
Cálculo por elementos finitos de uniones en estructuras metálicas

1.1. Introducción

El cálculo de uniones metálicas es un problema complejo. Los métodos de cálculo que se proponen en las normas parten en general de simplificaciones que pueden hacerlos inadecuados en geometrías más complicadas (presencia de esfuerzos en varios planos, disposición de elementos auxiliares como casquillos, cartelas, rigidizadores o chapas frontales, ...). Tampoco las tablas y ábacos recogen la amplia tipología que puede presentarse.

En este documento se describen las características del cálculo por elementos finitos de dos tipos de uniones viga-soporte y de dos arranques. Se han utilizado modelos tridimensionales en los que se tiene en cuenta el comportamiento no lineal del material ni de la superficie de contacto entre piezas atornilladas o cosidas con pernos. Para calibrar el modelo de cálculo se ha reproducido el modelo de elementos finitos empleado en el trabajo *Finite element analysis of structural steelwork beam to column bolted connections*, realizado por Jim Butterworth en la universidad de Teesside, U.K., trabajo que consistió en el ensayo de un modelo a escala real, para ser contrastado con los resultados obtenidos de un modelo de elementos finitos.

1.2. Posibles alternativas para el desarrollo del cálculo

1.2.1. Empleo de fórmulas prescritas por las normas

El cálculo de las uniones por los métodos tradicionales expuestos en la generalidad de las normas parte de las siguientes simplificaciones:

1. Los esfuerzos a los que están sometidos los elementos de la unión están contenidos en un plano. El comportamiento de la unión se estudia para combinaciones de axil y cortante o axil, momento y cortante de la pieza incidente contenidos en el plano del pórtico, cercha, ..., de la que la unión forma parte.
2. El reparto de los esfuerzos entre los distintos elementos de la unión (alas y alma de la pieza incidente, rigidizadores, cartelas, ...) se calcula mediante fórmulas simplificadas que sólo son válidas en el caso bidimensional ya descrito.
3. En el caso de las uniones soldadas, las fórmulas para el cálculo de tensiones en los cordones parten de la hipótesis de que todos ellos están contenidos en un plano. Para los casos de uniones espaciales (puede verse el anejo 3.A6 de la EA-95) se dan algunas fórmulas que sólo son aplicables a tipos concretos de unión corrientes en edificación.

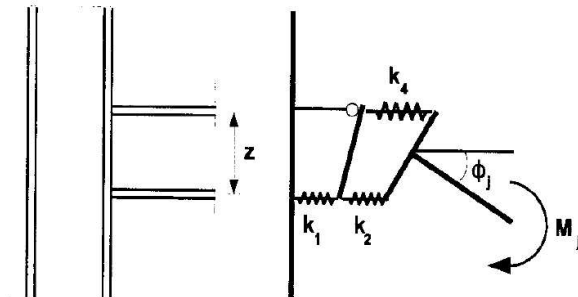


Figura 1.1: Modelo de componentes de una unión soldada sin rigidizar.

Caso aparte es el del denominado *Anejo J revisado* del Eurocódigo 3. En este documento se propone el denominado método de componentes en el que el análisis de la unión se realiza asimilándola a un modelo de barras y muelles similar al de la figura 1.1. Mediante dicha modelización se obtienen los esfuerzos en los distintos elementos de la unión. Aún siendo un método de aplicación mucho más general que los anteriores no es aplicable, hasta donde sabemos, a uniones con geometría compleja (con diagonales,...

1.2.2. Programas ordenador para cálculo de uniones

Existen en el mercado herramientas para cálculo de uniones, entre las que cabe citar:

- Scia connection expert system (www.scia-online.com).
- PowerConnect (www.buildsoft.be).
- CoP - The Connection Program (www.ConnectionProgram.com).
- Fastrak 5950 Connection Design (www.cscworld.com/fastrak/connection.html).
- FEWeld – Cálculo de Uniones Soldadas para Usuarios de COSMOS/M.

En todos los casos (salvo en el caso de FEWeld que se comentará a continuación) el problema resuelto corresponde a uniones típicas para pórticos bidimensionales, en las que sólo se admiten variaciones como presencia o ausencia de elementos (rigidizadores, cartelas, etc.) dentro de cada tipo.

El enfoque del programa FEWeld es mucho más general; en su caso, se modelizan los elementos de la unión mediante elementos tipo *shell* y los cordones de soldadura se modelizan como vínculos entre los nodos de la malla resultante.

