sirven para realizar un ajuste de la curva. Inicialmente la formulación era la siguiente.

$$\phi = C_1 (KM) + C_2 (KM)^3 + C_3 (KM)^5$$

Siendo K un parámetro que varía en función de las propiedades geométricas y mecánicas, y  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  son constantes para ajustar la curva. El problema es que para este modelo predictivo, aparecen partes de la curva en que la pendiente es negativa. Un modelo más avanzado por Azizinamini (1985) solucionó este problema formulando de la siguiente manera:

$$K = P_1^{\alpha_1} P_2^{\alpha_2} \dots$$

Siendo P un parámetro geométrico de la unión y  $\alpha$  coeficientes obtenidos a través del ajuste de la curva. Ha sido utilizado por otros grupos de investigadores (Govherdan, 1983), y se ha aplicado a diferentes tipologías de uniones.

#### C.1.2. MODELO DE KRIHNAMURTHY

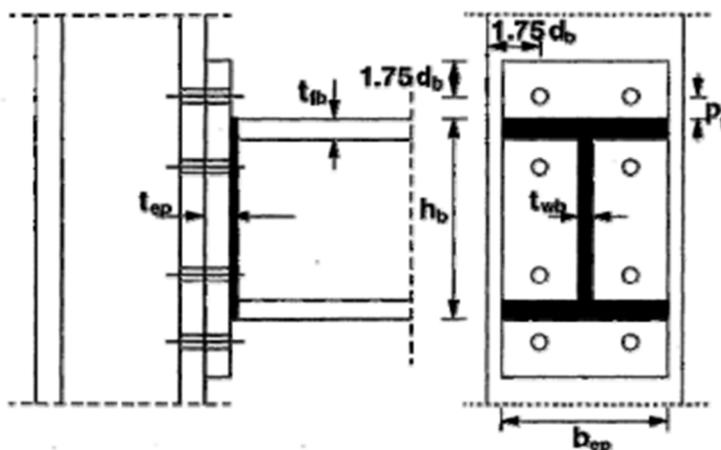
Esta metodología se desarrolló con programas de ordenador y modelos específicamente para uniones atornilladas con chapa de testa con elementos

finitos. Experimentalmente sólo se realizaron ensayos para ajustar algunos parámetros del modelo de ordenador y verificar los resultados numéricos.

El modelo numérico consideraba tensión plana en plano paralelo al alma de la viga, y posteriormente se amplió el estudio para uniones con chapa de testa extendida con cuatro tornillos en la zona de tracción, obteniendo la siguiente ecuación empírica:

$$\phi = CM^\alpha$$

Pero esta formulación es compleja, ya que las constantes de ajuste de la curva dependen de muchísimos factores como los coeficientes de pandeo de la viga, distancia entre tornillos, módulo resistente de la viga, diferentes características geométricas... El problema en este caso viene, además, debido a que en el modelo no se tuvo en cuenta la geometría de la viga, por lo que la curva momento rotación no hace referencia a la unión entera, sino simplemente a la conexión de elementos entre sí.

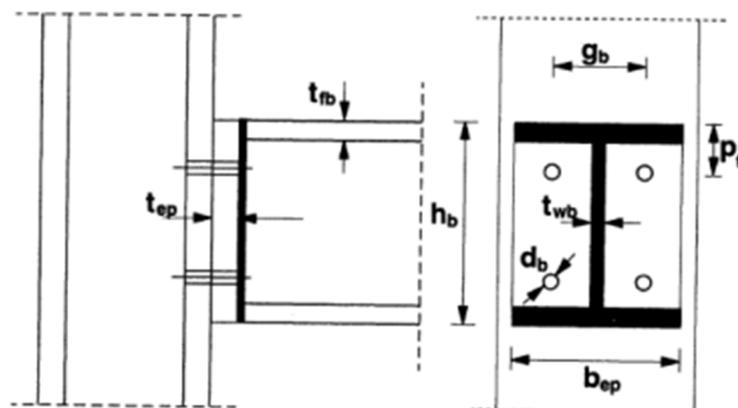


### C.1.3. MODELO DE KUKRETI

Continua con el desarrollo del anterior modelo, pero en este caso se estudiaron los casos de chapa de testa enrasada (y sin rigidizar). También mediante elementos finitos, aparece la misma expresión empírica que en el caso anterior. Más adelante, se extendió este modelo para contemplar también las uniones con chapa de testa extendida, sin rigidizar y con ocho tornillos (en la zona de tracción).

Los modelos empíricos basados en representaciones potenciales de la curva momento-rotación resultan bastante adecuados para predecir el comportamiento

rotacional de la unión inicialmente, pero se desvían del comportamiento real a medida que aumentan las deformaciones plásticas.



#### C.1.4. MODELO DE ATTIOGBE Y MORRIS

Este modelo se centra en las uniones con doble angular al alma, a través de un modelo basado en los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio para predecir el comportamiento rotacional. Se tienen en cuenta cuatro parámetros ( $\varphi_0$ ,  $M_0$ ,  $n$ ,  $K_{\varphi,p}$ ) todos ellos relacionados con propiedades geométricas de la unión: espesor de los angulares, distancia horizontal entre tornillos, longitud del angular, canto de la viga y número de tornillos por angular en el ala de la columna.

#### C.1.5. MODELO DE FAELLA, PILUSO Y RIZZANO

Faella et al (1997) usaron una aproximación que se utiliza en este trabajo como referencia en uniones con chapa de testa extendida. Se basa en un modelo mecánico estudiado a través del método de los componentes del EC3, siendo una ventaja el tener un modelo mecánico que evita el tiempo de cálculo de los métodos numéricos o el coste de los modelos experimentales. Con este modelo se analizaron más de 100.000 casos de uniones viga-columna.

### C.2. MODELOS ANALÍTICOS

#### C.2.1. MODELOS DE CHEN

Las uniones estudiadas son ejecutadas con angulares aplicando la teoría de análisis de estructuras, ya sea mediante doble angular de ala o doble angular de alma. Posteriormente a este estudio, otros investigadores (Kishi et al. 1993) generaron una serie de ábacos adimensionales para la aplicación práctica de estos

modelos, introduciendo su uso en un procedimiento de diseño y análisis avanzado de uniones semirrígidas. Al igual que ocurría con los modelos de Krishnamurthy, no se contempla la deformación generada en la columna, ya que asumimos que las uniones se realizan sobre un soporte rígido.

### **C.2.2. MODELO DE YEE Y MELCHERS**

Este estudio es para uniones con chapa de testa extendida teniendo en cuenta las deformaciones generadas en la columna, independientemente de su rigidez. Son modelos muy completos porque tienen en cuenta las deformaciones de todos los elementos de la unión: deformación a flexión de la chapa de testa, del ala de la columna, alargamiento de los tornillos, por cortante del alma de la columna y por compresión del alma de la columna.

Igualmente, considera que la estructura puede colapsar por rotura a tracción de los tornillos, plastificación de la chapa de testa, de la zona de tracción del ala de la columna, del alma de la columna, aplastamiento o pandeo del alma de la columna.

La rigidez rotacional de la unión viene haciendo una combinación de los desplazamientos y las deformaciones. Mientras el momento último resistente viene por la resistencia del componente más débil de la unión. Esto es el paso previo al método de los componentes del EC3 que se explica en el siguiente anexo.

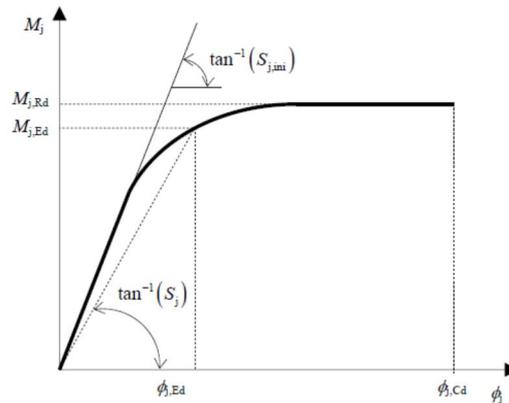
## ANEXO D. MÉTODO DE LOS COMPONENTES SEGÚN EUROCÓDIGO 3

### D.1. INTRODUCCIÓN

Uno de los modelos más utilizados para predecir la curva momento-rotación de una unión es el método recogido en la norma europea Eurocódigo 3, EC3-1-8:2005). Es un método mecánico-analítico (estudiado por Yee y Melchers, y Faella) que divide la unión en una serie de muelles, que son los componentes, y cada uno tiene su propia resistencia y rigidez, pudiéndose predecir el comportamiento de la unión si conocemos las características mecánicas y geométricas de todos estos componentes. Este método sirve para analizar uniones viga columna como la del presente trabajo, pero para cualquier caso, hay que seguir los siguientes pasos para poder aplicar el método de los componentes:

- Elegir el tipo de unión, nuestro caso sería viga-columna
- Definir geometría de la unión
- Definir los componentes de la unión
- Determinar las fuerzas de la unión
- Calcular las soldaduras
- Determinar la resistencia y rigidez de los componentes.
- Calcular la resistencia equivalente  $M_{j,Rd}$  y rigidez inicial de la unión  $S_{j,ini}$  mediante el ensamblaje de la unión. Dicha resistencia se considera la del eslabón de la cadena con menor resistencia.
- Determinar la capacidad de deformación de cada componente, a partir de lo cual se obtiene la ductilidad de la unión.
- Comprobar las soldaduras con los esfuerzos generados.

