

IV

Conclusiones

El tiempo y la reflexión, por lo demás, van modificando paulatinamente nuestra visión hasta que, por último, llegamos a comprender.

Paul Cézanne

Conclusiones

Diseño de pórticos de acero con uniones semirrígidas	332
Diseño y análisis de uniones semirrígidas: uniones con chapa de testa extendida	332
Un paso más: uniones semirrígidas tridimensionales	333
Futuras líneas de investigación	334
Estructuras y uniones semirrígidas	334
Diseño semirrígido tridimensional	335

Al comienzo de esta Tesis Doctoral el objetivo principal era analizar las posibilidades de diseño que permitía la aplicación de uniones semirrígidas. Los entonces borradores del Eurocódigo permitían su empleo, pero los estudios realizados hasta la fecha ahondaban principalmente en su comportamiento mecánico. Se carecía por tanto de datos sobre su uso y las alternativas de diseño que ofrecían. El conjunto de las tres partes en las que se ha estructurado esta Tesis constituye un recorrido por las uniones semirrígidas, desde su planteamiento y aplicación inicial a la propuesta de nuevas posibilidades de diseño.

Diseño de pórticos de acero con uniones semirrígidas

La primera parte se ha centrado en el diseño de pórticos con uniones semirrígidas. Las uniones semirrígidas proporcionan estabilidad lateral suficiente para cargas normales de viento en edificios de poca altura. Además, dada su rigidez rotacional permiten optimizar la distribución de momentos en la estructura. Su uso implica ventajas tanto para pórticos traslacionales como intraslacionales.

Su ejecución es rápida y sencilla: se trata de uniones atornilladas, sin preparación de superficies, ni soldado de rigidizadores, ni el apretado de los tornillos hasta el par. En comparación con las uniones rígidas y articuladas, son las que presentan mayor equilibrio entre los costos de mano de obra y de material.

Para facilitar su aplicación al diseño estructural se ha desarrollado una propuesta de algoritmo de diseño para pórticos semirrígidos (publicada en Cabrero y Bayo (2005a), y presentada aquí en el Capítulo 4) con las siguientes características:

- Se aprovechan las ventajas de las uniones semirrígidas de un modo sencillo y eficiente.
- El proceso de diseño es muy similar al empleado en la actualidad.
- Permite obtener uniones con comportamiento rotacional y resistente óptimos.
- El diseño definitivo de la unión no interfiere con el diseño estructural, ya que se relega al último paso.

Los ejemplos de aplicación del método demuestran la sencillez de la propuesta, además de la competitividad de las uniones semirrígidas. En comparación con las uniones articuladas y rígidas se obtiene la estructura de menor peso y, además, la de menor costo.

Diseño y análisis de uniones semirrígidas: uniones con chapa de testa extendida

La segunda parte de esta Tesis ha abordado el problema concreto de diseño de un tipo de unión semirrígida: la unión de chapa de testa extendida. Su ejecución es sencilla, y es además la unión semirrígida sin rigidizadores con mayor rigidez y resistencia, por lo que presenta muchas posibilidades de aplicación.

Se ha analizado pormenorizadamente mediante el método de los componentes el comportamiento de este tipo de uniones. Se ha realizado un extenso análisis paramétrico. Este análisis se ha orientado hacia factores geométricos que puedan ser controlados por el diseñador: la geometría de la chapa de testa y los tornillos. Las principales conclusiones obtenidas del estudio son:

- Los modos de rotura principales de estas uniones son los referidos a la chapa de testa y el alma del pilar.
- El espesor de la chapa de testa y la distancia vertical entre filas de tornillos son los parámetros geométricos con mayor influencia.
- El factor de interacción para el esfuerzo cortante, β , es otro de los factores con mayor influencia, al afectar directamente la rigidez y resistencia del alma del pilar.

Se ha desarrollado un modelo predictivo sencillo para obtener la rigidez y resistencia de las uniones de chapa de testa extendida. A partir de unos mínimos datos de diseño se logra estimar el comportamiento de la unión. Esta herramienta práctica es un complemento necesario al método de diseño estructural previamente propuesto. Los resultados obtenidos con este modelo son altamente satisfactorios: su error medio es inferior al 10 %. Proporciona mejores aproximaciones que las propuestas realizadas anteriormente por otros autores.