1.2.3. Empleo de ábacos y tablas

En algunos países como Alemania o el Reino Unido existen instituciones que publican tablas para el dimensionamiento de uniones. Por ejemplo, el *Steel Construction Institute* británico, edita las siguientes publicaciones:

- Joints in Steel Construction. Simple Connections. The Steel Construction Institute. Silwood Park. Ascot.

- Joints in Steel Construction. Moment Connections. The Steel Construction Institute. Silwood Park. Ascot.

En ellas se recogen tablas para el dimensionamiento de uniones articuladas, semi-articuladas y rígidas para los casos más comunes en estructuras de edificación.

1.3. Cálculo por el método de elementos finitos

El método de cálculo aplicado se resume a continuación:

1. En primer lugar, se crea un modelo tridimensional de la unión, que, dada la precisión geométrica que requiere, en general alcanza un muy elevado número de nudos y elementos. Es por ello y, en orden a obtener una solución suficientemente precisa en un tiempo de cálculo razonable, por lo que se usa un mallado menos fino en las zonas de menor concentración de tensiones.
2. Se analizan los esfuerzos obtenidos en el cálculo de la estructura metálica que se realizó con anterioridad a abordar el cálculo de sus uniones. Para el nudo considerado, se seleccionan las hipótesis más desfavorables, introduciendo los esfuerzos al modelo de elementos finitos en las secciones correspondientes de los perfiles que conforman la unión.
3. Para cada conjunto de esfuerzos, se realiza un cálculo no lineal del estado, caracterizado por dos tipos de *no-linealidades*:
 - a) *No-linealidad* del material acero, cuya curva tensión-deformación se introduce con una rama elástica y otra plástica, según se describe en el apartado 1.3.2.
 - b) *No-linealidad* de los elementos que modelizan el contacto entre superficies de chapas-perfiles atornillados, según se describe en el apartado 1.3.1.
4. Finalmente se analizan para cada estado los resultados obtenidos, comprobando que las tensiones o fuerzas calculadas no superan los máximos admisibles.

1.3.1. Tipos de elementos

Se usan cuatro tipos de elementos:

1. Hexaedros de 8 nudos y 3 grados de libertad por nudo, en las alas de los perfiles, placas base, chapas de unión y tuercas de tornillos.
2. Elementos tipo *placa* de 4 nudos y 6 grados de libertad por nudo para modelizar las almas de los perfiles.
3. Elementos tipo *barra* tracción-compresión, de 2 nudos y tres grados de libertad por nudo, para modelizar las espigas de los tornillos.
4. Elementos no lineales tipo *gap* en el contacto entre elementos de la unión; dichos elementos soportan sólo compresión en la dirección normal a las superficies en contacto y cortante (fricción de Coulomb) en la dirección tangencial.

Los tornillos modelizados son de métrica M20 y se les asigna un área de 245 mm^2 , de acuerdo con las especificaciones del British Standards Institute (BS 3692); el pretensado de los mismos se incluye en el modelo aplicando una fuerza de pretensado inicial a los elementos. Los taladros en las chapas y perfiles se modelizan mediante agujeros de forma cuadrada y área equivalente a la sección (circular) de los mismos.

Modelización del contacto

Como ya se ha dicho para modelizar el contacto se han empleado elementos de contacto superficie - superficie en lugar de elementos de contacto punto - punto. Los motivos por los que se han empleado los primeros son los siguientes:

- Permiten el cálculo de grandes deformaciones de forma muy eficiente, con grandes deslizamientos y modelos de fricción más elaborados.
- No existen restricciones en la forma de las superficies.
- Se necesita una menor cantidad de elementos, lo que reduce las necesidades de memoria y el tiempo de proceso.
- El cálculo de la posición de contacto inicial es automático.
- El cálculo de la rigidez del contacto es semi-automático.
- Se simplifica el modelado de los elementos.

1.3.2. Material

Se modeliza el acero como un material no lineal, de las siguientes características:

- En la rama de comportamiento elástico se considera un material isótropo, con un módulo de elasticidad de Young de $2,05 \times 10^5$ N/mm² y un coeficiente de Poisson de 0,3.
- El límite elástico es el correspondiente a un acero S275, es decir 275 N/mm².
- Para la fluencia del material se admite un comportamiento según el criterio de Von Mises. El rango máximo de tensiones se considera el doble del límite de fluencia, para tener en cuenta el efecto Bauschinger.