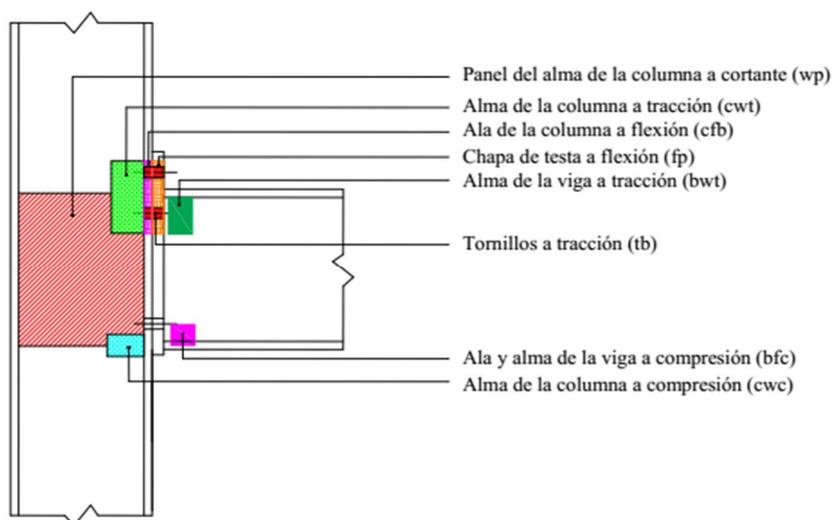
Obtenidos los momentos, rigidez inicial y capacidad de rotación, se obtiene la curva momento-rotación, cuya gráfica es la siguiente:



*Curva momento rotación de una unión*

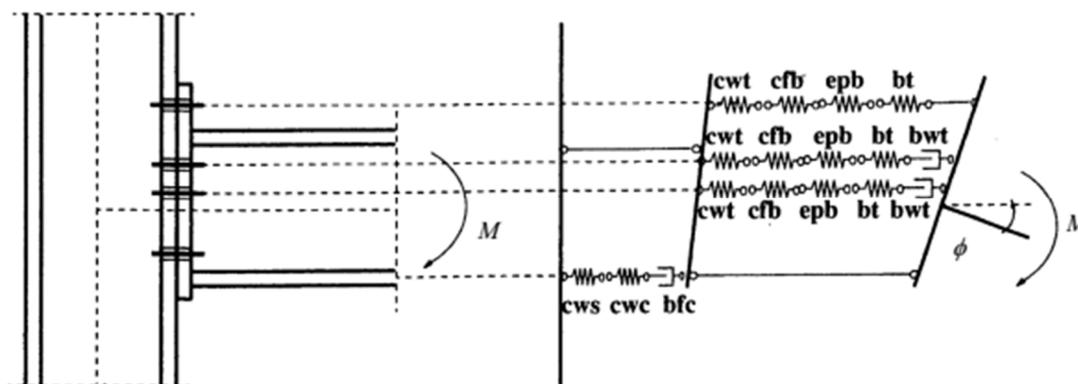
Para una unión viga-columna con chapa de testa extendida, el método de los componentes considera hasta 20 componentes básicos para modelizar la estructura, que son los siguientes:

1. En la zona de cortante
  - Componente 1: Panel del alma de la columna a cortante (wp).
2. En la zona de tracción
  - Componente 3: Alma de la columna a tracción (cwt).
  - Componente 4: Ala de la columna a flexión (cfb).
  - Componente 5: Chapa de testa a flexión (fp).
  - Componente 8: Alma de la viga a tracción (bwt).
  - Componente 10: Tornillos a tracción (tb).
3. En la zona de compresión
  - Componente 2: Alma de la columna a compresión (cwc).
  - Componente 7: Ala y alma de la viga a compresión (bfc).



*Componentes de la unión según EC3*

Cada uno de estos componentes tiene su propia resistencia y rigidez a tracción, compresión o cortadura. Los componentes 7 (ala y alma de la viga a compresión) y 8 (alma de la viga a tracción) solo se consideran en el cálculo de la resistencia, el resto de componentes se tienen en cuenta tanto en el cálculo de la resistencia como en el cálculo de la rigidez. Algunos de estos componentes dependen a su vez del número y localización de las filas de tornillos: ala de la columna a flexión, chapa de testa a flexión, tornillos a tracción, alma de la columna a tracción y alma de la viga a tracción. Estos componentes se analizan de forma independiente y como pertenecientes a un grupo de filas de tornillos (introduciendo las posibles interacciones con otras filas). En la figura a continuación se muestra el modelo mecánico de muelles equivalente de la unión. En esta figura se pueden distinguir los componentes pertenecientes a las filas de tornillos, y el resto, denominados *independientes*: alma de la columna a cortante, alma de la columna a compresión, ala y alma de la viga a compresión. La *conexión* está formada por los componentes: 2 (cwc), 3 (cwt), 4 (cfb), 5 (fp), 7 (bfc), 8 (bwt) y 10 (tb), y la *unión* es el conjunto formado por la conexión y el componente 1 (cws).

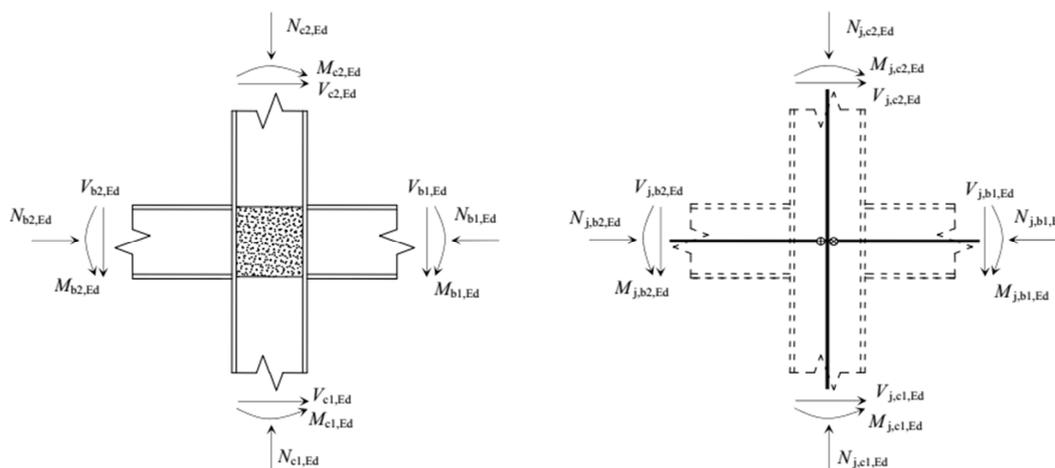


*Modelo de muelles (Faella et al., 2000) Los muelles son componentes elasto-plásticos, y los amortiguadores con rígido-plásticos*

## D.2. FUERZAS EN LA UNIÓN

La relación entre las propiedades de los componentes y de la unión está basada en la distribución de los esfuerzos internos. Para unas fuerzas externas, actuando en el nudo, la distribución de los esfuerzos entre los componentes debe de cumplir los siguientes requerimientos:

- Equilibrio entre esfuerzos internos y externos
- Cada componente debe resistir las fuerzas y momentos analizados
- Las deformaciones no han de superar la capacidad de formación de los componentes.



Fueras y momentos que pueden llegar a actuar en la unión

### D.3. RESISTENCIA Y RIGIDEZ DE LOS COMPONENTES

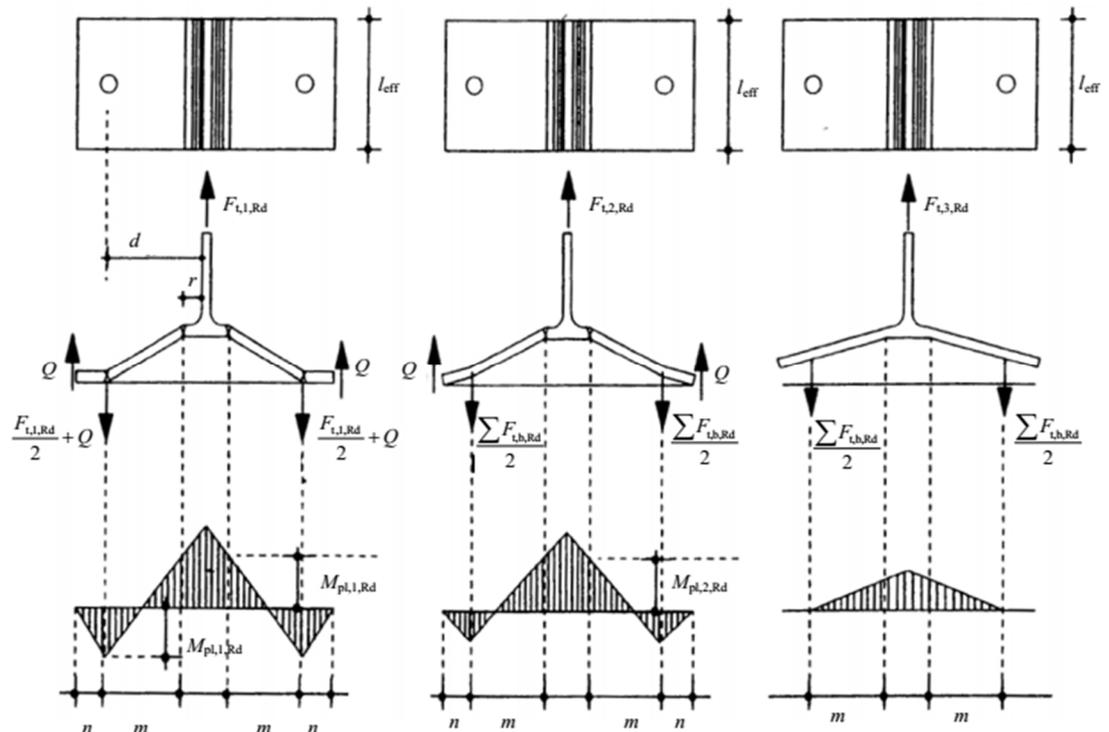
Una vez identificados los componentes de una unión se obtiene la resistencia y la rigidez de cada uno de ellos aplicando el procedimiento descrito en el EC3. Para la aplicación del método de los componentes se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Tanto la viga como la columna deben ser perfiles I o H.
2. La parte exterior de la chapa de testa extendida tiene sólo una fila de tornillos.
3. La unión viga-columna solamente tiene dos tornillos en cada fila.
4. Las uniones trabajan principalmente a flexión

Un punto que tiene muy en cuenta el método de los componentes son los diferentes modos de rotura que pueden aparecer:

- Modo de rotura formando un mecanismo flexible, donde se forman cuatro rótulas plásticas en las alas: dos ocasionadas por la flexión de los tornillos y otras dos en la unión entre el ala y el alma del perfil
- Modo de rotura semirrígido, formándose dos rótulas plásticas en las alas y la fractura de los tornillos. Se produce cuando los espesores del ala son mayores y las deformaciones por flexión de las alas y los alargamientos de los tornillos son similares en todos los que se consideran en la unión.
- Modo de rotura rígido, que se produce debido a la rotura a tracción de los tornillos, cuando el espesor del ala es muy grueso, pudiéndose considerar despreciable su deformación, de modo que los tornillos absorben todo el esfuerzo de tracción y acaban rompiéndose por ello.