Un paso más: uniones semirrígidas tridimensionales

En la última parte se ha propuesto y analizado un nuevo tipo de nudo tridimensional, con uniones semirrígidas en ambos ejes. Con su aplicación pueden ya obtenerse todas las ventajas del comportamiento semirrígido en los dos ejes estructurales. Las uniones propuestas son de chapa de testa extendida en ambos ejes; se obtiene el máximo posible de rigidez y resistencia con una unión sencilla y barata. Tras los análisis experimentales y virtuales con modelos de elementos finitos se conocen los parámetros principales de su comportamiento:

- La unión tridimensional del eje mayor es más rígida y resistente que su correspondiente plana: la chapa adicional soldada entre las alas para ejecutar la unión del eje menor la rigidiza.
- No se producen fenómenos de interferencia negativos entre ambos ejes.
- Las uniones se comportan de modo ligeramente más rígido al tener carga en los dos ejes (carga tridimensional):
 - La unión del eje mayor induce esfuerzos de “tensado” en la chapa adicional del eje menor. Estas tensiones reducen su deformación y elevan por tanto su rigidez.
 - Complementariamente, la unión del eje menor produce un efecto similar en la del eje mayor.
 - Estos efectos varían según la relación de esfuerzos entre ambos ejes.

Se ha desarrollado también la formulación necesaria para aplicar el método de los componentes a esta unión tridimensional:

- Se ha propuesto un modelo de rigidez para los componentes a flexión de la unión del eje menor no incluidos en el Eurocódigo: el alma y la chapa adicional a flexión.
- Se ha desarrollado también un modelo resistente para el alma a flexión. Obtienen valores resistentes adecuados en comparación con resultados experimentales publicados por otros autores para este componente.
- Se ha aplicado con resultados favorables el componente del alma a flexión desarrollado al análisis de uniones semirrígidas en el eje menor.
- Se han modificado convenientemente el resto de componentes necesarios para modelar las uniones tridimensionales.
- Se ha incorporado a la formulación los efectos tridimensionales observados en los análisis, según el grado de esfuerzo entre ambos ejes.
- Se ha propuesto y aplicado el modelo de componentes completo para las uniones tridimensionales en el eje menor y mayor. Los resultados obtenidos en ambos casos cuadran adecuadamente con los resultados experimentales.

Futuras líneas de investigación

En esta investigación se han obtenido métodos sencillos y eficaces de diseño para estructuras y uniones semirrígidas. Se ha comenzado a estudiar también el comportamiento semirrígido tridimensional. En este apartado se indican una serie de futuras líneas de investigación que merecen ser tenidas en consideración.

Estructuras y uniones semirrígidas

Aunque las estructuras con uniones semirrígidas tienen múltiples ventajas, prácticamente no se ejecutan en la realidad. Métodos de diseño como los aquí propuestos facilitan la tarea de “reconversión” de las uniones tradicionales a este nuevo concepto semirrígido. Pero queda mucho por hacer. La más importante labor a desarrollar no es tanto de investigación teórica, sino de índole práctica y de difusión. Para su aplicación real deben desarrollarse herramientas que simplifiquen su uso:

- Se necesita *software* que incorpore el comportamiento semirrígido de modo sencillo. No se dispone de programas informáticos de análisis y diseño estructural en el que se modelen uniones semirrígidas. Baste indicar que para la realización de los análisis y estudios de esta Tesis tuvo que modelarse la unión mediante un elemento viga equivalente.
- También deben desarrollarse métodos simplificados para el diseño de uniones semirrígidas similares al aquí propuesto para la unión de chapa de testa extendida. No es planteable que el diseñador medio de estructuras calcule según el método de los componentes, complejo y largo. Deben crearse herramientas que le faciliten esta labor.

Diseño semirrígido tridimensional

La propuesta tridimensional comenzada a analizar con éxito en esta Tesis Doctoral ha iniciado el camino de las estructuras semirrígidas tridimensionales. Los futuros avances requeridos para esta morfología pueden diferenciarse en dos campos:

- unión semirrígida tridimensional:
 - Resta obtener un modelo resistente para la chapa adicional a flexión (una posible formulación puede basarse en la aquí propuesta para la resistencia del alma a flexión).
 - El resto de componentes implicados en su comportamiento requieren también de análisis pormenorizados para cada uno de ellos.
 - Al ensayar y analizar uniones con cargas simétricas, en esta investigación se ha obviado el comportamiento de los componentes a cortante. Para una aplicación práctica de estas uniones se ha de desarrollar una formulación adecuada para ellos.
 - Los efectos tridimensionales inducidos entre ambas uniones han sido estudiados en un rango que, aunque realista, puede resultar escaso. Por ello, se requieren análisis que amplíen el intervalo ya estudiado.
- estructura tridimensional:
 - nuevos sistemas constructivos que opten por un trabajo conjunto de ambos ejes, relegando la diferenciación existente hasta ahora de eje principal y débil de la estructura;
 - pilares sin eje débil (por ejemplo, pilares mixtos tubulares rellenos de hormigón);
 - forjados bidireccionales adaptados a la construcción en acero.