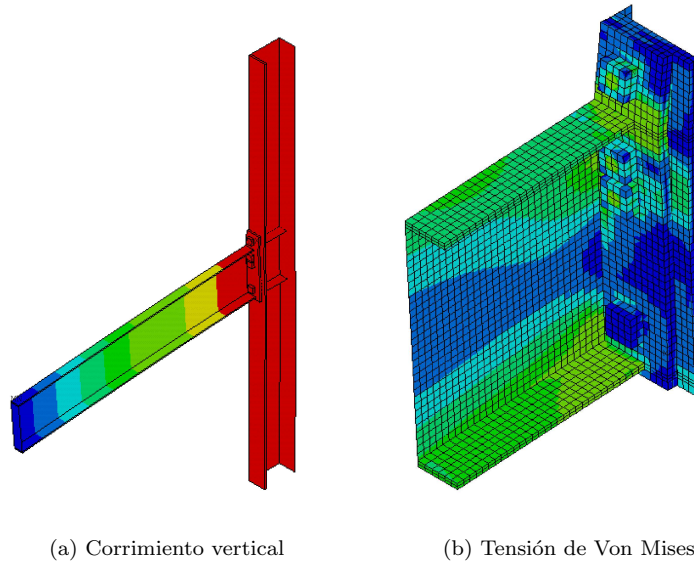


Figura 1.2: Modelo para verificación del método de cálculo

1.4. Test de verificación del método de cálculo

Para verificar la validez del método de cálculo empleado se usan los resultados del trabajo *Finite element analysis of structural steelwork beam to column bolted connections*, realizado por Jim Butterworth en la universidad de Teesside, U.K. Este trabajo consistió en el ensayo de un modelo a escala real, para ser contrastado con los resultados obtenidos de un modelo de elementos finitos.

En los laboratorios de esta universidad se realizaron cinco ensayos de modelos a escala real de la unión atornillada de una viga en ménsula a un pilar.

La conexión se realiza con tornillos M20 de grado 8.8 presolicitados con un momento torsor de 110 Nm.

El ensayo que usaremos como referencia para calibrar nuestro modelo es el denominado en el estudio E2. En él la viga tiene 1900mm de longitud y la chapa de unión un espesor de 15mm. La sección de la viga (GR355) es $356 \times 127 \times 33$ UB y la del pilar 254UC73; la chapa de unión tiene unas dimensiones de $200 \times 15 \times 460$. El fallo se produce en el ala comprimida al aplicar un momento de 220 kNm, alcanzando una tensión de 607 N/mm^2 , es decir, estaría sobretensionada en un 70 %.