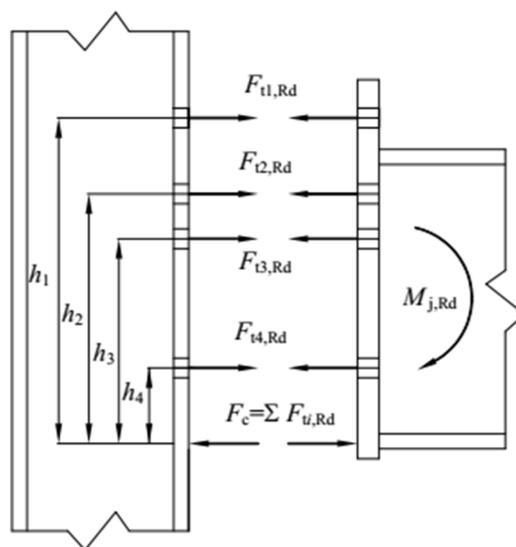
Los diferentes modos de rotura han sido estudiados por el EC3 y Faella:



Modos de rotura flexible, semirrígido y rígido (Faella et al., 2000)

Con este método se establece que cada componente tiene su propia rigidez y resistencia, pero hay que realizar un ensamblaje de la unión para obtener la resistencia de cálculo final de la unión a partir de las resistencias de componentes.

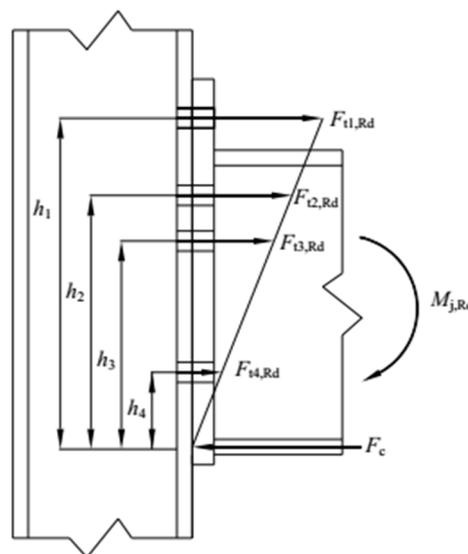
El comportamiento resistente de una unión se asimila al de una "cadena de eslabones", de manera que la resistencia está condicionada por la resistencia del eslabón (componente) más débil. Para una unión viga-columna con chapa de testa extendida, la resistencia o momento resistente de una unión se determina mediante:



Distribución de fuerzas en tornillos

Lo más crítico con las fuerzas en los tornillos, que dependen como se ha visto de los modos de rotura, y se puede dividir tal que así:

*Lineal.* Si la chapa de testa es suficientemente rígida, el modo de rotura en cada fila de tornillos se produce cuando se agotan los tornillos a tracción. Dado que la capacidad de deformación de los tornillos a tracción es limitada, la distribución de fuerzas internas entre las diferentes filas de tornillos es lineal respecto al centro de compresiones.



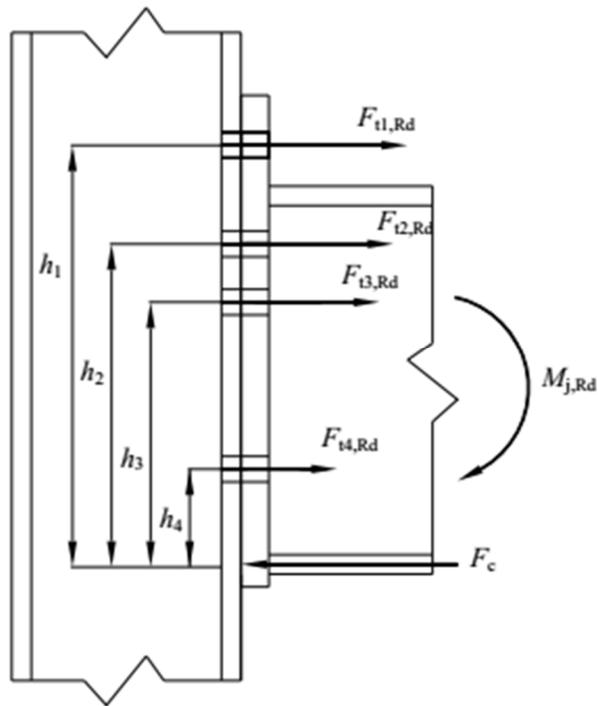
*Distribución lineal de la fuerza en tornillos traccionados*

*Plástica.* Si la chapa de testa es delgada, el modo de rotura es dúctil y puede producirse una redistribución de fuerzas entre las filas de tornillos, de modo que una vez que la fila superior alcanza su resistencia de cálculo, cualquier momento adicional en la unión es soportado por la segunda fila, hasta que ésta alcance su resistencia de cálculo, y sea la tercera fila la que soporte la carga adicional, y así sucesivamente. En este caso, la distribución se puede presentar de tres formas:

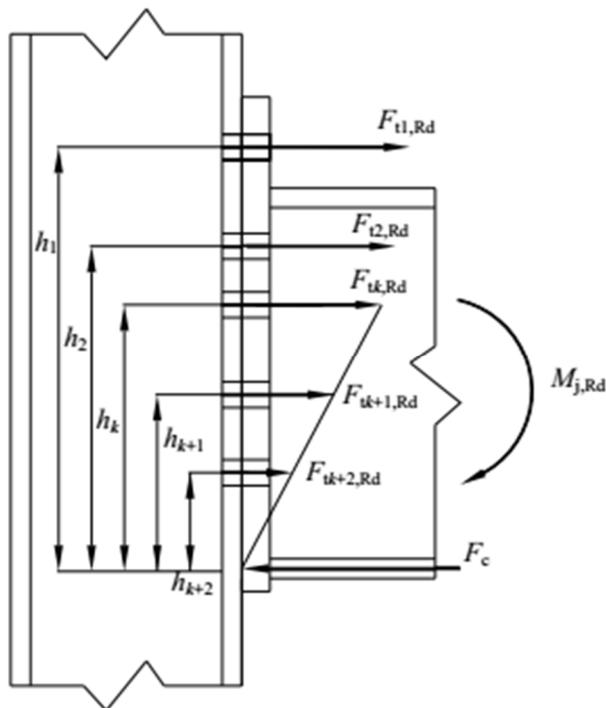
1. La redistribución plástica de las fuerzas se extiende a todas las filas de tornillos, si éstas tienen capacidad de deformación suficiente.

2. La redistribución plástica de las fuerzas se interrumpe debido a que la última fila que ha alcanzado su resistencia de cálculo (fila  $k$ ), no tiene capacidad de deformación suficiente para redistribuir los esfuerzos. En las filas de tornillos restantes (las situadas bajo la fila  $k$ ) las fuerzas se distribuyen linealmente respecto del centro de compresiones.

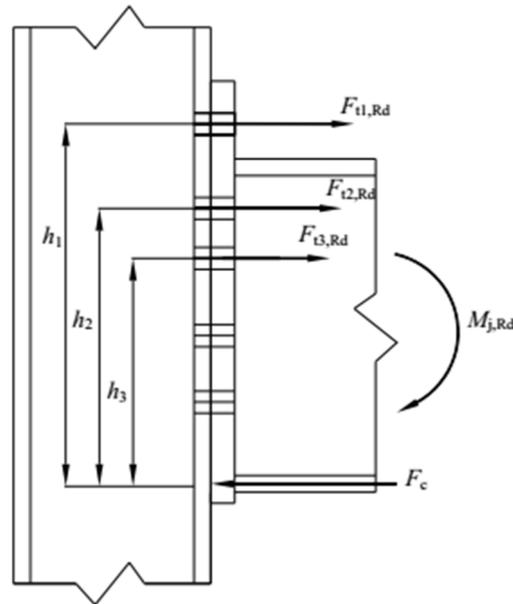
3. La redistribución plástica de las fuerzas se interrumpe porque se agota algunos de los componentes independientes: alma de la columna a cortante, alma de la columna a compresión o ala y alma de la viga en compresión.



*Distribución plástica de las fuerzas en los tornillos caso 1*



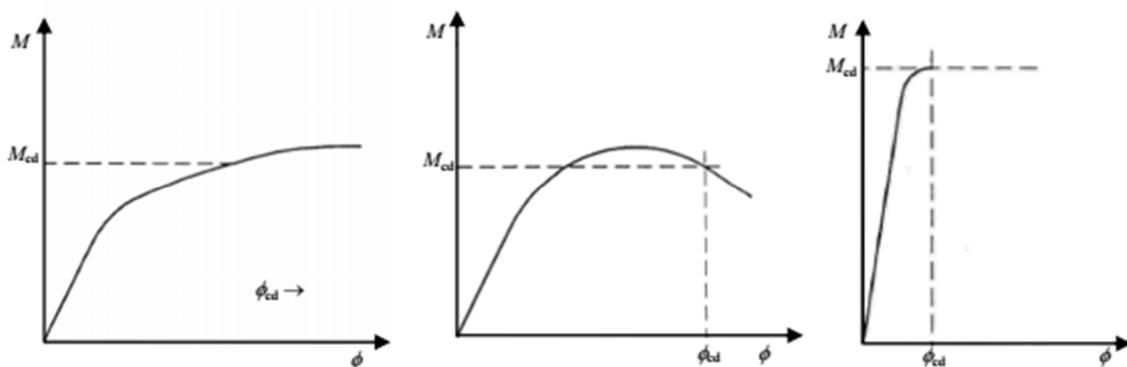
*Distribución plástica de las fuerzas en tornillos caso 2*



*Distribución plástica de las fuerzas en tornillos caso 3*

A partir de las rigideces de los componentes se debe establecer una rigidez secante al giro realizando el ensamblaje de las rigideces de los diferentes componentes. La capacidad rotacional tras el ensamblaje para uniones atornilladas según EC3 será suficiente en caso de plastificación dependiendo de la resistencia de diseño de los tornillos. Kuhlmann y Kühnemund (2000) distinguen entre uniones con ductilidad elevada, limitada y frágil, según el modo de fallo:

- Elevada, si el componente que limita la resistencia es el panel del alma de la columna a cortante, el ala de la columna a flexión, la chapa de testa a flexión, o el ala del angular a flexión.
- Limitada, si el componente que limita la resistencia es el alma de la columna a compresión o el ala y el alma de la viga a compresión
- Frágil, si el componente que limita la resistencia son los tornillos a tracción.



*Curva momento-rotación para ductilidad elevada, limitada o frágil*

El último paso sería el cálculo de soldaduras según método simplificado o el método direccional, ambos propuestos en el EC3.

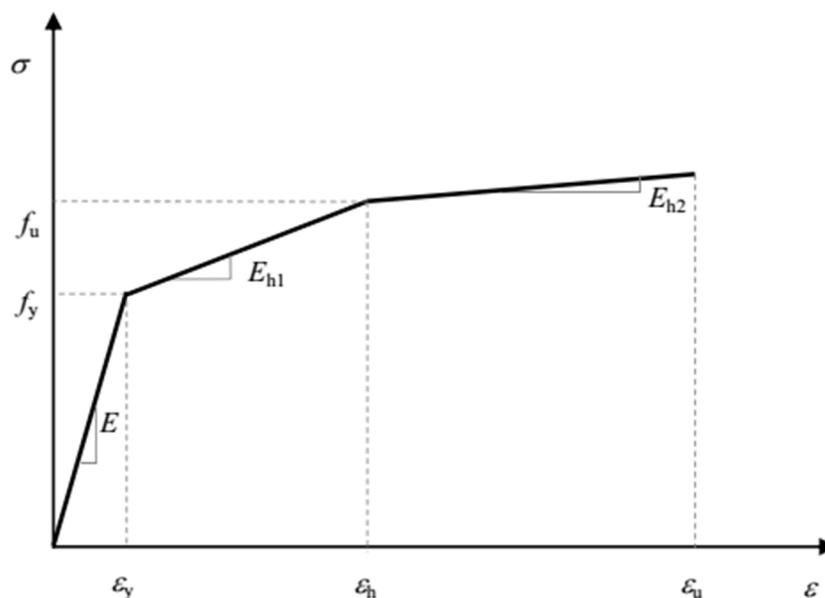
En general, el método de los componentes es complejo ya que tienen influencia muchos parámetros y el cálculo puede hacerse muy farragoso, es por ello que en este caso se seleccionan casos de cálculo cuyos resultados ya han sido previamente obtenidos por otros autores (Faella,...).

## ANEXO F. EXPERIMENTO T101.010 CON MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Para elaborar el modelo mediante elementos finitos, hay que describir previamente las curvas tensión-deformación para definir los distintos materiales, los tipos de elementos, las condiciones de contorno, las zonas de contacto entre componentes, la carga aplicada y los parámetros de análisis necesarios para su resolución.

### F.1. CURVAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE LOS MATERIALES

Para definir las características de los materiales se utilizan las curvas elástico-lineal y trilineal, y el criterio de plastificación de von mises acoplado con endurecimiento isotrópico, para obtener resultados los más homogéneos posibles.



Según la aproximación trilineal de la anterior curva quedan definidos los materiales de la viga, columna, chapa de testa, soldaduras y tornillos. El primer tramo es elástico con una pendiente  $E$ , un segundo tramo de endurecimiento isotrópico (cuando comenzaría a plastificar) con pendiente  $E/50$  (así lo indica el modelo experimental<sup>9</sup>, y una pendiente muy horizontal de  $E/500$  en el tercer tramo para que haya convergencia.

Las propiedades de los materiales vienen dadas por el Eurocódigo 3, siendo el módulo de elasticidad  $E=210000$  MPa, el coeficiente de Poisson  $\nu=0.3$  y el módulo de elasticidad transversal  $G=80769.23$  MPa.

## F.2. TIPOS DE ELEMENTOS FINITOS

Hay 4 factores a definir para elegir el tipo de elemento finito del modelo.

Por una parte, elección de elementos 2D o 3D. Los elementos 2D permiten un mallado más sencillo y un tiempo de cálculo inferior, sin embargo cuando utilizamos elementos 3D se pueden interpretar mejor fenómenos como la formación de rótulas plásticas, contactos...

El orden de interpolación puede ser de primer o segundo orden. Referencias de autores como Gantes y Lemonis, 2003 exponen que para problemas donde se quiere conseguir un alto grado de precisión, se recomienda el uso de elementos de segundo orden, mientras que cuando aparecen problemas de plasticidad donde se tienen que reproducir diferentes discontinuidades, es más adecuado elegir elementos de primer orden.

Los elementos además pueden ser tetraédricos o hexaédricos, el primer caso más adecuado para formas geométricas complejas con resultados fiables para mallas muy finas, el segundo caso recomendado cuando pueden surgir problemas de convergencia.

El orden de integración (reducida o completa) está relacionado con dos problemas asociados al análisis mediante elementos finitos: el bloqueo por cortante (*shear locking*) y el fenómeno de *hourglassing*. Los elementos sólidos lineales con integración completa pueden sobrestimar la rigidez de la estructura en problemas donde domina la flexión, y por tanto, los resultados pueden ser erróneos. Este problema numérico se denomina bloqueo por cortante. Para solucionar este inconveniente se han propuesto diferentes estrategias:

1.- *Funciones de forma auxiliares incompatibles (extra shape functions)*: introducidas por Wilson et al. (1973) y posteriormente revisadas por Taylor et al. (1976), consiguen eliminar las tensiones de cortante parásitas que provocan el aumento de la rigidez en la estructura. Las funciones auxiliares introducen

incompatibilidad (modos incompatibles), pero aseguran un comportamiento correcto a flexión (Zienkiewicz y Taylor, 2004). Al añadirse grados de libertad internos, resultan un poco más costosos que los elementos regulares de primer orden. A pesar de ello, siguen siendo más económicos que los correspondientes de segundo orden. Al emplear integración completa, no adolecen del efecto *hourglassing*.

2.- *Modos internos*: una forma de incrementar la flexibilidad del elemento consiste en añadir a la interpolación original modos de deformación internos que se anulan en sus contornos; el modo más sencillo es una función "burbuja" asociada a un nodo central (Oñate, 1995).

3.- *Integración reducida uniforme (uniform reduced integration)*: Para abordar el problema del bloqueo por cortante, y a su vez incrementar la eficacia computacional se propone una integración reducida. Por ejemplo, para un elemento sólido de primer orden con ocho nodos, al aplicar integración reducida se pasa de ocho a un único punto de integración, y para un elemento de veinte nodos se tiene ocho puntos de integración frente a los veintisiete que corresponden con la integración completa. Además, la integración reducida es flexible con las distorsiones producidas en el mallado. En análisis no lineales la utilización de elementos de primer orden con integración reducida tiene ventajas, pero a su vez también una serie de inconvenientes: el análisis no resulta tan preciso y no captura la flexión con una única fila de elementos. Sin embargo, los elementos de primer orden con integración reducida pueden producir una nueva dificultad numérica, denominada *hourglassing*, que hace que el elemento tienda a ser excesivamente flexible.

En este trabajo se utiliza un elemento 3D de primer orden con ocho nodos (3 grados de libertad por nodo) e integración completa con funciones de forma auxiliares incompatibles, donde predominan los elementos hexaédricos. Este elemento permite simular correctamente fenómenos no lineales (contacto, grandes deformaciones y desplazamientos, etc).