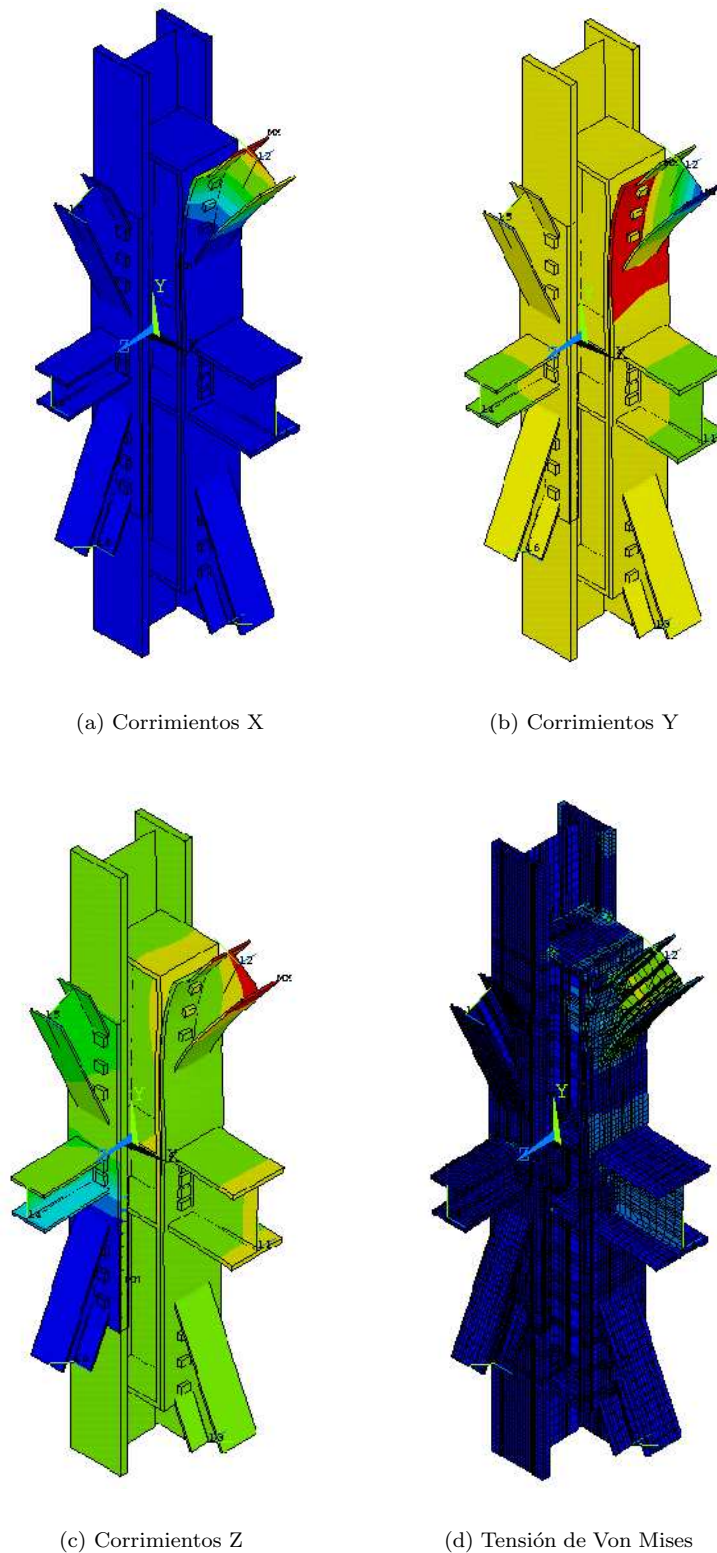


Figura 1.4: Unión viga-soporte en dos direcciones ortogonales con dos diagonales en cada uno de los planos viga-soporte. Resultados en hipótesis pésima