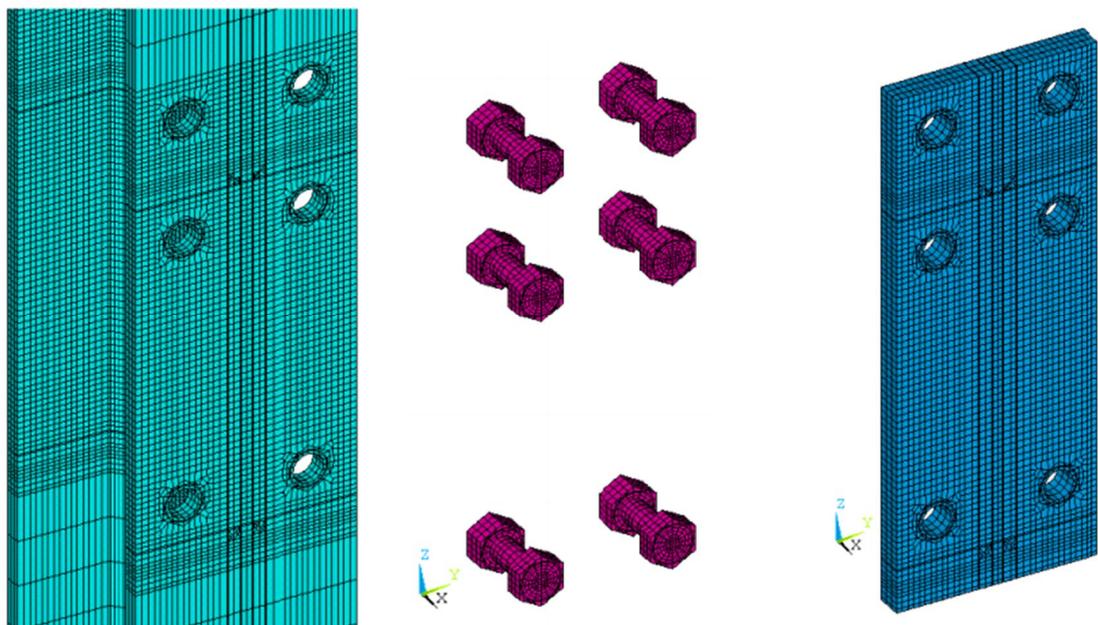
### F.3. DISCRETIZACIÓN

Bursi y Jaspar (1998) estudiaron el efecto de la discretización en el modelo numérico utilizando elementos hexaédricos de ocho nodos. Para ello realizaron diferentes modelos en los que el comportamiento predominante era la flexión: una viga biempotrada y otra simplemente apoyada. El elemento estudiado era lineal de ocho nodos con integración reducida (JEX-3D). Las condiciones de contorno corresponden a un problema de deformación plana. Para una longitud de la viga de seiscientos milímetros, ésta fue discretizada con veinticuatro elementos, mientras que el canto se discretizó con uno, dos, tres, cinco, y ocho elementos. Observaron

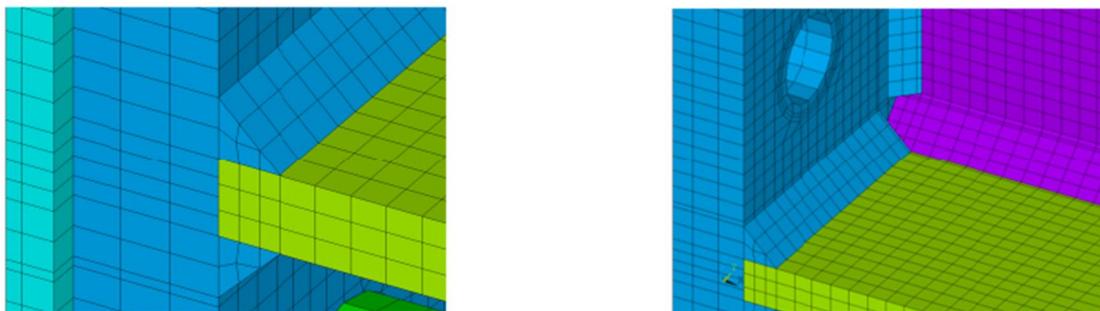
que una única capa de elementos en el canto aportaba resultados insatisfactorios; con dos capas los resultados eran satisfactorios en el régimen elástico, pero no adecuados en régimen plástico. A partir de dos capas de elementos los resultados eran excelentes, incluso para grandes desplazamientos. Concluyeron que, para el caso de problemas dominados por la flexión, se necesitan al menos tres capas de elementos para reproducir con un buen nivel de precisión el comportamiento de la sección, aunque con dos capas de elementos se pueden realizar análisis de tipo elástico. Cabrero (2006) realizó un análisis complementario al trabajo de Bursi y Jaspas (1998) utilizando elementos lineales de 8 nodos con modos incompatibles (C3D8I, incluido en ABAQUS). Los resultados obtenidos confirmaron los obtenidos por Bursi y Jaspas (1998), demostrando que con tres capas de elementos se captura mejor el comportamiento de la sección y la distribución de tensiones.

Asimismo, para introducir los tornillos pretensados hay una opción específica dentro de ABAQUS para darle la pretensión necesaria y simular el apriete. Aquí se modelizan los tornillos como elementos sólidos de 8 nodos, pero sin modelar las arandelas para que el coste computacional y el número de planos de contacto sean menores.

Debido a esta necesidad de utilizar tres capas de mallado, como se indica en la memoria, las zonas donde interesa conocer bien el comportamiento tras el proceso de carga tienen una malla fina, hay una malla grosera en puntos alejados donde no es relevante el estudio del análisis, y malla intermedia para conectar ambos tipos.



*Detalles del modelo: columna, tornillos y chapas de testa*



*Detalles de las soldaduras en ala superior e inferior*

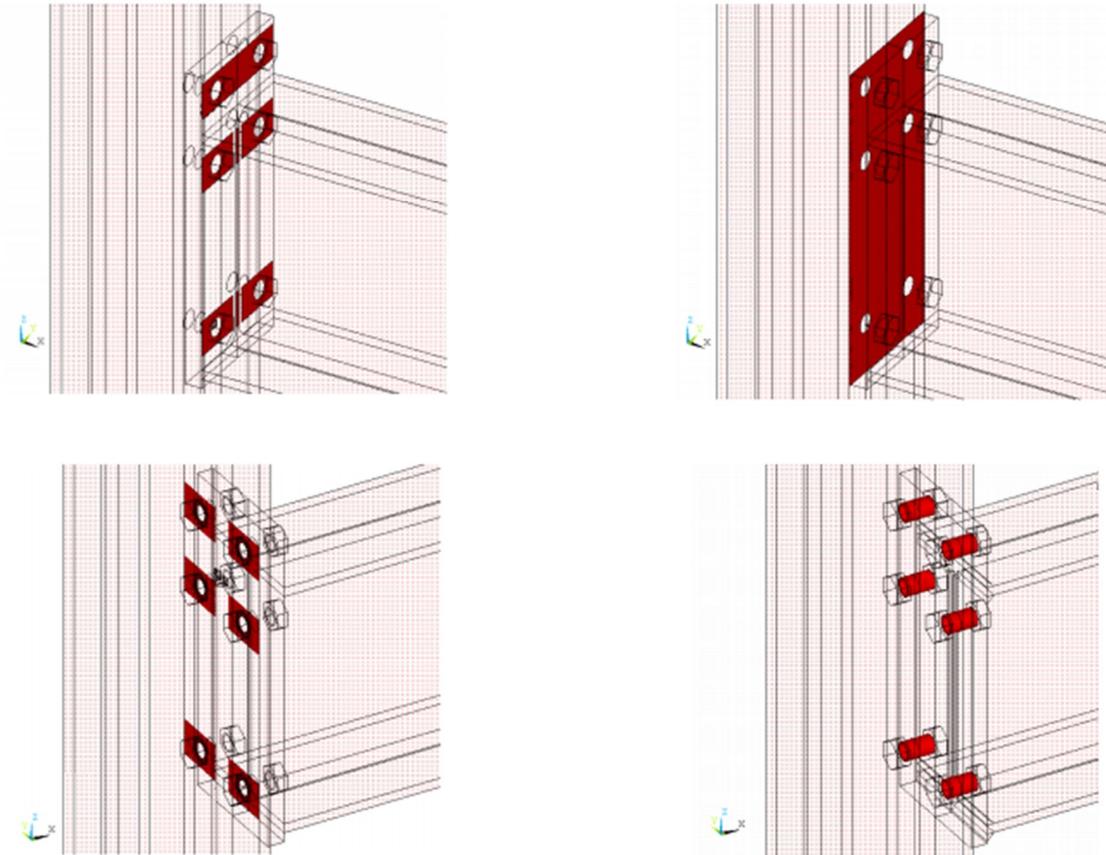
#### F.4. CONTACTO ENTRE SUPERFICIES

La formulación del contacto es un aspecto complicado dentro del modelo numérico de una unión, presentando varios inconvenientes. Al comienzo del análisis se desconoce las superficies que van a conectar entre sí. Dependiendo del tipo de material, cargas, y otros factores, las superficies pueden entrar y salir del contacto de una forma desconocida e inesperada, lo que introduce un alto grado de no linealidad en el problema. El contacto requiere tener en cuenta el rozamiento o fricción, que depende de la trayectoria seguida y requiere un historial de cargas preciso y un tamaño de paso de carga pequeño. ABAQUS permite elegir diferentes tipos de leyes y modelos de fricción, siendo todos no lineales. Un modelo inadecuado puede suponer una respuesta caótica, dando lugar a problemas de convergencia, y dispone de cuatro tipos de modelos para la formulación del contacto: nodo-nodo, línea-línea, nodo-superficie y superficie-superficie. El tipo de contacto superficie-superficie es el más adecuado para modelos de uniones atornilladas, permite la utilización de elementos de bajo y alto orden de interpolación en la zona de contacto, además las superficies que intervienen pueden tener mallas diferentes y no es preciso conocer la localización del contacto inicialmente. Este tipo de contacto es el adecuado para problemas con grandes deformaciones y rotaciones. En este trabajo se escoge el contacto superficie-superficie, ya que es el que mejor se ajusta a las características del problema.

Como se ha indicado previamente, hay cuatro zonas de contacto diferenciadas:

- Chapa testa y cabeza de tornillos
- Alma de la columna y chapa de testa
- Ala de columna y tuerca de tornillos.
- Vástago de tornillos y taladros de chapa testa y ala de la columna

En la siguiente imagen se han indicado estas cuatro zonas para que no haya dudas de los contactos generados.