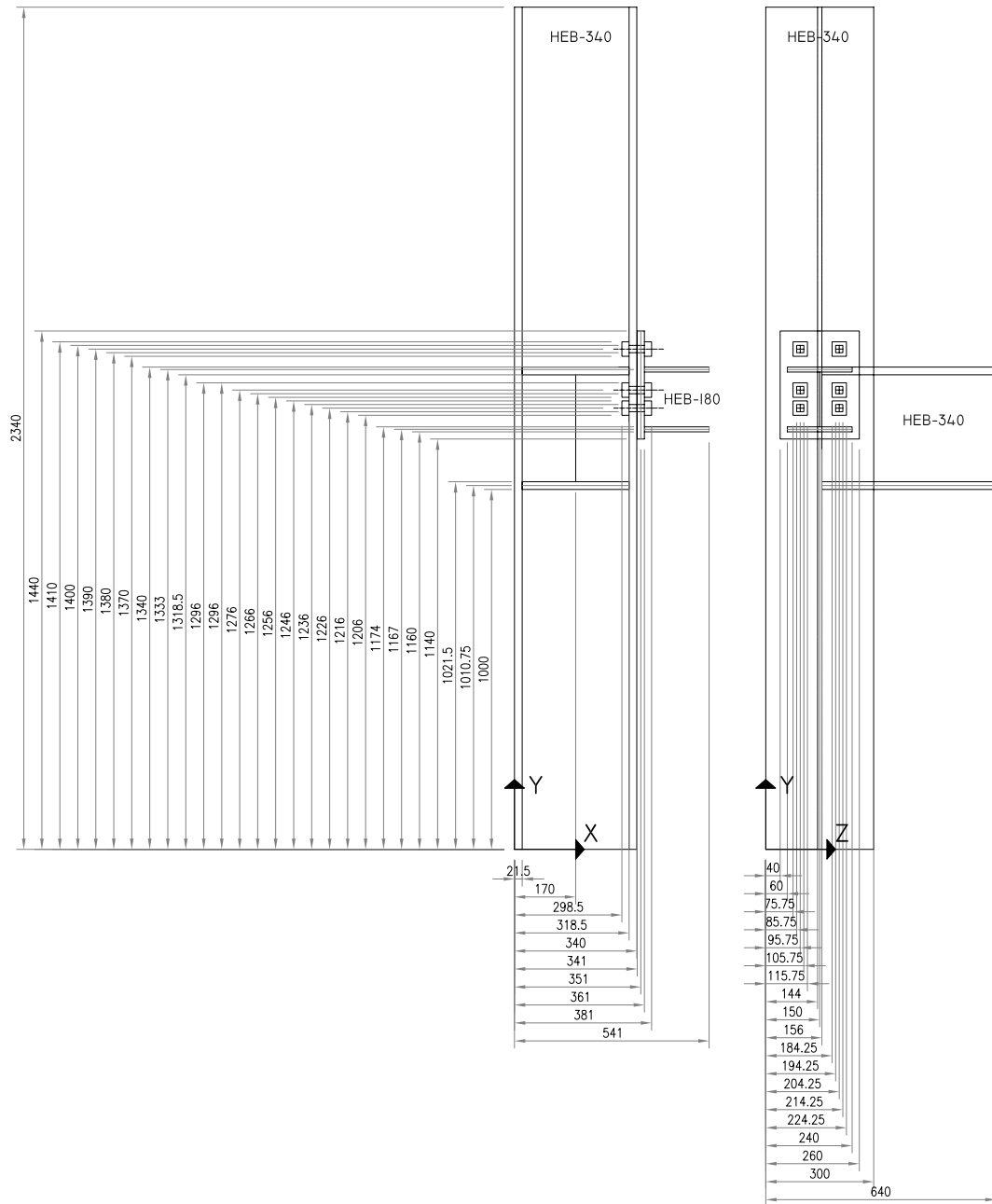


Figura 1.5: Unión viga-soporte en dos direcciones ortogonales. Definición geométrica del modelo de cálculo