## F.5. COEFICIENTE DE ROZAMIENTO

En las superficies de contacto donde se transmiten presiones normales y cortantes, el modelo utilizado para relacionar ambos es el modelo clásico de fricción de Coulomb. Cuando dos superficies entran en contacto se pueden transmitir tensiones debidas al cortante, a través de la interfase que las separa, hasta alcanzar un valor a partir del cual comenzarán a deslizarse. Este estado es conocido como adhesión. El valor del coeficiente de rozamiento depende del estado de las superficies de contacto:

Clase A: Coeficiente 0.5. Superficies granalladas SA 2 ½ o con chorro de arena, sin picaduras y sin tratar si la unión se lleva a cabo inmediatamente después del chorreado, o tratado térmicamente con aluminio si se va a tardar en realizar la unión.

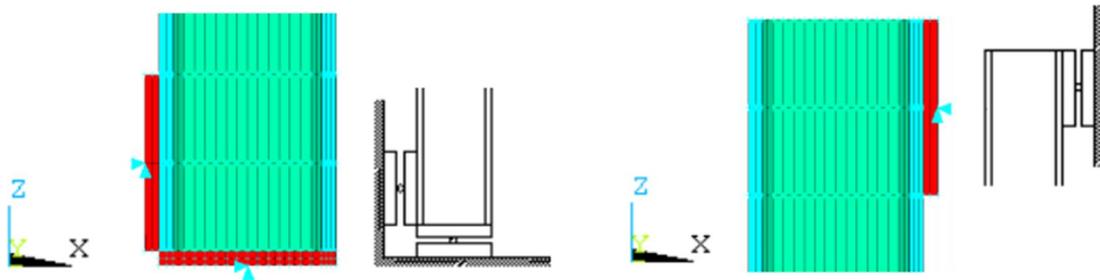
Clase B: Coeficiente 0.4. Igual que en el caso anterior pero pintadas con silicato alcalino de cinc con espesor comprendido entre 50 y 80 micras

Clase C: Coeficiente 0.3. Superficies limpiadas mediante cepillado

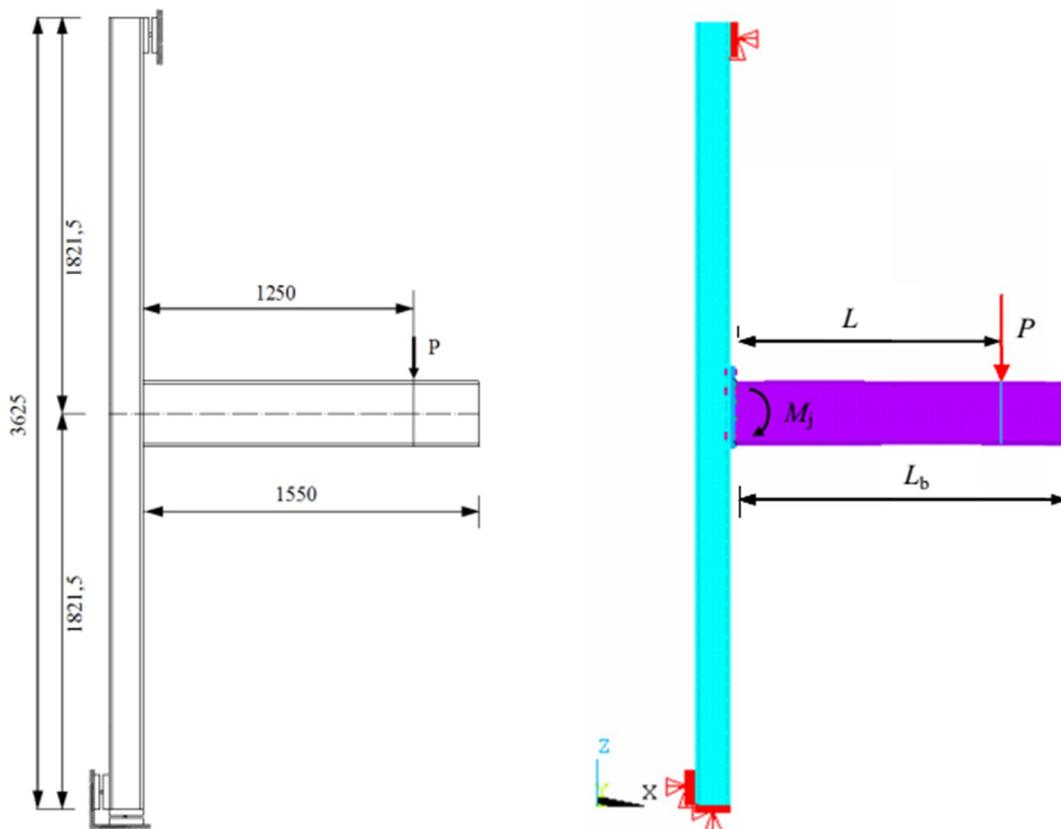
Clase D: Coeficiente 0.2. Superficies sin tratamiento.

### F.6. MODELO Y OBTENCIÓN DEL GIRO

Comparativamente con el modelo real, sólo queda introducir las condiciones de contorno indicadas en la memoria y comparar gráficamente ambos modelos:

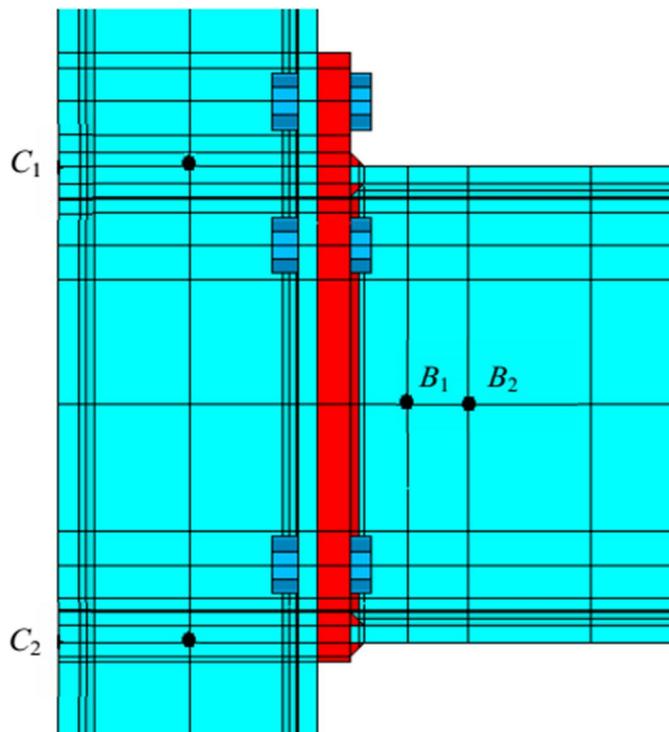


*Condiciones de contorno en apoyo inferior y superior*

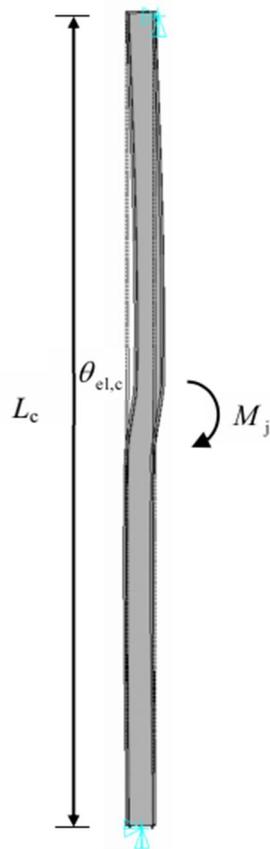


*Modelos experimental y numérico*

El EC3-1-8:2005 define la representación de la curva momento-rotación de una unión viga-columna en función del momento que transmite la viga a la columna y el giro relativo entre los ejes de la columna y de la viga. Para conseguir la deformación rotacional, se utilizan los valores de los desplazamientos obtenidos del análisis como se ve en la siguiente figura:



*Puntos para obtener el desplazamiento*



*Giro de la columna*

.El giro rotacional de la unión va a depender de los desplazamientos horizontales de los puntos situados en la fibra neutra de la viga y los de los situados en la fibra neutra de la columna situados a la altura de las alas, y su expresión se obtiene sumando la deformación rotacional de la conexión y la deformación rotacional del alma, de tal forma que:

Deformación rotacional de la unión. Aquí tenemos los desplazamientos de los puntos B y  $\theta_{el,c}$  es el giro elástico producido en la columna.

$$\phi_j = \text{atan} (D_{B2} - D_{B1}/L_{(B1-B2)}) - \theta_{el,c}$$

Deformación del panel del alma. Aquí tenemos los desplazamientos de los puntos C.