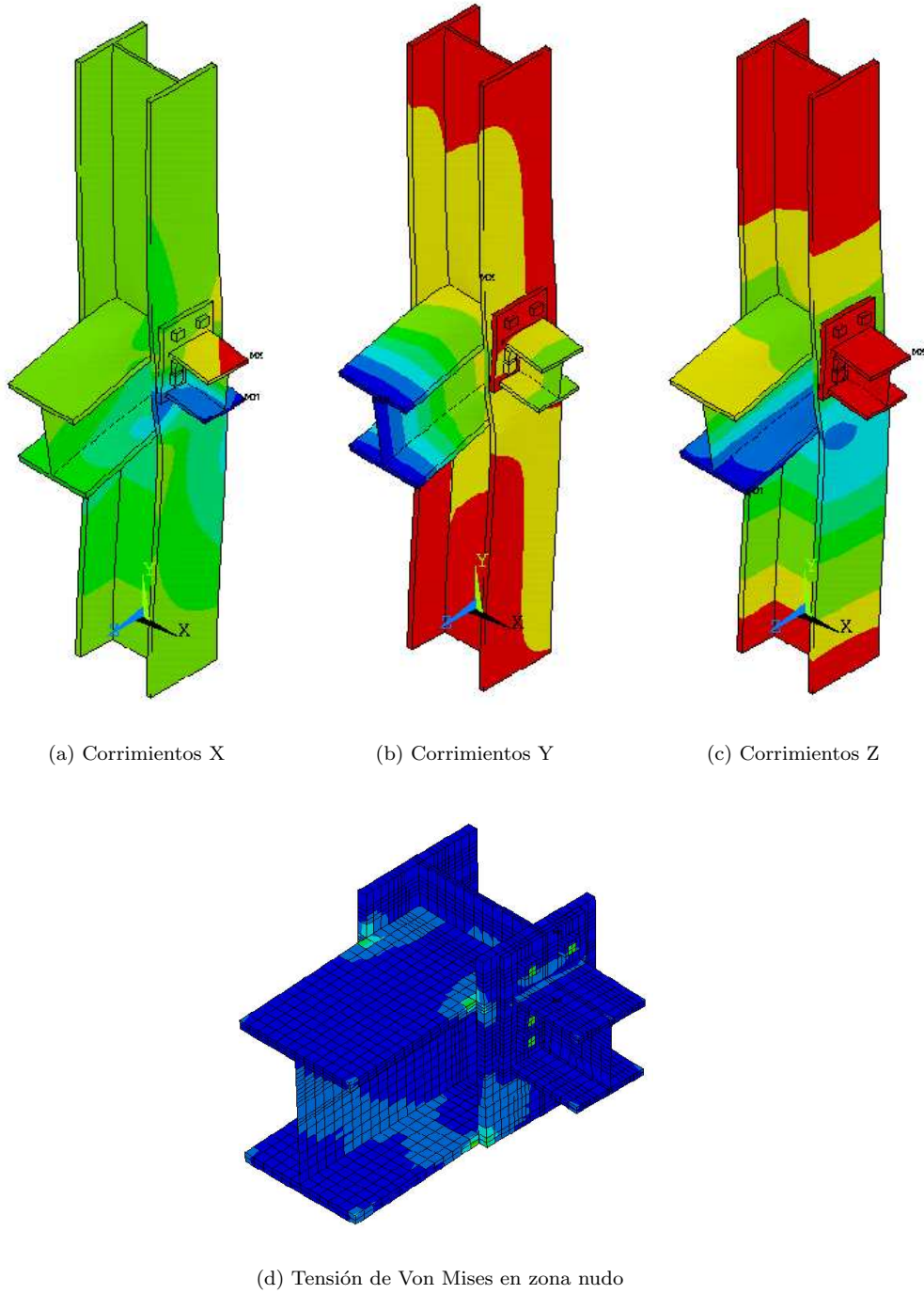


Figura 1.6: Unión viga-soporte en dos direcciones ortogonales. Resultados en hipótesis pésima

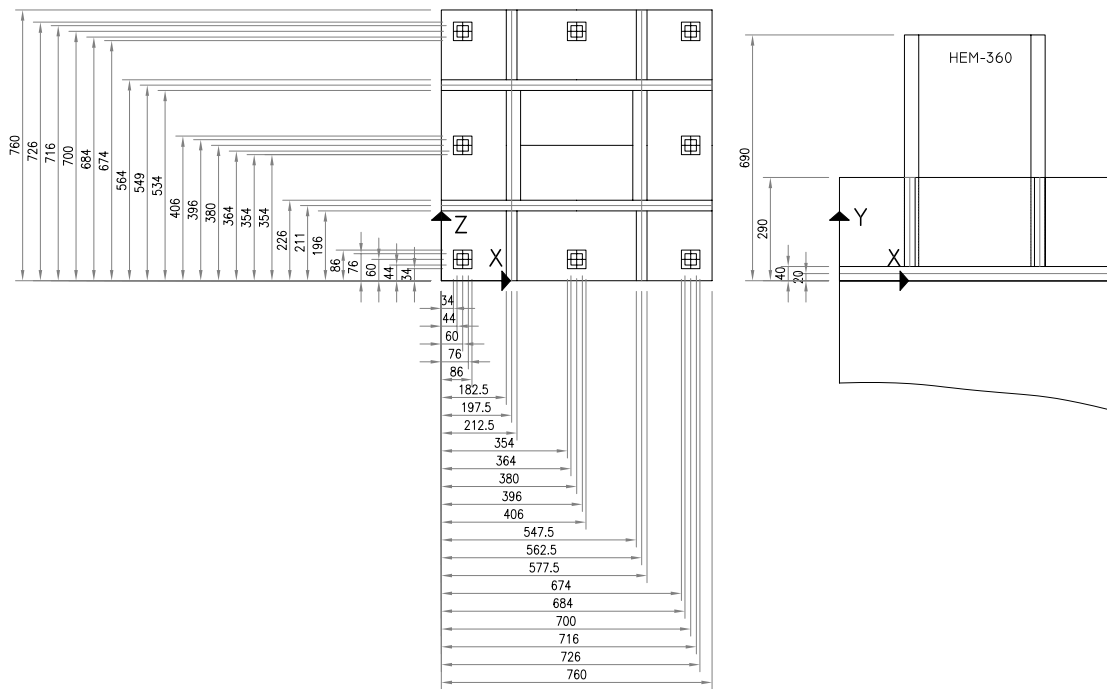
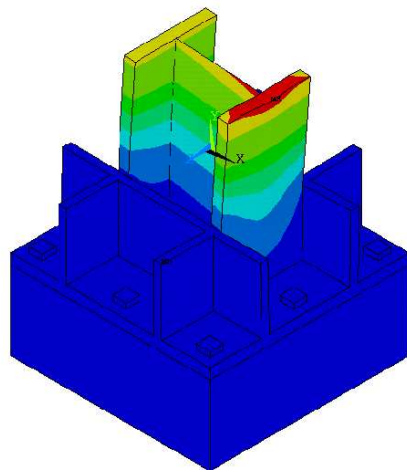
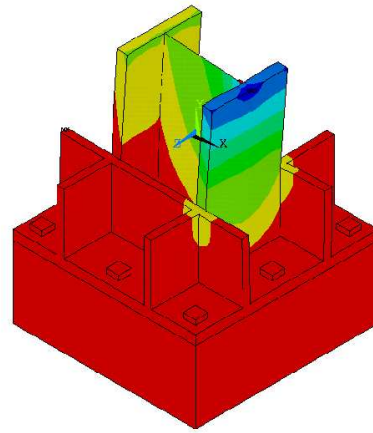


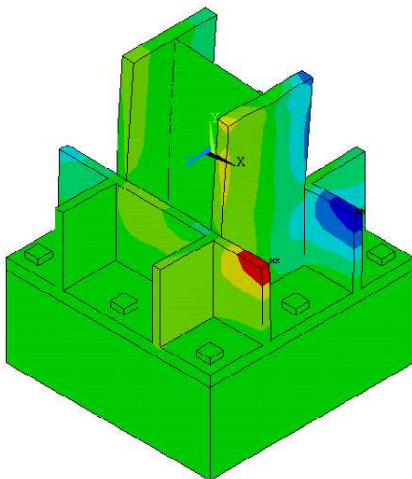
Figura 1.7: Arranque de soporte. Definición geométrica del modelo de cálculo



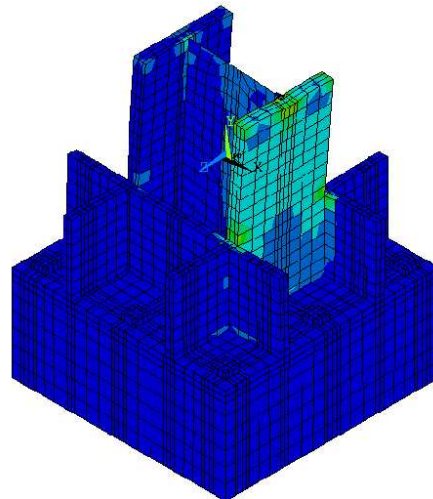
(a) Corrimientos X



(b) Corrimientos Y



(c) Corrimientos Z



(d) Tensión de Von Mises

Figura 1.8: Arranque de soporte. Resultados en hipótesis pésima

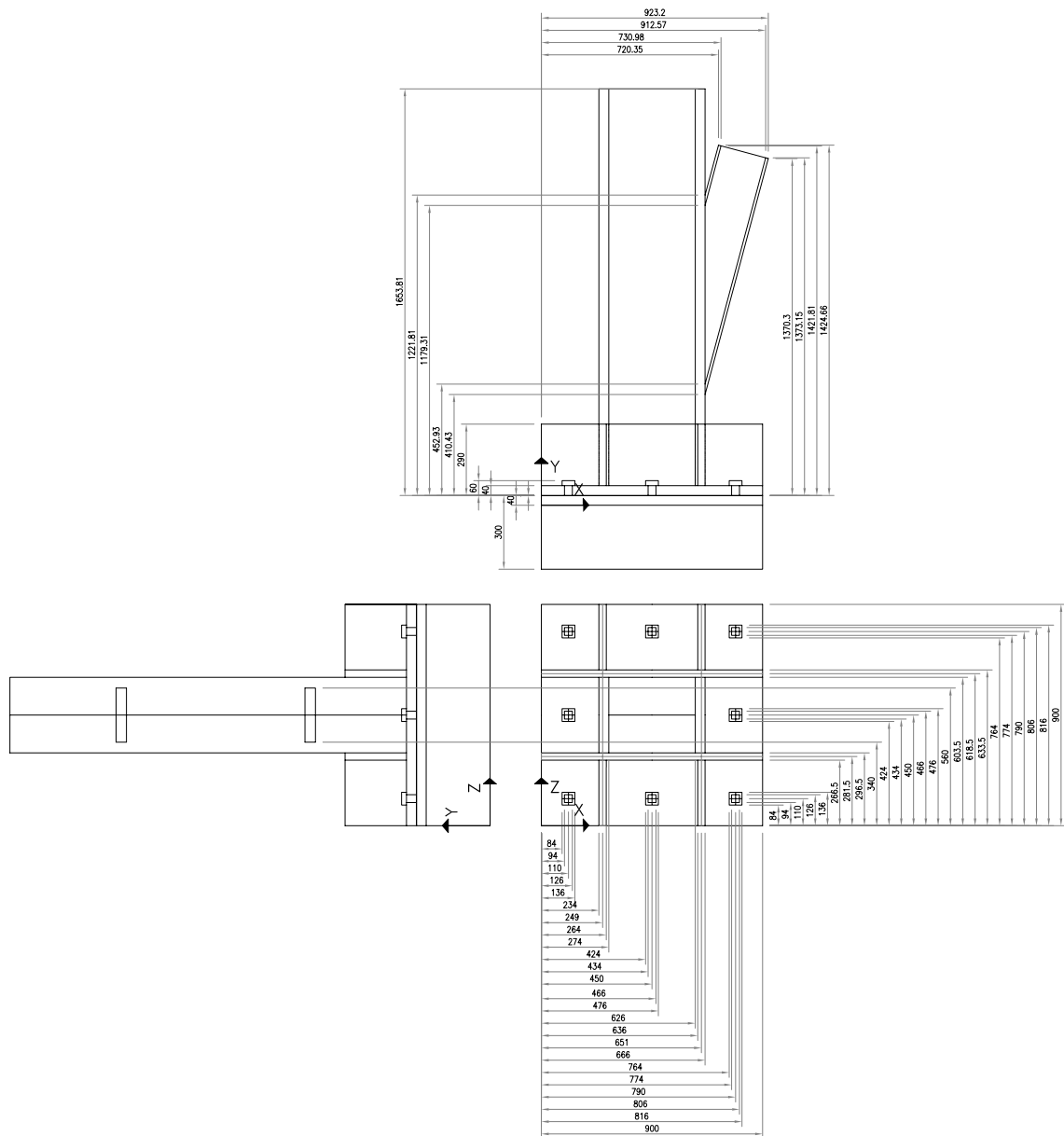
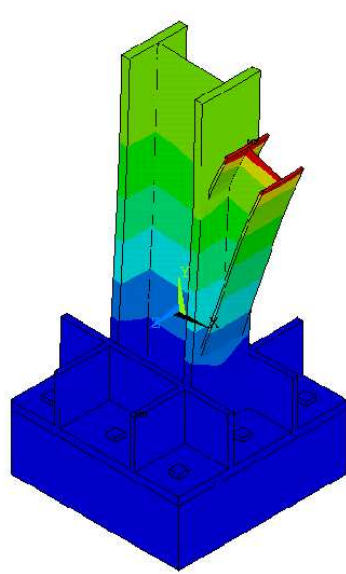