$$\gamma = \text{atan} (D_{C1} - D_{C2}/L_{(C1-C2)}) - \theta_{el,c}$$

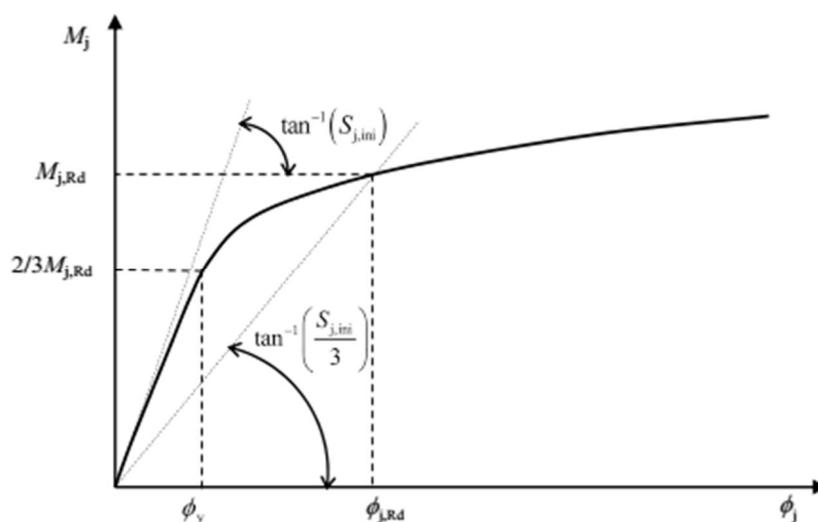
La rotación de la conexión es la diferencia entre el giro de la unión y el giro del panel del alma:

$$\theta_c = \phi_j - \gamma$$

Ahora, según el EC3 y la referencia Faella et al., 2000, para obtener el momento resistente de la unión hay que trazar la recta secante con la pendiente de la curva, según la expresión:

$$S_{sec} = S_{j,ini}/\mu$$

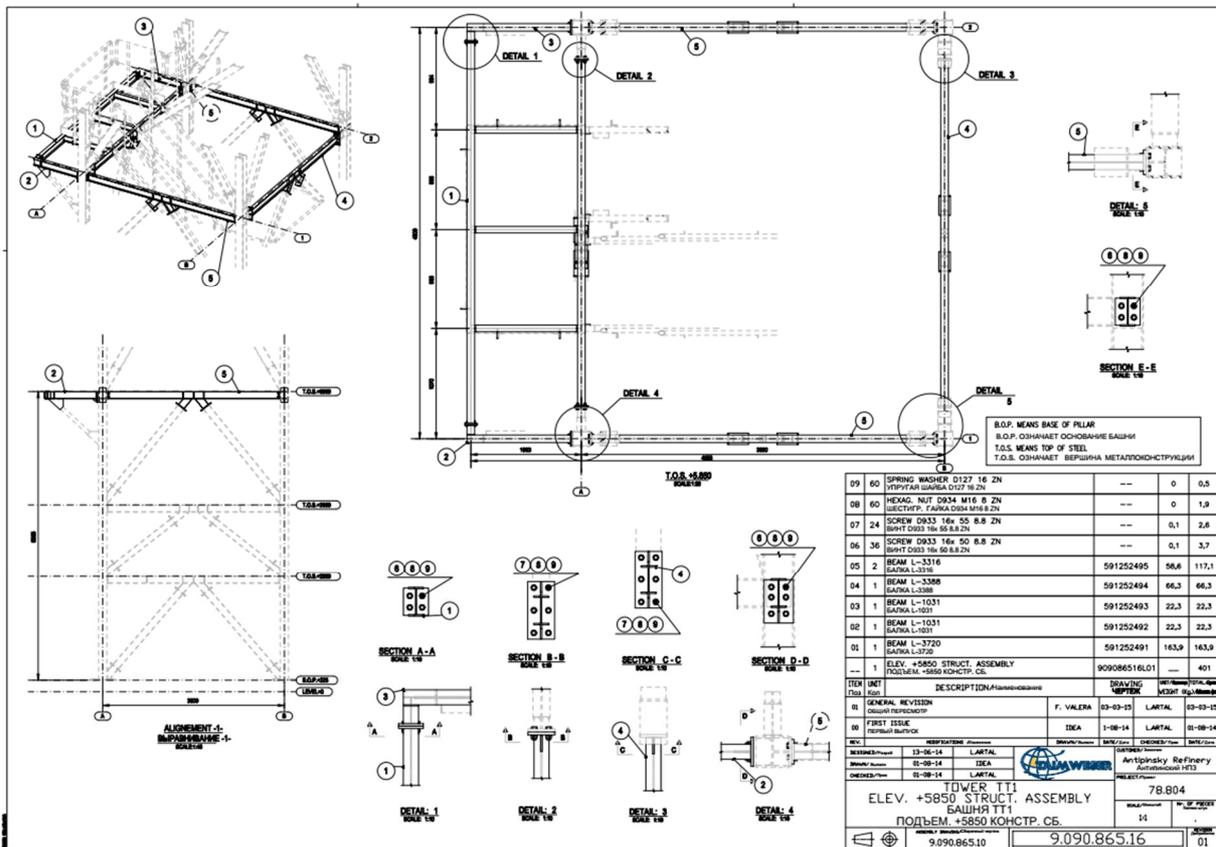
Donde  $\mu$  es aproximadamente 3 para uniones atornilladas con chapa de testa extendida. El punto de corte de la secante con la curva momento-rotación define el valor del momento resistente de la unión  $M_{j,Rd}$ .

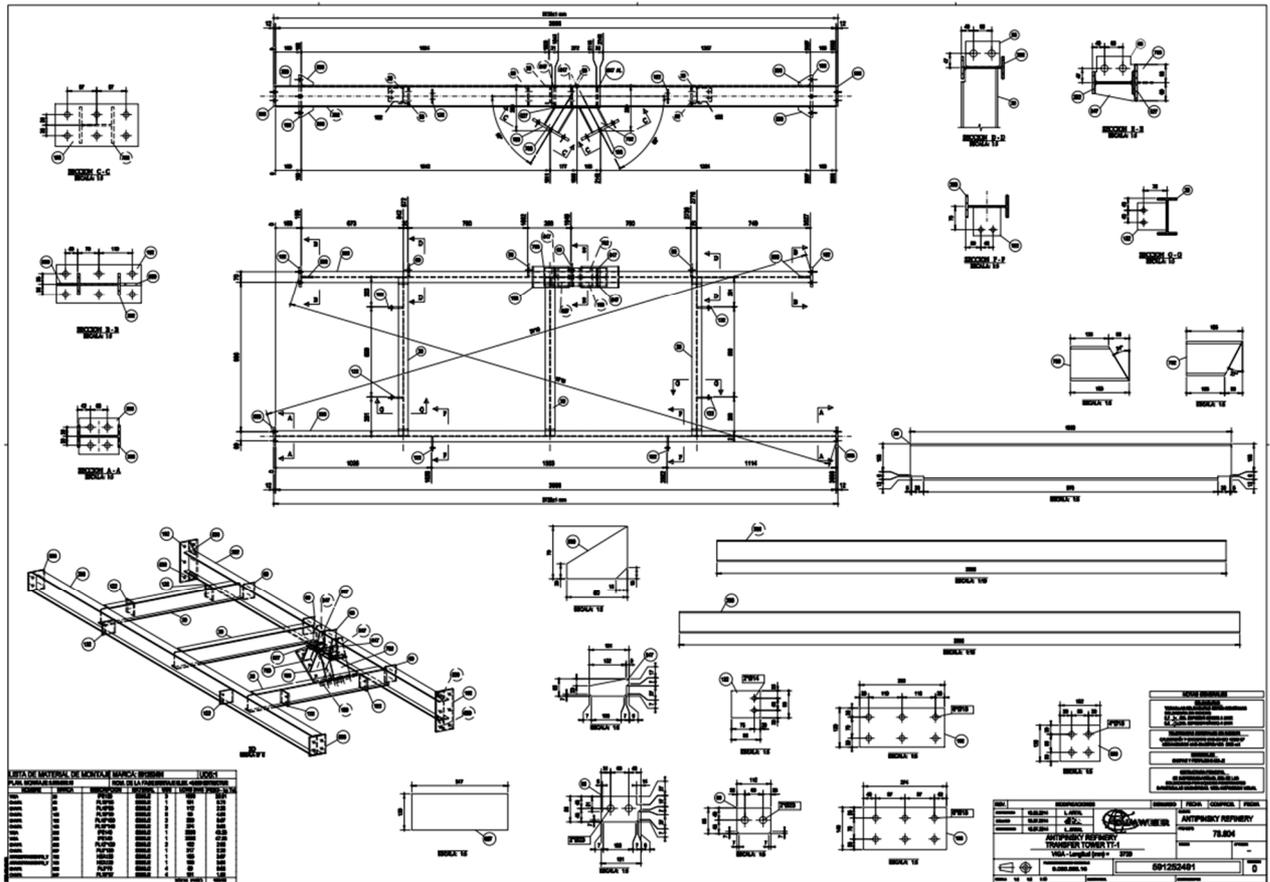


Curva momento-rotación de la unión s/Faella et al., 2000

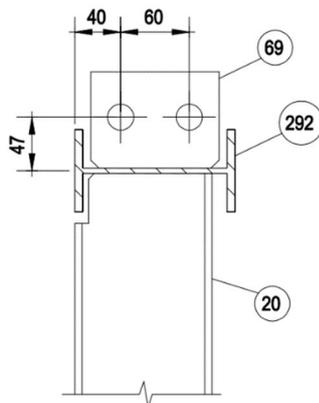
## ANEXO G. APLICACIONES

Ya se ha indicado en varias ocasiones a lo largo del trabajo que hasta el momento el estudio de las uniones semirrígidas se limita a modelos experimentales, modelos muy teóricos o modelos numéricos como el de ABAQUS muy costosos computacionalmente y que, por el momento, no se pueden llevar a la práctica en casi la totalidad de las uniones reales. Hay muchos factores que lo limitan, como, por ejemplo, los ajustados plazos de entrega con los que se suele trabajar en proyectos de construcción, que se demorarían si el cálculo fuera mucho más extendido en el tiempo. Sin embargo, en algunas ocasiones donde algunas uniones se pueden aislar de grandes conjuntos estructurales, se han realizado aproximaciones a las uniones semirrígidas. El siguiente ejemplo corresponde a una torre de transferencia:





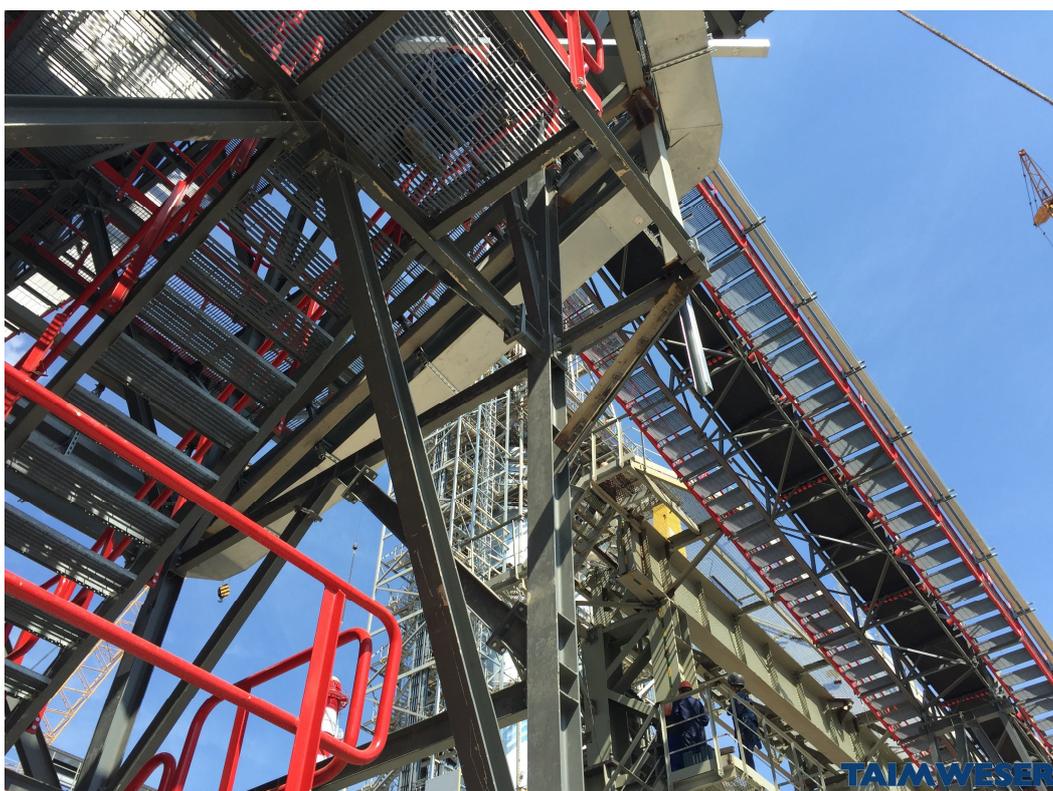
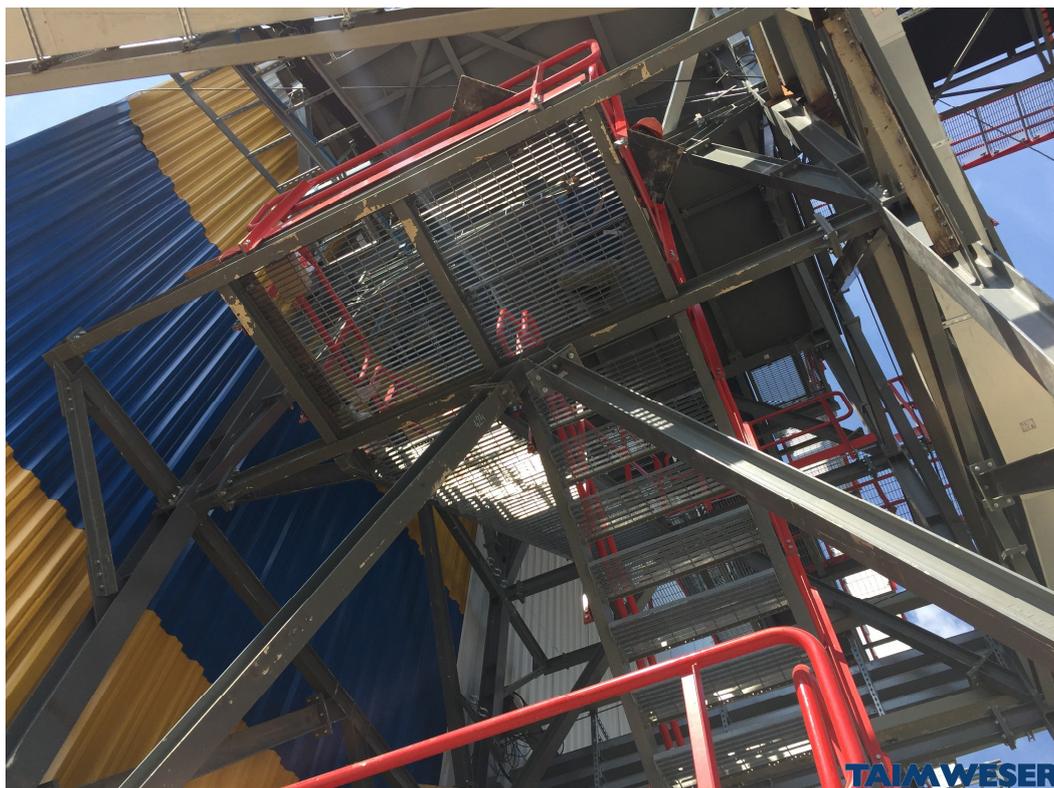
En este plano, en la sección D-D se representa una unión entre dos perfiles soldados únicamente dos tercios de la altura del alma completa, lo cual según el estudio clásico de uniones se considera como articulada. Sin embargo, como se ha visto a través del trabajo, no se puede considerar que no se transmita el momento flector y que el giro se produce sin restricciones, sino que el comportamiento es semirrígido, y la flexión indudablemente se transmite al resto de la estructura:



SECCION D - D  
ESCALA: 1:5

El cálculo de esa unión (para diversos módulos de la torre de transferencia) fue calculado por el método de los elementos finitos considerando los efectos que en este trabajo se han considerado para no simplificar la unión como únicamente articulada, pero actualmente está montándose, con lo cual se comprueba que se comienza a introducir en estructuras reales y con el tiempo podría terminar imponiéndose este diseño:





Las uniones a las que se hace referencia son a las de las jácenas contra las vigas, y dado que las hipótesis de carga no son excesivas se pudo considerar en el cálculo el modelo semirrígido.

## Bibliografía

AISC (American Institute of Steel Construction). *Specifications for the Design, Fabrication, and Erection of Structural Steel*, Chicago, Illinois, 1980.

ABAQUS, Inc. All Rights Reserved.

Bursi, O.S.; Jaspart, J.P., *Basic issues in the finite element simulation of extended end plate connections*, Computer and Structures, 1998.

Cabrero Ballarín, J.M. Nuevas propuestas para el diseño de pórticos y uniones semirrígidas de cero. Tesis doctoral, Universidad de Navarra, 2006.

Chen W.F. *Practical Analysis for Semirigid Frame Design*. Ed, Chen W.F. World Scientific Publishing Company, 2000.

Código Técnico de la Edificación (CTE) 2006.

Díaz Gómez, Concepción. Diseño óptimo de uniones semirrígidas mediante simulación numérica y modelos kriging. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena, Murcia, 2010.

EN 1993-1-8:2005 (EC3-1-8:2005) Eurocode 3. Design of Steel Structures. Part 1.8: Design of Joints, CEN, European Committee for Standardization, Brussels, 2005.

Faella, C; Piluso, V y Rizzano, G: *Structural Steel Semirigid Connections: Theory, Design and Software*, New Directions in Civil Engineering, CRC Publishers Boca Raton, Florida (EEUU), 2000.

Gerardy, J.C.; Schleich, J.B.: *Semi-rigid Action in Steel Frame Structures*. Report on ECSC Agreement, No 7210-SA1507, Arbed Reserches, Luxembourg, 1991.

Girao Coelho, A.M., Bijlaard, F, Simoes da Silva, L. Experimental assesment of the ductility of extended end plate connections, *Engineering Structures*, 2004.

Huber, G., Tschemmerneegg, F. Modelling of beam-to-column joints, *Journal of Constructional Steel Research*, 1998.

ITEA (Instituto Técnico de la Estructura de acero). *Diseño de uniones*, edición española del European Steel Development Educational Program (ESDEP), 2000.

Kameshki, E.S., Saka, M.P. Optimum design of non linear steel frames with semi-rigid connections using a genetic algorithm, *Comput. Struc.*, 2001.



Kishi, N., Chen, W.P. *Data Base of Steel Beam-to-Colum Connections*, Structural Engineering, West Lafayette, IN, 1986.

Kishi, N., Chen, W.P., Goto, Y., Matsuoka, K. G. Design aid of semi-rigid connections for frame analysis. *Engineering journal*, 1993.

Kishi, N., Hasun, R., Chen, W.F., Goto, Y. Study of Eurocode 3 Steel Connection Clasification, *Journal of Constructional Steel Research*, 1997.

Montoya Coronado, Luis Alberto. Influencia de flexibilidad de las conexiones en el comportamiento sísmico de edificios metálicos. Tesis de Master, Universidad Politécnica de Cataluña, 2013.

Oñate, E. *Cálculo de Estructuras por Elementos Finitos, Análisis Estático Lineal*. CIMNE, 1995.

Rodrigues Ornelas de Lima, L. *Comportamento de ligações com placa de extremidades em estruturas de aço submetidas a momento flector e força axial*, Tese de Doutorado, Pontificia Universidade de Católica Do Rio de Janeiro, traducido al español, 2003.

TAIM WESER, S.A., imágenes facilitadas de la instalación CJSC Antipinsky Oil Refinery, 2014.

Weynand, K. SERICON – Data bank of joint in building frames, *Proceeding of the 1st COST C1 Workshop*, Strasbourg, 1992.

Wilson, E.L., Taylor, R.L., Doherty, W.P., Ghabussi, T. Incompatible displacement models, *Numerical and Computer Methods in Structural Mechanics*, Academic Press, 1973.

Yee, K.L., Melchers, R.E. Moment-rotation curves for bolted connections, *Journal of Structural Engineering*, 1986.

Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. *El Método de los Elementos Finitos. Vol 1, Las Bases*. CIMNE, 2004.