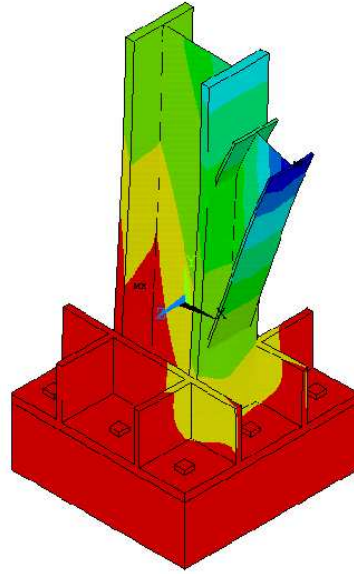


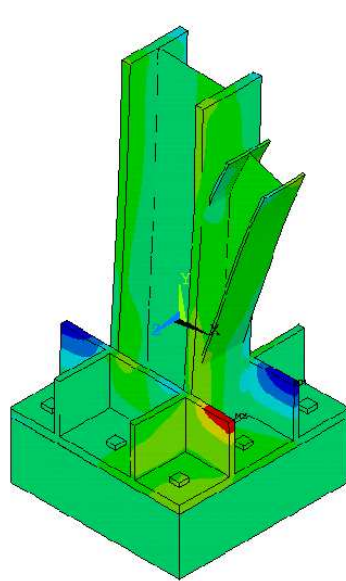
Figura 1.9: Arranque de soporte con diagonal. Definición geométrica del modelo de cálculo



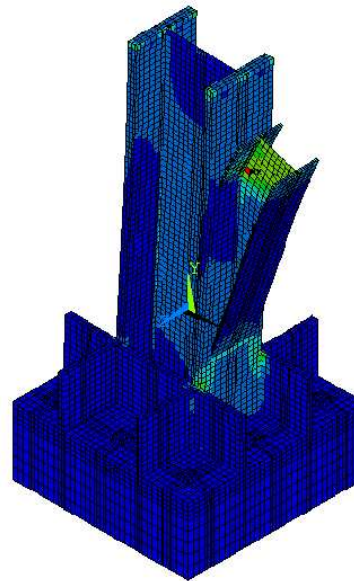
(a) Corrimientos X



(b) Corrimientos Y



(c) Corrimientos Z



(d) Tensión de Von Mises

Figura 1.10: Arranque de soporte con diagonal. Resultados en hipótesis pésima